UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

POSSIBILIDADES DE COLMATAÇÃO QUÍMICA DOS
FILTROS E DRENOS DA BARRAGEM DE PORTO
PRIMAVERA (SP) POR COMPOSTOS DE FERRO

Jehovah Nogueira Júnior

Orientador: Prof. Dr. Kenitiro Suguio

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	<u>Dr. K. Suguio</u>	<u>[Signature]</u>
Examinadores:	<u>Dra. M.C. Toledo Groke</u>	<u>[Signature]</u>
	<u>Dr. Nilson Gandolfi</u>	<u>[Signature]</u>

São Paulo
1988

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

POSSIBILIDADES DE COLMATAÇÃO QUÍMICA DOS FILTROS E DRENOS.
DA BARRAGEM DE PORTO PRIMAVERA (SP) POR COMPOSTOS DE FERRO

JEHOVAH NOGUEIRA JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. Kenitiro Suguio

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA GERAL E DE APLICAÇÃO

VOLUME I

TEXTOS

SÃO PAULO

1988

À querida Sam.

Agradecimentos

Desejo expressar meus sinceros agradecimentos

à Themag Engenharia Ltda que, através da Superintendência de Geologia e Mineração, concedeu a oportunidade e apoio necessários ao desenvolvimento do presente trabalho;

ao Prof. Dr. Kenitiro Suguio, pela orientação e incentivo nas diversas etapas do desenvolvimento deste trabalho;

às Centrais Energéticas de São Paulo - CESP que, através da Divisão de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil - ECG e da Residência de Porto Primavera, ofereceram todas as facilidades necessárias ao desenvolvimento dos estudos e permitiram a publicação dos dados utilizados; e em especial à Geóloga Silvia Maria Kitahara, pela sua inestimável colaboração no tratamento estatístico das análises granulométricas apresentadas;

aos Geólogos Francisco Nogueira de Jorge e Andrea Bartorelli, pelas valiosas sugestões e revisão da forma final do texto;

ao Prof. Dr. Milton Vargas e aos colegas da Themag e CESP que - com paciência, interesse e um cuidadoso senso crítico - analisaram e comentaram o presente trabalho, formulando importantes sugestões;

aos Geólogos Luiz Ferreira Vaz, Fausto N.C. Vêncio, Marilda Tressoldi, Eliezer F. da Silva, Mariana S. Vargas, Paulo Roberto de Oliveira, Jorge Luís Mortati, Porphírio da S. Mello Filho, Nelson Infanti Júnior, Miguel José Nuske, Cristian Petersen, Antonio Carlos F. Galvão, Antonio Norberto Mirandola, Hélio Taniguchi, Vital Y. Assano, Gualter Pupo, Bernardino F. Nunes Neto, Julian de Almeida, Ghandi Pires Fraga e Florência Stipanivic, cuja participação no projeto da UEH Porto Primavera - programando, coletando e interpretando os dados geológicos

cos e geotécnicos - possibilitou o desenvolvimento dos modelos evolutivos apresentados;

aos Geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, através da Divisão de Minas e Geologia Aplicada - Residência de Porto Primavera - pela constante colaboração, valiosa experiência prática e informações sempre oportunas;

aos Técnicos Paulo H. Shimabukuro, Walter Faveron e José de Oliveira, pelo extremo cuidado e espírito de colaboração nos trabalhos de apoio técnico;

aos Projetistas Manoel Missato e Takeshi H. Kushikawa, pelo zelo e dedicação na elaboração das ilustrações;

à Bibliotecária Helena Maria Possar, pela prestimosa organização e revisão da bibliografia;

à Senhorita Giovanina Célia de M. Araújo, pela dedicação e esmero nos trabalhos de datilografia;

à Samira, minha esposa, pela compreensão, dedicação e amor, motivando e colaborando, cedendo espaço e momentos de convívio para que eu pudesse desenvolver e completar este trabalho.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO	01
PARTE I - DEPÓSITOS ALUVIAIS CENOZÓICOS	
1 ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS	04
1.1 Introdução	04
1.2 A Região do Pontal do Paranapanema	04
1.3 Grupo Bauru	06
1.3.1 Generalidades	06
1.3.2 Estratigrafia	08
1.4 Formação Caiuá	11
1.4.1 Conhecimento Atual	11
1.4.2 Espessuras e Distribuição	13
1.4.3 Características Litológicas e Sedimentares	13
1.4.4 Relações Estratigráficas	14
1.4.5 Origem e Idade	15
1.5 Sedimentos Cenozóicos	16
1.5.1 Pesquisas de Cascalheiras na Bacia do Alto Paraná	16
1.5.2 Espessuras e Distribuição	17
1.5.3 Características Litológicas e Sedimentares	20
1.5.4 Origens e Idades	22
1.5.5 Modelo de Sedimentação	23
2 PESQUISA DESENVOLVIDA PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE PORTO PRIMAVERA	25

	Pág.
2.1	Fotointerpretação Geológica 25
2.2	Mapeamentos Geológico-geotécnicos de Superfície 26
2.3	Sondagens 26
2.3.1	Sondagens a Trado 27
2.3.2	Sondagens a Percussão 28
2.3.3	Sondagens Rotativas 29
2.3.4	Poços para Inspeção e Amostragem 30
2.3.5	Sondagens a Varejão 31
2.3.6	Tubulão 31
2.4	Ensaaios de Campo 32
2.4.1	Ensaaios de Permeabilidade em Solos 32
2.4.2	Ensaaios de Permeabilidade em Rocha (Perda de água sob pressão) 36
2.5	Ensaaios de Laboratório 38
2.5.1	Análises Granulométricas 38
2.5.2	Ensaaios de Permeabilidade 40
3	DEPÓSITOS ALUVIAIS CENOZÓICOS 44
3.1	Metodologia de Estudo e Critérios Utilizados na Pesquisa 44
3.2	Unidades Geomorfológicas 47
3.3	Características do Embasamento 50
3.3.1	Arenitos da Formação Caiuá 51
3.3.2	Basaltos da Formação Serra Geral 53
3.4	Características dos Sedimentos Cenozóicos 55
3.4.1	Terraço Colúvio-Aluvial 59
3.4.2	Terraço Aluvial 61
3.4.3	Planície Aluvial 63
3.4.4	Leito do Rio 66

	Pág.
3.5	Modelo Depositional 72
3.6	Conclusões 76
✓ PARTE II - PROCESSOS DE LATERIZAÇÃO E DE EVOLUÇÃO DOS PERFIS LATERÍTICOS	
✓ 4	PROCESSOS DE LATERIZAÇÃO 79
4.1	Introdução 79
4.2	O Conceito de Laterita 79
4.3	Características Químicas e Mineralógicas das Lateritas 81
4.3.1	A Dinâmica do Ferro 81
4.3.2	Natureza e Evolução dos Compostos de Ferro 88
4.3.3	Mecanismos Geoquímicos 90
4.3.4	Geoquímica dos Elementos Maiores e dos Elementos Traços 92
4.4	Características Básicas dos Perfis Lateríticos 93
4.4.1	Organização das Estruturas 93
4.4.2	Relações com Fatores Ambientais 94
4.4.3	Idade 97
4.4.4	Evolução 98
5	OS ARENITOS DA FORMAÇÃO CAIUÁ COMO FONTE PRIMÁRIA DE FERRO 102
5.1	Introdução 102
5.2	Distribuição Geográfica das Ocorrências de Arenitos e Conglomerados Ferruginosos na Bacia do Alto Paraná 104
5.2.1	Rio Grande 105
5.2.2	Rio Tietê 106
5.2.3	Rio Paranapema 106
5.2.4	Rio Ivaí 106
5.2.5	Margens do Rio Paraná 107

	Pág.
5.2.6 Rio Paraná	107
5.3 Descoloração do Arenito Caiuá em Zonas de Oscilação do Nível da Água e Estruturas	109
5.4 Ensaios de Desagregabilidade	111
5.4.1 Ensaios Realizados para as Obras da Usina de Rosana	112
5.4.2 Ensaios Realizados para as Obras da Usina de Porto Primavera	112
5.4.3 Ensaios Realizados pelo Instituto de Geociências da USP (Campos, 1981)	114
5.5 Análise de Lâminas Petrográficas	116
6 ORIGEM E EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE CONGLOMERADOS E ARENITOS FERRUGINOSOS NO PONTAL DO PARANAPANEMA	118
6.1 Introdução	118
6.2 Características do Meio-Ambiente	119
6.2.1 Fatores Ambientais	119
6.2.2 Fatores Físico-Químicos	119
6.2.3 Fatores Biológicos	121
6.3 Distribuição e Características dos Perfis Lateríticos Estudados	123
6.3.1 Margem Direita do Rio Paraná	123
6.3.2 Leito do Rio Paraná	132
6.4 Características das Lateritas	143
6.4.1 Características Químicas e Mineralógicas	143
6.4.2 Estruturas	144
6.5 Modelo de Laterização	145
6.5.1 Mecanismos de Mobilização do Ferro	146
6.5.2 Mecanismos de Precipitação do Ferro	149
6.5.3 Modelo Evolutivo	155

	Pág.
6.6 Conclusões	161
PARTE III - POSSIBILIDADE DE COLMATAÇÃO QUÍMICA DOS FILTROS E DRENOS DA BARRAGEM DE PORTO PRIMAVERA POR COMPOSTOS DE FERRO	
7 COLMATAÇÃO QUÍMICA DO SISTEMA DRENANTE DE BARRAGENS - CONHECIMENTO ATUAL	164
7.1 Introdução	164
7.2 Histórico do Conhecimento do Problema no Brasil	165
7.3 Mecanismos Geoquímicos	167
7.3.1 Mobilização do Ferro	167
7.3.2 Precipitação do Ferro	169
7.4 Evolução dos Compostos de Ferro	170
7.5 Estudos de Colmatação em Barragens	172
7.5.1 Barragem do Rio Grande	172
7.5.2 Barragens da CESP	173
7.6 Reprodução do Fenômeno em Laboratório	174
7.6.1 Ensaio Realizados pela CESP no Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) de Ilha Solteira	175
7.6.2 Ensaio Realizados por FURNAS para a Barragem de Itumbiara	176
7.6.3 Ensaio Realizados no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (MACIEL FILHO, 1982)	176
8 MODELO GEOQUÍMICO	179
8.1 Introdução	179
8.2 Características Gerais da Barragem de Terra de Porto Primavera	180
8.2.1 Filtro Vertical	181
8.2.2 Filtro Horizontal Suspenso	182
8.2.3 Trincheira Drenante	182

	Pág.
8.3	Características Previstas para o Reservatório de Porto Primavera 183
8.4	A Dinâmica do Ferro após o Enchimento do Reservatório 187
8.4.1	Mobilização do Ferro a Montante dos Filtros 187
8.4.2	Precipitação do Ferro no Sistema Drenante da Barragem 190
8.5	Modelo Geoquímico Preliminar 193
9	MEDIDAS ADOTADAS E RECOMENDAÇÕES PARA OUTRAS BARRAGENS DE TERRA BRASILEIRAS 194
9.1	Medidas Preventivas e Corretivas 194
9.2	Medidas Adotadas para a Barragem de Porto Primavera 197
9.3	Metodologia para Investigação do Fenômeno 198
9.3.1	Barragens em Operação 199
9.3.2	Barragens em Fase de Projeto 201
9.4	Conclusões 204
10	CONCLUSÕES FINAIS 205

RESUMO

O conhecimento dos mecanismos geoquímicos e fatores ambientais que regem a laterização nos sedimentos quaternários do Rio Paraná, em Pontal do Paranapanema, é de fundamental importância no estudo da possível colmatção química por compostos de ferro dos drenos da Barragem de Porto Primavera, em construção no Rio Paraná. Os mecanismos de solubilização e precipitação do ferro, dentro do contexto ambiental regional, bem como a evolução dos compostos de ferro são, tanto para a laterização quanto para a colmatção, basicamente os mesmos.

A presente pesquisa abrangeu, portanto, um conhecimento do meio ambiente do ponto de vista geológico, especialmente sedimentológico e um conhecimento dos processos que regem a laterização e sua evolução. Abrangeu, também, uma modelação desses processos de forma a fornecer subsídios para o entendimento do fenômeno da colmatção química dos drenos de uma barragem.

Os estudos desenvolvidos basearam-se nas investigações realizadas para o projeto da Usina de Porto Primavera, durante o período de julho de 1976 a dezembro de 1985, constituindo três etapas de trabalho que são apresentadas como partes distintas da pesquisa.

- Parte 1 - Estudo dos depósitos aluviais quaternários do Rio Paraná.

Este estudo teve como base os mapeamentos geológicos, sondagens mecânicas, ensaios "in situ" e análises de laboratório que foram desenvolvidos para o projeto da Barragem de Porto Primavera ao longo da extensa planície aluvial da margem direita do Rio Paraná. Contemplou, também, o Arenito Caiuá, que ocorre como substrato dos aluviões na região e poderia representar a principal fonte primária de ferro nos atuais processos de laterização.

- Parte 2 - Estudo dos processos de laterização e da evolução dos perfis lateríticos e conglomerados ferruginosos.

A existência de níveis concrecionados e de conglomerados fortemente cimentados por compostos de ferro, nos aluviões do Rio Paraná, mostra que a região apresenta condições ambientais favoráveis à mobilização e precipitação do ferro. Essas condições foram pesquisadas a partir de sondagens, ensaios de campo e laboratório e correlações geológicas, obtendo-se subsídios para a elaboração de um modelo para a laterização e sua evolução como modeladora do relevo.

- Parte 3 - Estudo do fenômeno da possível colmatção química dos drenos da futura Barragem de Porto Primavera por compostos de ferro.

Conhecidos os mecanismos que regem a laterização e estabelecido um modelo, foi desenvolvido um estudo da possível colmatção química dos drenos da Barragem de Porto Primavera devida à precipitação de compostos de ferro. Este estudo abrangeu uma análise dos mecanismos que governam a colmatção no sistema drenante de uma barragem a partir de condições ambientais diversas das atuais, decorrentes da formação do reservatório. Foram propostas, ainda, medidas preventivas visando a minimização ou até a eliminação da colmatção na futura barragem e de mais barragens de terra brasileiras.

ABSTRACT

The understanding of environmental factors and geochemical mechanisms that rule the laterization phenomenon in the Pontal do Paranapanema" cenozoic sediments is of paramount importance in the study of possible chemical clogging by iron compounds in the drains of the Porto Primavera Dam, under construction in the Paraná River. The Mechanisms of solubility and precipitation of iron, within a regional environmental context, as well as the evolution of iron compounds are basically the same, both for the laterization and the clogging processes.

The current research reported here has taken into account the knowledge of the environment under geological and sedimentological context, the knowledge of the processes that rule the laterization and its evolution, and a modelling of these processes, in order to subsidize the understanding of the chemical clogging phenomenon of the dam drains.

Based on borehole data "in situ" tests, laboratory tests and mapping that have been carried out, the cenozoic alluvial deposits of Paraná River and the processes of laterization and evolution of sand and gravel beds strongly cemented by iron compounds, present in the alluvia, were studied. The Caiuã sandstone, which occurs as the bedrock for the regional alluvia and should represent the main primary source of iron in the processes, was also considered.

After the mechanisms that rule the laterization were defined and the geochemical model established, a study of the possible chemical clogging of the drains of Porto Primavera Dam was executed, and the mechanisms that could lead to this clogging due to environmental conditions with the creation of the reservoir were analysed.

Prevent measures that will be adopted in order to minimize or eliminate the clogging in the future dam are presented, as well as suggestions for the study, prevention and correction of the phenomenon in other Brazilian earth dams.

INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos visando o aproveitamento do potencial hidrelétrico do Rio Paraná entre Jupiá e Itaipu tiveram início em 1963, quando se definiu que, entre o nível de jusante da Usina de Jupiá e o remanso da Usina de Itaipu, fixado na cota 220,00m, se dispunha de uma descarga média anual de 6.500m³/seg., suficiente para aproveitamento de energia da ordem de 5.000 MW. Uma série de estudos alternativos foi desenvolvida por várias entidades nacionais e internacionais, visando o aproveitamento deste trecho do Rio Paraná.

A alternativa escolhida para detalhamento foi definida em 1974, dividindo o trecho de interesse em dois estágios, cada um com 19,0m de queda: Porto Primavera, 267 km a jusante de Jupiá, com reservatório na cota 259,00m e potência instalada de 1.800 MW e Ilha Grande, 499 km a jusante de Jupiá, com reservatório na cota 239,00m e potência instalada de 2.000 MW (figuras I e II).

Além dessas usinas, que vêm sendo construídas no Rio Paraná sob responsabilidade da CESP - Companhia Energética de São Paulo e ELETROSUL - Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A. respectivamente, encontram-se em fase de conclusão as usinas de Rosana e Taquaruçu, no Rio Paranapanema e Três Irmãos, no Rio Tietê, todas sob responsabilidade da CESP.

A Usina de Porto Primavera constitui o mais recente aproveitamento hidrelétrico do Rio Paraná encontrando-se, atualmente, em fase executiva, com previsão de entrada em operação em maio de 1.991. Os objetivos principais da obra são a geração comercial de energia elétrica, ampliando a capacidade instalada do sistema CESP em mais 1.800 MW e preservando a navegabilidade do rio, através da construção de uma eclusa para a transposição do desnível que será criado pela barragem.

Em julho de 1976 foram iniciados os estudos de viabilidade técnico-econômica da usina, seguidos de estudos de projeto básico

(Julho/77 a Novembro/78) e de detalhamento em nível de projeto executivo (a partir de dezembro/78). O início efetivo das obras se deu em maio de 1.980 e estas vêm se desenvolvendo até a presente data, juntamente com o projeto executivo.

As características morfológicas do local do aproveitamento condicionaram o arranjo básico de suas principais estruturas, que se encontra esquematizado na figura III. Suas características gerais são descritas a seguir:

- a) Barragem de terra da margem direita: Com um comprimento total de 9 km e altura máxima de 30m, estendendo-se por toda a planície aluvial da margem direita do Rio Paraná.
- b) Barragem do leito do rio: Situada entre a barragem da margem direita e as estruturas de concreto. Apresenta extensão de 1,14 km e altura média de 30m, devendo ser construída, também, de terra.
- c) Estruturas de concreto: abrangem, basicamente, o vertedouro; tomada de água; casa de força; edifício de comando e área de montagem. Situam-se no leito do rio e parte da margem esquerda, com uma extensão total de 986,5m. A tomada de água, casa de força e o vertedouro deverão apresentar alturas médias de 44,0 e 53,0m, respectivamente.
- d) Eclusa: localizada na margem esquerda do rio, com uma câmara de 210,0m de extensão e 17,0m de largura. O canal de aproximação de jusante possui 5.200m de comprimento.

Ainda na margem esquerda encontra-se em operação, desde julho de 1982, uma eclusa temporária que atualmente permite a navegação através do Rio Paraná no trecho do aproveitamento. Sua construção se tornou necessária devido às altas velocidades que se desenvolveriam após o estrangulamento do rio, quando da construção das obras de desvio. Deverá ser desativada após o início da operação da eclusa definitiva.

e) Reservatório: Com um volume de 20 km^3 no seu nível normal (259,00m), deverá possuir uma extensão de 233 km no seu eixo maior e área inundada de 2.250 km^2 .

PARTE I
DEPÓSITOS ALUVIAIS CENOZÓICOS

1 ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

1.1 Introdução

A partir dos estudos de divisão de queda, para o aproveitamento hidrelétrico do Rio Paraná e principalmente da implantação das usinas de Jupiá e Ilha Solteira, todo o curso do rio vem sendo intensamente investigado para fins geotécnicos. Essas investigações têm sido dirigidas aos locais das usinas, às áreas que deverão conter os seus reservatórios e às jazidas de materiais naturais de construção.

A proximidade das usinas de Porto Primavera, Rosana e Taquaruçu, na região denominada Pontal do Paranapanema e de domínio dos arenitos da Formação Caiuá, unidade basal do Grupo Bauru, permitiu um estudo geológico regional integrado para esses três aproveitamentos. Este estudo foi iniciado em agosto de 1974 para as usinas de Porto Primavera e Rosana (IPT, 1976a) e concluído em março de 1978 com o detalhamento, em nível de projeto básico, da Usina de Porto Primavera (THEMAG, 1978).

Durante os anos de 1984 e 1985, por ocasião da presente pesquisa, foi desenvolvido um levantamento da bibliografia existente sobre a Formação Caiuá, no contexto do Grupo Bauru, e sobre os depósitos cenozóicos presentes na Bacia do Alto Paraná.

1.2 A Região do Pontal do Paranapanema

No Cretáceo Inferior, o soerguimento marginal das bordas da Bacia do Paraná associado aos levantamentos dos arcos de Ponta Grossa e do Rio Grande, no interior da área basáltica, criaram uma depressão provavelmente pouco subsidente, na qual se acumularam os sedimentos do Grupo Bauru. Originou-se, dessa forma, a Bacia do

Alto Paraná (ALMEIDA, 1980).

A região do Pontal do Paranapanema, situada no interior da bacia, constitui área de domínio da Formação Caiuá, unidade basal do Grupo Bauru, que repousa sobre os derramos basálticos da Formação Serra Geral. Sedimentos aluviais e coluviais cenozóicos recobrem essas formações.

Como pode ser observado no mapa geológico da figura 1.1, as ocorrências de rocha basáltica, em superfície, restringem-se a pontos localizados no encontro dos rios Paraná e Paranapanema, nas margens do Paranapanema e em locais próximos à cidade de Teodoro Sampaio. Em Teodoro Sampaio e no local da Usina de Rosana, o topo do basalto se encontra, em média, na cota 205m, estando entre as cotas 220 e 240m em Porto Primavera. Um poço da Petrobrás, executado em Presidente Epitácio, indicou o seu topo na cota 168m e uma espessura total de 1.623m para o pacote de rochas basálticas (IPT, 1976a).

Superposta aos basaltos, a Formação Caiuá se estende por toda a região, com espessuras da ordem de 150m em Teodoro Sampaio, 120m em Rosana, 90m em Porto Primavera e 70m em Presidente Epitácio. Seu contato inferior com a Formação Serra Geral, situa-se entre as cotas 200 e 240m, podendo estar ausente na calha do Rio Paraná, em locais onde foi erodido e os sedimentos aluviais se depositaram diretamente sobre o basalto (IPT, 1976a).

A cobertura cenozóica é representada por depósitos coluviais e aluviais que atingem grande expressão na margem direita do Rio Paraná. Observam-se, nesta margem, terraceamentos situados nas cotas médias 265, 245 e 240m definindo, respectivamente, um terraço colúvio-aluvial, um terraço aluvial e uma planície aluvial ao

longo de uma faixa marginal ao rio que varia de 10 a até 20 Km de largura. Na margem esquerda do Rio Paraná os depósitos são inexpressivos ou ausentes, restringindo-se à planície aluvial da várzea do Rio Paranapanema, entre as cotas 240 e 250m.

Do ponto de vista estrutural, foram inferidos alguns lineamentos regionais que devem estar relacionados às calhas dos rios Paraná e Paranapanema, considerados alinhamentos estruturais importantes (THEMAG, 1978). Os arenitos apresentam apenas descontinuidades primárias, representadas por estruturas sedimentares e fraturamento primário, sendo raras as fraturas de origem tectônica e ausentes os falhamentos (STEIN et al., 1979 e ALMEIDA, 1980).

1.3 Grupo Bauru

1.3.1 Generalidades

O Grupo Bauru estende-se pelos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás, constituindo a Bacia do Alto Paraná. Esta se formou no Cretáceo, a partir de soerguimento das estruturas marginais ao Norte e atividade positiva dos arcos de Ponta Grossa e Campo Grande no interior da Bacia do Paraná (ALMEIDA, 1980).

Desde 1905, quando GONZAGA DE CAMPOS introduziu o termo "Grés de Bauru" para os sedimentos cretáceos situados acima dos derrames basálticos, esses sedimentos têm sido estudados sob vários primas, tendo sido considerados como formação, série, grupo, formação e novamente grupo.

SETZER (1948) subdividiu essas rochas em duas unidades: Bauru Inferior e Bauru Superior, denominadas mais

tarde, respectivamente, de Itaqueri e Marília, por ALMEIDA e BARBOSA (1953). FREITAS (1955) utilizou o termo "Série Bauru", subdividindo-a nos membros Itaqueri e Bauru porém abandonou, em 1964, o termo Itaqueri pela sua pequena expressão geográfica.

BARBOSA et al. (1970), estudando a área do Triângulo Mineiro, indicaram a existência de três fácies da base para o topo: Uberaba, Ponte Alta e Bauru. HASUI (1969) definiu a Formação Uberaba sob a Formação Bauru, na mesma região, registrando uma discordância entre ambas e observando a existência de um conglomerado basal no contato com a Formação Uberaba.

SUGUIO (1973) utilizou o termo Formação Bauru reunindo, sob essa denominação, a Fácies Itaqueri ou Ponte Alta e Fácies Bauru, colocando também a Formação Uberaba como unidade independente.

SOARES et al. (1973) subdividiram a Formação Bauru, na região nordeste do Estado de São Paulo, em Formação Bauru Inferior e Superior. No ano seguinte, PIERUCETI e BRANDT NETO (1974) e MEZZALIRA (1974) se basearam na presença do cimento calcítico como critério para subdivisão estratigráfica, como um retorno ao trabalho de SETZER (op.cit.).

COIMBRA (1976) estudou a estratigrafia da Formação Bauru a partir da assembléia de minerais pesados e AMARAL (1977) mostrou a possibilidade de identificação das unidades estratigráficas da Formação Bauru com base nos padrões fotogeológicos observados em imagens Landsat.

Em 1977 BRANDT NETO, mapeando o baixo curso do Rio Tietê, descreveu três membros na Formação Bauru e os denominou Membro Inferior, Médio e Superior. Nesse mesmo ano, SUGUIO et al. (1977) apresentaram uma subdivisão que a

brangeu as litofácies Araçatuba, São José do Rio Preto e Marília.

SOARES et al. (1979), estudando as regiões administrativas 10 e 11 do Estado de São Paulo, distinguiram cinco associações litológicas, que foram denominadas Formação Caiuá, Fácies Santo Anastácio, Fácies Taciba, Fácies Ubirajara e Formação Marília.

Em 1980 ALMEIDA et al., concordando com SOARES et al. (1979), elevaram a Formação Bauru à categoria de grupo, incluindo neste as formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, embora alguns autores como FREITAS (1982) e JABUR e SANTOS (1984) ainda entendessem a Formação Caiuá como anterior ao Grupo Bauru, pertencendo ao Grupo São Bento. A Formação Adamantina foi subdividida nas litofácies Araçatuba e São José do Rio Preto, de SUGUIO et al. (1977) e Ubirajara e Taciba, de SOARES et al. (1979). JABUR e SANTOS (1984) propuseram as litofácies Porto Rico e Mamborê para a Formação Caiuá.

1.3.2 Estratigrafia

Os sedimentos do Grupo Bauru, formados no Cretáceo, repousam sobre os derrames basálticos da Formação Serra Geral sendo divididos, de acordo com a maioria dos autores, em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. A Figura 1.2 representa o quadro estratigráfico esquemático do grupo no Estado de São Paulo e noroeste do Paraná, sendo indicadas as espessuras e as características gerais das formações.

A Formação Caiuá se assenta, discordantemente, sobre os basaltos da Formação Serra Geral, admitindo-se um ciclo erosivo entre ambas (SOARES et al., 1980). É constituída de arenitos quartzosos a subarcoseanos finos a

médios, de coloração arroxeada a vermelha escura e apresenta como estruturas sedimentares principais, estratificações cruzadas de grande porte. JABUR E SANTOS (1984) distinguem, no Paraná, os arenitos de cor arroxeada e estratificação cruzada de forte mergulho como litofácies Porto Rico e os arenitos vermelhos, de estratificação sub-horizontal, como litofácies Mamborê. Data do Cretáceo Inferior, tendo-se depositado sobre superfície bastante irregular, num padrão de altos e baixos regionais moldados por um tectonismo pré-Bauru. É de origem predominantemente flúvio-deltaica, com provável ocorrência de sedimentos eólicos associados.

A Formação Santo Anastácio é representada por arenitos finos a médios, com matriz argilosa inferior a 15%, dispostos em grandes bancos maciços, localmente com acamamento plano-paralelo e estratificação cruzada. Sua coloração é marrom avermelhada e localmente podem ocorrer arenitos subarcoseanos e intercalações de arenitos argilosos e lamitos. O contato basal dessa formação se faz com as formações Serra Geral e Caiuá, apresentando discordância erosiva com a primeira e transicional com a segunda, denotando um caráter transgressivo em sua sedimentação. Data, provavelmente, do Cretáceo Inferior, quando se formou a partir de canais meandrántes e retilíneos, de pequena profundidade, e em planícies de transbordamento arenosas, com suprimento lento, uniforme e regular de areia, mas com deficiência de material argiloso na área fonte (SOARES et al., 1980).

A Formação Adamantina caracteriza-se por duas principais fácies deposicionais: uma de arenitos finos a muito finos, de coloração rósea a castanha e estratificação cruzada (fácies de canal) e outra de sedimentos lamiticos maciços ou com acamamento plano-paralelo grosseiro, de cor castanho-avermelhada a cinza-acastanhada (fácies de planície de inundação em várzeas e lagoas).

As variações regionais apresentadas levaram alguns pesquisadores a diferenciarem as litofácies São José do Rio Preto e Araçatuba ou Taciba e Ubirajara. O contato com a Formação Santo Anastácio se apresenta transicional ou interdigitado e com os basaltos da Formação Serra Geral é do tipo discordante erosivo, com conglomerado basal.

A Formação Adamantina apresenta o mais abundante registro fossilífero do Grupo Bauru e sua idade é atribuída ao Cretáceo Superior (Huene, 1933 in SOARES et al., 1980) e Cretáceo Médio (Soares e Landim, 1975 in SOARES et al., 1980). A origem destes sedimentos pode ser relacionada a um amplo sistema fluvial meandran-te, predominantemente pelítico ao Sul e sudoeste do Estado de São Paulo, gradando para psamítico a Leste e Norte deste estado onde, parcialmente, passa para entrelaçado.

A Formação Marília é composta por arenitos predominantemente grosseiros, dispostos em bancos maciços ou com acamamento incipiente, de coloração creme ou esbranquiçada e raros corpos lenticulares de lamitos ou arenitos lamíticos vermelhos no topo. De maneira geral, a granulometria é crescente de baixo para cima, predominando conglomerados próximo ao topo. Com a Formação Adamantina as relações de contato são interdigitadas ou apresentam mudança brusca de litologia, mas a Formação Marília pode também repousar sobre a Formação Serra Geral, por discordância erosiva com conglomerado basal ou, localmente, sobre o Botucatu, Pirambóia e mesmo "sills" de diabásio, através de discordância angular sobre estruturas dômicas pré-Bauru (SOARES et al., 1980).

Sua sedimentação é atribuída ao Cretáceo Superior, tendo ocorrido sob regime de alta energia, com trans-

porte fora de canais em extensos lençóis de escoamento, com deposição rápida e sem formação de estruturas. A granulometria crescente para cima indica que a sedimentação foi realizada cada vez mais próxima das cabeceiras dos leques aluviais, sugerindo um incremento na taxa de soerguimento dos arcos marginais. Entre os leques formaram-se, localmente, depósitos lamíticos ou finas camadas de calcário branco, micrítico ou nódulos carbonáticos irregulares.

1.4 Formação Caiuã

1.4.1 Conhecimento Atual

A Formação Caiuã foi descrita, pela primeira vez, por BAKER (1923) que a considerou de origem deltaica e ida de terciária, sendo confinada à calha do Rio Paraná. WASHBURNE (1930) atribuiu a essa formação uma origem eólica, denominando-a Formação Caiuã e sobrepondo-a aos basaltos, em posição estratigráfica inferior à Formação Bauru.

Outros autores como MAACK (1941), que a denominou Arenito São Bento Superior, SCORZA (1952) e BIGARELLA (1949), apontaram uma origem eólica para a Formação Caiuã, situando-a abaixo da Formação Bauru. MEZZALIRA e ARRUDA (1965), MEZZALIRA (1974, e SUAREZ (1976) sugeriram uma deposição fluvial ou flúvio-deltaica para os arenitos desta unidade.

FREITAS (1973) retornou às hipóteses de BAKER (op.cit.) e, a partir de dados sedimentológicos, concluiu pela origem subaquosa e posição estratigráfica do Caiuã entre as formações Serra Geral e Bauru. BÓRIO e LANDIM (1971)

consideraram a Formação Caiuá neoceno^zica e, com base também em dados sedimentol^ogicos, apoiaram as idéias de BAKER.

Em 1971, LANDIM e FULFARO reforçaram a idéia de idade cenoz^oica para a Formação Caiuá, atribuindo-lhe origem deltaica a partir de um represamento tect^onico ocorrido na região de Guaíra, no noroeste do Paraná, associando-a ao vale do Rio Paraná e seus grandes afluentes, como o Paranapanema.

LANDIM e SOARES (1976), trabalhando no Pontal do Paranapanema, verificaram a posição estratigráfica da Formação Caiuá, conforme as premissas de WASHBURNE (op.cit.), notando a existência de um fácies de transição que denominaram Santo Anastácio, entre as formações Bauru e Caiuá.

SOARES et al., (1980) propuseram uma interpretação integrada dos sedimentos cretáceos no Estado de São Paulo e redefiniram o Grupo Bauru, do qual a Formação Caiuá seria a unidade basal, considerando-a como de origem eólica. ALMEIDA et al. (1980) concordaram com a elevação da Formação Bauru à categoria de grupo e a inclusão da Formação Caiuá, mas apontaram uma origem duvidosa entre eólica e flúvio-deltaica para essa unidade.

Em 1981 são publicados os resultados dos estudos desenvolvidos por SALAMUNI et al.; RICCOMINI et al.; SOBREIRO NETO et al. (a e b) e ALMEIDA et al. no Pontal do Paranapanema, Norte e noroeste do Paraná, que atestaram origem flúvio-deltaica para a Formação Caiuá, sem descartar uma possível ocorrência de sedimentos eólicos associados. Essa concepção foi apoiada por FREITAS, em 1982, a partir de pesquisa por sedimentogramas.

1.4.2 Espessuras e Distribuição

Definida na região do Pontal do Paranapanema, a Formação Caiuã se restringe, no Estado de São Paulo, a essa área, podendo ser visualizada nas barrancas da margem esquerda do Rio Paraná. Em subsuperfície estende-se a Oeste de Pirapozinho e Presidente Prudente e Sul de Panorama (SOARES et al., 1979). Estende-se, ainda, pela região noroeste do Paraná e sudeste do Mato Grosso do Sul, não havendo registro de sua ocorrência em outros estados.

Sua espessura é muito variável, podendo apresentar alguns metros no contato com o embasamento basáltico até cerca de 200m no Morro dos Três Irmãos, no Paraná. De modo geral acunha-se nos sentidos N e E (SOBREIRO NETO et al., 1981b e JABUR e SANTOS, 1984).

1.4.3 Características Litológicas e Sedimentares

Como característica principal, a Formação Caiuã possui grande uniformidade litológica. É constituída por arenitos finos a médios de distribuição granulométrica bimodal tendo, localmente, areia muito fina a grosseira e conglomerado basal no contato com a Formação Serra Geral. A matriz é de natureza lamítica, com 2 a 30% de silte e argila e os grãos são cobertos por película de óxido de ferro, que atribui à rocha uma coloração arroxeada a vermelha escura.

Quanto à composição mineralógica o principal constituinte é o quartzo, com 82 a 96%, seguido por 3 a 18% de microclínio e plagioclásio, o que permite classificar os arenitos como subarcosianos. Ocorrem ainda, secundáriamente, calcedônia, minerais de argila (montmorilonita e caulinita), minerais pesados (opacos, zircão e turmalina) e, localmente, muscovita.

A matriz que envolve os grãos é representada por compostos de ferro e argila podendo ocorrer, também, cimentação carbonática e nódulos calcários, principalmente em arenitos maciços.

As estruturas primárias mais conspícuas da Formação Caiuá são as estratificações cruzadas de grande porte, tangenciais na base, com ângulos de mergulho variáveis entre 5° e 28°, raramente atingindo 30°. Apresentam-se predominantemente acanaladas, estando intercaladas ou variando lateralmente para estratificações plano-paralelas horizontais a sub-horizontais rítmicas (SOBREIRO NETO et al., 1981b). A espessura dos bancos varia entre 1 e 5m, com extensão de 10 a 30m e os mesmos se encontram separados por diastemas.

Bancos de arenito com estrutura maciça podem, também, ser encontrados intercalados, ocorrendo com maior frequência na metade inferior da formação (RICCOMINI et al., 1981). Apresentam granulação fina e 20 a 30% de matriz siltico-argilosa.

Outras estruturas foram, ainda, registradas por SALAMUNI et al. (1981) e SOBREIRO NETO et al. (1981b), tais como estruturas de escavação e preenchimento, marcas onduladas (micro-estratificações cruzadas em bancos sub-horizontais), dobras convolutas, marcas de sobrecarga e "boudinage", estratificação gradacional e brechas intraformacionais.

1.4.4 Relações Estratigráficas

O contato basal da Formação Caiuá se faz com os basaltos da Formação Serra Geral através de discordância, sendo admitido um ciclo erosivo entre ambas. A ocorrência de solo fóssil e de brecha sedimentar na região de Porto Primavera (SOARES et al., 1979 e RICCOMINI et

al., 1981) indica que o transporte e sedimentação das areias do Caiuá não ocorreram nos episódios finais do vulcanismo, havendo um hiato de tempo com formação de solo e erosão local.

Entre as formações Caiuá e Santo Anastácio o contato se faz de forma transicional, com o Arenito Caiuá passando de bancos maciços para camadas plano-paralelas decimétricas de arenitos menos selecionados e mais ricos em matriz (SOARES et al., 1980). As características mineralógicas e texturais das duas formações mostram, ainda, que o Arenito Caiuá atuou como fonte da Formação Santo Anastácio.

1.4.5 Origem e Idade

A maioria dos autores admite para a Formação Caiuá uma origem flúvio-deltaica, enquanto alguns a interpretam como de origem eólica. RICCOMINI et al. (1981) interpretaram a porção basal do Caiuá como de origem aquosa (canais fluviais) e a porção superior como de origem ora eólica e ora aquosa, mas JABUR e SANTOS (1984) entendem que sua porção inferior seja eólica e a superior aquosa, originada em ambientes lacustres efêmeros, sobre areias de deserto.

A partir das evidências apresentadas pode-se assumir uma origem predominantemente subaquosa, de ambiente flúvio-deltaico, para o Caiuá, sendo os depósitos formados a partir de altos regionais originados por falhamentos e/ou arqueamentos (reativação dos arcos de Ponta Grossa, Canastra e da Serra do Mar).

As áreas fontes dos sedimentos da Formação Caiuá teriam sido as formações Estrada Nova, Pirambóia, Botucatu e Serra Geral para os conglomerados basais e os arenitos da Formação Botucatu para os sedimentos restantes,

uma vez que a composição mineralógica, forma e dimensões dos grãos desses arenitos são semelhantes aos do Caiuã. Por sua vez, a Formação Caiuã teria alimentado a Formação Santo Anastácio. O cimento ferruginoso do Caiuã teria origem nos basaltos da Formação Serra Geral.

As informações paleontológicas da Formação Caiuã restringem-se a pegadas de dinossauros pouco conclusivas (LEONARDI, 1977) não existindo fósseis. Sua idade é atribuída ao Cretáceo Inferior pela grande maioria dos autores, fato que pode ser estabelecido por comparação com a evolução da Bacia de Santos (SOARES et al., 1980).

1.5 Sedimentos Cenozóicos

1.5.1 Pesquisas de Cascalheiras na Bacia do Alto Paraná

As primeiras investigações sistemáticas dos sedimentos cenozóicos na Bacia do Alto Paraná visaram os depósitos de cascalho existentes na margem direita e leito do Rio Paraná, denominados genericamente cascalheiras. Tiveram como objetivo a obtenção de materiais naturais para construção das usinas de Jupiá e Ilha Solteira (RUIZ, 1963).

Os resultados dessa pesquisa foram publicados, em 1972, por GUIDICINI e FERNANDES DA SILVA e contemplaram extenso depósito existente na região de Três Lagoas (sudeste de Mato Grosso). NÜSKE e OLIVEIRA (1972) também apresentaram dados sobre pesquisa de cascalheiras no leito do Rio Paranapanema e Rio Grande, para as usinas de Capivara e Água Vermelha, respectivamente.

A partir dessa época, outros aproveitamentos hidrelétricos foram estudados e iniciou-se uma pesquisa extensiva a todo o curso do Rio Paraná e seus afluentes da

margem esquerda, até a região de Guaíra (MONTICELLI e PEREIRA, 1976). Essa pesquisa, que teve caráter regional no seu início, indicou as ocorrências de cascalho presentes na bacia, mais tarde caracterizadas e cubadas durante os projetos de Porto Primavera, Rosana e Taquaruçu para a CESP e Ilha Grande para a Eletrosul.

Ao longo de todo o período em que evoluíram os conhecimentos sobre o Grupo Bauru, a cobertura cenozóica na Bacia do Alto Paraná foi abordada, porém em caráter superficial, secundariamente aos sedimentos cretáceos. Em 1984, SUGUIO et al. apresentaram uma proposta de modelo deposicional para os sedimentos do Rio Paraná na região do Pontal do Paranapanema e BOGGIANI et al. (1985) desenvolveram um trabalho de pesquisa sobre a origem dos seixos das cascalheiras dos rios Paraná e Araguaia.

1.5.2 Espessuras e Distribuição

Em toda a Bacia do Alto Paraná ocorrem sedimentos coluviais e aluviais, os primeiros de forma generalizada e os segundos associados ao Rio Paraná e seus afluentes. Os grandes volumes de cascalho da margem direita e leito do Rio Paraná, e sua possível utilização como material natural de construção, levaram a um maior interesse por esses depósitos, que tiveram um melhor detalhamento nos estudos realizados.

São encontrados até a 50 km do atual leito do rio, podendo situar-se até 60m acima deste e distribuem-se em terraços ou níveis bem definidos, conforme descrito por GUIDICINI (1973), FULFARO (1974), IPT (1976b) e SUGUIO et al. (1984). Esses depósitos são apresentados nas figuras 1.3 e 1.4, em seções esquemáticas transversais aos rios Paraná e Paranapanema, e descritos a seguir.

a) Terraços Altos ou de Topo de Morro

Situam-se entre 20 e 80m acima do Rio Paraná e seus afluentes de primeira e segunda ordem. Em Porto Primavera e Rosana sua distância do leito do rio é de cerca de 10km e 2km respectivamente, e recebem a denominação de Terraços Colúvio-Aluviais.

Sua espessura varia entre poucas dezenas de centímetros até 5 ou 6m e podem possuir, como cobertura, um solo coluvial poroso areno-argiloso, vermelho, com espessuras de 2 a 10m, originado principalmente dos arenitos da Formação Caiuá. São constituídos por areia fina a média ou argila arenosa com seixos esparsos e cascalho na base, e apresentam concreções e veios ferruginosos.

b) Terraços e Depósitos de Meia Encosta

Abrangem terraços fluviais autênticos e depósitos de retrabalhamento de níveis superiores. Os terraços verdadeiros apresentam areia "lavada", enquanto os depósitos de retrabalhamento são constituídos de uma areia argilosa avermelhada, com linhas de seixos caoticamente dispostos. Sua espessura não ultrapassa 2m.

c) Terraços Baixos

Situam-se entre 3 e 20m acima do Rio Paraná afastando-se, no máximo, alguns quilômetros do mesmo. Em Porto Primavera recebem a denominação de Terraços Aluviais e têm uma largura de cerca de 3,5km. Não ocorrem no Rio Paranapanema. São os depósitos mais volumosos, com espessuras entre 5 e 10m e grandes extensões, e sua característica mais marcante é a horizontalidade do topo. Apresentam areia fina a mé-

dia, pouco argilosa no topo tendendo a grossa na base, com lentes erráticas de seixos na sua porção intermediária e cascalho basal. Podem ocorrer ainda, couraças, veios e cimentação ferruginosa.

d) Depósitos de Plainos de Inundação

São constituídos por camadas descontínuas de areia com cascalho na base, recobertas por camadas e lentes de argila orgânica ou material areno-argiloso. Em Porto Primavera e Rosana esses depósitos são denominados planícies aluviais, com espessuras médias de 6m e 4,5m, respectivamente.

No local de implantação da Usina de Porto Primavera, esta unidade geomorfológica foi subdividida em três subunidades: Planície do Rio Baía, Paleo-Ilha e Planície do Rio Paraná. De maneira geral são constituídas por areia fina a média com cascalho e cimentação ferruginosa na base, e argilas moles com matéria orgânica no topo. Nas partes mais elevadas da Paleo-Ilha predomina areia argilosa compacta (SUGUIO et al., 1984).

e) Depósitos de Leito de Rio

Apresentam areia fina, média e grossa na sua constituição, associada a níveis de cascalho. No Rio Paraná suas espessuras variam de 1 a 15m, com maiores concentrações de cascalho junto à margem direita, enquanto na porção média e junto à margem esquerda do rio ocorre apenas areia. No Rio Paranapanema a espessura desses depósitos dificilmente ultrapassa 2m.

Ocorrem, ainda, níveis concrecionados constituídos por areias e/ou seixos cimentados por compostos de ferro, formando lajes de conglomerado resistentes.

te. No Rio Paraná essas lajes foram observadas na superfície do depósito, com grande continuidade, e em diversos níveis no seu interior. No Rio Parana-panema praticamente inexistem.

f) Casos Especiais

Por não se enquadrar em nenhum dos tipos de ocorrência descritos, o depósito estudado por GUIDICINI e FERNANDES DA SILVA (1972) na região de Três Lagoas, margem direita do Rio Paraná, para a Usina de Jupiá, foi considerado um caso especial.

Apresenta uma espessura total da ordem de 60m em Três Lagoas, diminuindo na direção do Rio Paraná, e tem o seu topo cerca de 60m acima da calha do rio. É constituído por intercalações decimétricas a métricas de areia e cascalho e sua granulometria diminui da base para o topo, onde predominam sedimentos mais finos. Ocorrem, ainda, intercalações de lentes siltico-argilosas com 2 a 3 metros de espessura.

Nos contatos entre camadas de diferente composição granulométrica, e na base do depósito, foram detectadas crostas ferruginosas com alguns centímetros de espessura e alguns metros de extensão.

1.5.3 Características Litológicas e Sedimentares

Com base na constituição litológica dos seixos das cascalheiras, esses depósitos foram divididos em dois grupos denominados "gerações" (GUIDICINI, 1973). Mais tarde essas "gerações" receberam, também, conotação estratigráfica (FULFARO, 1974 e FULFARO et al., 1983) e são reavaliadas por BOGGIANI et al. (1985).

a) Geração Quartzítica

É representada por depósitos de cascalho com seixos friáveis, imbricados, de composição predominantemente quartzítica e diâmetro entre 2 e 4 cm. Secundariamente ocorrem seixos de sílex, sílex oolítico e arenito intratrapeano, além de elevada porcentagem de nódulos e concreções ferruginosas. A matriz é geralmente fina, com ausência de termos arenosos.

Os depósitos apresentam estratificação cruzada e seqüências de sedimentação gradativa e se situam em cotas mais elevadas, constituindo os terraços altos ou de topo de morro.

FULFARO (1974) define, ainda, uma outra geração denominada de meia encosta, cujas linhas de seixos seriam derivadas de retrabalhamento dos depósitos de topo de morro.

b) Geração Calcedônica ou Geração Ágata

Apresenta predominância de seixos de variedades micro e criptocristalinas e amorfas de sílica e, secundariamente, arenito silicificado e seixos de quartzito retrabalhados das gerações anteriores. É freqüente sua associação com termos arenosos, principalmente superpostos às cascalheiras, e os seixos são maiores, mais esféricos e resistentes que os da geração quartzítica.

FULFARO (1974) estabelece uma relação entre essa geração e os depósitos de terraços e leito do Rio Paraná e seus afluentes, e pela sua grande extensão e litologia estabelece uma semelhança com a atual sedimentação na calha desses rios.

BOGGIANI et al. (1985) propõem a substituição da de nominação de geração calcedônica para geração ágata, uma vez que os seixos de ágata zonada são mais abundantes nos leitos dos rios e os seixos de calcedônia ocorrem secundariamente. Descrevem também, preliminarmente, 19 tipos de seixos acrescentando aos termos conhecidos diversas variedades co mo estromatólitos silicificados, oólitos, oncólitos, jaspe, ágatas, geodos de quartzo e outras.

GUIDICINI (1973) relata, ainda, a ocorrência de duas cascalheiras com litologias e características diversas. Uma delas situa-se no limite sul da ba cia, em Sete Quedas, próximo ao Rio Piquiri, com seixos de até 30cm de diâmetro de arenito silicifici cado (70%) e, secundariamente, ágatas e calcedônias (30%). A outra situa-se em São Simão, próximo ao Rio Parnaíba, onde poços executados no topo de mor ros indicaram a existência de blocos com 40 e 50 cm de arenito ou siltito na base de um terraço com espessuras de 13 a 14m.

1.5.4 Origens e Idades

As gerações quartzítica e calcedônica ou ágata têm su as origens, respectivamente, em áreas fontes externas e internas à Bacia do Alto Paraná.

A geração quartzítica encontra-se ligada à calha prin cipal do Rio Paraná e seus formadores com nascentes em áreas pré-Cambrianas, sendo resultante da dissecação do embasamento cristalino circundante à bacia, em áreas quartzíticas a sudoeste do Estado de Minas Gerais (HASUI, 1969 e GUIDICINI, 1973) e Oeste do Estado de São Paulo (FULFARO, 1974 e FULFARO et al., 1983). Uma fonte secundária seriam os níveis conglome ráticos da Formação Furnas e das formações do Grupo

Bauru (BOGGIANI et al., 1985).

É considerada por alguns pesquisadores como terciária (FULFARO, 1974 e STEIN et al., 1979) e por outros como quaternária, estando ligada ao Pleistoceno (IPT, 1976b e SUGUIO et al., 1984).

A geração calcedônica está associada à grande calha do Rio Paraná e seus afluentes com nascentes e cursos nas mais altas unidades da Bacia do Paraná. Os seixos dessa geração teriam sua origem, portanto, nos basaltos da Formação Serra Geral, nos arenitos intratrapezoidais e nos fácies mais resistentes da Formação Botucatu e do Grupo Bauru. Os seixos de quartzito seriam produto de retrabalhamento das gerações mais antigas (GUIDICINI, 1973 e FULFARO, 1974).

BOGGIANI et al. (1985), pesquisando áreas-fontes nas bacias dos rios Paraná e Araguaia indicam, como fonte primária dos seixos de estromatólitos e oólitos negros, a Formação Irati do Grupo Passa Dois, no divisor de águas das bacias daqueles rios, a sudeste de Mato Grosso e Sul de Goiás (Serra do Caiapó). Como fonte secundária apontam os níveis conglomeráticos da Formação Adamantina.

Alguns autores também atribuem idade terciária a essa geração (GUIDICINI e FERNANDES DA SILVA, 1972 e STEIN et al., 1979) enquanto outros a situam no Quaternário, no final do Pleistoceno e Holoceno (IPT, 1976b e SUGUIO et al., 1984).

1.5.5 Modelo de Sedimentação

FULFARO (1974) associa a formação dos depósitos de cascalho da geração quaternária a um regime de rios entrelaçados de grande competência que, por epirogenis-

mo positivo, teria se instalado sobre os sedimentos do Grupo Baruru, entalhando a montante, atingindo as regiões do cristalino e lavando antigos pavimentos detriticos relacionados ao Terciário Inferior.

Mais tarde o mecanismo evolui para um padrão de rios meandantes, com sucessivos rebaixamentos do nível de base regional, que provocam o entalhamento dos rios com nascentes no platô basáltico e Grupo Bauru. Origina-se, então, a geração calcedônica ou geração ágata, de grande continuidade e semelhança com a atual sedimentação ao longo do canal principal do Rio Paraná. As variações do nível de base teriam sido descontínuas, como o evidenciam os freqüentes conglomerados ferruginosos existentes nas cascalheiras, cuja formação estaria ligada às mudanças de canais (típicos de regime entrelaçado), com exposição dos depósitos rudáceos.

Os depósitos de meia encosta teriam se formado a partir de depósitos torrenciais, de curto transporte e rápida deposição, em clima sub-úmido ou semi-árido, com chuvas ocasionais de alta intensidade.

SUGUIO et al. (1984) atribuem a natureza fortemente assimétrica do vale do Rio Paraná, com a margem direita essencialmente deposicional e a esquerda erosiva, a um basculamento regional da área para S-SE, com eixo aproximadamente paralelo ao leito do rio, que teria acompanhado o levantamento epirogenético positivo da área durante o Cenozóico. Definem, ainda, seis estágios na história geológica da sedimentação, associados a variações paleo-climáticas e/ou tectônicas, em que o terraco colúvio-aluvial seria mais antigo, seguido pelo terraco aluvial, planície aluvial e depósitos do leito do rio.

2

PESQUISA DESENVOLVIDA PARA A IMPLANTAÇÃO DA USINA HI DRELÉTRICA DE PORTO PRIMAVERA

Os estudos geológico-geotécnicos na área de implantação da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera foram desenvolvidos, em nível de detalhe, somente a partir de março de 1978, estendendo-se até os dias atuais. A presente pesquisa sobre os depósitos aluviais, no entanto, contemplou todos os dados obtidos durante o período de agosto de 1974 a dezembro de 1985, e abrangeu os seguintes trabalhos:

2.1 Fotointerpretação Geológica

Abrangeu toda a área destinada às obras da usina e o seu entorno, e as jazidas de materiais naturais de construção nas margens direita e esquerda do Rio Pa
ranã. Estendeu-se, também, a todo o futuro reservatô
rio, com maior ênfase aos depósitos aluviais da marg
em direita, imediatamente a montante do eixo da barr
agem.

Foram utilizados os seguintes levantamentos:

a. Fotografias aéreas

a.1. escala 1:60.000 - levantamento realizado por 30th Engineer Battalion em 1965 de todo o terr
itório nacional.

a.2. escala 1:20.000 - levantamento realizado por Aeromapa Brasil S.A. em 1972, entre Três Lag
oas (MT) e Andradina (PR).

a.3. escala 1:20.000 - levantamento realizado por Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. em 1977, entre Três Lagoas (MT) e Andra-

dina (PR).

b. Imagens de Satélite

b.1. Imagens LANDSAT na escala 1:250.000, Órbita 220 em 18/07/1976, processada pelo INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais).

2.2 Mapeamentos Geológico-geotécnicos de Superfície

Nas fases de viabilidade e projeto básico da usina, foram realizados visando-se a caracterização superficial dos materiais existentes nas fundações e jazidas de materiais naturais de construção, de forma a orientar os programas de sondagens e ensaios para investigação de subsuperfície. Durante a fase de projeto executivo foram realizados nas áreas das fundações e superfícies escavadas, permitindo uma aferição das seções geológico-geotécnicas obtidas a partir das sondagens e uma inspeção direta das fundações.

Utilizaram-se, como base, plantas topográficas em escalas variáveis a saber:

- a. escala 1:10.000 - Projeto de Viabilidade (1974)
- b. escala 1: 4.000 - Projeto Básico (1978)
- c. escalas 1:2.000 e 1:500 - Projeto Executivo (1980 a 1985).

2.3 Sondagens

Foram realizadas em toda a área de implantação da usina, durante as fases de viabilidade e projetos básico e executivo, de acordo com as diretrizes publicadas pela ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia) (1977 e 1980), compreendendo sondagens

a trado, sondagens a percussão, sondagens rotativas e poços para inspeção e amostragem. No leito do Rio Paraná foram executadas, ainda, sondagens a varejão na área da usina e um tubulão na jazida de cascalho denominada Cascalheira do Óleo Cru-Braço Direito.

O total das sondagens utilizadas na presente pesquisa é de 2.410 e suas principais características, objetivos e fase de projeto em que foram realizadas são apresentados nas tabelas 2.1 a 2.5, respectivamente para o terraço colúvio-aluvial, terraço aluvial, planície aluvial, leito do Rio Paraná e Cascalheira do Óleo Cru. Nas figuras 2.1 a 2.6 é apresentada a localização dessas investigações nessas unidades geomorfológicas.

2.3.1 Sondagens a Trado

Foram realizados dois tipos de sondagens a trado: tipo cavadeira, por processo manual, em diâmetro de 4" e tipo mecânico, com diâmetro de 500mm. Ambos os tipos foram identificados pela sigla ST seguida de número indicativo.

O método consiste no avanço por rotação, manual ou mecânica, de uma ferramenta cilíndrica que permite a amostragem do solo, acoplada a hastes metálicas. Tem como limitações ao seu avanço o nível freático local, o topo rochoso e a existência de cascalho ou concreções resistentes. A profundidade investigada por este método, em condições favoráveis, não ultrapassa 10 a 15 metros.

Foram utilizados os dados de 399 sondagens, realizadas quase que exclusivamente para pesquisa de materiais naturais de construção no terraço colúvio-aluvial e terraço aluvial.

2.3.2 Sondagens a Percussão

Foram utilizadas na investigação dos depósitos aluviais e manto de alteração, uma vez que essas sondagens têm como limitação ao seu avanço o topo de rocha, níveis concrecionados duros e, em função do seu diâmetro, até mesmo camadas de cascalho.

O método consiste no avanço de um barrilete amostrador acoplado a hastes metálicas, através de sucessivos golpes provocados pela queda de um peso sobre a composição do hasteamento. Este processo pode ser alternado, a cada 0,5m, com o método de perfuração a trado ou de perfuração por lavagem, no qual se utiliza uma ferramenta em forma de bixel, com circulação de água.

Nas sondagens de diâmetro 2 1/2", além da amostragem, é possível a realização de um ensaio para avaliação da resistência do solo à penetração. Este ensaio é denominado S.P.T. (Standard Penetration Test) e consiste na cravação de um barrilete amostrador padrão, através do impacto de um peso de 65,0 Kg caindo livremente de uma altura de 0,75m. O número de golpes necessários à cravação dos 30 cm finais, num trecho ensaiado de 0,45m, constitui o índice de resistência à penetração (HVORSLEV, 1965 e ABGE, 1977 e 1980). Estas sondagens, via de regra, foram utilizadas na investigação das fundações das obras da usina.

Nas sondagens de diâmetro superior a 2 1/2" não foram realizados ensaios S.P.T., e tanto o barrilete amostrador quanto o peso utilizado na sua cravação não são os padronizados. A amostragem é feita através de janelas laterais no amostrador ou de uma válvula na sua extremidade inferior, que permite a entrada do mate

rial durante o avanço, mas impede a sua saída. Estas sondagens, com diâmetro de até 16", foram utilizadas para a instalação de instrumentos ou poços para rebaixamento do nível freático nas fundações, e para a obtenção de amostras mais representativas das fundações, jazidas de materiais naturais de construção e cascalheiras.

As 1.462 sondagens analisadas, denominadas pelas siglas SP, PR (poço de rebaixamento), INA (indicador de nível da água), SIE e SPC-IV, seguidas de número indicativo, encontram-se assim distribuídas:

- Terraço Colúvio-Aluvial	: 37
- Terraço Aluvial	: 327
- Planície Aluvial	: 626
- Leito do Rio	: 149
- Cascalheira do Óleo Cru	: 323

2.3.3 Sondagens Rotativas

São representadas pela sigla SR seguida de número indicativo e permitem a investigação da cobertura de solo, mesmo com níveis concrecionados resistentes, e do maciço rochoso.

No trecho de solo o avanço é feito pelo método de perfuração a percussão, respeitando-se as características de amostragem e ensaios "in situ" daquele método. Ao atingir níveis resistentes ou o topo rochoso, utiliza-se o processo de perfuração por rotação, através de equipamento mecânico.

O método consiste no avanço de um barrilete amostrador acoplado a hastes metálicas, ao qual é aplicado um movimento de rotação. A perfuração é realizada por meio de uma coroa de aço com diamantes incrusta

dos ou, eventualmente, vídia (ABGE, 1977 e 1980).

Em Porto Primavera foram utilizados diferentes diâmetros de sondagens em função das suas diferentes finalidades. Para o estudo dos conglomerados do leito do rio utilizaram-se as de 86mm; para estudo das fundações e pedreiras as de 86mm e 4", e para a instalação de instrumentos nas fundações, diâmetros variáveis entre 2" e 6". No estudo da cascalheira do Óleo Cru foram utilizadas, ainda, sondagens de 86mm associadas a varejão com jato de água.

Os dados quantitativos das 499 sondagens interpretadas no presente estudo são os seguintes:

- Terraço Colúvio-Aluvial	:	4
- Terraço Aluvial	:	42
- Planície Aluvial	:	68
- Leito do Rio	:	349
- Cascalheira do Óleo Cru	:	36

2.3.4 Poços para Inspeção e Amostragem

Foram realizados visando-se a inspeção direta dos materiais de fundação e/ou a coleta de amostras para ensaios de laboratório, tendo sido identificados pela sigla PI seguida de número indicativo. Neste tipo de investigação a escavação é realizada manualmente, por meio de pá e picareta, tendo como limitação ao seu avanço a presença do lençol freático ou do topo rochoso. Normalmente não ultrapassam 10 metros de profundidade.

Em Porto Primavera foram escavados 26 poços, distribuídos entre o terraço colúvio-aluvial, o terraço aluvial e a planície aluvial. No caso das duas últimas unidades geomorfológicas, os poços executados(em

número de 19) necessitaram de serviços de escoramento e rebaixamento do lençol freático local por meio de poços de bombeamento, de forma a tornar possível o seu avanço.

2.3.5 Sondagens a Varejão

São investigações de simples reconhecimento, para detecção de depósitos arenosos, lajes concrecionadas ou afloramentos de rocha no leito de rios. Não permitem amostragem e as informações obtidas são inferidas, restringindo-se à superfície do terreno investigado.

O método consiste na cravação manual de uma haste metálica, ou de madeira com ponteira metálica, de diâmetro não superior a 1", no leito do rio, a partir de uma embarcação leve ou flutuante. Em depósitos arenosos sua penetração é da ordem de 0,4m, sendo limitada pela profundidade investigada, existência de lajes concrecionadas e afloramentos de rocha.

No leito do Rio Paraná foram realizadas 23 sondagens a varejão, denominadas SV, para verificação da existência e continuidade de laje conglomerática ferruginosa superficial.

2.3.6 Tubulão

Para inspeção direta e amostragem dos níveis conglomeráticos da Cascalheira do Óleo Cru-braço direito, foi construído um tubulão que atravessou todo o depósito aluvial e penetrou parcialmente no topo do Arenito Caiuá, atingindo uma profundidade final de 15,68m.

Sua escavação foi iniciada sob uma lâmina de água de

4,5m e realizada manualmente, avançando a partir de uma câmara de pressão à qual se aplicou ar comprimido, de forma a equilibrar as pressões interna e externa à câmara. O diâmetro do tubulão não foi fornecido.

2.4 Ensaios de Campo

Para pesquisa das fundações das obras da Usina de Porto Primavera foram realizadas diversas campanhas de ensaios de campo, objetivando-se a obtenção de parâmetros dos materiais das fundações para o projeto. A maioria desses ensaios teve finalidades exclusivamente geotécnicas, não tendo sido considerada no presente estudo.

Dos ensaios executados, somente os ensaios de permeabilidade "in situ" foram utilizados.

Foram realizados concomitantemente às sondagens e de acordo com as diretrizes publicadas pela ABGE (1975, 1977 e 1981), para ensaios de permeabilidade em solo e em rocha, e Mansur e Kauffman (in LEONARDS, 1962) para ensaios de rebaixamento. Nas tabelas 2.1 a 2.5 são apresentados os dados quantitativos e a distribuição dos 2.759 ensaios analisados.

2.4.1 Ensaios de Permeabilidade em solos

2.4.1.1 Ensaios de Infiltração

São ensaios realizados correntemente em furos de sondagens a percussão, ou nos trechos em solo de sondagens rotativas, através da introdução de água a carga constante, medindo-se a vazão necessária para se manter o seu nível constante na boca do furo. A ali-

mentação é feita por meio de um tambor com escala graduada e volume conhecido, onde se é possível obter o volume de água introduzido durante um certo intervalo de tempo (ABGE, 1981).

O trecho de ensaio corresponde ao intervalo entre o final do revestimento e o fundo do furo, e o espaçamento entre os ensaios é definido em função da maior ou menor heterogeneidade dos materiais atravessados.

A vazão considerada no cálculo da permeabilidade é a vazão estabilizada após atingida a saturação do solo, caracterizando uma percolação, a mais contínua e uniforme possível. São considerados, ainda, o diâmetro do furo, o comprimento do trecho ensaiado, a posição do nível da água no solo e a altura da coluna da água no furo.

Quanto à validade, os ensaios de infiltração apresentam algumas restrições que devem ser consideradas na sua interpretação. Variações bruscas na posição do nível da água, antes ou após a sua estabilização, podem estar relacionadas a fenômeno de "piping", colmatção ou presença de estruturas de origem orgânica como canalículos, formigueiros, etc. A posição do nível da água no solo também interfere com o tempo necessário para a sua saturação, e a aplicação de fórmulas no cálculo da permeabilidade apresenta limitações, pois se considera o solo ensaiado um meio homogêneo, isotrópico e onde permanece válida a lei de Darcy.

Em Porto Primavera foram realizados 1.084 ensaios em furos de sondagens com diâmetros variáveis entre 2 1/2" e 6".

2.4.1.2 Ensaios de Rebaixamento

Foram realizados em furos de sondagens a percussão denominados poços de rebaixamento (PR), com diâmetro 16", dispostos em baterias e associados a indicadores de nível da água (INA). Cada bateria de poços de rebaixamento do freático visou, principalmente, a retirada de amostras deformadas e indeformadas e a inspeção direta das fundações abaixo do nível da água no solo. Esse rebaixamento, no entanto, foi cuidadosamente acompanhado, constituindo um ensaio "in situ" e permitindo o cálculo da permeabilidade média do depósito aluvial atravessado (Mansur e Kauffman in LEONARDS, 1962).

Uma bateria para rebaixamento abrangeu um mínimo de 2 PR's e 5 INA's, até 6 ou 8 PR's com 18 e 12 INA's, respectivamente. Os PR's foram instalados em duas linhas ortogonais, distando 3,00m do centro do poço de inspeção e mantendo, entre si, um espaçamento de 3,00m. Os INA's foram instalados segundo os mesmos alinhamentos, porém a distâncias que variaram de 1,0 até 100,0m do PR correspondente, distância essa considerada o limite prático máximo da área de influência do rebaixamento. O dimensionamento da bateria foi função da profundidade de rebaixamento desejada.

Os PR's foram construídos até o topo do arenito, com tubos lisos ligados a tubos perfurados com diâmetro 8", cujo comprimento foi estabelecido em função da camada permeável. A parte perfurada foi envolvida por tela de "nylon" com malha de 1mm. Entre os tubos filtro e as paredes dos poços foram colocados pré-filtros formados por areia grossa e cascalho, e no restante do furo um "selo" de argila. O sistema de bombeamento foi constituído por uma bomba submersa de eixo vertical, com capacidade de 50m³/h, acoplada

a tubos galvanizados de diâmetro 4", instrumentos para medição de vazão e um sistema de descarga a longas distâncias.

Os INA's foram construídos até profundidades gradativamente menores, em função do seu afastamento dos PR's, em furos de percussão com diâmetro 2 1/2". Eram constituídos de tubos de PVC rígido, com diâmetro 1 1/2", perfurados nos 2,00m finais e revestidos por manta de "nylon" permeável. O espaço entre o tubo de PVC e as paredes dos furos foi preenchido por areia.

O ensaio propriamente dito consistiu no bombeamento ininterrupto da água do aquífero, de forma a provocar o rebaixamento e estabilização do lençol freático na maior profundidade possível. Durante o bombeamento foram registradas as leituras dos INA's e os volumes bombeados pelos PR's em função do tempo. Após estabilizado o nível da água na maior profundidade obtida, iniciou-se a escavação do PI, mantendo-se o sistema de rebaixamento em funcionamento.

No cálculo da permeabilidade foram considerados o diâmetro e número de poços do sistema, seu espaçamento, raios de influência, vazões, a profundidade do rebaixamento no ponto considerado e a espessura das camadas permeáveis. Segundo Mansur e Kauffman (in LEONARDS, 1962), as hipóteses admitidas para o estabelecimento das fórmulas utilizadas são as seguintes:

- Regime permanente de percolação nos poços e no aquífero;
- Aquífero com permeabilidade isotrópica e homogênea;

- Materiais incompressíveis face ao aumento das tensões efetivas devido ao rebaixamento;
- Para fluxo gravitacional a superfície de rebaixamento se desenvolve, totalmente, no interior da camada permeável e o aquífero é limitado, inferiormente, por uma camada impermeável;
- Para fluxo artesianos a superfície do rebaixamento se desenvolve, totalmente, no interior da camada impermeável superficial e o aquífero é limitado, inferiormente e superiormente, por uma camada impermeável;
- Para fluxo gravitacional os gradientes, ao longo de uma linha vertical que intercepta a superfície de rebaixamento, são iguais à declividade da superfície freática (hipótese de Dupuit-Forcheimer);
- Poços totalmente penetrantes.

Em Porto Primavera foram realizados 19 ensaios de rebaixamento, tendo sido todos analisados no desenvolvimento da presente pesquisa.

2.4.2

Ensaio de Permeabilidade em Rocha (Perda de água sob pressão)

Este ensaio é realizado em sondagens rotativas, apenas no maciço rochoso. Consiste na injeção de água sob pressão, em trechos de 3,00m de comprimento que são isolados através de obturadores de borracha, medindo-se a quantidade de água que se infiltra no maciço durante um certo tempo, sob uma dada pressão de injeção. É derivado do ensaio proposto por Lugeon, em 1933, para a verificação da estanqueidade das fundações de barragens (ABGE, 1975 e 1977).

A água é aplicada em 5 estágios de pressão, de acordo com o seguinte critério:

- 1º estágio - pressão mínima: $0,10 \text{ Kg/cm}^2$
- 2º estágio - pressão intermediária: $P \text{ máx.}/2$
- 3º estágio - pressão máxima: $(0,25 \text{ Kg/cm}^2) / \text{metro de profundidade do obturador.}$
- 4º estágio - pressão intermediária: $P \text{ máx.}/2$
- 5º estágio - pressão mínima: $0,10 \text{ Kg/cm}^2$.

Cada estágio de pressão é mantido durante um período de tempo de 10 min., após a estabilização dos valores de pressão e vazão, com leituras de vazão a intervalos de 1 min. Quando as perdas registradas são elevadas, repete-se o ensaio em subtrechos menores que 3,00m, de forma a se obter uma melhor definição do trecho mais permeável.

Após a realização do ensaio são calculadas as perdas de água específicas do maciço rochoso, dadas em $l/m \times \text{min.} \times \text{Kg/cm}^2$. Esse cálculo considera o diâmetro do furo, a profundidade do obturador, o comprimento do trecho ensaiado, a profundidade do nível da água no maciço, a carga da coluna da água no furo, a pressão manométrica e a perda de carga na tubulação. Posteriormente as perdas de água específicas são convertidas para permeabilidade equivalente ($K \text{ eq.}$).

Também é construída, para cada trecho ensaiado, uma curva absorção x pressão, através da qual é possível a interpretação do comportamento do maciço rochoso face ao aumento e decréscimo das pressões aplicadas. Desta forma são caracterizados os regimes permanen-

tes de escoamento, de natureza laminar ou turbulenta, e o comportamento do maciço rochoso no tocante ao fechamento ou abertura de estruturas.

Foram realizados 1.656 ensaios de perda de água sob pressão em Porto Primavera, dos quais cerca de 74 % nas fundações das estruturas de concreto, no leito do Rio Paraná. Foram ensaiados furos de sondagens rotativas com até 6" de diâmetro e alguns trechos em sondagens a percussão, mas a grande maioria dos ensaios se deu em sondagens de 86mm.

2.5 Ensaios de Laboratório

De todas as campanhas de ensaios de laboratório realizadas, somente as análises granulométricas e os ensaios de permeabilidade foram utilizados na presente pesquisa. Os demais ensaios não foram considerados por fornecerem outros parâmetros, de interesse apenas geotécnico.

Como a pesquisa dos materiais de cobertura visou a implantação de uma obra de engenharia, foram adotadas as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e do LCEC (Laboratório Central de Engenharia Civil de Ilha Solteira), de uso corrente na engenharia nacional e usinas da CESP.

2.5.1 Análises Granulométricas

Foram realizadas sobre amostras deformadas de solos, obtidas a partir das sondagens executadas. As amostras de solos da margem direita do Rio Paraná foram submetidas a análises por peneiramento e sedimentação, de acordo com a norma MB-32 da ABNT - "Método Brasileiro para Análise Granulométrica de Solos".

As amostras dos depósitos aluviais do leito do Rio Paraná, por conterem quantidade irrelevante ou nula de finos e por serem objeto de pesquisa para utilização em concreto, foram submetidas apenas a análise por peneiramento, de acordo com a mesma norma. A fração de cascalho (*) presente nesses depósitos que vem sendo utilizada como agregado em substituição à brita, foi classificada de acordo com a norma MB-6 da ABNT - "Amostragem para agregados".

As faixas granulométricas consideradas na presente pesquisa, para as diferentes frações dos solos foram, portanto, as seguintes:

FRAÇÃO	FAIXA GRANULOMÉTRICA (em mm)	NORMA (ABNT)
ARGILA	< 0,005	MB-32
SILTE	0,005 - 0,05	
AREIA FINA	0,05 - 0,42	
AREIA MÉDIA	0,42 - 2,00	
AREIA GROSSA	2,00 - 4,76	
CASCALHO 1	4,76 - 12,50	MB-6
CASCALHO 2	12,50 - 25,00	
CASCALHO 3	25,00 - 50,00	
CASCALHO 4	> 50,00	

(*)

De forma a compatibilizar a terminologia da presente pesquisa com aquela adotada no projeto, utilizou-se o termo "cascalho" em substituição a "pedregulho", que é empregado nas normas da ABNT para essa fração granulométrica.

Foram consideradas 2.905 análises granulométricas cujos quantitativos, por unidade geomorfológica, são apresentados nas tabelas 2.1 a 2.5 e encontram-se assim distribuídos:

- Terraço Colúvio-Aluvial : 439
- Terraço Aluvial : 340
- Planície Aluvial : 1.006
- Leito do Rio : 323
- Cascalheira do Óleo Cru : 797

Na margem direita do Rio Paraná foram utilizadas as amostras obtidas a partir de sondagens com diâmetro de 4", 6" e 16". No leito do rio só se utilizaram as amostras de sondagens com diâmetro de 16", uma vez que este diâmetro se mostrou o mais adequado para a obtenção de amostras representativas dos conglomerados ferruginosos e da fração granulométrica correspondente aos cascalhos. Em pesquisas anteriores no leito de rios da Bacia do Alto Paraná este diâmetro de sondagens foi utilizado para detalhamento de cascalheiras, possibilitando melhores amostragens (GUIDICINI e FERNANDES DA SILVA, 1972; NÜSKE e OLIVEIRA, 1972 e MONTICELLI e PEREIRA, 1976).

2.5.2 Ensaios de Permeabilidade

Foram realizados de acordo com o método MSL-09 do LCEC - "Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Meios Porosos em Laboratório", para ensaios de permeabilidade a carga constante (através do permeâmetro de Kapetski) (CESP, 1982 (?)a) e ensaios a carga variável. Os valores de permeabilidade obtidos a

partir de ensaios de adensamento dos solos não foram considerados na presente pesquisa, devido à grande imprecisão que essas medidas apresentam neste tipo de ensaio.

2.5.2.1 Ensaios de Permeabilidade a Carga Constante (Permeâmetro de Kapetski)

São ensaios realizados sobre amostras deformadas ou indeformadas de solos predominantemente arenosos, que são instaladas em um permeâmetro vertical e, após saturação, são submetidas a percolação de água com sentido de fluxo topo/base, a um gradiente hidráulico constante.

São realizadas duas ou três medidas do tempo necessário para o escoamento de um volume de 50 cm³ de água, sob gradientes da ordem de 0,3; 0,5 e 1,3, totalizando 6 a 9 medidas por ensaio.

O permeâmetro de Kapetski apresenta dimensões variáveis em função da granulometria do material a ser ensaiado. Para areias puras utiliza-se diâmetro de 10 cm e comprimento de 15 cm, e para cascalhos arenosos utiliza-se diâmetro de 40 cm e comprimento de 60 cm.

No caso das jazidas de materiais granulares, os ensaios foram realizados sobre amostras deformadas de material que passa na peneira 4 (ASTM) (4,76mm), após submetidas a quarteamento e secagem em estufa ou fogareiro. Cerca de 3 kg de cada amostra são moldados por pisoteamento e/ou vibração, em um cilindro de contenção no interior do permeâmetro, limitado no topo e na base por chapa perfurada ou tela metálica com gaze.

Os ensaios dos materiais presentes nas fundações da

barragem foram realizados sobre amostras indeformadas, moldadas nas dimensões do cilindro de contenção e instaladas no interior do permeâmetro com os mesmos cuidados.

A permeabilidade é obtida com base na lei de Darcy, para fluxo laminar, considerando-se o volume de água percolante, o tempo de escoamento, o gradiente hidráulico e a seção do corpo de prova.

Cuidado especial deve ser tomado na escolha das dimensões do permeâmetro, em função do diâmetro das partículas, e na moldagem das amostras deformadas, de forma a se evitar estratificações horizontais e heterogeneidade do material que acarretam, respectivamente, variações de permeabilidade na vertical e caminhos preferenciais de percolação.

Em Porto Primavera foram realizados 272 ensaios sobre amostras deformadas da Cascalheira do Óleo Cru e 161 ensaios sobre amostras do leito do rio (Cascalheira Santa Ilídia). Foram ensaiadas 139 amostras indeformadas dos materiais das fundações, na margem direita.

2.5.2.2 Ensaios de Permeabilidade a Carga Variável

São ensaios realizados sobre amostras deformadas ou indeformadas de solos com quantidade significativa de argila e baixas permeabilidades ($K < 10^{-3}$ cm/s), em permeâmetros verticais de dimensões reduzidas (diâmetro de 9cm e altura 10 cm).

A amostra é moldada e colocada no permeâmetro, ficando isolada das paredes do mesmo por uma camada de argila que evita percolação preferencial de água pelo

contato. No topo e base da mesma são instalados filtros de areia e a saturação do corpo de prova é efetuada através de percolação de água no sentido base/topo, de forma a provocar a saída do ar contido no solo. Utiliza-se água destilada e deaerada.

A seguir promove-se uma percolação através do corpo de prova no sentido topo/base, efetuando-se leituras de carga e vazão com o tempo, em uma proveta de 100ml, graduada de 1 em 1 ml, com 158 cm de comprimento e seção de 0,85 cm². As leituras são feitas a cada 15 cm de perda de carga ou, no caso de solos muito pouco permeáveis, com a frequência de uma por dia.

Construindo-se uma curva das permeabilidades assim obtidas em função do tempo, adota-se o critério para paralisação do ensaio. Curvas ascendentes (aumento de K com o tempo) indicam ocorrência de "piping", e curvas descendentes (diminuição de K com o tempo) indicam colmatção do corpo de prova. Caso se obtenha uma curva estabilizada, com um valor constante de K ao longo do tempo, considera-se o ensaio válido.

A permeabilidade corresponde ao valor médio do trecho estabilizado da curva e é calculada considerando-se as dimensões do corpo de prova, a área da proveta, as cargas aplicadas em função do tempo e a viscosidade da água.

As principais causas de erro na execução desses ensaios são a má vedação das paredes do permeâmetro pela argila, a absorção de água por essa argila, a não saturação do corpo de prova e a utilização de gradientes hidráulicos muito elevados (alterando o regime de fluxo). A utilização de água não destilada ou não deaerada pode, também, alterar os resultados devi

do à existência de sólidos em suspensão ou sais e ar dissolvidos.

Foram utilizados nesta pesquisa, 5 ensaios de permeabilidade a carga variável, realizados sobre amostras indeformadas de areias argilosas das fundações na margem direita do Rio Paraná.

3 DEPÓSITOS ALUVIAIS CENOZÓICOS

3.1 Metodologia de Estudo e Critérios Utilizados na Pesquisa

Os sedimentos aluviais cenozóicos presentes na margem direita e leito do Rio Paraná, no local da Barragem de Porto Primavera, foram estudados por métodos indiretos e diretos de investigação e ensaios de campo e laboratório.

A distribuição espacial desses sedimentos, e suas feições deposicionais, foram inicialmente obtidas a partir de fotointerpretação geológica e complementadas por trabalhos de mapeamento geológico ao longo de toda a área. Durante a fase de projeto executivo foram mapeadas, ainda, as superfícies das escavações e valetas de drenagem.

As sondagens mecânicas realizadas, descritas no item 2.3, permitiram uma definição das espessuras dos materiais atravessados, profundidade do topo rochoso, contatos geológicos e caracterização tátil-visual dos sedimentos e da rocha. As amostras obtidas a partir dessas sondagens, dependendo do diâmetro e finalidade do furo, foram submetidas a análises granulométricas.

Os ensaios SPT (Standard Penetration Test) realiza-

dos em sondagens a percussão com diâmetro 2 1/2" , possibilitaram a caracterização dos solos atravessados, de acordo com o seu estado, segundo o critério proposto por TERZAGUI e PECK (1969) e adaptado por DE MELLO e TEIXEIRA (1967) às condições brasileiras. Este critério de classificação, amplamente utilizado na engenharia civil como indicador do grau de compactidade ou consistência dos solos, apresenta as seguintes correlações:

SOLO	COMPACIDADE OU CONSISTÊNCIA	SPT
AREIAS E SILTES	FOFA	0 - 4
	POUCO COMPACTA	5 - 8
	MEDIANAMENTE COMPACTA	9 - 18
	COMPACTA	19 - 40
	MUITO COMPACTA	>40
SILTE ARGILOSO E ARGILA	MUITO MOLE	<2
	MOLE	2 - 5
	MÉDIA	6 - 10
	RIJA	11 - 19
	DURA	>19

Nas sondagens a percussão adotou-se como topo de rocha o impenetrável à cravação do barrilete amostrador, no ensaio SPT, de acordo com os critérios da ABGE (1977).

As permeabilidades dos solos foram investigadas por meio de ensaios de infiltração nos furos de sondagens, ensaios de rebaixamento e ensaios de permeabilidade a carga constante e a carga variável em laboratório. As grandes variações verificadas nos valores de permeabilidade obtidos nos ensaios de infiltração, inclusive para solos de composição granulométrica similar, não permitiram sua utilização, tendo sido definidas as faixas de variação desse parâmetro através dos ensaios de laboratório, associados às suas curvas granulométricas. Os ensaios de rebaixamento forneceram valores médios de permeabilidade para todo o pacote de solo ensaiado.

As permeabilidades do maciço rochoso foram obtidas a partir dos ensaios de perda de água sob pressão. Os valores de perda de água específica ($l/m \times min \times Kg/cm^2$) foram convertidos para permeabilidade equivalente (K_{eq}).

As granulometrias dos solos foram obtidas a partir de análises granulométricas realizadas sobre amostras de furos com diâmetro de 4" (terraço colúvio-aluvial), 6" (terraço e planície aluvial) e 16" (leito do rio e Cascalheira do Óleo Cru). Essas amostras foram coletadas ao longo de todo o furo, em trechos que variaram de 0,5 a 2m, tendo atingido eventualmente até 4 ou 5m, em função da homogeneidade apresentada pelo material durante a perfuração.

Os resultados das análises são apresentados na forma de curvas granulométricas e histogramas de frequência relativa, para as diferentes frações dos solos ensaiados.

3.2 Unidades Geomorfológicas

Os estudos desenvolvidos na margem direita e leito do Rio Paran le^o levaram definio de quatro unidades geomorfolgicas distintas denominadas terrao colvio-aluvial, terrao aluvial, plancie aluvial e leito do rio (SUGUIO et al., 1984). Estas unidades podem ser identificadas na figura 3.1 e visualizadas no mapa geolgico e geomorfolgico que constitui a figura 3.2.

a) Terrao Colvio-Aluvial

Forma uma superfcie relativamente plana que se desenvolve entre as cotas 250 e 270m. Compreende um pacote de colvios com espessura varivel entre 2 e 12m, sotoposto por sedimentos aluviais com espessura mdia em torno de 6m.

O embasamento representado por Arenito Caiu, que pode aflorar em pontos localizados no fundo das calhas das drenagens que cortam o terrao, como se observa no Ribeiro Combate, a cerca de 3,5 km a montante da estaca zero da linha de referncia, no sentido N-NE.

b) Terrao Aluvial

No eixo da futura barragem apresenta uma extenso de 3,4 km. Com uma superfcie mais ou menos plana, variando entre as cotas 244 e 246m, caracterizado por um pacote aluvial com espessura mdia em torno de 10m, podendo atingir espessuras inferiores a 6m, at cerca de 13m.

Encontra-se assentado parte sobre arenito e parte sobre basalto, localmente imtemperizado na for

ma de solo residual.

c) Planície Aluvial

Estende-se por cerca de 5,5 km ao longo do eixo da barragem projetada. A sua superfície é mais ondulada que a do terraço aluvial, com elevações variando entre 237 e 240m.

Nesta unidade podem ser reconhecidas três subunidades geomorfológicas: planície do Rio Baía, paleo-ilha e planície do Rio Paraná.

c.1. Planície do Rio Baía

Com uma extensão superior a 2,3 km, na linha de referência, compreende uma superfície quase plana em torno da cota 238m, exceto na margem esquerda do Rio Baía, onde ocorre o seu dique marginal, o qual forma uma pequena ondulação na cota 239m.

É ocupada, em parte, pelo atual curso do Rio Baía e pelas lagoas Combate e Paraguaia, e encontra-se separada da planície do Rio Paraná por pequenas elevações alongadas, de cotas um pouco mais elevadas, denominadas paleo-ilhas.

A espessura média do pacote de sedimentos é da ordem de 5m e estes se encontram sotopos tos pelos arenitos da Formação Caiuá.

c.2. Paleo-Ilha

A paleo-ilha de maior expressão se estende por cerca de 2,3 km ao longo da linha de re-

ferência, entre o Rio Baía e o Rio Paraná, e apresenta cotas variáveis entre 238 e 240m.

Sua superfície é recortada por complexos padrões de paleocanais, aparentemente constituídos pela justaposição de barras longitudinais originadas em canais fluviais entrelaçados. Exibem cordões arenosos recurvados e alongados na direção aproximada do Rio Paraná, separados entre si por zonas contendo solos argilosos com matéria orgânica, de idade recente.

A espessura média dos sedimentos varia entre 4 e 6m e seu substrato é representado por Arenito Caiuá, solo residual de Arenito Caiuá e basalto.

c.3. Planície do Rio Paraná

Com 1,3 km de extensão na linha de referência, situa-se ao redor da cota 239m. com altitudes inferiores às da paleo-ilha, porém superiores à da planície do Rio Baía.

Ao longo da margem direita do rio apresenta um dique marginal de largura variável entre 200 e 500m e que chega a atingir cotas superiores a 240m. Este dique apresenta "línguas" de material de rompimento, que avançam sobre a planície.

A espessura média dos sedimentos é da ordem de 5m e o pacote é sotoposto por Arenito Caiuá que se encontra, em parte, intemperizado em solo.

d) Leito do Rio Paraná

Esta unidade geomorfológica se encontra permanentemente submersa, abrangendo o atual leito do Rio Paraná. Nela estão incluídos as cascalheiras do Óleo Cru e Santa Ilídia, esta última no próprio sítio e imediatamente a montante das estruturas de concreto.

Na linha de referência atinge uma extensão de cerca de 1,5 km e tem a sua superfície, que constitui o fundo do Rio Paraná, variando entre as cotas 230 e 235m. Junto à margem esquerda, ao longo do canal principal do rio, essas cotas variam entre 224 e 229m.

As espessuras do pacote aluvial oscilam entre 1 e 8m junto à margem direita, mas aumentam no sentido do canal principal, onde podem atingir até 13m.

O substrato rochoso é representado pelo Arenito Caiuã e basalto e ocorrem diversos níveis de arenitos e conglomerados ferruginosos do topo até a base do pacote aluvial.

3.3 Características do Embasamento

O substrato dos depósitos cenozóicos é composto, na área, pelas formações Serra Geral do Grupo São Bento e Caiuã do Grupo Baurú.

A Formação Serra Geral, constituída por rochas eruptivas predominantemente básicas, intercaladas por arenitos semelhantes aos da Formação Botucatu e cortadas por diques e soleiras de diabásio, apresenta a maior espessura conhecida na Bacia do Paraná (1529m),

verificada na sondagem 2-PE-1-SP, realizada pela Petrobrás em Presidente Epitácio no Estado de São Paulo. Como pode ser observado na seção geológica que constitui as figuras 3.3 a 3.5, essa unidade geológica só entra em contato direto com os depósitos sedimentares em trechos do terraço aluvial (entre as estacas 10 e 75) e paleo-ilha (estacas 380 a 390) e ao longo do canal principal do Rio Paranã, onde os arenitos foram totalmente erodidos. No restante da área os sedimentos aluviais se encontram sotopostos somente pela Formação Caiuá.

A topografia da superfície do embasamento pode ser considerada plana ao longo do terraço e planície aluviais, com as elevações variando entre 231 e 235m. Das proximidades da estaca 40, no sentido do terraço colúvio-aluvial, as elevações passam de 235m para 245m na estaca zero. No leito do rio as elevações variam de 235m, junto à margem direita, até cotas inferiores a 215m ao longo do canal principal.

A espessura total da camada de arenito se apresenta bastante reduzida, não ultrapassando 15m. As irregularidades do topo dos basaltos contribuíram para que ocorram variações significativas nessas espessuras, com exceção do trecho da planície do Rio Baía, onde o Arenito Caiuá mantém espessuras médias mais elevadas, variando entre 10 e 13m.

3.3.1 Arenitos da Formação Caiuá

A camada de arenito se encontra intemperizada na sua porção superior estando inclusive, em grandes extensões do seu topo, totalmente alterada em solo residual fóssil, que ainda mantém preservadas as estruturas da rocha original. Trata-se de um solo arenoso fino e compacto, de coloração marrom-avermelhada a cinza

esverdeada, com até 15% de argila e permeabilidades variáveis entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Sua espessura média é da ordem de um metro, podendo localmente atingir até 2m.

A rocha propriamente dita é representada por uma areia fina a média com matriz siltico-argilosa e cimentação ferruginosa ou carbonática. Do seu topo até a cota 230m aproximadamente, predomina a cimentação ferruginosa, e o arenito se mostra mais intemperizado, apresentando coloração marrom-amarelada. Abaixo da cota 230m predomina a cimentação carbonática e o arenito apresenta coloração marrom-avermelhada ou roxa e se mostra menos intemperizado, a não ser em trechos localizados da base da camada, onde ocorre uma faixa de alguns centímetros até 1,5m de espessura de arenito mais intemperizado.

De modo geral as permeabilidades equivalentes obtidas para o maciço rochoso variaram entre 10^{-4} e 10^{-3} cm/s.

Do ponto de vista estrutural a camada de arenito apresenta seqüências de estratificações planas ou cruzadas, separadas por diastemas subhorizontais. Os bancos de arenito assim diferenciados possuem dimensões métricas e acamamento com espessura milimétrica a centimétrica, com mergulhos variáveis entre 2° e 25° até, eventualmente, 30° . Ocorrem, também, bancos com estrutura maciça.

Entre as elevações 229 e 230m, em toda a extensão do terraço e da planície aluvial, foi detectada a presença de uma descontinuidade subhorizontal, caracterizada por uma faixa de arenito fortemente intemperizado, com 0,1 a 1,5m de espessura e K eq. de 5×10^{-3} cm/s. Essa descontinuidade se desenvolve, em quase

toda a sua totalidade, na zona de transição entre as cimentações ferruginosa e carbonática da rocha e pode representar um diastema entre diferentes camadas de arenito, uma vez que ocorrem estratificações diversas acima e abaixo da mesma.

Foram observadas, ainda, fraturas subhorizontais e inclinadas, com atitudes variáveis, instaladas nos planos de acamamento, e fraturas com atitude EW/subverticais de distribuição irregular e extensão não superior a 10m. Ocorrem, também, "bolsões" de arenito to talmente intemperizado em solo.

3.3.2 Basaltos da Formação Serra Geral

Os basaltos presentes na área distribuem-se em dois domínios distintos. Um deles compreende derrames com espessuras variáveis entre 15 e 30m, os quais foram denominados macroderrames e ou outro, dos microderrames, compreende derrames com espessuras entre 3 e 4m e reduzida continuidade lateral. Como pode ser observado nas figuras 3.3 a 3.5, os contatos entre esses domínios situam-se próximos às estacas 40 e 530 da linha de referência.

De maneira geral os derrames são constituídos, na base, por basaltos maciços de coloração castanho-avermelhada e esverdeada, passando gradativamente para basaltos vesiculares e/ou amigdaloidais e mesmo brechas basálticas arenosas e/ou carbonáticas, de cor castanho-avermelhada, no topo. Os contatos entre macroderrames se apresentam intemperizados e intensamente fraturados enquanto os microderrames, via de regra, apresentam contatos soldados, caracterizados por uma auréola de cor avermelhada.

Sondagens mais profundas, realizadas no leito do Rio

Paraná, detectaram a existência de arenito fino vermelho, intratrapeano, silicificado, com topo entre as cotas 180 e 182m. Apresenta mergulho de cerca de 30° para S-SE e espessura não superior a um metro.

O contato com os arenitos da Formação Caiuá é do tipo erosivo e apresenta uma brecha de coloração castanho-avermelhada, constituída por fragmentos de basalto envoltos em matriz arenosa, e com espessuras de alguns centímetros até 2,5m. Apresenta-se bastante intemperizada e extremamente fraturada, com K eq. de 10^{-3} e 10^{-2} cm/s mas que atingem, também, valores mínimos (10^{-6} cm/s) ou muito elevados ($> 10^{-2}$ cm/s).

Ao longo da margem direita, o topo do maciço rochoso basáltico apresenta ocorrências localizadas de solo argilo-siltoso a siltico-argiloso, rijo, castanho-avermelhado, com permeabilidades da ordem de 5×10^{-5} cm/s. Sua espessura não ultrapassa 4,5m no terraço aluvial e 2m na paleo-ilha. Abaixo desse solo, e em quase toda a extensão do terraço colúvio-aluvial e terraço aluvial, a rocha se encontra muito intemperizada e fraturada até profundidades entre 1,5 e 15m do topo, com K eq. que vão desde 3×10^{-4} cm/s a mais de 10^{-2} cm/s, e mais freqüentemente de 2 a 3×10^{-3} cm/s.

O restante do maciço, até as profundidades investigadas, se mostra são ou muito pouco intemperizado e pouco fraturado, com K eq. muito variáveis, mas mais freqüentemente entre 3 e 5×10^{-4} cm/s.

As principais estruturas observadas correspondem aos contatos entre derrames, com fraturamento subhorizontal associado, e fraturas subverticais nos basaltos maciços do corpo dos derrames. Ocorrem, ainda, descontinuidades subhorizontais em faixas de grande

continuidade lateral, que podem ou não estar associadas a contatos entre derrames.

Essas descontinuidades correspondem a zonas de intenso fraturamento subhorizontal, com espessura entre 0,1 e 1m. As fraturas se encontram em geral abertas, com paredes alteradas e ocorrência de película argilosa, e apresentam K eq. superiores a 10^{-2} cm/s. Foram detectadas em elevações médias relativamente bem definidas com intervalos de cerca de 5m no domínio dos microderrames e 10 ou 15m nos macroderrames.

No leito do Rio Paraná, na zona do contato entre os macro e os microderrames, foram detectadas ocorrências localizadas de brecha basáltica hidrotermalizada. A mais significativa situa-se, aproximadamente, entre as estacas 523 e 530 da linha de referência e tem uma espessura máxima de 15m, não sendo conhecida sua extensão. Encontra-se sotoposta pelo domínio dos microderrames e seus contatos são do tipo gradacional, com auréola avermelhada. É constituída por fragmentos de basalto alterados em argilominerais dos grupos da esmectita e paligorskita, em matriz paligorskítica, e sua coloração é castanho-avermelhada ou cinza-azulada. As zonas castanhas apresentam sistemas de fraturas em padrões poligonais, ou concêntricos e radiais, preenchidas por paligorskita (IPT, 1985 a e b e TRESSOLDI et al., 1986).

3.4 Características dos Sedimentos Cenozóicos

Além da constituição litológica geral, dois aspectos se sobressaem entre as características dos sedimentos cenozóicos: a presença de níveis conglomeráticos, representados por areias com cascalhos e cascalhos arenosos, e os arenitos e conglomerados ferruginosos.

a) Níveis Conglomeráticos

A análise dos dados de subsuperfície e as observações de campo nos taludes do terraço aluvial, barrancos do Ribeirão Combate e Rio Baía, e escavações na margem direita e leito do Rio Paraná, permitiram reconhecer quatro níveis conglomeráticos principais, como pode ser observado nas figuras 3.3 a 3.5.

O mais antigo ocorre na base do terraço colúvio-aluvial, aproximadamente ao longo da cota 245m, sendo constituído por grandes seixos de quartzo, quartzito e sílex, seguidos por calcedônia, em matriz arenosa quartzosa.

Estratigraficamente acima deste, entre as elevações 253 e 255m, ocorre um nível de cascalho cujos seixos são, predominantemente, de quartzo e quartzito, e rarissimamente de calcedônia e/ou sílex. Corresponde à camada superior do pacote aluvial, no terraço colúvio-aluvial.

O terceiro nível se desenvolve ao redor da cota 235m, na base de todo o terraço e planície aluvial. É constituído por grandes seixos de calcedônia, ágata, quartzo e quartzito, em matriz arenosa quartzosa.

Abaixo da elevação 235m, no leito do Rio Paraná, todo o pacote aluvial apresenta areias quartzosas com porcentagens variáveis de cascalho, e camadas de cascalhos arenosos, constituindo o quarto nível conglomerático. Os seixos, subarredondados, achatados e ovóides são, na sua maioria, de ágata zonada e calcedônia, e secundariamente de quartzo, quartzito, arenitos, siltitos e estromatólitos silicificados (CESP, 1975e; 1979a e 1980b e

BOGGIANI et al., 1985). Seus diâmetros variam entre 1 e 15cm predominando os seixos de 2 a 5 cm.

Os dois primeiros níveis, mais antigos, parecem pertencer à chamada "geração quartzítica", de origem essencialmente fluvial, predominantemente de calha, depositada em regime torrencial associado a canais entrelaçados (GUIDICINI, 1973 e FULFARO, 1974). Os dois últimos pertenceriam à "geração calcedônica" (GUIDICINI, 1973 e FULFARO, 1974) ou "geração ágata" (BOGGIANI et al., 1985), sedimentada em regime muito semelhante ao atual, representando depósitos de barras de meandros.

Entre as elevações 240 e 255m do terraço colúvio-aluvial ocorre, ainda, um nível conglomerático com seixos da ordem de 10 cm de calcedônia negra, e seixos de quartzito com 3 a 4 cm de diâmetro, em matriz arenosa. Pela sua posição estratigráfica e constituição litológica, este nível de cascalho parece ter se originado do retrabalhamento dos níveis mais elevados, correspondendo aos "depósitos de meia encosta" descritos por FULFARO (1974).

b) Arenitos e Conglomerados Ferruginosos

Nos depósitos sedimentares da margem direita e leito do Rio Paraná, ocorrem níveis de areias e cascalhos mais ou menos cimentados por compostos de ferro constituindo, respectivamente, arenitos e conglomerados ferruginosos. Apresentam uma certa continuidade, podendo até formar lajes de elevada resistência mecânica e espessuras variáveis.

Um desses níveis se desenvolve ao longo da cota 255m, no topo do aluvião e base dos colúvios do

terraço colúvio-aluvial. A camada de cascalho se encontra parcialmente limonitizada, constituindo níveis descontínuos e localizados que, às vezes, podem ser reconhecidos apenas pela presença de concreções ferruginosas mais resistentes.

No terraço aluvial, aproximadamente entre as cotas 240 e 241m, foi detectada a presença de níveis concrecionados, com espessuras entre 0,1 e 0,5m, em ocorrências de extensão não superior a 150m. Tratam-se de arenitos fortemente cimentados por compostos de ferro que, no talude do terraço, podem apresentar mergulhos de 25° a 30° para S-SE, sugerindo que a limonitização tenha ocorrido após a formação do terraço e sua erosão parcial, que deu origem ao talude natural que desce para a planície de inundação (figura 3.6). Na camada superficial também ocorre areia ferruginizada, na forma de concreções esporádicas.

Ao longo de toda a zona basal do terraço e planície aluviais, aproximadamente na cota 235m, as sondagens realizadas acusaram a existência de concreções ferruginosas esporádicas, associadas às areias e cascalhos, indicando a presença de ocorrências localizadas de um nível concrecionado irregular e fracamente cimentado. Estes mesmos tipos de ocorrências foram observados na camada superficial dos sedimentos da paleo-ilha, entre as elevações 238 e 240m.

No leito do Rio Paraná, as sondagens e escavações realizadas na área da barragem e a pesquisa das cascalheiras Santa Ilídia e Óleo Cru, mostraram a existência de arenitos e conglomerados ferruginosos entremeados aos depósitos sedimentares. Tratam-se de camadas aproximadamente horizontais,

com espessuras entre 0,10 e 0,30m (mas que podem atingir, excepcionalmente, até 1,5m) e variados graus de cimentação, que lhes confere diferentes resistências à desagregação mecânica. Quando fortemente cimentadas, formam lajes muito resistentes, tendo dificultado o avanço das sondagens e das escavações; quando fracamente cimentadas correspondem a impregnações ferruginosas na matriz arenosa, que se desagregam facilmente, tendo inclusive dificultado sua identificação nas amostras coletadas.

Foram detectados até 7 níveis concrecionados, porém os mais contínuos distribuem-se entre as cotas 230 e 235m (figura 3.5). Embora apresente irregularidades e depressões, sómente a laje mais superficial, da cota 235m, tem sua continuidade confirmada, estendendo-se por quase toda a área investigada, entre a margem direita e o canal principal do Rio Paraná. No local das estruturas de concreto, junto ao canal, as obras de desvio do rio permitiram observar que, ao longo do canal, a mesma se encontra fragmentada, deslocada e alveolada por ação das águas do rio (figura 3.7).

3.4.1 Terraço Colúvio-Aluvial

3.4.1.1 Colúvios

Constituem uma camada bastante homogênea de areia fina argilosa de coloração avermelhada, porosa, fofa no topo e com concreções ferruginosas na base. Na figura 3.8 pode-se observar que a fração areia fina é predominante, com teores entre 60 e 80%, seguida da fração argila com 15 a 25%. As frações silte e areia média participam com menos de 10% e a fração areia grossa, quando ocorre, raramente atinge 5%. Suas per

meabilidades situam-se em torno de 3×10^{-3} cm/s.

As características granulométricas e a cor sugerem que os colúvios tenham se originado, predominantemente, a partir da Formação Caiuá.

3.4.1.2 Pacote Aluvial

Na sua parte superior apresenta uma camada de areia predominantemente fina com cascalho e concreções ferruginosas, de espessura entre 0,5 e 2,5m, superposta a uma camada de areia fina e média, com reduzidos teores de argila e espessura entre um e 3m, ambos com coloração avermelhada.

As análises granulométricas realizadas, cujos resultados se encontram resumidos nas figuras 3.9 e 3.10, mostram que, na camada superior, as porcentagens de areia fina podem chegar a 100%, enquanto as frações média e grossa nunca ultrapassam 45 e 15% respectivamente. Os cascalhos, predominantemente do tipo I, podem ocorrer em teores menores que 5%, porém atingem até 55% em alguns níveis de maior concentração. Na camada inferior os teores de areia fina variam entre 30% e 85%, ocorrendo secundariamente areia média e grossa e porcentagens de argila que atingem, no máximo, 16%.

As permeabilidades obtidas para a camada de areia com cascalho são, em geral, da ordem de 10^{-2} cm/s, porém a ocorrência eventual de 6% a 17% de argila pode reduzir esses valores para 10^{-3} ou 10^{-4} cm/s. A camada areno-argilosa apresenta permeabilidades variáveis entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s.

A parte intermediária do pacote aluvial é constituída por areia fina e média cinza-amarelada, pouco a muito compacta, com até 6% de cascalho do tipo I. Sua espessura varia entre 1,5 e 6,5m. Como pode ser observado na figura

3.11, a fração areia fina predomina com um teor variável entre 50% e 100%. Seguem-se as frações média e grossa com teores máximos de 55% e 10%, respectivamente. Suas permeabilidades são da ordem de 5×10^{-2} cm/s.

A parte basal apresenta areia fina e média cinza-amarelada, com níveis de elevados teores de cascalho. Sua espessura se situa entre 0,5 e 2m. Na figura 3.12 são apresentados os resultados das análises granulométricas, que mostram porcentagens de areia fina variáveis entre 20% e 90%, secundadas por areia média e areia grossa. Os teores de cascalho se apresentam bastante variáveis, podendo atingir mais de 50%. Predominam os cascalhos do tipo I e, secundariamente, dos tipos II e III. As permeabilidades são da ordem de 10^{-2} cm/s.

Além dos materiais acima descritos verificou-se a ocorrência, no pacote aluvial, de níveis argilosos de espessura centimétrica e continuidade restrita. Como pode ser observado na figura 3.3, esses níveis podem ocorrer na parte superior do aluvião, na forma de uma argila rija a dura de coloração vermelha, ou nas suas partes intermediária e basal, como argilas ou areias argilosas plásticas de coloração esbranquiçada ou cinzenta.

3.4.2 Terraço Aluvial

Na parte superior deste terraço predomina areia fina pouco argilosa amarela-acinzentada a cinza esbranquiçada, fofa, com espessuras entre 1,5 e 6m e permeabilidades entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s. Na figura 3.13 pode-se observar que a fração areia fina pode chegar a 100%, embora teores de até 70% de areia média e 11% de areia grossa possam, eventualmente, ocorrer. As frações argila e silte têm sempre incidência infe

rior a 2%, porém podem atingir valores de até 10% e profundidades superiores a 10m.

Localmente são encontradas ainda, além de concreções ferruginosas, ocorrências de argila arenosa mole cinza e amarela; areia argilosa fofa acinzentada e areia fina argilosa com restos vegetais, sempre com permeabilidades inferiores a 10^{-5} cm/s. Como se observa na figura 3.14, onde são apresentados histogramas de frequência relativa em função da profundidade, para diferentes porcentagens de argila, as maiores concentrações dessa fração (10% a 44%) se situam entre zero e 4m, correspondendo a essas ocorrências.

A parte intermediária do pacote aluvial apresenta uma espessura variável entre 1,5 e 8m de areia fina a média lavada, compacta, cinza-esbranquiçada, com menos de 1% de cascalho e permeabilidades de 5×10^{-2} cm/s. Erraticamente ocorrem lentes de areia fina a grossa com até 13% de cascalho e espessuras de 0,5 a 4m. Excepcionalmente se verificou a presença de uma lente com 33% de seixos.

Na base do terraço ocorre areia fina a grossa compacta, cinza-esbranquiçada, com cascalho e fragmentos esporádicos de conglomerado ferruginoso, constituindo uma camada cuja espessura se situa entre 0,5 e 2m. As análises granulométricas representadas na figura 3.15 mostram que pode predominar areia fina ou areia média e a fração areia grossa raramente ultrapassa 10% nas amostras. As porcentagens de cascalho variam entre 5% e 45% podendo atingir, eventualmente, até 80%.

Os ensaios de campo e laboratório acusaram valores de permeabilidade da ordem de 10^{-2} cm/s para este horizonte.

3.4.3 Planície Aluvial

3.4.3.1 Planície do Rio Baía

Superficialmente apresenta argilas arenosas moles de coloração cinzenta, em grande parte com restos vegetais e lentes erráticas de areia argilosa. Os teores de argila chegam a 75% (figura 3.16), distribuindo-se até 3m de profundidade, que corresponde à maior espessura da camada (figura 3.14). As permeabilidades registradas são da ordem de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s para as argilas e 10^{-3} a 10^{-4} cm/s para as lentes arenosas.

Abaixo da zona superficial encontra-se uma areia predominantemente fina a média, em geral lavada, fofa a compacta, de coloração amarela-acinzentada a cinza-esbranquiçada e espessuras entre 0,5 e 2m. Suas permeabilidades são da ordem de 5×10^{-2} cm/s.

Como pode ser observado nas figuras 3.14 e 3.16, a fração argila pode ocorrer com uma incidência de até 15% ou mais, reduzindo as permeabilidades para 10^{-3} a 10^{-4} cm/s. As frações areia grossa e cascalho em geral nunca ultrapassam 1%.

A zona basal é caracterizada por uma areia cinza-esbranquiçada compacta com cascalho, irregularmente cimentada por limonita e com permeabilidades da ordem de 10^{-2} cm/s. As porcentagens de areia fina e média são bastante variáveis, chegando a 90% e 60% respectivamente, e a fração areia grossa raramente atinge 35%. Os teores de cascalho também variam consideravelmente até 55%, tendo sido registrada uma amostra com 70% de seixos (figura 3.17). A espessura desta camada nunca ultrapassa 2m.

O dique marginal do Rio Baía é constituído por uma areia argilosa fofa, amarela-acinzentada a cinza, com lentes erráticas de argila arenosa. Sua espessura varia entre 2 e 4m. Os teores de argila são sempre superiores a 11%, o que confere aos materiais que compõem esta feição sedimentar, permeabilidades da ordem de 10^{-5} cm/s.

3.4.3.2 Paleo-Ilha

A parte superior desta subunidade geomorfológica é constituída por mais de 60% de areia fina amarela-acinzentada a cinza-esbranquiçada, fofa a compacta, com até 12% de argila e concreções ferruginosas esparsas. Sua espessura varia entre 2,5 e 4m e os valores de permeabilidade se situam entre 10^{-3} e 10^{-5} cm/s. Os teores de areia grossa e cascalho não ultrapassam 1%, enquanto a fração areia média, com teores em geral inferiores a 4%, pode ocorrer em proporções variáveis, até excepcionalmente 44% (figura 3.18).

Em zonas topograficamente mais baixas, com desníveis da ordem de 2m em relação à superfície, ocorrem depósitos de até 3m de espessura de argilas arenosas moles, cinzentas, com ou sem matéria orgânica. Como pode ser observado na figura 3.19, os teores de argila podem atingir até 68% nessas ocorrências, e as permeabilidades se mostram inferiores a 10^{-6} cm/s.

A parte intermediária do depósito apresenta areia predominantemente fina, cinza-esbranquiçada, limpa e compacta. Possui espessuras entre 0,5 e 4m e permeabilidade de 5×10^{-2} cm/s.

Na base do pacote aluvial ocorre areia cinza-esbranquiçada com 5% a 40% de cascalho, irregularmente cimentada por limonita. As análises granulométricas

realizadas mostram que predomina a fração areia fina, com teores entre 40% e 80%, enquanto as frações areia média e areia grossa participam com menos de 20% e 10%, respectivamente. Eventualmente pode ocorrer até 12% de argilas e siltes e 80% de seixos (figura 3.20).

A espessura desta camada varia entre 0,5 e 1,5m e suas permeabilidades se situam na faixa de 10^{-2} a 10^{-4} cm/s.

3.4.3.3 Planície do Rio Paraná

Apresenta, na superfície, uma camada de argila arenosa plástica predominantemente mole, com ou sem matéria orgânica e espessuras entre 0,5 e 2,5m. Como se observa nas figuras 3.19 e 3.21, os teores de argila podem chegar a 65%, ocorrendo ainda até 30% de silte e as frações areia fina e areia média em proporções variáveis. As permeabilidades nesta camada variam entre 10^{-6} e 10^{-7} cm/s.

A parte intermediária do pacote aluvial é composta por areia fina compacta, amarela-acinzentada, com 3 a 11% de argila e menos de 1% de areia grossa e cascalho. A fração areia média ocorrem em porcentagens variáveis podendo atingir, eventualmente, até 60%.

Apresenta permeabilidades entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s e espessuras de até 2m, exceto na área do dique marginal do Rio Paraná, onde os sedimentos argilosos se encontram diretamente assentados sobre areia com cascalho.

A parte basal é constituída por areia fina e média cinza-esbranquiçada, irregularmente cimentada por limonita, com 10 a 70% de cascalho e espessuras de 0,5 a 1,5m. Sua permeabilidade varia de 10^{-2} a 10^{-4}

cm/s e as frações argila, silte e areia grossa raramente ultrapassam 10% (figura 3.22).

O dique marginal é formado por uma camada de areia argilosa fofa, amarela-acinzentada a cinza, com até 2m de espessura e permeabilidades entre 10^{-3} e 10^{-5} cm/s, que repousa sobre argilas moles de natureza orgânica ou arenosa. A espessura desta camada argilosa subjacente varia entre 0,5 e 2m e suas permeabilidades são inferiores a 10^{-6} cm/s.

3.4.4 Leito do Rio

Esta unidade é constituída, fundamentalmente, por um pacote de areias quartzosas de granulometria variada, associadas ou não a cascalhos, e de cascalhos arenosos com níveis de areia e/ou cascalho, cimentados por compostos de ferro na forma de arenitos e conglomerados ferruginosos.

As análises granulométricas realizadas sobre amostras da cascalheira Santa Ilídia mostraram teores predominantes de areia fina e areia média, contribuindo a fração areia grossa com menos de 4% (figura 3.23). Nas lentes de cascalho a concentração de seixos é variável, podendo atingir até 82%, sempre com matriz arenosa. Nessas lentes predominam os cascalhos dos tipos I e II, com 30% a 60% sobre o cascalho total, secundados pelos tipos III (menos de 15%) e IV (menos de 1%). Os cascalhos do tipo I são, predominantemente, de quartzo e quartzito (cerca de 70%) e os dos tipos II e III de calcedônia e ágata (mais de 50%) (CESP, 1980 b).

Ensaio de rebaixamento realizados no leito do Rio Paraná, nas áreas ensecadas para a construção das estruturas de concreto, indicaram uma permeabilidade

média de 3 a 5×10^{-2} cm/s para todo o pacote aluvial. Os ensaios Kapetski, em laboratório, acusaram valores variáveis entre 10^{-2} e 5×10^{-2} cm/s porém foram obtidas, ocasionalmente, permeabilidades de 10^{-3} cm/s e 5×10^{-1} cm/s.

Foram detectadas também, no interior do pacote, lentes de argila plástica cinzenta de ocorrência restrita. Sua espessura varia entre 0,2 e 1m e devem estar situadas, estratigraficamente, em dois níveis, em torno das elevações 230 e 234m.

As escavações realizadas nas áreas ensecadas permitiram, ainda, a observação das estruturas presentes no pacote sedimentar, a constatação da existência de fósseis de origem vegetal e animal e o acesso direto aos níveis mais superficiais de arenitos e conglomerados ferruginosos.

As estruturas sedimentares são típicas de sistemas fluviais entrelaçado e meandrante, com alternâncias de regimes de maior ou menor energia. Os sedimentos se encontram dispostos em depósitos de barra de meandro e de preenchimento de canal.

Os níveis conglomeráticos se distribuem em camadas relativamente contínuas e cunhas restritas dentro do pacote arenoso, e denotam o baixo poder de seleção do agente transportador em regime torrencial (figura 3.24). A disposição dessas camadas se dá paralelamente ao rio, principalmente em depósitos de preenchimento de canal e, secundariamente, ao longo de barras longitudinais. Os níveis argilosos correspondem a depósitos de acreção vertical, na forma de camadas horizontais.

Foram observadas estruturas sindeposicionais representadas, predominantemente, por estratificações gradadas.

cionais, estratificações planas e estratificações cruzadas. As estratificações cruzadas, de pequena ou de grande escala, são do tipo recumbente ou tangencial na base, com mergulhos de até 30° (figura 3.25). Ocorrem, ainda, estruturas maciças, marcas onduladas, pelotas centimétricas a decimétricas de argila envoltas por crostas limoníticas e diques clásticos em arenito ferruginoso.

Nas camadas superiores do pacote aluvial foram encontrados restos vegetais fossilizados, entremeados aos sedimentos. Tratam-se de folhas e gravetos carbonizados, depositados nos estratos das camadas mais arenosas, e troncos de madeira, via de regra associados aos níveis conglomeráticos. Datações radiométricas pelo método do Carbono-14, realizadas sobre amostras desse material coletadas à superfície do depósito, indicaram idade superior a 30.000 anos (idade limite para o método) (FLEXOR, 1984 - informação verbal).

A disposição desses restos vegetais nas camadas, como se observa na figura 3.26, faz supor que sua deposição tenha ocorrido simultaneamente à sedimentação. A hipótese de um possível retrabalhamento a partir de depósitos vegetais mais antigos, situados a montante, pode ser descartada face à natureza dos detritos que se apresentam totalmente íntegros e são extremamente frágeis, desagregando-se facilmente ao tato.

Os troncos de madeira fossilizados encontram-se frequentemente envolvidos por uma couraça de conglomerado ferruginoso, transferindo para esta o seu molde externo. Muitos se apresentam, também, recobertos por concreções ferruginosas arenosas, com vazios no seu interior, na forma de estruturas centimétricas a subcentimétricas de forma elíptica, que parecem ter se originado a partir do preenchimento de cavidades no

tronco e posterior substituição da madeira por compostos de ferro.

Na laje conglomerática superficial do depósito foi encontrado, ainda, um dente fossilizado com incrustações de areia cimentada por compostos de ferro, pertencente a um animal herbívoro, provavelmente mas todonte da espécie Haplomastodon waringi, que teria vivido no final do Pleistoceno.

Os níveis de arenito e conglomerado ferruginoso, já citados no item 3.4.b, apresentam uma disposição aproximadamente horizontal, interceptando os sedimentos aluviais ao longo de cotas mais ou menos definidas. Encontram-se associados principalmente aos níveis conglomeráticos, que se apresentam cimentados ou impregnados por compostos de ferro ao longo de uma faixa, independentemente de variações granulométricas ou estruturas sedimentares presentes. Em alguns casos essas estruturas se tornam mais conspícuas, em virtude da pigmentação auferida pelo ferro, que é mobilizado e precipitado nestes sedimentos até os dias atuais (figura 3.27).

3.4.4.1 Cascalheira do Óleo Cru

A cascalheira do Óleo Cru é um depósito de sedimentos rudáceos, situado no Rio Paraná a cerca de 25 km a jusante do sítio da Barragem de Porto Primavera, em local onde a Ilha do Óleo Cru divide o rio em dois braços. O braço direito constitui o canal principal do Rio Paraná, enquanto o braço esquerdo se situa no alinhamento da foz do Rio Paranapanema e comporta as ilhas do Rapa, Três Estados e Humaitá.

Ambos os braços foram intensamente investigados, visando-se a sua utilização como jazida de areia e cas

calho, a partir de sondagens a percussão e sondagens rotativas, conforme apresentado no mapa da figura 2.6. Sobre amostras coletadas nas sondagens, foram realizadas análises granulométricas e ensaios Kapetski, em laboratório.

a) Jazida do Braço Direito

É constituída por intercalações de camadas de areia predominantemente fina com mais ou menos cascalho, e camadas de cascalho arenoso. Como se observa na figura 3.28, os teores de areia fina variam até 60%, enquanto a fração areia média participa com menos de 30% e a fração areia grossa com menos de 4%. Os níveis conglomeráticos de cascalho em matriz arenosa apresentam teores muito variados, atingindo até mais de 90% nos locais de maior concentração.

Nas ocorrências de cascalho predominam os seixos dos tipos I e II, com teores entre 30% e 55% e 20% a 45%, respectivamente, sobre o cascalho total, seguidos pelos tipos III e IV, que raramente ultrapassam 20% ou 10%.

Os cascalhos do tipo I são predominantemente de quartzo e quartzito (cerca de 70%) e os do tipo II e III de calcedônia e ágata (mais de 50%) (CESP, 1979a e 1980b).

Na figura 3.29 é apresentado um mapa de isopacas do aluvião, onde se observa que os maiores valores registrados (10 a 12m) ocorrem junto à Ilha do Óleo Cru, enquanto espessuras não superiores a 2m foram verificadas junto à margem direita. Os bancos mais espessos se situam ao longo da antiga calha do Rio Paraná, atualmente entulhada de sedi

mentos. Os maiores teores de cascalho distribuem-se em concentrações dispostas ao longo de toda a calha do rio, em depósitos de preenchimento de canal (figura 3.30).

Foi constatada a presença de até 7 níveis de conglomerado ferruginoso com espessuras de 0,1 a 0,3 m, mas que chegam a atingir 0,8m, sempre associados a horizontes com elevados teores de cascalho. Somente o nível mais superficial teve sua continuidade confirmada, persistindo por quase todo o depósito. Os demais níveis, em geral descontínuos, distribuem-se pelo pacote aluvial separados por 1 a 2m de sedimentos.

Em cerca de 20% da área ocorre uma camada arenosa, com até 18% da fração areia grossa e espessura não superior a 3m, assentada sobre a primeira laje conglomerática. Ocorrem também no interior do depósito, principalmente nas proximidades da Ilha do Óleo Cru, lentes argilosas esparsas que constituem depósitos de acreção vertical.

Os ensaios de permeabilidade acusaram valores de 10^{-2} a 5×10^{-2} cm/s tendo-se obtido porém, ocasionalmente, permeabilidades de 10^{-3} cm/s ou superiores a 5×10^{-1} cm/s.

b) Jazida do Braço Esquerdo

É constituída por camadas de areia fina e média com cascalho e camadas de cascalho arenoso. As frações areia fina e areia média ocorrem com frequências semelhantes (5 a 30%), enquanto a fração areia grossa aumenta com a porcentagem de cascalho, tornando-se mais acentuada (até 20%) para porcentagens de seixos superiores a 50%. Os teores

de cascalho nos bancos arenosos e conglomeráticos também são variáveis, podendo atingir até perto de 90% (figura 3.31).

Em diversas regiões do pacote aluvial constatou-se a presença de um horizonte superficial, de espessura da ordem de 2m, com até 40% de areia grossa. Situa-se sempre a menos de 3m de profundidade.

No mapa de isopacas da figura 3.29, observa-se que bancos arenosos e conglomeráticos com 7 a 8m encontram-se dispostos junto às ilhas do Óleo Cru, do Rapa, Humaitá e Três Estados, em regiões de atual atividade construtiva do rio. Próximo à margem esquerda, ao longo do canal principal que escoas as águas provenientes do Rio Paranapanema, as espessuras de sedimento não ultrapassam 3m. À semelhança do braço direito, as maiores concentrações de cascalho distribuem-se em depósitos de preenchimento de canal ao longo do rio.

Ao contrário do braço direito, foram constatadas poucas lajes de conglomerado ferruginoso nesse braço do rio, sendo os níveis existentes pouco expressivos e descontínuos, e sempre associados a horizontes conglomeráticos.

As permeabilidades registradas nos aluviões do braço esquerdo do Rio Paraná assemelham-se às aquelas obtidas para os sedimentos do braço direito.

3.5 Modelo Depositional

A grande semelhança da área de distribuição dos sedimentos do Grupo Bauru, de origem predominantemente fluvial, com a atual bacia hidrográfica do Rio Paraná,

sugere que aqueles sedimentos tenham sido depositados por um "proto-Rio-Paraná", quando a drenagem ainda assumia o padrão de canais divagantes, sem um canal principal muito bem definido. Posteriormente a calha do Rio Paraná se definiu melhor, talvez condicionada à área de maior subsidência, tendo sido entalhada, principalmente, em sedimentos da Formação Caiuá, ocupando praticamente toda a largura do atual vale.

O modelo deposicional aqui adotado explica o entulhamento desse vale pelos sedimentos cenozóicos, assumindo-se que um possível basculamento regional, com eixo aproximadamente paralelo ao traçado do rio, teria governado sua deposição ao longo da margem direita, sem alteração dos parâmetros sedimentares que definem o regime fluvial. Deve-se observar que a área do presente estudo é bastante limitada, sendo o modelo proposto apenas setorial e provisório, pois somente estudos de escala mais regional poderiam esclarecer sobre outros movimentos ocorridos ao longo da bacia e as conseqüentes mudanças de regime por eles provocadas.

Dessa forma, é admitida a seguinte seqüência de eventos para explicar a história geológica da sedimentação no Rio Paraná, na área do Pontal do Paranapanema, como apresentado na figura 3.32 (SUGUIO et al., 1984).

Estágio 1

Escavação do paleovale do Rio Paraná e deposição dos cascalhos basais encontrados no terraço colúvio-aluvial e parte do terraço e planície aluvial, em condições que propiciaram regimes de transporte e deposição torrenciais, como se comprova a partir da ima-

turidade textural e petrofábrica desordenada dos sedimentos. Este estágio, provavelmente caracterizado por paleoclima semi-árido, deve ter ocorrido durante o Pleistoceno, ou mesmo no final do Terciário.

Estágio 2

Formação de espesso regolito, seguida de remobilização, através de movimentação por rastejo, por distâncias limitadas, dando origem aos extensos colúvios areno-argilosos muito comuns na região do Pontal do Paranapanema. Constituem a porção superior do terraço colúvio-aluvial e devem ter se originado, principalmente, a partir da Formação Caiuá.

O regolito deve ter se formado sob condições de paleoclima quente e úmido, durante o Pleistoceno.

Estágio 3

Erosão parcial do terraço colúvio-aluvial e deposição dos sedimentos do terraço aluvial a partir de um rio de padrão entrelaçado que ocupou grande parte da largura total do vale. Estabeleceram-se sistemas intrincados de canais, delimitando barras longitudinais predominantemente arenosas. Enquanto nos canais, em virtude de maior competência, depositaram-se areias com cascalhos esparsos, nas barras longitudinais foram depositadas areias isentas ou pobres em seixos. Entre os cordões dessas barras arenosas, em regime lacustre, depositaram-se argilas contendo mais ou menos matéria orgânica de origem principalmente vegetal.

Prováveis flutuações climáticas propiciaram o fornecimento de abundante material detrítico, acima da ca

pacidade de transporte do paleo-Paraná, sob condições de paleoclima mais seco que o atual, durante o Pleistoceno.

Estágio 4

Variações do nível de base, associadas a fatores paleoclimáticos e/ou tectônicos, promoveram a erosão e o terraceamento parcial dos sedimentos depositados no estágio anterior. Neste estágio a erosão afetou aproximadamente 2/3 da largura do vale, a partir de sua margem esquerda, formando a planície aluvial, onde incisões mais profundas teriam originado a atual planície do Rio Baía e o leito do Rio Paraná, erodindo as camadas basais de cascalho do estágio 1 e, localmente, até o substrato de arenito.

O fato da erosão ter afetado assimetricamente o vale, preservando o terraço colúvio-aluvial e parte do terraço aluvial na margem direita, sugere que tenha ocorrido um basculamento regional da área para S-SE, com eixo aproximadamente paralelo ao rio.

Estágio 5

Deposição dos sedimentos da planície aluvial em condições semelhantes às do estágio 3, estabelecendo-se um padrão fluvial entrelaçado. Os sedimentos depositados são predominantemente arenosos, correspondentes a barras longitudinais entre as quais se desenvolveu um complexo sistema de canais que permitiu a sedimentação de areias com seixos escassos. Nas zonas intercordões depositaram-se argilas orgânicas e, no final da sequência de sedimentação, areias localmente argilosas e orgânicas.

Estes sedimentos seriam predominantemente pleistocênicos, tendo sido depositados sob condições paleoclimáticas semi-áridas.

Estágio 6

O padrão de canais entrelaçados do estágio 5 evoluiu para um tipo misto, meandrante-entrelaçado, que passou da situação pré-atual para a atual. Formaram-se os diques marginais do Rio Paraná e do Rio Baía que, rompidos, originaram depósitos de rompimento de diques de idade pré-atual, principalmente em vários trechos do Rio Paraná. A presença dessas feições condicionou o escoamento das águas através dos canais principais do estágio anterior, afeiçoando as paleo-ilhas e a planície do Rio Baía. À medida que as águas foram canalizadas para o atual leito do Rio Paraná, o canal principal do Rio Baía assumiu características mais tipicamente meandantes, enquanto outros cursos foram colmatados pelos próprios sedimentos, devido à diminuição da competência, originando as lagoas Paraguaia, Combate, Rodrigo e outras.

Atualmente, nas zonas mais arenosas dos cordões e barras dos depósitos da margem direita, desenvolve-se uma vegetação maior e mais densa, enquanto nas zonas intercordões, de natureza mais argilosa, estabelece-se uma vegetação predominantemente subaquática de gramíneas.

3.6 Conclusões

- 3.6.1 Os depósitos aluviais cenozóicos do Rio Paraná, no Pontal do Paranapanema, encontram-se dispostos ao longo da margem direita do rio, em três unidades geomorfológicas distintas denominadas terraço colúvio-aluvial, terraço aluvial e planície aluvial, esta última

subdividida em planície do Rio Baía, paleo-ilhas e planície do Rio Paraná. Uma quarta unidade corresponderia aos depósitos do leito do Rio Paraná.

Essas unidades representam feições moldadas por processos deposicionais e erosivos relacionados a eventos de flutuações paleoclimáticas ocorridas durante o fim do Terciário e o Pleistoceno.

- 3.6.2 As cotas mais elevadas em que se acham os terraços colúvio-aluvial e aluvial, em relação à planície aluvial, suas disposições espaciais e relações de contato permitem concluir que as unidades geomorfológicas se desenvolveram na seguinte sequência: terraço colúvio-aluvial, terraço aluvial e, finalmente, planície aluvial. A íntima relação entre os terraços e o vale fluvial atesta a pouca idade desses eventos geológicos.
- 3.6.3 O embasamento dos depósitos aluviais é representado, predominantemente, pelos arenitos da Formação Caiuá parcialmente intemperizados na forma de solo residual fóssil. Estes arenitos se encontram mais profundamente erodidos junto à margem esquerda do vale fluvial e localmente escavados nas planícies dos rios Baía e Paraná, denotando uma importante fase erosiva na história evolutiva da planície aluvial, que teria atingido, principalmente, os sedimentos aluviais do estágio 3, sem contudo remover os níveis de cascalho do estágio 1.
- 3.6.4 A natureza fortemente assimétrica do vale do Rio Paraná no trecho estudado, com a margem direita essencialmente deposicional e a esquerda erosiva, parece ser um padrão típico de outros trechos deste rio. Esta tendência deve refletir um basculamento regional, com eixo aproximadamente paralelo ao traçado do rio,

que tem acompanhado o levantamento epirogenético positivo da área durante o Cenozóico.

- 3.6.5 Os depósitos rudáceos existentes no pacote aluvial originaram-se a partir do preenchimento de canais, devido à maior competência do agente transportador, numa época em que prováveis flutuações climáticas, em clima semi-árido, forneceram abundante material detrítico. O abandono sucessivo desses canais dentro de um regime tipicamente entrelaçado, levou à formação de bancos conglomeráticos que, submetidos a flutuações do nível de base e a intensa evaporação, tiveram camadas de seus sedimentos cimentadas parcial ou totalmente por composto de ferro, criando-se os níveis de arenitos e conglomerados ferruginosos.

PARTE II

PROCESSOS DE LATERIZAÇÃO E DE EVOLUÇÃO DOS PERFIS LATERÍTICOS

4 PROCESSOS DE LATERIZAÇÃO

4.1 Introdução

Desde 1907, quando Buchanan fez o primeiro relato sobre uma ocorrência de laterita na Índia e introduziu o termo no meio científico, até os dias atuais, inúmeros pesquisadores, em todo o mundo, vêm desenvolvendo estudos sobre este material, enfocando-o sob o ponto de vista geológico, hidrogeológico, mineralógico, geoquímico, pedológico, geotécnico e econômico. Não resta dúvida de que a complexidade dos problemas encontrados tem desafiado a argúcia daqueles que militam nestes campos da ciência.

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma síntese dos conhecimentos atuais sobre os processos de laterização, contribuindo para o entendimento dos mecanismos básicos que regem a formação das lateritas, sua evolução e relação com os fatores ambientais.

4.2 O Conceito de Laterita

O termo laterita foi sugerido, inicialmente, por Buchanan (1907, in SCHELLMANN, 1979) para designar um material de construção típico das regiões montanhosas de Malabar, ao Sul da Índia. Tratava-se de um material ferruginoso que, quando fresco, podia ser cortado facilmente mas, quando exposto ao ar, endurecia rapidamente adquirindo alta resistência aos processos de alteração. Devido a essa propriedade era utilizado fazendo as vezes de tijolo, de cuja palavra latina "later" deriva o termo. Depois de Buchanan, a laterita foi descrita por inúmeros geólogos, sempre sob aspectos petrográficos, tanto na Índia como na África, Austrália e América do Sul.

Um novo período de pesquisa começou com Bauer (1898, in SCHELLMANN, 1979) que estabeleceu as principais características químicas das lateritas, sendo seguido por outros autores que propuseram classificações a partir de relações químicas entre seus componentes. A partir da década de 1920 foram consideradas as características morfológicas desse material, dando-se um enfoque predominantemente pedológico à sua gênese (MAIGNIEN, 1966 e SCHELLMANN, 1979). Posteriormente Pendleton (1936 e 1946 in SCHELLMANN, 1979) fortemente refratário às definições químicas, evocou o conceito original de Buchanan, considerando as lateritas como um horizonte iluvial do solo que endurece quando exposto ao ar.

O conceito moderno fundamenta-se nos processos de evolução dos produtos de alteração residual, a partir dos quais ocorre concentração relativa de constituintes pouco solúveis da rocha (principalmente Fe e Al), pela remoção de seus constituintes móveis e concentração absoluta desses constituintes móveis nos níveis do perfil de solo onde os mesmos são acumulados.

Deste modo, as lateritas representam o produto de intensa alteração subaérea da rocha, durante a qual o conteúdo de ferro e/ou alumínio aumenta e o conteúdo de SiO_2 diminui em relação à composição química da rocha-matriz alterada. Um perfil laterizado compreende todos os estágios, desde a rocha até a superfície do terreno, incluindo também os materiais não lateríticos correspondentes aos primeiros passos do processo de alteração. Os termos laterita ou laterizado não dependem de resistência e coloração.

Dentre os membros que compõem o grupo das lateritas encontram-se as limonitas níquelíferas, as bauxitas e outros produtos hidróxido-aluminosos. As lateritas

que possuem um metal mais importante que os demais a tribui-se um adjetivo referente ao elemento dominante, como no caso da laterita niquelífera, laterita manganesífera e laterita ferruginosa.

Na terminologia atualmente empregada pelos pesquisadores, alguns termos tornaram-se já consagrados pelo uso. Lacroix (1913, in LEPRUN, 1979) introduziu o termo "carapaça", para designar os materiais ferruginos não endurecidos; "couraça" ou "crosta" representariam o material de resistência elevada. Foram, também, introduzidas outras expressões como "ferricrete" (Lamplugh, 1970 in LEPRUN, 1979), "duricrosta" (Woolnough, 1970 in LEPRUN, 1979), "eisenkruste", "plinita", "canga limonítica", etc... Os solos de alteração laterítica passaram a ser denominados "latossolos" (Kellog, 1949 in MAIGNIEN, 1966), "oxissolos", "caulissolos" ou "solos ferralíticos".

4.3 Características Químicas e Mineralógicas das Lateritas

4.3.1 A Dinâmica do Ferro

Na natureza, o ferro pode ser encontrado combinado com minerais primários e secundários; individualizado na forma de óxidos e hidróxidos móveis, ou complexo com matéria orgânica. Sua forma de ocorrência é controlada pelas condições geoquímicas e ambientais, sendo o conhecimento dos parâmetros que regem os equilíbrios químicos em solução aquosa de grande importância para o entendimento da sua dinâmica.

Os fatores que controlam o comportamento do ferro na água são de natureza físico-química e biológica. Os principais parâmetros físico-químicos são o potencial iônico, o pH, o potencial de oxi-redução (Eh), a

pressão parcial de gases e a existência de condições complexantes. A influência da temperatura (cuja elevação facilita as reações endotérmicas) e pressão (considerada igual em toda a superfície), não tem sido dada a devida importância nos processos supêrgenos. As concentrações dos íons em solução também podem determinar a solubilização ou precipitação do ferro, em função do seu produto de solubilidade (K_s).

Os seres vivos que participam dos processos biogeoquímicos de importância na dinâmica do ferro são as bactérias, fungos, algas e protozoários.

4.3.1.1 Influência de Fatores Físico-Químicos

a. potencial iônico

Elementos como o Fe, Al e Mn têm potencial iônico intermediário, precipitando por hidrólise, enquanto o Ca, Mg e K, de potencial iônico baixo, permanecem em solução. A precipitação do Fe^{2+} em solução é precedida de oxidação, o que eleva seu potencial iônico.

b. pH

Nos meios naturais os hidróxidos de Fe^{2+} solubilizam-se em pH igual ou inferior a 5 ou podem permanecer em solução num meio com pH até 7,5, dependendo do potencial de oxi-redução desse meio. Já os hidróxidos de Fe^{3+} solubilizam-se somente em pH inferior a 3, encontrado apenas em águas de minas ou fontes termais ácidas (GARRELS, 1960).

c. Eh

O potencial padrão de oxi-redução, em solução áci

da, medido para o par $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$, na reação $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$ é +0,77 volts (KRAUSKOPF, 1910). Observa-se que o Fe^{3+} necessita de um alto potencial (voltagens positivas), apresentando-se concentrado em meios mais oxidantes, enquanto que o Fe^{2+} pode tornar-se solúvel em meios mais redutores, com potencial entre moderado e baixo.

d. Limites de pH e Eh nas Reações do Ferro

Os valores mais freqüentes de Eh e pH nas águas naturais foram obtidos, primeiramente, por Baas Becking (in MELFI, 1982), a partir de dados empíricos. A Figura 4.1 apresenta os intervalos mais comuns, bem como as faixas de domínio dos meios oxidantes e redutores.

Observa-se que os valores mais freqüentes de pH na natureza situam-se entre 4 e 9. A água da chuva, de um modo geral, é levemente ácida e, em contato com silicatos que contêm Fe^{2+} , torna-se mais redutora e alcalina. As águas subterrâneas, abaixo do nível hidrostático são, portanto, alcalinas e redutoras.

Considerando-se o par $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$ ($E_0 = +0,77\text{V}$), nota-se que essa reação independe do pH, pois nem H^+ nem OH^- dela participam. Seu potencial pode ser plotado como uma linha paralela ao eixo do pH (trecho A da Figura 4.1). A linha não tem grande continuidade porque o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipita a um pH de mais ou menos 3.

Para $\text{pH} > 3$ (meios ácidos) temos, portanto, a reação do trecho B da curva ($[\text{Fe}^{2+}]$ a 1M):

$$Eh = 1,06 - 0,177 \text{ pH}$$

Em soluções mais alcalinas, a reação corresponde ao trecho D:

A mudança de Fe^{2+} para Fe^{3+} situa-se no centro da área correspondente às condições naturais, ocorrendo a passagem de um para o outro com muita frequência, em função de ligeiras alterações no pH ou Eh do ambiente. O diagrama também mostra que a oxidação do ferro se realiza, de modo mais completo, em soluções alcalinas do que em soluções ácidas.

Analisando-se as relações Eh-pH na Figura 4.2 (GARRELS e CHRIST, 1965), observa-se que a hematita (Fe_2O_3) é um mineral estável em todos os ambientes forte ou moderadamente oxidantes. Em ambientes redutores o mineral estável poderá ser a pirita (FeS_2), siderita (FeCO_3) ou magnetita (Fe_3O_4), dependendo das concentrações de enxofre e carbonato na solução. Caso o meio se torne mais ácido, ou contenha menos enxofre diminuem, respectivamente, os campos da siderita e pirita, aumentando os domínios da hematita e magnetita.

A utilização do diagrama apresenta, porém, uma série de restrições, uma vez que se consideram os minerais puros, temperatura de 25°C , pressão de uma atmosfera, ausência dos íons FeOH^+ , FeOH^{2+} e Fe(OH)_2^+ e não é levado em conta o efeito de outras variáveis como silicatos, fosfatos dissolvidos e formas isomórficas substituídas.

e. Condições Complexantes

O ferro pode permanecer em solução na forma de comple

xos. Alguns quelatos que compõem a matéria orgânica mobilizam o Fe^{3+} , normalmente imóvel na faixa natural de pH. O complexo oxálico de Fe^{3+} é estável entre pH de 4 a 7,5, o que significa que os oxalatos são também capazes de mobilizar o Fe^{3+} .

Pode ainda o ferro ser complexado por metais alcalinos e alcalino-terrosos e pela sílica, através de ligações Si-O-Fe, mantendo-se na forma de geles férricos ou ferrissilícicos móveis (MELFI, 1971).

f. Pressão Parcial de Gases

A pressão parcial de gases, em especial do O_2 e CO_2 , interfere diretamente com as concentrações de ferro nas soluções. O O_2 dissolvido na água torna o meio oxidante, instabilizando o Fe^{2+} que precipita na forma férrica, enquanto que o CO_2 dissolvido na água torna o meio redutor e favorável à estabilidade dos íons Fe^{2+} , que se mantém em solução.

g. Produto de Solubilidade (K_s)

Quando uma solução contendo íons de ferro em abundância mistura-se com uma solução contendo íons de carbonatos, sulfeto, fosfato ou mesmo OH^- , ou quando uma solução rica em ferro e um desses íons sofre evaporação, o ferro precipita se o produto das concentrações iônicas atingir um valor crítico denominado "Produto de Solubilidade". Esta constante de equilíbrio varia significativamente em função da temperatura.

Os produtos de solubilidade mais comuns para os compostos de ferro, em mol por litro de solução, são os seguintes:

- Segundo LANGE (1961), a 18°C:

$[\text{Fe}^{2+}] [\text{OH}^-] = 1,64 \times 10^{-14}$ Precipita o hidróxi-
xido ferroso ($\text{Fe} (\text{OH})_2$).

$[\text{Fe}^{3+}] [\text{OH}^-] = 1,1 \times 10^{-36}$ Precipita o hidróxi-
do férrico ($\text{Fe} (\text{OH})_3$).

- Segundo KRAUSKOPF (1910), a 25°C.

$[\text{Fe}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] = 10^{-10,5}$ Precipita a siderita
(Fe CO_3).

$[\text{Fe}^{2+}] [\text{S}^{2-}] = 10^{-17,2}$ Precipita o Sulfeto FeS

$[\text{Fe}^{3+}] [\text{PO}_4^{3-}] = 10^{-21,6}$ Precipita o fosfato amor-
fo (Fe PO_4) ou

$10^{-26,2}$ Precipita a strengita
($\text{Fe PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Verifica-se, portanto, que é grande a solubilidade dos
compostos formados pelos íons Fe^{2+} se comparada à da-
queles formados pelo Fe^{3+} .

4.3.1.2 Influência de Fatores Biológicos

Segundo Silverman e Ehrlich (1964, in MACIEL FILHO, 1982),
os processos pelos quais os microorganismos modificam
os minerais podem ser resumidos em enzimicos e não en-
zimicos. Os processos enzimicos abrangem a digestão
de complexos metálicos e as transformações minerais
em grande escala causadas por oxidações e reduções en-
zímicas diretas. Os processos não enzimicos correspon-
dem à eliminação de produtos metabólicos (H_2S , H_2CO_3 ,
 HNO_3 , H_2SO_4 , ácidos orgânicos, amônia, bases e íons
orgânicos) e à adsorção, principalmente de ferro e man-
ganês, à superfície das células.

a. Solubilização do Ferro dos Minerais das Rochas por Ação de Fungos.

Os experimentos desenvolvidos por Ribeiro, Santos e Martelli (in MACIEL FILHO, 1982) mostraram que a ação indireta dos produtos de metabolismo do fungo Aspergillus niger libera o íon ferro dos minerais do diabásio, na forma de um complexo organo-metálico. A solubilidade do ferro nos minerais depende de sua natureza, da superfície de ataque e da concentração dos produtos metabólicos.

b. Redução do Ferro por Ação de Bactérias

A redução do íon Fe^{3+} para Fe^{2+} de forma a se obter energia, pode ocorrer por ação direta de bactérias ou indireta, sendo neste caso apenas provocado o ambiente redutor. A redução do ferro, em ambos os casos, é favorecida por baixo pH, ausência de O_2 , existência de matéria orgânica e valores de Eh entre 600 e -400 mv.

As espécies redutoras mais comuns são representadas por Bacillus macerans polymira e Thiobacillus thiooxidans e as bactérias sulfato-redutoras, formadoras de ambiente redutor, são as espécies Desulfovibrio desulfuricans, Desulfovibrio aestuarii, Desulfovibrio rubentschikii, Desulfovibrio orientis e Clostridium nigrificans.

c. Oxidação e Precipitação do Ferro por Ação de Outros Microorganismos

Alguns microorganismos provocam a oxidação e precipitação do ferro por ação direta ou enzimática. Podem ser mencionados como principais exemplos alguns gêneros de bactérias como Ferribacterium, Ferrobacillus, Thiobacillus, Galionella e a espécie Lepto

thrix ochracea.

Por ação indireta ou não enzimática, outros microorganismos também oxidam e precipitam o ferro, pela geração de ambiente oxidante ou consumo de CO_2 do meio. Algumas algas são particularmente ativas dessa maneira, em especial as dos grupos Cyanophyceae, Chrysophyceae, Volvocales, Chlorococcales, Euglenae, Conjugales e Ulothricales.

Outra forma indireta de precipitar o ferro consiste na adsorção do mesmo à superfície celular. Supõem-se que atuam dessa forma algumas bactérias laminadas (Crenothrix, Clonothrix e Leptothrix), uma bactéria com caule (Gallionella) e alguns protozoários flagelados (Anthophysa, Siderodendron, Bikosoeca e Siphomonas) (in MACIEL FILHO, 1982).

4.3.2 Natureza e Evolução dos Compostos de Ferro

O ferro ocorre, naturalmente, na forma de silicatos (argilominerais), sulfetos (pirita), carbonatos (siderita), óxidos e hidróxidos amorfos, sendo que somente as duas últimas formas serão abordadas na presente pesquisa.

Os óxidos mais comuns são a hematita ($\alpha \text{Fe}_2\text{O}_3$) e goethita (αFeOOH); secundariamente podem ocorrer magnetita (Fe_3O_4), maghemita ($\gamma \text{Fe}_2\text{O}_3$), ilmenita (FeTiO_2) e lepidocrocita (γFeOOH); podendo ser citada a stilpnossiderita ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) como hidróxido amorfo. A limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) corresponde a uma composição de óxidos (fase cristalizada) com uma fase amorfa.

Estudando as couraças ferruginosas do Senegal e Mauritânia, NAHON (1976) definiu uma sequência evolutiva para os minerais de ferro nas fácies de couraças

instaladas sobre arenito. Segundo esse autor, a evolução dos compostos de ferro envolve formas transitórias entre a hematita e a goethita, com maior ou menor porcentagem de substituição isomórfica por alumínio, em função de sua concentração e das condições ambientais. SCHWERTMANN (1983), e BOCQUIER et al. (1983), a partir de estudos de campo e laboratório, também definiram taxas de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio em goethitas aluminosas.

Sobre a estabilidade da hematita e goethita, existem conceitos conflitantes. Berner (1969) considera a hematita a forma mais estável, enquanto Höhr (1972) atribui maior estabilidade à goethita (in MELFI, 1982). Na realidade, os dois minerais ocorrem em quantidades relativamente próximas, predominando a goethita somente em regiões de melhor drenagem, uma vez que a mesma é uma forma hidratada da hematita.

Ferrier (1969) e Langmur (1972, in MELFI, 1982) observaram que a estabilidade da hematita e goethita depende do diâmetro dos cristais. Com efeito, estudos em itabiritos brasileiros mostraram que a hematita apresenta granulação maior que a goethita (MELFI, 1982). Outras relações de granulometria foram, também, relatadas por GILKES e SUDDHIPRAKARAN (1979) e SCHWERTMANN (1983).

A matéria orgânica assume, ainda, importante papel no comportamento dos compostos de ferro destruindo, por exemplo, a hematita e precipitando o ferro na forma de goethita. O ferro é, portanto, complexado e novamente reorganizado (MELFI, 1982). Perfis laterizados, com crosta de goethita no topo, frequentemente apresentam matéria orgânica associada.

Um fator fundamental para a natureza dos compostos de ferro e sua evolução diz respeito às características da rocha-matriz. Quanto mais "impuro" o meio, ou seja, quanto mais saturadas as soluções, maior a quantidade de ferro amorfo presente (Nalovic, 1974 in MELFI, 1982). Este conceito explica a evolução dos minerais de ferro a partir de perfis de alteração de rochas ácidas e básicas.

Em meios de rochas ácidas, e portanto pobres em OH^- e cátions, o Fe^{3+} é complexado pelo OH^- , porém não forma grandes polímeros, evoluindo rapidamente para goethita e tomando a forma cristalina na superfície. Em meios de rochas básicas, ricos em OH^- e cátions, o Fe^{3+} forma grandes polímeros amorfos, com estrutura tridimensional, permitindo a fixação de muitos elementos, principalmente os de transição (Ni, Co, Mn, etc.). Podem permanecer como amorfos por muito tempo, necessitando de lixiviação intensa para eliminar os elementos capturados e se transformarem em hematita. Nos solos basálticos da Bacia do Paraná (Brasil) ocorrem apenas traços de goethita, predominando a hematita (MELFI e PÉDRO, 1977).

4.3.3 Mecanismos Geoquímicos

O estudo da evolução dos perfis lateríticos permite observar que a laterização ocorre sob condições em que os metais alcalinos, alcalino-terrosos e a sílica são mais móveis que o ferro e o alumínio (MERCADO, 1979) sendo a laterita um produto de alteração pela dessilicificação do ferro, do alumínio ou ambos (Fermor, 1911; Humbert, 1948 e King, 1962 in KARUNA KARAN e SINHA ROY, 1979). Em lateritas fósseis ou recentes, observa-se uma acentuada diminuição do SiO_2 no sentido do topo dos perfis. No caso de lateritas ferruginosas essa lixiviação é acompanhada da perda, também, do Al_2O_3 e TiO_2 , aumentando o teor de Fe_2O_3 (SAHASBUDHE e DESHMUKH, 1979 e BOCQUIER et al., 1983).

SCHELLMANN (1979) distingue três processos bem definidos nos estágios avançados de laterização:

- 1) Dissolução incongruente (ou parcial) da caulinita, com formação da gibbsita (SiO_2 é removido, sendo concentrados Al_2O_3 e Fe_2O_3).
- 2) Dissolução congruente (ou total) da caulinita (Al_2O_3 e SiO_2 removidos e Fe_2O_3 acumulado).

3) Dissolução do quartzo com concentração do Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Segundo esse autor, em rochas básicas e alcalinas predomina a dissolução incongruente da caulinita, sendo menos pronunciada a formação de couraças e o seu endurecimento. Em rochas ácidas a dissolução do quartzo e caulinita é congruente, havendo maior endurecimento das crostas pelo maior conteúdo de ferro.

NAHON (1976) definiu dois mecanismos geoquímicos na evolução das couraças ferruginosas africanas:

- 1) Dissolução do quartzo e da caulinita, garantindo a estabilidade dos óxidos e hidróxidos de ferro ou permitindo sua neoformação.
- 2) Dissolução dos óxidos e hidróxidos de ferro, garantindo a estabilidade do quartzo e da caulinita ou permitindo sua neoformação.

Os dois mecanismos ocorrem simultaneamente, havendo subtração em um meio e acumulação em outro. A dissolução do quartzo e da caulinita leva à acumulação relativa dos óxi-hidróxidos de ferro na parte superior dos perfis e à acumulação absoluta de quartzo e caulinita, neoformados a partir do SiO_2 e Al_2O_3 liberados, a jusante e em níveis inferiores. Dentro de uma mesma topo-sequência acontece o inverso nos meios em que os óxi-hidróxidos são dissolvidos e o quartzo e a caulinita acumulados.

PÉDRO e MÉLFI (1983) atribuem essa incompatibilidade entre os compostos de ferro e o quartzo e a caulinita, à alta polarização do Fe^{3+} , que torna o meio ácido e, conseqüentemente, hostil aos silicatos, destru

indo a estrutura da caulinita e liberando o Al^{3+} , que é incorporado aos minerais de ferro por substituição isomórfica.

4.3.4 Geoquímica dos Elementos Maiores e dos Elementos Traços

A decomposição da rocha, nos processos de laterização, leva à concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos, após a lixiviação das bases e da sílica. O alumínio forma sesquióxidos, principalmente a gibbsita e mais raramente a boehmita; os sesquióxidos de ferro são representados pela goethita e hematita, e como principal argilo-mineral temos a caulinita com pequena mistura de illita. Formam-se, ainda, inúmeros produtos amorfos aluminosos ou alúmino-ferrosos (Herbillon e Gastuche, 1962 in MAIGNIEN, 1966).

Com a diminuição do SiO_2 e Al_2O_3 nos materiais lateríticos ferruginosos, entram em solução o quartzo e caulinita. O alumínio restante se recombina em soluções sólidas com o ferro. Quanto maior a proporção de Al_2O_3 , ou seu aumento por acumulação, maior a taxa de substituição do alumínio nos compostos de ferro ou maior a acumulação de caulinita. O aumento de SiO_2 também leva ao acúmulo de caulinita e quartzo em níveis mais baixos nos perfis (NAHON, 1976).

Dosagens químicas efetuadas em crostas ferruginosas do oeste da África (LEPRUN, 1979) mostraram que a perda das bases (MgO , CaO , Na_2O , K_2O e P_2O_5), por lixiviação, é rápida e total, elevando o pH sob as capapaças e aumentando a capacidade de troca catiônica, especialmente de Na^+ e Ca^{2+} , nos horizontes argilosos mais abaixo.

O comportamento de elementos traços como o titânio, manganês, vanádio, níquel e cromo nos perfis lateríticos foi estudado por NAHON (1976), LEPRUN (1979), SAHASRABUDHE e DESHMUKH (1979), SAPOJNIKOV (1979), SCHELLMANN (1979), MERCADO (1979) e MELFI (1982).

4.4 Características Básicas dos Perfis Lateríticos

4.4.1 Organização das Estruturas

ALEVA (1983) sugere uma sistemática na descrição das estruturas e texturas das lateritas, chamando de estruturas "maiores" aquelas derivadas da rocha matriz, visíveis em afloramentos, e estruturas "menores" as neoformadas, descritas em amostras de mão.

De acordo com NAHON (1976), as estruturas existentes nos perfis lateríticos podem organizar-se em quatro categorias bem definidas:

- a. Estruturas herdadas: correspondem àquelas existentes na rocha-matriz e que primeiro veiculam as soluções, sendo o ponto de partida para as demais estruturas.
- b. estruturas de acumulação: após a epigênese dos minerais, no processo de laterização, essas estruturas aparecem nos "vazios" formados e são representadas, primeiramente, por "nódulos", passando a estruturas "maciças".
- c. Estruturas de reorganização: são produzidas pelas soluções que apresentam circulação constante no perfil, reorganizando estruturas de acumulação. Ocorre reorientação, a partir de recristalização da matéria que entrou em solução, formando

do-se "folheações", "fitas", "montes", etc.. que dividem as fácies maciças ou reduzem as fácies nodulares em finamente nodulares.

- d. Estruturas de lixiviação: correspondem a "canais", "tubos" e "vazios" oriundos da subtração de matéria por dissolução, nos horizontes endurecidos criados por acumulação e reorganização.

As estruturas de lixiviação podem sofrer acumulação e reorganização e serem novamente lixiviadas. O processo evolui continuamente e todas as organizações minerais e estruturas existem, simultaneamente, dentro de uma topo-seqüência e, às vezes, do perfil. Qualquer organização resulta da evolução de uma organização precedente que ela tende a obliterar e "apagar".

4.4.2 Relações com Fatores Ambientais

São considerados como lateritas os perfis de solos que apresentam, em pelo menos um de seus horizontes, uma crosta ou carapaça já formada ou em curso de formação, ou ainda um alto conteúdo de sesquióxidos de ferro e/ou alumínio, caso não haja qualquer endurecimento. A posição relativa desse horizonte no perfil do solo ou da topo-seqüência, bem como sua espessura são função, principalmente, do clima, litologia, relevo e período de tempo envolvido no processo de laterização.

4.4.2.1 Clima

A influência do clima no desenvolvimento das lateritas abrange, basicamente, os efeitos da temperatura e da pluviosidade. Como o estágio de laterização é dado pela relação $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ ou $\text{SiO}_2 : \text{Fe}_2\text{O}_3$, pode-se dizer que a drenagem assume maior importância que a

temperatura. relegando esta a um plano secundário e dando, à pluviosidade, um peso maior.

a. Temperatura

Os solos lateríticos se desenvolvem em locais de temperaturas médias anuais em torno de 25°C existindo, porém, lateritas em regiões cuja média anual é sensivelmente mais baixa, como no platô de Madagascar (18-20°C) (Prescott in MAIGNIEN, 1966).

b. Pluviosidade

Pode-se estabelecer como um limite mínimo de precipitação, necessário para a formação e evolução das lateritas, a faixa compreendida entre 750 e 1.200 mm anuais. Não existe um limite superior de precipitação, encontrando-se lateritas até na Baixa Guiné, onde os índices pluviométricos atingem 6.000 mm anuais.

A incidência de lateritas parece corresponder, também, a climas com período chuvoso morno, o que amplia sua faixa de domínio para as regiões de clima tropical semi-úmido e equatorial (GRUBB, 1983). Mesmo em regiões pouco drenadas, precipitações da ordem de 500 a 1.000 mm por ano são suficientes para mobilizar e concentrar o ferro.

4.4.2.2 Vegetação

A influência da vegetação na evolução das lateritas é bastante discutível, uma vez que as mesmas se desenvolvem sob florestas densas ou vegetação de pequeno porte como os campos e savanas. Sabe-se, porém, que os dois tipos de cobertura vegetal apresentam condi-

ções favoráveis e desfavoráveis a sua evolução.

A vegetação de pequeno porte, do tipo cerrado ou savana, permite uma maior lixiviação, com facilidade de mobilização do ferro. Embora seja menor a proteção contra a erosão, seu efeito elimina os materiais de cobertura, expondo carapaças que evoluem rapidamente para couraças. Além disso, o elevado "run-off " das águas superficiais concentra material granular, criando condições favoráveis à laterização.

Sobre as florestas a lixiviação é menor e os solos ficam protegidos da erosão e ressecção, embora a ação mecânica das raízes seja um fator que destrói as couraças em formação e a falta de água à superfície retarde a sua evolução.

4.4.2.3 Fauna

No tocante à fauna, Erhart (1951, in MAIGNIEN, 1966) e BARROS MACHADO (1983), mencionam a ação dos térmites na formação de crostas lateríticas. Erhart menciona, também, a participação de bactérias e fungos nos mecanismos de alteração de minerais.

4.4.2.4 Rocha-Matriz

A evolução das lateritas encontra-se relacionada à natureza da rocha-matriz que lhes dá origem, encontrando-se lateritas sobre todos os tipos de rochas que contêm alumino-silicatos.

O desenvolvimento de crostas ferruginosas ocorre, preferencialmente, sobre rochas com alto conteúdo de ferro ou mesmo baixo, desde que haja acumulação por movimentação oblíqua ou lateral de soluções (D'Hoore, 1954 in MAIGNIEN, 1966). É importante a

influência do relevo no controle das acumulações, pois couraças situadas sobre rochas não portadoras de ferro devem apresentar ligação com litologias ricas neste metal, situadas em posição relativamente mais alta na topo-seqüência (NAHON, 1976).

Relações entre o perfil laterítico e a rocha-matriz são relatadas por MAIGNIEN (1966), LEPRUN (1979), KARANAKARAN e SINHA ROY (1979), CHAUVEL et al. (1983) e VOLKOFF (1983).

4.4.2.5 Relevo

A grande maioria dos pesquisadores concorda em que as carapaças e couraças ferruginosas ocorrem, preferencialmente, em terrenos relativamente planos, levemente irregulares, com uma superfície estável por longo período de tempo. Os solos lateríticos tendem a se desenvolver em colinas, pois são típicos de locais bem drenados e cobertos por vegetação mais densa.

O desenvolvimento de crostas ferruginosas apresenta, portanto, estreita relação com a topografia suave e o movimento da água nos solos, que mobiliza o ferro depositando-o em pontos mais baixos. A erosão expõe as couraças já formadas que evoluem para montante, "horizontalizando" o terreno a partir de formas côncavas, provocando uma inversão do relevo. (MAIGNIEN, 1966).

LEPRUN (1979), MELFI (1982) e SOMBROEK e CAMARGO (1983) também associam a evolução de lateritas ferruginosas a formas de relevo.

4.4.3 Idade

As lateritas mais antigas de que se tem registro en-

contram-se em regiões áridas, estando relacionadas a antigos climas úmidos, durante os quais se desenvolveram os processos de laterização. O primeiro período de laterização reconhecido em escala mundial corresponde ao Terciário (BARDOSSY, 1981 e SAPOJNIKOV 1981).

A laterização, como um todo, exige períodos de milhares de anos, porém a formação das couraças propriamente ditas é mais rápida, envolvendo alguns séculos e sendo estas bastante sensíveis às variações climáticas. Segundo Alexander e Cady (1962, in Maignien, 1966), o "endurecimento" do solo laterizado, antes da formação da crosta, leva alguns anos quando este é exposto ao ar, ajustando-se ao conceito de laterita proposto por Buchanan.

4.4.4 Evolução

A origem e evolução das lateritas é função da mobilidade dos íons de ferro e/ou alumínio no perfil de solo e/ou na topo-seqüência. Os mecanismos de remoção e deposição de íons dependem portanto, fundamentalmente, da quantidade de água presente e das condições de drenagem.

A acumulação dos sesquióxidos, que origina as crostas lateríticas, ocorre de forma relativa ou absoluta. Quando os elementos mais solúveis (metais alcalinos e alcalino-terrosos) e a sílica são removidos dos níveis superiores do solo por lixiviação aumentam, nesses níveis, as concentrações relativas de elementos pouco solúveis como o ferro, o alumínio e o manganês. Estes elementos, após concentrados passam, também, a ser lixiviados, mobilizando-se em solução e concentrando-se de forma absoluta, em níveis mais baixos do perfil ou da topo-seqüência. Neste caso o

ferro e o manganês são mais móveis do que o alumínio.

Abaixo da crosta ferruginosa forma-se uma camada de argila, onde predomina a caulinita por concentração absoluta de SiO_2 e Al_2O_3 . Nos perfis bauxíticos concentra-se a gibbsita por acúmulo de Al_2O_3 e Fe_2O_3 (SAHASRABUDHE e DESHMUKH, 1979).

As acumulações absolutas são mais comuns para o ferro e o manganês, que se encontram a jusante nos perfis e/ou na topo-seqüência. Segundo Castagnol e Shan-Gia-Tu (1940, in MAIGNIEN, 1966), podem ocorrer na forma de:

- Cimentações: freqüentes em solos de granulometria mais grosseira (areias, cascalhos, etc.) sendo raras para partículas menores que 20 μ .
- Impregnações: ocorrem em materiais de textura relativamente fina tais como siltes, areia fina, areia argilosa e argila arenosa. A epigênese do quartzo pelo ferro, nas bordas de cristais, representa um caso típico de impregnação.
- Concreções: são produzidas pela concentração, precipitação ou deposição de filmes de sesquióxidos ao redor de núcleos de quartzo e restos de minerais. Representam formas arredondadas, individualizadas e endurecidas, formadas por segregação a partir do material argiloso.

SUGUIO e BARBOUR (1969), estudando as estruturas li moníticas da Bacia Terciária de São Paulo, descreveram acumulações absolutas de Fe_2O_3 ao longo de contatos entre camadas contíguas de diferentes permeabilidades. As camadas argilosas teriam funcionado como "barreiras de permeabilidade", que impediram o avan-

ço das chamadas "ondas de limonitização" para cima ou para baixo nos sedimentos, concentrando o ferro.

NAHON (1976) relata, nas couraças ferruginosas sobre arenitos da Mauritânia, a existência de acumulações relativas de ferro no topo dos perfis. O ferro teria se concentrado a partir da lixiviação da sílica e alumina (epigenizando, inclusive, parte do quartzo e da caulinita) enquanto estes, atingindo concentrações elevadas a jusante, formariam depósitos de quartzo e caulinita neoformados.

Marbut (1932, in KARUNAKARAN e SINHA ROY, 1979) relaciona a espessura de lateritas à zona de flutuação do lençol freático. A movimentação dos ions de ferro e alumínio "para cima" no perfil, seria função de flutuações do nível de água (Pendleton e Shrasuvana, 1946) e da capilaridade (Loughnan et al., 1962 e Gondie, 1973), sendo sua precipitação na forma coloidal (Fox, 1923) ou a partir de soluções floculadas por cargas eletrolíticas opostas (Sinha Roy, 1973 e 1977) (in KARUNAKARAN e SINHA ROY, 1979).

Berner (1971, in MACIEL FILHO, 1982, refere-se à precipitação do ferro em ambiente subaquático, quando soluções ricas em ions Fe^{2+} atingem águas mais oxigenadas. MELFI (1982) menciona a possibilidade de ascensão capilar do ferro, em virtude de fortes evaporações, na evolução de couraças ferruginosas na região de Chapado, Estado de Goiás.

Mac Farlane (1976, in KARUNAKARAN e SINHA ROY, 1979) explica a formação das lateritas a partir de migração do ferro "para baixo" no perfil. O ferro se tornaria móvel devido à perda de sílica e bases na alteração, sendo acumulado em níveis associados à camada de argila, sob o horizonte laterítico. No topo, a

alteração química promoveria o desenvolvimento da la terita em função do desenvolvimento desses níveis.

KARUNAKARAN E SINHA ROY (1979) fazem menção à movimentação de material detrítico na topo-sequência descrevendo, nas lateritas do Kerala, uma fração detrítica superficial e uma fração residual. A fração detrítica dos níveis topográficos mais baixos seria alimentada pelos perfis dos níveis mais altos. Descrevem, ainda, o "desmantelamento" superficial das cou raças, devido à ação da ressecção e intensa lixivia ção pelas fissuras, promovendo a sua desintegração na forma de material com estrutura tabular. MAIGNIEN (1966), NAHON (1976) e LEPRUN (1979) também se referem a esse tipo de evolução e NAHON detalha a passagem de cou raças maciças para pisólitos, cascalho fer ruginoso, nódulos ferruginosos e finalmente areia, em direção à superfície.

É consenso entre a maioria dos pesquisadores que a la terização se processa mais facilmente em climas úmidos e quentes, onde se observa alternância de estações chuvosas e secas. Durante a época das chuvas ocorre intensa lixivia ção pelas estruturas do solo e à superfície, mantendo ativos os mecanismos de sub tração e acumulação de matéria. Na época seca os ho rizontes endurecidos, já formados, funcionam como uma capa protetora contra a erosão, expondo-se, fragmentando-se com o tempo e preservando o perfil. Dentro desse quadro evoluem as crostas ferruginosas e a frente de alteração.

PÉDRO e MELFI (1983) analisaram a evolução dos perfis lateríticos em regiões com variações do nível de água e regiões com contraste de estações úmidas e secas. No primeiro caso, o ferro sofre redução abaixo do nível da água e se oxida com o seu rebaixamento, concentrando-se graças à ressecção e evoluindo para nódulos e glóbulos, até formar crostas. No segundo caso, o Fe^{3+} do solo ou rocha é liberado pelos prótons contidos na água da chuva e migra para níveis mais úmidos, formando hidróxidos. O aumento da sua concentração absoluta leva à formação de crostas. Esses autores atestam, ainda, que a alta polarização do Fe^{3+} torna o meio ácido, atacando a caulinita e liberando o alumínio que se combina com o ferro, formando compostos de Al-Fe.

LEPRUN (1979) afirma que o desenvolvimento das couças ocorre da base para o topo do perfil, em sentido contrário ao da evolução da frente de alteração. Segundo esse autor as crostas ferruginosas passam a evoluir somente durante, ou após a alteração já instalada.

5 OS ARENITOS DA FORMAÇÃO CAIUÁ COMO FONTE PRIMÁRIA DE FERRO

5.1 Introdução

A ocorrência de arenitos e conglomerados ferruginosos na Bacia do Alto Paraná, mais notadamente em cascalheiras ao longo do Rio Paraná, faz supor que os sedimentos do Grupo Bauru, e em especial o Arenito Caiuá, constituam uma das fontes primárias de ferro da região, nos processos de laterização.

No local de construção da futura Usina de Porto Primavera essa associação se torna mais evidente, ob-

servando-se que as áreas de ocorrência do basalto não apresentam lajes conglomeráticas ou níveis lateríticos, havendo atualmente, inclusive, precipitação de compostos de ferro nas águas efluentes dos solos residuais ou transportados que capeiam os arenitos da Formação Caiuá. O ferro seria, portanto, proveniente da película de compostos de ferro que recobre os grãos do arenito, de onde é mobilizado por processos ainda pouco conhecidos, mas que certamente se relacionam à natureza do arenito, às características físico-químicas das águas e à ação de microorganismos.

As pesquisas de campo e laboratório desenvolvidas para o projeto de usinas hidrelétricas na Bacia do Alto Paraná, em especial as usinas de Porto Primavera e Rosana, permitiram algumas constatações que, associadas e analisadas à luz dos conhecimentos atuais, favorecem a hipótese de que os arenitos da Formação Caiuá seriam uma das principais fontes primárias de ferro, nos processos de laterização que têm atuado na região durante o Cenozóico. Essas evidências podem ser assim resumidas:

- a. Distribuição geográfica de arenitos e conglomerados ferruginosos, a nível regional, associados às águas do Rio Paraná e rochas do Grupo Bauru, em especial da Formação Caiuá, e a nível local, associados às águas efluentes dos solos residuais ou transportados que capeiam o Arenito Caiuá.
- b. Intensa descoloração do arenito ao longo de estruturas e zonas do maciço rochoso sujeitas à ação de águas meteóricas e oscilações do nível da água.
- c. Alta desagregabilidade do arenito devido à existência de argilas expansivas na sua matriz.

d. Ocorrência de minerais secundários sobre os grãos do arenito, formados por precipitação da sílica e do alumínio, evidenciando um mecanismo que favorece a cristalização do quartzo, feldspato e caulinita, em detrimento da limonita, goethita e montimorilonita.

Neste capítulo são analisadas as evidências apresentadas, com base nos dados disponíveis até o presente momento.

5.2 Distribuição Geográfica das Ocorrências de Arenitos e Conglomerados Ferruginosos na Bacia do Alto Paraná.

Conforme apresentado no capítulo 1, a Formação Caiuá se distribui em superfície e subsuperfície pelos estados de São Paulo, noroeste do Paraná e sudeste de Mato Grosso do Sul sendo que, neste último, as ocorrências dessa formação se restringem a alguns afloramentos nas barrancas dos rios Verde e Pardo (STEIN et al., 1979).

Entre 1972 e 1979 a CESP desenvolveu um programa de pesquisa de materiais naturais de construção ao longo da calha e das margens dos rios Paraná e Paranapanema, visando a obtenção de areia e cascalho para a construção de usinas hidrelétricas. Esses trabalhos consistiram de um reconhecimento por terra dos depósitos de sedimentos rudáceos e de campanhas de sondagens nos leitos desses rios, na área de domínio da Formação Caiuá.

Foram obtidas informações sobre a existência de materiais ferruginosos nos depósitos aluviais e o seu grau de ferruginização nos pontos de ocorrência, tendo-se observado que a cimentação por compostos de ferro variou de níveis ou manchas avermelhadas pouco resis

tentes, até níveis conglomeráticos extremamente duros. Constatou-se, também, que esses depósitos se encontram sotopostos por arenitos de coloração vermelha ou arroxeadada, descritos na maioria dos relatórios e boletins de sondagens como pertencentes à Formação Caiuá.

Em viagem de reconhecimento realizada pela COPEL-Companhia Paranaense de Energia Elétrica em 1984, no baixo curso do Rio Ivaí, foram observadas, também, ocorrências de conglomerado ferruginoso nos depósitos aluviais, sobre arenitos da Formação Caiuá.

Os pontos visitados e as jazidas investigadas na Bacia do Alto Paraná se encontram indicados na figura 5.1 e suas características principais, assim como o nível da pesquisa realizada e relatórios ou trabalhos de referência, são resumidas nas tabelas 5.1 a 5.4. Analisando-se essas informações dentro do contexto geológico regional, podem ser feitas as considerações que se seguem.

5.2.1 Rio Grande

Corta a Bacia do Alto Paraná em toda a sua extensão, porém só se dispõe de informações sobre os locais de implantação das usinas de Marimbondo e Água Vermelha. Embora fundadas em basaltos, essas usinas se situam na área de ocorrência dos sedimentos do Grupo Bauru.

Somente no local da Usina de Água Vermelha foram registrados alguns níveis ferruginosos de cimentação incipiente nos aluviões atuais (leito do rio), porém os antigos terraços apresentaram níveis de conglomerado fortemente cimentados (CESP, informações verbais).

5.2.2 Rio Tietê

Possui três usinas hidrelétricas na região de ocorrência do Grupo Bauru, todas fundadas em basaltos. As usinas de Promissão e Nova Avanhandava, em operação, e a Usina de Três Irmãos, em construção.

Nos locais de implantação dessas usinas e no curso do rio, ao longo de seus reservatórios, não foram registrados quaisquer indícios de cimentação ferrugífera nos depósitos aluviais (CESP, informações verbais).

5.2.3 Rio Paranapanema

As investigações realizadas nos depósitos de areia e cascalho do leito do rio, na pesquisa de materiais granulares para as usinas hidrelétricas de Capivara, Taquarucu e Rosana, não indicaram quaisquer indícios de ferruginização nos aluviões. Esses depósitos se encontram assentados, diretamente, sobre Arenito Caiuá e basalto.

As análises granulométricas indicaram ausência ou a presença eventual de concreções ferruginosas no cascalho, porém em porcentagens quase sempre inferiores a 2%. Constituem parte da fração grosseira dos sedimentos, sendo provenientes do retrabalhamento de antigos níveis lateríticos situados a montante no rio ou em suas margens.

5.2.4 Rio Ivaí

A pesquisa realizada restringiu-se a uma viagem de reconhecimento pelo baixo curso do rio. Foram registradas ocorrências de lajes superficiais de conglomerado ferruginoso resistente, sobre o depósito alu-

vial, identificadas no mapa de acordo com a quilometragem medida em relação a sua foz.

Até o quilômetro 60, no trecho de ocorrência dos conglomerados, foi constatada a presença de Arenito Caiuá sotoposto aos depósitos aluviais; a partir desse ponto, para montante, ocorrem afloramentos de basalto no leito do rio, na forma de soleiras, sem ocorrências de conglomerados.

5.2.5 Margens do Rio Paraná

Dos pontos visitados, somente as ocorrências de nºs 3.004, 3.005, 3.018, 4.012 e 4.013 apresentam ferruginização intensa no depósito aluvial, formando lajes conglomeráticas resistentes. Com exceção da ocorrência 3.018, que se situa em terraço elevado, as demais se encontram na foz dos rios Verde (3.004 e 3.005) e Ivaí (4.012 e 4.013), em terraços baixos do Rio Paraná, sobre Arenito Caiuá.

As outras ocorrências indicadas nas margens dizem respeito a níveis pouco significativos de cimentações ou impregnações por compostos de ferro, situadas em cotas mais elevadas com relação à calha do Rio Paraná, predominantemente sobre arenito e secundariamente sobre basalto.

Esses dados evidenciam a influência de fatores morfológicos e da rocha-matriz nos processos de laterização.

5.2.6 Rio Paraná

Os aluviões ao longo do rio apresentam intensa ferruginização no trecho compreendido entre Jupiá e Guaíra. Das proximidades de Presidente Epitácio até Guaí

ra, na área de domínio da Formação Caiuá, essas ocorrências assumem maior expressão, constituindo níveis de conglomerado ferruginoso resistente, dispostos no topo e interior dos depósitos aluviais. A jusante de Guaíra, em toda a região de ocorrência superficial dos basaltos, não se tem registro de ferruginização dos aluviões existentes no rio. O mesmo ocorre a montante de Jupiá.

Nas usinas de Jupiá e Ilha Solteira foi registrada a presença de conglomerado ferruginoso apenas em terraços aluviais antigos. Nesses dois locais se observou forte cimentação do cascalho, constituindo uma laje com cerca de um metro de espessura em Ilha Solteira e diversas lajes em Jupiá (CESP e THEMAG, informações verbais).

A distribuição das lajes de conglomerado abrange, quase que exclusivamente, a área de domínio do Arenito Caiuá, mesmo que a sua espessura sobre o basalto seja de poucos metros. Ao longo do canal principal do Rio Paraná e próximo a sua margem esquerda, pontos onde o rio escavou o maciço rochoso até o basalto (que constitui o substrato dos aluviões), não são encontrados conglomerados.

Percebe-se, portanto, que a ocorrência de conglomerados ferruginosos encontra-se relacionada ao Arenito Caiuá e, via de regra, aos rios Paraná e Ivaí. A existência dessas lajes nos terraços aluviais antigos, em cotas mais elevadas que as do atual leito do rio (Ilha Solteira, Jupiá e Guaíra) mostra que, ainda antes da exposição dos basaltos na calha do Rio Paraná por ação da erosão, já havia mobilização do ferro dos sedimentos cretáceos e o mesmo era precipitado onde as condições ambientais o permitiam.

Os processos de mobilização e precipitação do ferro têm registro até os dias atuais pois se observa que,

no sítio da futura Usina de Porto Primavera, as águas efluentes dos solos residuais e aluviões que capeiam os arenitos da Formação Caiuá formam precipitados ferruginosos ao entrar em contato com o ar atmosférico. Nesse local se estima que o aporte de ferro pelas águas do Rio Paraná e águas da fundação seja relativamente elevado e as condições ambientais favoreçam a sua precipitação (figura 3.27).

5.3 Descoloração do Arenito Caiuá em Zonas de Oscilação do Nível da Água e Estruturas

A constatação de descoloração do Arenito Caiuá por percolação de água, em condições redutoras, através das estruturas do maciço rochoso, é relativamente antiga. SCORZA (1952) relata uma sensível diferença entre os arenitos das barrancas do Rio Paraná e aquele obtido por testemunhagem em uma perfuração com 35m de profundidade, executada a 1.000m da margem, na cidade de Presidente Epitácio. O Arenito Caiuá, nestes dois pontos, apresentou coloração diversa, sendo vermelho nas barrancas do rio, onde o meio é oxidante, e vermelho esbranquiçado no poço para captação de água, onde o meio é redutor.

Nas sondagens rotativas executadas em Porto Primavera observou-se fato semelhante. O maciço rochoso arenítico amostrado por sondagens realizadas no terraço e planície aluvial acima da cota 230m, apresentou cimentação ferruginosa e coloração marrom-esbranquiçada, marrom-amarelada ou amarela, contrastando com a cimentação carbonática e os tons vermelhos ou vermelho-arroxeados do arenito de cotas mais baixas ou das barrancas do rio (figura 5.2).

A análise dessas informações permite associar a descoloração do arenito à ação das águas subterrâneas ,

de características mais redutoras que as águas do Rio Paraná e, portanto, capazes de dissolver o cimento carbonático e mobilizar o ferro da película de óxidos e argila que envolve os grãos. Em Porto Primavera essa ação se manifesta, mais intensamente, da zona de flutuação do nível da água até a cota 230m, abaixo da qual os arenitos se encontram mais preservados. O acesso da água à superfície dos grãos seria facilitado pela porosidade do arenito e estruturas existentes no maciço rochoso (sistemas de fraturas, acamamento e diastemas).

Nos taludes das escavações efetuadas na margem esquerda do Rio Paraná, para as estruturas de concreto e obras do futuro sistema de transposição do desnível da Barragem de Porto Primavera, foram estudadas com detalhe as estruturas primárias e secundárias do Arenito Caiuá. Além das feições estruturais já comentadas, típicas dos processos de sedimentação do Caiuá, foram verificados os seguintes sistemas de fraturas:

- Principal : N76°-86°E/subvertical
- Secundário : N15°-37°E/subvertical
- Terciário : N00°-07°E/subvertical

Estes sistemas, em especial o principal, juntamente com os acamamentos apresentaram, de modo geral, intensa descoloração em suas superfícies, ocorrendo ao longo dessas descontinuidades uma faixa simétrica, centimétrica, de material esbranquiçado e friável. Uma análise mais cuidadosa desse material mostrou tratar-se de grãos de quartzo com pouca matriz argilosa, tendo havido remoção quase completa dos finos pré-existent (figura 5.3).

Observa-se, neste caso, uma íntima relação entre as águas percolantes pelo maciço rochoso (através das

descontinuidades) e a descoloração, uma vez que esta só se manifesta ao longo dos caminhos preferenciais de percolação. Os processos de lixiviação devem ser regidos pela expansibilidade dos argilo-minerais, características físico-químicas das águas e tipo de fluxo, sendo difícil ponderar sobre a influência de cada fator. Fica bastante evidente, entretanto, também nesse caso, a facilidade de liberação do ferro pelo Arenito Caiuá nas condições ambientais atuantes na região.

5.4 Ensaios de Desagregabilidade

O fenômeno da desagregação de blocos de Arenito Caiuá de diversos diâmetros, quando submetidos a ciclagem natural e artificial, foi relatado a partir dos ensaios realizados nas obras de Rosana e Porto Primavera (CESP, 1976a, 1979b, 1979c, 1980a) e por CAMPOS (1981). Embora todos os ensaios simulem condições diferentes daquelas às quais o maciço rochoso se encontra realmente submetido pode-se inferir que, na natureza, o processo se realiza dentro dos mesmos moldes, porém num período de tempo sensivelmente maior, liberando íons de ferro para as águas percolantes.

A desagregação se dá por expansão dos argilo-minerais presentes na matriz do arenito (esmectitas) quando sujeitos, alternadamente, a umedecimento e secagem. O processo atua com grande rapidez havendo, inclusive, casos de desintegração total das amostras em menos de uma semana, o que mostra a grande susceptibilidade da rocha à alteração e erosão, quando exposta nas barrancas dos rios e zonas sujeitas à ação de águas meteóricas percolantes ou oscilações do nível da água.

5.4.1 Ensaios Realizados para as Obras da Usina de Rosana

Consistiram de ensaios de ciclagem natural (pelo período de um ano), pelo processo água-estufa (*) (duração de 64 ciclos ou 4 meses) e através de extrator Soxhlet (**) (duração total de 100 ciclos ou 10 dias). As amostras de arenito foram coletadas na barranca do Rio Paraná (no Pontal do Paranapanema), tendo diâmetros ($\emptyset$) variáveis entre 76,2mm e 4,76mm nos ensaios água-estufa; 50,8mm e 9,52mm nos ensaios por extrator, e blocos de dimensões decimétricas nos ensaios de ciclagem natural.

Nos ensaios água-estufa todas as amostras apresentaram perdas superiores a 79% em peso, chegando a 100% nos menores diâmetros. Observou-se um comportamento semelhante nos ensaios em extrator, porém as perdas estiveram entre 24,84% (50,8mm $> \emptyset >$ 38,1mm) e 98,79% (12,7mm $> \emptyset >$ 9,52mm). A exposição das amostras às intempéries mostrou perdas de 48,04% para 25,4mm $> \emptyset >$ 12,7mm e menores que 8,77% nos blocos de grandes dimensões, após um ano de observação.

5.4.2 Ensaios Realizados para as Obras da Usina de Porto Primavera

Abrangeram ensaios de ciclagem natural, água-estufa e através de extrator Soxhlet, com durações variáveis de alguns dias a 4 meses ou um ano. As amostras foram obtidas a partir de sondagens ou das barrancas do Rio Paraná, sendo o arenito classificado, antes dos ensaios,

(*) Ensaios de ciclagem água-estufa: Cada ciclo é composto por uma imersão da amostra em água por 24 horas e 12 horas de secagem em estufa. Em uma semana são realizados 4 ciclos completos.

(**) Ensaios de ciclagem por extrator Soxhlet: Cada ciclo é composto por uma sifonagem. Em um dia são realizados 10 ciclos.

como "resistente" ou "friável", de acordo com sua maior ou menor resistência.

a. Ensaaios de ciclagem natural

O diâmetro das amostras variou desde 9,52mm até o de blocos com grandes dimensões, tendo-se observado após um mês, de modo geral, perdas de 20% a 100% em peso. Foram constatadas, ainda, algumas perdas de até 100% em menos de uma semana, nos arenitos ditos "resistentes", com pequeno diâmetro ($63,5\text{mm} > \varnothing > 9,52\text{mm}$) e em todas as amostras de arenito "friável". Algumas amostras com diâmetro menor que 25,4mm mostraram perdas de apenas 3,07% após um ano de observação, assim como grandes blocos, cuja desagregação não ultrapassou 1,69% nesse mesmo período.

b. Ensaaios de ciclagem água-estufa

Tiveram duração de 4 meses e foram realizados em amostras coletadas nas barrancas do Rio Paraná, com diâmetros entre 76,2mm e 1,19mm. As menores perdas observadas (1,55% a 6,16%) ocorreram no intervalo $76,2\text{mm} > \varnothing > 25,4\text{mm}$ e as maiores perdas (14,47 a 45,70%) no intervalo $12,7\text{mm} > \varnothing \geq 1,19\text{mm}$.

c. Ensaaios de ciclagem através de extrator Soxhlet

Foram realizados em amostras de sondagens com dimensões entre 50,8mm e 9,52mm e tiveram duração máxima de 100 ciclos. As menores perdas ocorreram no intervalo $50,8\text{mm} > \varnothing > 19,1\text{mm}$ e estiveram entre 2,5% e 6,95% em peso. As maiores perdas foram cons-

tatadas nas frações menores ($12,7\text{mm} > \emptyset > 9,52\text{mm}$), chegando a atingir 21,12% em peso. No arenito dito "friável", não foram atingidos os 100 ciclos previstos, havendo desintegração total das amostras com diâmetro entre 50,8mm e 38,1mm quando completado o 30º ciclo.

5.4.3 Ensaios Realizados pelo Instituto de Geociências da USP (CAMPOS, 1981)

Abrangeram ensaios de ciclagem natural e água-estufa em amostras de Arenito Caiuá obtidas de afloramentos próximos à cidade de Rosana e escavação situada 16 km a montante da mesma, na margem esquerda do Rio Paraná. Incluem, também, ensaios de ciclagem água-estufa realizados com amostras de testemunhos de sondagens e executadas às margens do Rio Paranapanema (futura Usina de Rosana). Os diâmetros das amostras variaram entre 76,2mm e 1,19mm, tendo sido também ensaiados blocos de grandes dimensões, com pesos variáveis entre 10 e 30 kg.

Os ensaios de ciclagem natural consistiram de exposição das amostras de rocha às intempéries, por um período de até 287 dias. Verificou-se que os blocos de grandes dimensões apresentaram perdas de peso menores, variando entre 1,6% e 8% e as amostras com dimensões menores ($38,1\text{mm} > \emptyset > 25,4\text{mm}$) perderam 3% a 50% do peso.

Os ensaios de ciclagem acelerada (água-estufa) consistiram de ciclos alternados de imersão em água e secagem das amostras, até um máximo de 72 ciclos (116 dias). As perdas de peso, de modo geral, estiveram entre 75% e 100%, dos quais 55% a 85% ocorreram nos primeiros 24 ciclos e as maiores perdas foram verificadas nas frações menores ($4,76\text{mm} > \emptyset > 1,19\text{mm}$).

As amostras de sondagens, submetidas apenas a ensaios de ciclagem água-estufa, em geral apresentaram intensa desagregação no primeiro terço ou até metade do período de ciclagem correspondente, com perdas também elevadas.

Os ensaios de desagregabilidade ou ciclagem analisados mostram que, como regra geral, as amostras de rocha de dimensões menores desagregam-se mais rapidamente, devido à maior superfície específica exposta à ação da água. O processo se inicia pelo aparecimento de rachaduras e esfoliação dos blocos, tendendo a evoluir rapidamente. A ocorrência de amostras mais resistentes à alteração, mesmo nas frações menores, permite supor a existência de um controle mineralógico no processo.

No maciço rochoso o ferro tende a ser liberado das argilas, carbonatos e óxidos presentes no arenito, nos pontos onde o acesso das águas percolantes é favorecido. Além do elevado grau de desagregabilidade do arenito, decorrente da existência de argilas expansivas na sua matriz, outros fatores físico-químicos e/ou biológicos, intrínsecos das águas da região, devem promover a sua redução de Fe^{3+} para Fe^{2+} , mobilizando-o e mantendo-o em solução até que o mesmo encontre condições ambientais favoráveis à sua precipitação.

Os basaltos da Formação Serra Geral, em Porto Primavera, também apresentam elevada susceptibilidade à desagregação, tendo sido objeto de ensaios de ciclagem natural e artificial até o presente momento. Essa característica, relacionada à mineralogia do basalto na região, não foi observada em Rosana, Taquaruçu e outras barragens da CESP.

Em Porto Primavera, no entanto, os basaltos se encontram permanentemente cobertos pelo arenito ou submer

so nas águas dos rios Paraná e Paranapanema, sendo dificilmente submetidos a ciclos naturais de umedecimento e secagem, através de oscilações do nível da água ou exposição da rocha em afloramentos. Este fato, aliado à influência dos metais alcalinos e alcalino-terrosos presentes nos minerais do basalto, faz com que essa rocha libere íons Fe^{2+} , por esse mecanismo, em quantidades sensivelmente menores do que o arenito. Essa mobilização se daria, ainda, na forma complexada, o que transmitiria ao ferro maior estabilidade em solução, dificultando a sua precipitação.

5.5 Análise de Lâminas Petrográficas

BLATT et al. (1972) descrevem as relações entre a solubilidade da calcita e do quartzo e o pH do meio mostrando que, com a diminuição do pH, ocorre dissolução da calcita e precipitação da sílica na forma amorfa (figuras 5.4 e 5.5). Essa precipitação se dá em pH's inferiores a 7, em soluções com concentrações menores que 100 a 140 p.p.m. Conforme descrito no capítulo 4, essas condições ambientais favorecem a dissolução dos minerais de ferro ou impedem a sua neoformação.

Os estudos de petrografia microscópica realizados em amostras de Arenito Caiuá constituem importante contribuição para o entendimento dos mecanismos que levam à mobilização do ferro na rocha. Os fatores responsáveis por essa mobilização e suas interações não são ainda conhecidos, mas as estruturas de dissolução e recrescimento observadas nos minerais da rocha em estado são, permitem o estabelecimento de um modelo geoquímico.

Foram confeccionadas 9 lâminas petrográficas pelo IPT- Ins-

tituto de Pesquisas Tecnológicas (1979) e 11 por CAMPOS (1981), a partir de amostras de arenito provenientes de sondagens e escavações nos locais de construção das usinas de Porto Primavera e Rosana. Foram analisados materiais representativos dos diferentes tipos litológicos que constituem o Arenito Caiuã.

A composição mineralógica e as características dos grãos do arenito encontram-se já descritas na primeira parte deste trabalho. A matriz argilosa é constituída de quartzo, montmorilonita ferruginosa e, secundariamente, caulinita. O cimento ferruginoso, na proporção de 5% a 10%, é representado por limonita e/ou goethita. O IPT menciona, ainda, a ocorrência de cimentação secundária por material branco a branco-amarelado, de natureza amorfa, provavelmente de calcedônia e/ou opala. Esse material ocorre, também, na forma de lentes.

CAMPOS (op.cit.) descreve corrosão parcial nas bordas dos grãos de quartzo, com evidências de recrescimento secundário de sílica amorfa. Os grãos de feldspato detrítico também apresentam recrescimento secundário, provavelmente de caulinita.

A existência de recristalizações secundárias de sílica amorfa e caulinita, mostra que as condições ambientais são favoráveis à precipitação da sílica e do alumínio, provocando a solubilização do ferro, que é liberado na forma de Fe^{2+} para o meio ambiente. Este mecanismo leva à dissolução, ou impede a neoformação da limonita, goethita e montmorilonita ferruginosa.

A mobilização dos íons de ferro é regida por fatores físico-químicos e biológicos ainda desconhecidos sendo função, também, das concentrações absolutas e relativas de íons e da maior ou menor atuação das águas percolantes. Conforme foi comentado no item 5.3 deste ca

pítulo, ao longo das estruturas essa atuação é mais pronunciada.

6 ORIGEM E EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE CONGLOMERADOS E ARENITOS FERRUGINOSOS NO PONTAL DO PARANAPANEMA

6.1 Introdução

A origem e evolução dos conglomerados e arenitos ferruginosos presentes no topo e interior dos depósitos aluviais cenozóicos na região do Pontal do Paranapanema, encontram-se relacionadas às características do meio físico e biológico. Os fatores ambientais que atuam na região desde a formação desses depósitos, além de pouco conhecidos, não participam isoladamente dos mecanismos de mobilização e precipitação do ferro, apresentando componentes sinérgicos que dificultam sobremaneira a sua interpretação.

No sítio de implantação da futura Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, a ocorrência de lajes contínuas de conglomerado ferruginoso constituiu um fator de considerável importância nos estudos de projeto, por dificultar as escavações e interferir nos padrões de percolação e estabilidade dos aluviões, nas fundações. Este condicionamento geológico, inusitado nesse tipo de obra de engenharia, demandou cuidados especiais em termos de investigação, necessitando de uma pesquisa detalhada cujo escopo se insere na metodologia descrita no capítulo 2.

Embora essa pesquisa tenha sido voltada apenas para as necessidades de projeto, não tendo contemplado os fatores ambientais intervenientes nos processos de laterização, o conhecimento detalhado da distribuição e posição espacial dos níveis lateríticos nos depósitos aluviais, complementado por estudos ambientais de caráter

geral e observações de campo, permitiu o desenvolvimento de um modelo preliminar sobre a sua evolução. Esse modelo forneceu subsídios para o entendimento dos mecanismos que poderão reger uma possível colmatção química do sistema drenante da Barragem de Porto Primavera por compostos de ferro, e é objeto do presente capítulo.

6.2 Características do Meio-Ambiente

6.2.1 Fatores Ambientais

Segundo levantamentos realizados por SILVEIRA e FREITAS (1973), o clima da região do Pontal do Paranapanema, na classificação de Köppen, é do tipo tropical de savana com inverno seco e verão chuvoso (AW). A temperatura média anual é de 22°C, sendo 25°C a média do mês mais quente e 18°C a média do mês mais frio. O índice de precipitação pluviométrica anual médio é de 1.250mm, com cerca de 150mm no trimestre mais seco e 400mm no trimestre mais úmido.

Este quadro climatológico associado ao relevo suave, às boas condições de drenagem das unidades geológicas presentes na região e à disponibilidade de ferro que estas apresentam, constitui um ambiente bastante favorável ao desenvolvimento de lateritas ferruginosas.

6.2.2 Fatores Físico-Químicos

Os dados relativos às características físico-químicas das águas da região restringem-se a análises de águas coletadas no Rio Paraná e seus principais afluentes no Estado de São Paulo, incluindo os reservatórios de Jupia e Ilha Solteira (SZIKSZAY 1973), e no

Rio Paraná no sítio da futura Barragem de Porto Primavera (IPT, 1984). As determinações de maior interesse são apresentadas na tabela 6.1 deste trabalho.

As amostras analisadas pelo IPT são provenientes de duas nascentes situadas no pé de uma ensecadeira construída para desvio do Rio Paraná, e do próprio rio imediatamente a montante da área ensecada. Os pontos de coleta foram denominados A-1, A-2 e A-3 e se encontram indicados na figura 6.1.

A nascente A-1 se localiza na zona de domínio do Arenito Caiuá e a nascente A-2 na zona do basalto. São formadas, portanto, por águas provenientes do Rio Paraná, que percolam através da fundação da ensecadeira, pelo arenito e pelo basalto respectivamente, resurgindo a jusante. A coleta no ponto A-3 foi realizada a cerca de 0,40m de profundidade, no próprio Rio Paraná.

Analisando-se as determinações efetuadas nas águas do Rio Paraná e seus afluentes (Tabela 6.1), observa-se que o pH médio obtido varia em torno de 7 e são elevados os teores dos íons sulfato e bicarbonato. Essas águas foram caracterizadas como carbonatadas, típicas de climas tropicais e subtropicais (SZIKSZAY, 1973). As maiores concentrações de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e SiO_2 e baixas de Fe^{2+} e Al^{3+} encontram-se de acordo com os produtos esperados nos processos de laterização, em que os metais alcalinos e alcalino-terrosos são lixiviados juntamente com a sílica (concentrações elevadas nas águas), elevando-se as concentrações relativas do ferro e alumínio nos solos (teores mais baixos nas águas).

Nas águas efluentes das fundações, verificam-se teores elevados de metais alcalinos, alcalino -

terrosos e sílica, porém as maiores concentrações desses íons ocorrem nas águas que percolam através do basalto. Em contrapartida, os teores de ferro total, Fe^{2+} e Mn^{2+} são significativamente maiores nas águas que percolam através do arenito, denotando uma maior mobilização desses elementos nesta rocha. Na nascente A-1 ocorre, inclusive, precipitação de compostos de ferro na forma de um gel amarelado a marrom-avermelhado (figura 3.27).

Nas determinações efetuadas após a filtração dessas amostras, foram obtidos teores significativamente mais baixos de ferro total no resíduo, atingindo valores de 0,7 mg/l nas águas efluentes do arenito e < 0,1mg/l nas águas efluentes do basalto. Como o teor de matéria orgânica também se mostrou bastante elevado, essa variação nos teores de ferro encontrados antes e após a filtração deve estar relacionada a uma possível associação entre esse elemento e a matéria orgânica em suspensão.

As condições de pH e Eh encontradas nas águas analisadas permitem caracterizar o meio como favorável à precipitação do ferro na forma de hidróxidos e óxihidróxidos. Os íons de metais alcalinos e alcalino-terrosos e a sílica, em maiores concentrações nas águas que percolam através do basalto devem, no entanto, retardar ou mesmo impedir essa precipitação por constituir, com o ferro, complexos estáveis.

6.2.3 Fatores Biológicos

As amostras de água coletadas pelo IPT (1984) foram submetidas, também, a exames biológicos, investigando-se a presença de bactérias, fungos e algas.

Na águas efluentes do arenito, coletados no ponto A-1,

foi detectada a presença de grande quantidade de bactérias precipitadoras do ferro ($1,2 \times 10^5$ col./ml) e do manganês (26 col./ml), algumas colônias de bolores (3 col./ml) e ausência de fitoplâncton.

A amostra da nascente A-2, sobre basalto, apresentou também bactérias precipitadoras do ferro, porém em menor quantidade ($9,0 \times 10^3$ col./ml). Estão ausentes as bactérias que oxidam o manganês, mas ocorrem algas do grupo Chlorococcales (16 org./ml) que oxidam o ferro.

A água amostrada no Rio Paraná apresenta reduzida quantidade de bactérias precipitadoras do ferro (29 col./ml), mas é significativa a presença de algas, entre as quais as dos grupos Chlorococcales (1.501 org./ml) e Euglenae (54 org./ml), que oxidam o ferro por ação não enzimática.

As ferrobactérias filamentosas estão presentes nas três amostras examinadas, porém o grande número de filamentos de cor marrom-avermelhada encontrado na amostra A-1 sugere que, nesta amostra, esses microorganismos sejam mais abundantes.

De maneira geral, as análises realizadas mostram que as águas provenientes das fundações constituem meios mais redutores, empobrecidos de oxigênio e, portanto, capazes de mobilizar o ferro. Em contato com meios mais oxidados, como o ar atmosférico, ou mesmo com as águas do Rio Paraná, o ferro tende a precipitar, inclusive com participação de bactérias e algas.

As águas do Rio Paraná representam um meio oxidante, caracterizado pela grande quantidade e variedade de organismos fitoplanctônicos (4.499 org./ml) capazes de produzir oxigênio nos seus processos metabólicos.

6.3 Distribuição e Características dos Perfis Lateríticos Estudados

6.3.1 Margem Direita do Rio Paraná

A distribuição e as espessuras dos arenitos e conglomerados ferruginosos da margem direita do Rio Paraná foram obtidas através de sondagens e da inspeção das barrancas de rios e dos taludes das escavações executadas para a construção da Barragem de Porto Primavera. Esses níveis se encontram representados, esquematicamente, na seção transversal que constitui a figura 6.2.

A calha do Ribeirão Combate foi inspecionada ao longo dos terraços colúvio-aluvial e aluvial, entre as elevações 255m e 237m. Suas barrancas ofereceram, portanto, condições favoráveis à observação da estratigrafia dos sedimentos da base do terraço colúvio-aluvial e da metade superior do terraço aluvial.

O Rio Baía apresenta um leito escavado unicamente na planície aluvial, porém ao desembocar na Lagoa do Rodrigo (vide figura 3.2), intercepta o talude do terraço aluvial, erodindo-o até o nível do contato com o Arenito Caiuá, expondo parte dos seus sedimentos.

Foram estudadas as escavações executadas para a exploração dos colúvios do terraço colúvio-aluvial como jazida de "solo para empréstimo", e das areias do terraço aluvial para a construção de um aterro hidráulico experimental. A abertura de um canal de escoamento para as águas do aterro hidráulico, cortando o terraço aluvial e atingindo a planície, também contribuiu com cortes na parte superior dos sedimentos dessa unidade geomorfológica.

De grande importância foram as escavações realizadas

nas fundações de uma ensecadeira incorporada à barragem, que permitiram a inspeção direta dos sedimentos em todo o terraço e planície aluvial. Visaram a remoção do material inadequado como fundação, numa faixa que variou entre 50 e 100m de largura, e acompanhou toda a linha de referência da barragem, imediatamente a montante da mesma.

No trecho do terraço aluvial, e na quase totalidade da paleo-ilha, essas escavações se restringiram a alguns metros do topo do depósito, raramente ultrapassando 5m de profundidade. Em toda a planície do Rio Baía, e em cerca de 50% da planície do Rio Paraná, o pacote aluvial foi completamente removido até o topo do Arenito Caiuá.

De forma a drenar as águas provenientes das fundações, acumuladas nessas escavações, foram abertas valetas relativamente extensas a montante e jusante da cava. Através da inspeção dos taludes dessas valetas foram obtidas, também, informações sobre os níveis laterizados, até profundidades da ordem de 2 a 3m.

6.3.1.1 Terraço Colúvio-Aluvial

As ocorrências de níveis laterizados nesta unidade geomorfológica restringem-se à base dos colúvios e à camada superior de cascalho do depósito aluvial. A primeira apresenta grande continuidade, enquanto a segunda corresponde a lentes com algumas dezenas de metros.

Nos cortes executados na área de empréstimo foi obtida uma seção completa entre as elevações 252 e 262m, abrangendo os colúvios e a parte superior do pacote aluvial. A camada coluvial apresenta uma espessura total de 7m, estando fortemente cimentada, na base, por compostos de ferro, numa faixa com cerca de 0,40m de espessura.

Nas escavações pôde-se verificar que essa cimentação a grega firmemente os grãos de areia fina e média, formando um horizonte basal maciço, de coloração vermelha a marrom-avermelhada, que evolui para concreções ferruginosas soltas no sentido do topo da faixa laterizada. A partir de sondagens só foi possível a amostragem das formas concrecionadas, que se distribuíram numa faixa de espessura variável entre alguns centímetros até 0,80m mas que persistiram em, praticamente, todos os furos executados.

Imediatamente abaixo dos colúvios o pacote aluvial apresenta, no topo, uma camada de cascalho arenoso com espessura de 0,70m, capeada por 0,50m de um argilito ferruginoso, duro e maciço, de coloração vermelha. A base dessa camada é constituída por areia grossa e cascalho médio a grosso de quartzito, fortemente cimentados por compostos de ferro numa faixa de 0,40m, formando lentes descontínuas de conglomerado ferruginoso, que não apresentam mais do que 50m de extensão lateral. A posição estratigráfica desses conglomerados, e sua distribuição errática nos cortes e sondagens realizados, permitem concluir que os mesmos tenham ser formado antes dos processos de coluvionamento tendo sido, inclusive, retrabalhados parcialmente pelas águas do proto-Rio-Paraná.

Na calha do Ribeirão Combate, cerca de 3.500m a montante da estaca zero, aflora Arenito Caiuá alterado, com estratificação cruzada mergulhando 18° a 25° no sentido W-NW. Nesse local ocorre pequena cobertura de cascalho representado por seixos de quartzo e quartzito e blocos soltos de conglomerado ferruginoso, com até 0,5m de diâmetro, constituídos por areia grossa e cascalho fortemente cimentados. Pela sua natureza e constituição litológica este conglomerado parece corresponder ao nível laterítico encontrado no topo do aluvião, nas es

cavações da área de empréstimo.

Próximo à estaca zero, quase no talude do terraço aluvial, foi registrada a existência de uma nascente na margem esquerda do Ribeirão Combate, cerca de um metro acima do nível da água. Essa surgência ocorre no topo do depósito aluvial e se apresenta rica em compostos de ferro de coloração escura do tipo "ferro dos pântanos", denotando transporte do ferro em condições redutoras, através dos aluviões, e sua facilidade de precipitação, por oxidação, em contato com o ar atmosférico.

6.3.1.2 Terraço Aluvial

Nessa unidade geomorfológica a ferruginização ocorre em três diferentes níveis do depósito aluvial: Na sua porção superior, onde foi detectada na forma de concreções ferruginosas esparsas nas sondagens; na porção basal, como fragmentos esporádicos de conglomerado ferruginoso; e no topo da camada intermediária, a proximadamente na cota 240m, como lajes de arenito ferruginoso de 100 a 200m de extensão, expostas nos taludes das escavações executadas.

A escavação da área de empréstimo para o aterro hidráulico experimental expôs cerca de 3 a 5m dos sedimentos superficiais do terraço, na altura do seu talude natural. Esses sedimentos são representados por uma areia fina a média amarelada, fofa, sem qualquer estrutura deposicional visível.

No talude leste dessa cava observa-se uma camada de arenito ferruginoso em fragmentos com até 0,1m de espessura. Pouco mais ao Sul, próximo ao pé do talude do terraço, essa camada mergulha cerca de 30° para SE, desaparecendo ao nível da base da escavação,

que corresponde ao topo da planície aluvial. O número de fragmentos limoníticos também diminuem gradativamente nessa direção e os mesmos não chegam a formar uma laje maciça e contínua, mas sim um nível de fragmentos placóides, tubiformes e esferóides não cimentados entre si. No talude oeste da área de empréstimo essa camada não ocorre.

O canal de escoamento do aterro hidráulico consiste numa escavação que atinge as mesmas profundidades das escavações da área de empréstimo, e que alcança o topo da planície aluvial. Fica a Leste do aterro experimental e expõe a mesma areia do terraço aluvial descrita anteriormente.

Ao longo de quase toda a escavação, na direção N-S, ocorre uma laje horizontal e contínua de arenito ferruginoso, com espessuras variando entre 0,1 e 0,4m e cerca de 50m de extensão. A poucas dezenas de metros do talude natural do terraço essa camada mergulha 30° no sentido da planície aluvial, não existindo mais ao atingir o nível do piso da escavação (figura 3.6) . Imediatamente abaixo desta camada o aluvião apresenta ferruginização menos intensa, caracterizada por concreções arredondadas com 1 a 5 cm de diâmetro, numa faixa de aproximadamente 0,20m.

Este horizonte laterizado ocorre no mesmo nível daquele que foi observado na área de empréstimo do aterro hidráulico experimental devendo desaparecer, também, no sentido oeste da área.

As escavações das fundações da ensecadeira, devido ao seu caráter superficial nessa unidade geomorfológica, expuseram apenas o topo dos sedimentos, no qual foram observadas concreções ferruginosas esparsas. No trecho compreendido entre as estacas 130 e 140 da linha de referência, a construção de uma valeta de drenagem

nagem a jusante da mesma atingiu o nível ferruginoso da cota 240m, a cerca de 2,5m de profundidade. Neste local esse horizonte é representado por uma faixa com 0,2 a 0,3m de espessura de areia fina a média cinzenta com seixos esparsos, pouco compacta, fracamente cimentada por compostos de ferro, com ocorrências localizadas de conglomerado ferruginoso resistente.

Cerca de 3.500m a jusante do ponto em que é cortado pela linha de referência, o Rio Baía, que até então tem um leito escavado unicamente nos sedimentos da planície aluvial, intercepta o talude natural do terraço aluvial erodindo-o. Nesse ponto, situado na Fazenda Santa Ilída, a barranca do rio expõe uma areia fina a média amarela, homogênea e muito fofa, com um horizonte laterizado intercalado, de 0,3 a 0,5m de espessura.

Ainda neste local observam-se grandes placas de arenito ferruginoso, com 1 a 2m de diâmetro, deslocadas e caídas junto ao leito do rio. Encontram-se alveoladas e sua disposição sugere ação erosiva do Rio Baía sobre o talude natural do terraço aluvial, a ponto de atingir a camada ferruginizada da elevação 240m e deslocar blocos da mesma (figura 6.3).

Nos demais trechos do rio suas barrancas apresentam apenas sedimentos arenosos, sem qualquer evidência de camadas limonitizadas.

As correlações entre os níveis ferruginizados encontrados no terraço aluvial, a partir das sondagens e escavações realizadas, mostram que os mesmos constituem horizontes descontínuos, de ocorrência restrita ou até isolada. No caso do nível da cota 240m pode-se inferir uma extensão de menos de 100m a pouco mais de 150m para as lajes de arenito.

A posição destes níveis no depósito e em relação à planície aluvial sugere, ainda, que os mesmos tenham se formado de acordo com a seguinte sequência: conglomerados ferruginosos da camada basal; arenitos ferruginosos da cota 240m e, finalmente, as concreções ferruginosas da camada superficial. A forte inclinação do nível intermediário no trecho do talude natural, como se observa nas figuras 3.6 e 6.2, e a homogeneidade dos sedimentos arenosos acima e abaixo do mesmo, sem evidências de retrabalhamento, atestam que a laterização que originou esse nível se deu após a completa formação do depósito e do processo erosivo que originou o talude.

Alguns outros aspectos observados no terraço aluvial fornecem, ainda, um testemunho de que os processos de mobilização e precipitação do ferro, através dos aluviões, persistem até os dias atuais.

Na crista e nos taludes do aterro hidráulico experimental foi registrada a existência de concreções ferruginosas à superfície. Na crista essas concreções ocorrem na forma de crostas pouco resistentes, com até 0,20m de diâmetro e espessura variável entre 2 e 3 cm (figura 6.4). Formam pequenas placas discóides individualizadas, de coloração marrom-clara a bege, cuja cimentação diminui gradualmente para baixo e para as bordas até o seu contato com a areia, sugerindo evolução a partir de um ponto central.

Nos taludes do aterro, principalmente na sua porção inferior, as concreções se dispõem na forma de placas ferruginosas descontínuas e muito friáveis, com até 2m de diâmetro e espessura da ordem de 5mm. No pé de um desses taludes existe uma nascente cujas águas se apresentam ricas em compostos de ferro de coloração marrom-escura.

A ferruginização superficial dos sedimentos arenosos é um fenômeno relativamente comum em locais do terraço aluvial onde foram realizadas escavações ou aterros. O aporte de ferro é feito a partir do Arenito Caiuá, através de oscilações do nível da água, ou a partir dos próprios aluviões, onde este elemento mi-gra e se concentra graças à infiltração e percolação de águas superficiais.

6.3.1.3 Planície Aluvial

Nesta unidade somente a paleo-ilha apresenta dois níveis de ferruginização, sendo um deles no topo do pacote, na forma de concreções ferruginosas esparsas, e o outro na sua base, junto ao Arenito Caiuá. O nível basal ocorre, também, nas demais subunidades, a proximadamente ao longo da cota 235m.

Na planície do Rio Baía, o preparo das fundações da ensecadeira incorporada, para a construção do aterro, consistiu na escavação de todo o pacote aluvial, expondo o topo do Arenito Caiuá. Pôde-se observar que a camada basal do depósito apresenta cimentação irre-gular por compostos de ferro e blocos de conglomerado ferruginoso. Esses blocos são constituídos por uma areia fina, média e grossa com cascalho, irregu-larmente cimentada, e se apresentam como lajes indi-vidualizadas de espessura centimétrica a decimétri-ca, com alguns metros ou até dezenas de metros de ex-tensão. Entre as estacas 238 e 252 ocorrem com maior frequência.

Nas proximidades da estaca 264 foi detectada a exis-tência de uma fratura subvertical aberta no topo do arenito, com direção N20°E e extensão inferior a 5m, erodida e preenchida superficialmente por conglomera-do ferruginoso. Apresenta uma espessura da ordem de

3 cm e, em profundidade, mostra preenchimento areno-siltoso.

Na paleo-ilha as escavações realizadas foram apenas superficiais, com exceção do trecho compreendido entre as estacas 325 e 335, onde atingiram o Arenito Caiuá. No topo do pacote, em geral, ocorre areia fina argilosa de cor cinza, com grânulos esparsos de limonita amarelada ou castanho-amarelada.

As escavações que atingiram o Arenito Caiuá mostraram a existência de níveis subhorizontais de conglomerado irregularmente cimentado, com espessura entre 5 e 10 cm, intercalados numa camada basal de areia com cascalho, cuja espessura varia entre 0,30 e 0,90m. A apresentam ocorrência isolada e extensão de alguns metros ou dezenas de metros.

Na planície do Rio Paraná, todo o pacote aluvial foi removido a partir da estaca 435, ficando o Arenito Caiuá exposto nas escavações das fundações da enseca deira incorporada. Neste trecho verificou-se a existência de conglomerado ferruginoso na parte basal dos aluviões, representada por uma camada de areia fina, média e grossa com cascalho. O horizonte cimentado apresenta-se na forma de uma laje resistente com espessura média de 0,3 a 0,5m, parcialmente solidarizada ao arenito, que se estende por toda a superfície do topo rochoso de forma aparentemente contínua.

Dos níveis concrecionados detectados nos depósitos sedimentares da planície aluvial, o nível basal é o mais antigo. O grau de cimentação observado e sua posição estratigráfica nos aluviões atestam que se trata do mesmo nível concrecionado da base do terraço aluvial.

Sua origem deve estar associada, principalmente, à percolação de soluções provenientes do Arenito Caiuá e dos colúvios, numa época em que estes se estendiam por grande parte da margem direita do Rio Paraná. As concreções ferruginosas observadas no topo dos sedimentos da paleo-ilha assemelham-se àquelas observadas no topo dos sedimentos do terraço e são de origem mais recente.

6.3.2 Leito do Rio Paraná

O estudo dos níveis laterizados existentes nos depósitos aluviais do leito do Rio Paraná, representados na sua maioria por lajes de conglomerado ferruginoso, fundamentou-se na correlação de sondagens e no mapeamento de taludes de escavações.

As campanhas de sondagens tiveram por finalidade a investigação e instrumentação das fundações no local de implantação das obras da barragem, e a pesquisa de materiais granulares nas cascalheiras Santa Ilídia e Óleo Cru. A Jazida Santa Ilídia abrange o trecho do rio onde são construídas as estruturas de concreto da usina.

Todas as sondagens apresentadas nas figuras 2.5 e 2.6 e relacionadas nas tabelas 2.4 e 2.5 foram utilizadas na definição e caracterização dos níveis ferruginizados, mas somente 43 sondagens rotativas e 20 sondagens a percussão, na Cascalheira Santa Ilídia, foram executadas com cuidados especiais para amostragem das lajes de conglomerado. Essas sondagens se encontram destacadas no mapa da figura 6.1.

As obras realizadas para o desvio do Rio Paraná, de forma a possibilitar a construção da casa de força e do vertedouro da usina no seu leito permitiram, inici

almente, o acesso direto ao canal principal do rio e toda a superfície do depósito aluvial na área ensecada. As escavações executadas posteriormente neste trecho possibilitaram o estudo dos níveis laterizados no interior dos sedimentos.

A medida que evoluíam as escavações, os taludes provisórios dos cortes que se formavam, transversal e longitudinalmente à direção do rio, foram mapeados com finalidades geotécnicas. Esses cortes se distribuíram entre as estacas 507 e 525 da linha de referência, cerca de 15m a montante até 200m a jusante da mesma. Atingiram, na sua maioria, cotas variáveis entre 224 e 220m, porém alguns se restringiram ao topo dos aluviões.

6.3.2.1 Cascalheira Santa Ilídia

Os níveis laterizados deste depósito aluvial são representados, predominantemente, por cascalhos arenosos ou areias com mais de 20% de cascalho, fortemente cimentados por compostos de ferro, constituindo lajes de conglomerado de coloração cinzenta, castanha ou marrom-escura avermelhada. Secundariamente ocorrem horizontes de areia concrecionada, formando lajes de arenito ferruginoso de cor cinza ou castanho-amarelada.

Diferenças no grau de cimentação desses materiais foram observadas nas escavações e durante a realização das sondagens. Alguns níveis foram facilmente atravessados apenas por meio de varejão com jato de água associado, enquanto outros se mostraram impenetráveis aos métodos percussivos, sendo amostrados somente por meio de sondagens rotativas. Sua espessura varia entre um mínimo de 5 cm e um máximo de 1,5m, porém os valores mais freqüentemente observados situam

se entre 0, 1 e 0,3m.

Sua distribuição, inferida através de sondagens, é a apresentada no mapa da figura 6.1 e nas seções transversais da figura 6.5, e parece obedecer a um zoneamento aproximadamente paralelo ao eixo do Rio Paraná. Essas faixas de distribuição possuem as seguintes características gerais:

- Zona I: Compreende o trecho entre a margem direita do rio e as proximidades da estaca 485 da linha de referência, ao longo do qual a espessura dos aluviões é da ordem de 2m. Apresenta uma única laje de conglomerado no topo do pacote aluvial, em torno da cota 235m.
- Zona II: Desenvolve-se entre as estacas 485 e 520 aproximadamente; neste trecho foram detectados até 7 níveis laterizados, sendo um deles superficial e contínuo, situado no topo do pacote aluvial, ao longo da cota 235m. Dos demais níveis, alguns mostraram elevada persistência em torno das cotas 234, 233 e 230m, o que pode significar grande continuidade. Outros níveis, nas elevações 228 e 224m, parecem constituir ocorrências mais localizadas, de pequena extensão.
- Zona III: Abrange o trecho compreendido entre as estacas 520 e 530, ao longo do qual se desenvolve o canal principal do rio. Nesta zona ocorrem com frequência um a dois níveis de conglomerado e, secundariamente, até 4 níveis. Apresentam pequena extensão e distribuição irregular entre as elevações 218 e 228m.
- Zona IV: Desenvolve-se das proximidades da estaca 530 até a margem esquerda do rio e não apresenta lajes

de conglomerado e arenito ferruginoso. As únicas e vidências de ferruginização correspondem a fragmentos de conglomerado, amostrados pelas sondagens na base do depósito aluvial, que podem significar precipitação sub-aquática do ferro e/ou retrabalhamento de lajes completamente desmanteladas.

De maneira geral o espaçamento entre as lajes varia entre 0,1 e 1m, podendo atingir mais de 3m nos locais de distribuição errática. Sua disposição no pacote aluvial, via de regra, é horizontal a sub-horizontal.

A distribuição dos conglomerados de acordo com o zoneamento apresentado mostra uma redução do número de lajes e um maior grau de retrabalhamento no sentido da margem esquerda do rio, até o seu total desaparecimento. Esse fato, se relacionado à intensa erosão que ocorreu entre as estacas 515 e 550 aproximadamente, faz supor que o canal principal do Rio Paraná tenha se mantido junto a essa margem durante e após a formação das lajes. A existência de outros níveis de erosão localizados, às vezes atingindo o topo do maciço basáltico, seria explicada a partir de paleo-canaís secundários.

Os níveis concrecionados das zonas I, II e III teriam colaborado, portanto, para a preservação do depósito que constitui a Cascalheira Santa Ilida protegendo-o da erosão, mantendo o fluxo principal do rio ao longo do seu atual canal.

As escavações realizadas na área ensecada foram de grande importância no estudo da natureza dos níveis laterizados, uma vez que a amostragem através de sondagens nem sempre constituiu um método adequado de investigação, devido às próprias característi-

cas desses níveis que se encontram, por vezes, fracamente cimentados e com espessuras da ordem de centímetros. O mesmo pode ser dito dos horizontes de argila, de pequena espessura e ocorrência restrita. Nas figuras 6.6 e 6.7 estão representadas algumas seções aproximadamente longitudinais e transversais ao Rio Paraná, obtidas a partir do mapeamento dessas escavações.

A laje superficial se estende por quase todo o pacote aluvial, entre a margem direita do rio e o seu canal principal. É constituída por cascalho arenoso e areia, fortemente cimentados por compostos de ferro, formando conglomerados e arenitos. Como pode ser observado na figura 6.8, sua disposição é praticamente horizontal, assim como a dos horizontes laterizados subjacentes, seguindo um processo de cimentação controlado por flutuações do nível da água do rio.

Apresenta-se geologicamente contínua, porém a menor resistência dos arenitos à ação das águas do rio faz com que estes se mostrem quase sempre desgastados, emprestando à laje uma aparente descontinuidade (figura 6.9). São observadas feições erosivas nos arenitos (figura 6.10) e nos conglomerados, estes últimos podendo se mostrar alveolados pela remoção de intercalações areníticas menos consolidadas (figura 6.11).

Outras feições fazem supor a participação de um condicionamento hidrodinâmico associado às condições físico-químicas, na precipitação do ferro. As figuras 6.12 e 6.13 referem-se a diferentes formas de precipitação a partir de frentes de migração de íons em provável ambiente subaquático raso, formando pequenas placas e cimentando diques clásticos nas la

jões de arenito ferruginoso. Variações de permeabilidade também governaram a precipitação do ferro, como é evidenciado pela ocorrência de concreções lateríticas subarredondadas envolvendo pelotas de argila, e pela maior frequência e grau de ferruginização nos conglomerados, em comparação aos arenitos ferruginosos.

Foram observados, também, diques subverticais de arenito ferruginoso projetados a partir da laje superficial, cortando discordantemente os sedimentos arenosos (figura 6.14). Apesar de discordantes, suas características granulométricas e estruturais são iguais às das areias que os envolvem, evidenciando uma gênese posterior à do depósito. Estes diques teriam se formado de cima para baixo, por infiltração de soluções provenientes de fraturas ou vazios do nível concrecionado, e precipitação do ferro nos trechos de maior concentração de fluxo.

Na área escavada foram encontradas seqüências de até 5 níveis concrecionados abaixo da laje superficial. Sua extensão varia entre um mínimo de 4 até mais de 150m, porém a maioria se situa entre 7 e 15m. De modo geral apresentam maior extensão paralelamente à direção do rio, tendo se formado ao longo de barras longitudinais e depósitos de preenchimento de canal.

São constituídas na sua maioria por conglomerados e, secundariamente, por arenitos ferruginosos. Como se observa nas seções das figuras 6.6 e 6.7, podem apresentar ramificações ou acompanhar os taludes de antigos bancos arenosos, com mergulhos de até 23° , evidenciando que a precipitação do ferro tenha se dado na zona de contato entre o talude e a superfície livre da água do rio, e por migração ascendente ou lateral de íons.

Algumas lajes abrangem um horizonte de conglomerado no topo e um de arenito na base, sendo que a cimentação no conglomerado possui dureza elevada, enquanto no arenito se nota um decréscimo de resistência de cima para baixo. Tal fato sugere que, após a deposição da camada de cascalho sobre um banco arenoso, a precipitação de compostos de ferro tenha se dado na faixa de oscilação do nível da água e abaixo desta, em condições gradativamente menos oxidantes. A maior permeabilidade do cascalho, associada a fortes evaporações, teria também contribuído para a migração ascendente de íons e sua precipitação em meio mais oxigenado.

Algumas camadas arenosas concrecionadas, na sua porção superior, apresentam indícios da atuação de processos pedogenéticos, tendo já constituído paleo-ilhas sujeitas às flutuações do nível da água. Nesses casos o pacote sedimentar apresenta estratificações que tendem a se atenuar e desaparecer no sentido do topo da camada, à medida que a areia se torna mais homogênea, escura e cimentada por compostos de ferro.

Evidências de retrabalhamento de lajes de conglomerado e arenito foram também observadas. Blocos de dimensões decimétricas, provenientes de níveis concrecionados, ocorrem esparsamente no meio dos sedimentos que separam as lajes (figura 6.15) ou integram camadas de cascalho arenoso com matações.

Algumas seções de escavação (como na figura 6.6) mostram paleo-canais escavados no leito arenoso, típicos de um regime fluvial entrelaçado-meandrante de canais divagantes. Esses canais às vezes interrompem lajes de arenito ou mesmo de conglomerado e se

apresentam entulhados de cascalho arenoso com matacões e pelotas de argila, ou apenas areia, denotando regimes de maior ou menor energia.

Na mesma figura se observam lajes de conglomerado e arenito retrabalhadas e abatidas no talude de um antigo canal do rio. A existência de lajes contínuas e horizontes centimétricos a decimétricos de argila cinza com ou sem restos vegetais, intercalados aos sedimentos, são indicativos das freqüentes mudanças de direção dos canais, criando bancos de sedimentos rudáceos sujeitos às oscilações do nível da água, e lagoas ou zonas alagadiças de acreção vertical de sedimentos lamíticos.

A presença de níveis de retrabalhamento intercalados às lajes evidencia que a ordem de formação das mesmas tenha se dado da base para o topo do depósito, sendo a laje superficial a mais recente. Sob condições de paleoclima semi-árido, cada nível laterizado teria se formado na parte superior de bancos e mersos de cascalho arenoso ou areia, sendo posteriormente retrabalhado pelas águas do rio e coberto por uma nova camada de sedimentos, durante um ciclo de cheias torrenciais. A maior ou menor continuidade das lajes seria função do número de canais existentes no leito do rio, do grau de ferruginização atingido e da intensidade e tempo de atuação do agente erosivo.

6.3.2.2 Cascalheira do Óleo Cru

Nesse depósito aluvial, que abrange o trecho do Rio Paraná onde se localiza a Ilha do Óleo Cru, foram detectadas lajes de conglomerado e de arenito constituídas por cascalhos arenosos, areias com cascalho ou apenas areias, cimentadas por compostos de ferro. Sua

coloração, em geral escura, pode se apresentar em tons de cinza, castanho ou marrom.

O grau de cimentação desses horizontes é variável, o correndo níveis fracamente cimentados e outros de elevada resistência, atravessados com dificuldade pelos furos realizados. A amostragem através de sondagens não permitiu uma definição precisa de suas espessuras, que variaram entre 0,1 e 0,3m atingindo, no máximo, 0,8m.

Sua distribuição é apresentada no mapa da figura 6.16, tendo-se observado um zoneamento paralelo ao rio. Utilizando-se os mesmos padrões adotados para a Casca lheira Santa Ilídia, temos as seguintes zonas de ocorrência:

- Zona I: Apresenta um nível laterizado e ocorre de forma eventual.
- Zona II: Apresenta 3 a 5 níveis laterizados podendo atingir, nos locais de maior espessura do aluvião, até 7 níveis. Desenvolve-se junto à Ilha do Óleo Cru, ao longo dos dois braços do rio.
- Zona III: Envolve a Zona II e possui 1 a 2 níveis laterizados, ocupando cerca de 2/3 do braço direito e 1/3 do braço esquerdo do rio, a partir da Ilha do Óleo Cru.
- Zona IV: Desenvolve-se junto às margens direita e esquerda do rio e não apresenta níveis laterizados.

As maiores concentrações de níveis laterizados coincidem com as maiores espessuras do aluvião, correspondentes a antigos canais escavados em solo

residual de arenito ou basalto, junto à Ilha do Óleo Cru.

A correlação dos furos de sondagens se mostrou extremamente difícil, sendo praticamente impossível estabelecer uma continuidade satisfatória entre as lajes detectadas. Este fato leva a crer que as lajes apresentam pequena extensão lateral tendo sido, inclusive, submetidas a um intenso retrabalhamento.

De modo geral situam-se entre as elevações 225 e 235m do pacote aluvial, ocorrendo uma laje superficial mais ou menos contínua praticamente em toda a extensão das zonas II e III. Apresentam espacamento de 1 a 2m, estando separadas por camadas de sedimentos não concrecionados.

Como se observa nas seções da figura 6.17 sua disposição é horizontal a subhorizontal podendo ocorrer, a exemplo da Cascalheira Santa Ilídia, níveis inclinados acompanhando o mergulho de camadas. As maiores extensões verificadas parecem ultrapassar 150m e ocorrem longitudinalmente ao rio, o que sugere que esses níveis tenham se formado ao longo de depósitos de barras longitudinais e preenchimento de canais.

A falta de escavações no leito do rio impossibilitiou um estudo mais detalhado das lajes de conglomerado e arenito, dificultando o conhecimento de sua natureza. As informações disponíveis através de sondagens, sobre a topografia do embasamento e a distribuição das lajes permitiram, no entanto, chegar a algumas conclusões importantes sobre a

sua gênese.

Após o ciclo erosivo que originou o canal principal do rio teriam se sucedido, alternadamente, pe ríodos de estiagem e períodos de cheias torrenciais, em condições de paleoclima semi-árido. A cada ciclo deposicional, responsável por uma camada de sedimentos no processo de entulhamento do canal, seguia-se um período de sêca ao longo do qual se instalava, sobre o depósito aluvial, um regime fluvial do tipo entrelaçado-meandrante com um intrincado sistema de canais secundários.

Nesse período, barras de areia e cascalho parcialmente emersas teriam sido submetidas a fortes eva porações e às oscilações do nível da água do rio, formando-se horizontes concrecionados através dos mecanismos já descritos.

Os níveis laterizados assim formados teriam sido submetidos a um novo ciclo erosivo, de retrabalhamento e deposição de sedimentos, a partir de chei as torrenciais. O entrelaçamento de canais de pequeno porte confinados a uma calha de rio parcialmente assoreada, delimitando bancos pouco extensos de sedimentos, e a erosão sofrida pelas lajes, seriam os responsáveis por sua pequena extensão e distribuição aparentemente errática.

Da mesma forma que na Cascalheira Santa Ilídia, a formação das lajes teria se dado da base para o topo do depósito, sendo a laje superficial a mais recente.

A Ilha do Óleo Cru teria se afeiçoado já na fase erosiva que originou o canal principal dos braços direito e esquerdo do rio recebendo, a partir de

então, acreção de sedimentos e funcionando como um divisor das águas fluviais até os dias atuais. A formação de lajes ferruginosas nos sedimentos que preencheram esses antigos canais é indicativa de que, na época de sua formação, o volume das águas drenadas pelos rios Paraná e Paranapanema se apresentava extremamente reduzido já que seus canais mais profundos estavam parcialmente assoreados e sua águas eram escoadas por uma calha estrangulada e pouco profunda.

6.4 Características das Lateritas

6.4.1 Características Químicas e Mineralógicas

A precipitação dos compostos de ferro se dá, inicialmente, na forma de geles amorfos, de coloração marrom-amarelada, amarela-avermelhada ou marrom-escura, nos locais onde as águas efluentes dos aluviões, sotopostos pelo Arenito Caiuá entram em contato com um meio mais oxigenado. Esta forma de ocorrência corresponde à primeira etapa da cimentação dos aluviões, na qual o ferro ocorre como hidróxidos e oxi-hidróxidos pouco solúveis.

A evolução desses compostos ao longo do tempo se dá através da perda gradativa da água contida na sua estrutura, tendendo da fase amorfa para uma fase cristalina mais estável. Ocorre um aumento das concentrações relativas de ferro no meio, pela eliminação da água, ou das concentrações absolutas deste elemento, pelo aporte de íons.

Embora não se disponha de análises químicas e mineralógicas dos cimentos ferruginosos pode-se inferir, comparando-se sua cor, tempo de formação e elevada resistência com dados da literatura, que são consti

tuídos, provavelmente, por sesquióxidos insolúveis, com uma fase amorfa e pequena substituição isomórfica por alumínio; os minerais presentes estariam representados pela goethita, limonita e hematita. A existência de carbonatos na cimentação do Arenito Caiuá e de íons CO_3^{2-} e HCO_3^- nas águas da região sugere, ainda, a eventual presença de siderita nos meios de pH mais elevado e baixos potenciais de oxi-redução.

6.4.2 Estruturas

Do ponto de vista morfológico as lateritas estudadas podem apresentar feições "maiores", correspondentes às estruturas das camadas sedimentares, preservadas e até realçadas nos horizontes cimentados, e estruturas "menores", formadas a partir da cimentação das areias e cascalhos por compostos de ferro (ALEVA, 1983). Com base na sistematização proposta por NAHON (1976), as primeiras corresponderiam às estruturas herdadas e as demais representariam estruturas de acumulação, lixiviação e reorganização.

De maneira geral foram caracterizadas com facilidade as estruturas de acumulação, formadas pelo preenchimento dos "vazios" existentes nos sedimentos. Correspondem às concreções e nódulos observados nas lateritas da margem direita e às lajes maciças de conglomerado e arenito presentes em praticamente toda a formação aluvial.

Estruturas de lixiviação puderam ser reconhecidas em amostras de mão, somente em lajes de conglomerado que apresentaram retrabalhamento, mostrando-se alveoladas (figura 6.11). Verificou-se no entanto que, dadas as dimensões e forma de ocorrência dos alvéolos, sua origem se deve, predominantemente, à remoção mecânica de matéria, supondo-se que uma provável participa

ção dos processos de dissolução química do cimento tenha se dado em escala microscópica, apenas no contato da superfície erodida com as águas.

Estruturas de reorganização não puderam ser dentifi cadas com segurança. Prevê-se, porém, que estejam re lacionadas à mobilização do ferro na interface do pre cipitado com as águas percolantes, em função de vari ações nas condições físico-químicas e concentrações de soluções, ou pelo ataque de microorganismos, segu i da de pequeno transporte e precipitação. Estariam pre sentes no interior de estruturas de lixiviação, ao longo de barreiras de permeabilidade e em feições co mo "folheações", associadas à precipitação em condi ções subaquáticas rasas (figura 6.12).

6.5 Modelo de Laterização

Os estudos realizados na região do Pontal do Parana-panema, para a implantação da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, permitiram o desenvolvimento de um modelo de laterização que se propõe a explicar a origem e a evolução dos níveis de conglomerado e arenito ferruginoso presentes nos aluviões.

Na figura 6.18 são apresentados, esquematicamente, os pro váveis mecanismos que atuaram na mobilização e na precipitação do ferro em perfis de solo típicos da região, considerando-se as diversas posições do nível freático local. Por representarem processos extremamente complexos, envolvendo diversos fatores físico-químicos e ambientais, foram tratados de forma bastante simplificada, merecendo pesquisa específica em etapas futuras.

Também é proposto um modelo evolutivo para os níveis concrecionados estudados, tecendo-se algumas conside

rações sobre a participação das lateritas como modeladoras do relevo.

6.5.1 Mecanismos de Mobilização do Ferro

A mobilização do ferro se dá em ambiente redutor caracterizado por uma diminuição do pH, do Eh e/ou da pressão parcial de O_2 , ou ainda na presença de agentes complexantes ou microorganismos. Quando essas condições se intalam no maciço rochoso e nos aluviões, o ferro presente, que constitui minerais primários e secundários, é liberado passando para a solução aquosa na sua forma reduzida e entrando num processo de migração através do qual irá atingir um ambiente oxidante, onde é provocada a sua precipitação.

Abaixo do nível da água sua migração é governada por gradientes regionais e locais. Pode ser ascendente ou descendente, com direção vertical ou lateral ao perfil de solo. Na topo-seqüência se dá lateralmente em relação ao perfil, sempre de montante para jusante, no sentido do nível de base regional.

Acima do nível da água a migração do ferro se processa vertical ou lateralmente ao perfil de solo, no sentido ascendente ou descendente em função, respectivamente, da capilaridade do material ou infiltração de soluções. A franja capilar pode apresentar maior ou menor amplitude, dependendo da ação solar sobre a superfície do aluvião.

6.5.1.1 Mobilização do Ferro Abaixo do Nível da Água

Abaixo do nível da água o ferro deve ser mobilizado do Arenito Caiuá e, secundariamente, dos basaltos e aluviões. O ferro proveniente do maciço basáltico passa para as soluções percolantes complexado pelos íons

de metais alcalinos e alcalino-terrosos que também são liberados, apresentando maior mobilidade e permanecendo estável por maior período de tempo.

Sua redução se dá de três formas distintas:

- a. Na presença de águas subterrâneas pouco oxigenadas.

A falta de contato das águas subterrâneas com o ar atmosférico lhes confere características redutoras devido à falta de oxigenação. Essa característica tende a se intensificar com a profundidade, havendo mobilização do ferro de forma lenta e contínua, principalmente no maciço rochoso, onde o mesmo é reduzido e passa a migrar através das estruturas presentes.

- b. A partir da infiltração de águas ricas em ácido húmico.

Este mecanismo atua na planície aluvial devido à existência de condições naturalmente redutoras, pela grande quantidade de matéria orgânica presente. As pequenas espessuras dos aluviões fazem supor que as águas assim acidificadas atinjam também o maciço arenítico, mobilizando íons de ferro pelo mesmo processo.

Analisando-se o mapa da figura 5.1 verifica-se que as ocorrências mais significativas de ferruginização dos aluviões do leito do Rio Paraná, representadas pelas lajes de conglomerado e arenito, distribuem-se no trecho do rio que possui uma extensa planície de inundação na margem direita. Esses depósitos aluviais se encontram recortados por rios e ribeirões meandrantés, lagoas e pântanos, es

tando parcialmente recobertos por vegetação sub-aquática e grande quantidade de matéria orgânica em decomposição.

Este fato evidencia uma importante contribuição dessa unidade geomorfológica nos processos de laterização. O ferro reduzido e liberado por esse mecanismo teria migrado continuamente ao longo dos últimos milhares de anos, de montante para jusante no topo-seqüência, no sentido do rio. Esse aporte de íons seria um dos responsáveis pela ferruginização dos aluviões à medida que as soluções percolantes fossem atingindo o nível de base regional, representado pelo Rio Paraná.

- c. Através da ação de agentes complexantes e microorganismos.

Essas formas de mobilização se encontram associadas à matéria orgânica presente nos aluviões, uma vez que esta libera quelatos e abriga colônias de bactérias redutoras e sulfato-redutoras.

6.5.1.2 Mobilização do Ferro Acima do Nível da Água

Acima do nível da água o ferro deve ser mobilizado principalmente dos aluviões, onde constitui minerais secundários. Sua liberação se dá de duas formas:

- a. A partir da infiltração da água das chuvas, naturalmente ácida pela presença de H_2CO_3 .

Este mecanismo de mobilização atua mais intensamente na superfície dos depósitos aluviais, liberando íons de ferro que migram verticalmente para baixo no perfil de solo e lateralmente na topo-seqüência, ao longo de taludes inclinados, precipi-

tando rapidamente.

Ocorre nos depósitos da margem direita, principalmente nos taludes das escavações e do aterro hidráulico experimental e já ocorreu, no passado, à superfície dos depósitos existentes no atual leito do Rio Paraná.

- b. A partir da ascensão de águas ácidas, por capilaridade.

Nos ambientes redutores as águas se encontram pouco oxigenadas e naturalmente ácidas, mesmo na zona de oscilação do nível da água. Embora o grau de oxigenação se torne gradativamente maior no sentido do topo, as condições de pH, Eh e pressão parcial de CO_2 possibilitam a mobilização do ferro.

Esta forma de liberação atua, portanto, na franja capilar que se instala acima da superfície do lençol freático, tendo uma ação limitada à amplitude dessa franja. O ferro mobilizado, no entanto, precipita rapidamente em função de pequenas variações no equilíbrio físico-químico do meio, sendo sua migração muito restrita.

6.5.2 Mecanismos de Precipitação do Ferro

A precipitação do ferro se dá em ambiente oxidante, caracterizado por um aumento do pH, do Eh e/ou da pressão parcial de O_2 . Pode ocorrer, também, na presença de bactérias ou algas capazes de oxidar o ferro quando as concentrações de íons Fe^{2+} e de OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- ou S^{2-} atingirem o seu produto de solubilidade.

Essas condições se instalam, via de regra, no interior ou sobre os depósitos aluviais, uma vez que os mesmos

mantêm contato com o ar atmosférico e contêm matéria orgânica. As soluções ricas em ferro, que percolam pelos aluviões até encontrarem as condições favoráveis à sua precipitação, são chamadas "frentes de migração".

Em meio oxidante o ferro precipita na forma de hidróxidos e oxihidróxidos amorfos, ou mesmo carbonatos na presença de íons CO_3^{2-} e HCO_3^- , e depois evolui para sesquióxidos, constituindo uma cimentação que acaba por preencher completamente os vazios do solo, permanecendo estável. Em meio redutor, na presença de íons S^{2-} , precipita como sulfeto, podendo então sofrer oxidação ou evoluir para uma forma cristalina mais estável, no caso a pirita.

6.5.2.1 Precipitação do Ferro Acima do Nível da Água

Acima do nível da água o íon Fe^{2+} apresenta uma mobilidade bastante restrita, uma vez que o meio é muito oxigenado e a sua precipitação se dá rapidamente. As "frentes de migração" avançam governadas por gradientes locais, instalados em função da topografia e da profundidade do lençol freático, sendo o ferro precipitado de três formas:

a. Em contato com o ar atmosférico

Este processo ocorre quando águas efluentes dos aluviões ou do Arenito Caiuá atingem naturalmente a superfície do terreno, são interceptadas por escavações ou trazidas à superfície através de bombeamento. Pode haver participação de bactérias, porém a forte oxigenação que é imprimida ao meio, quando as soluções entram em contato com o ar atmosférico, é a principal responsável pela precipitação do ferro, em especial nos casos de bombeamento.

b. A partir da infiltração de águas superficiais

A infiltração das águas de chuva promove a lixiviação do solo e a formação de "frentes de migração" que avançam vertical ou lateralmente no perfil, em função da topografia. Quando essas frentes encontram uma barreira física ao seu avanço, ou condições favoráveis à precipitação do ferro, este se fixa, formando níveis fracamente cimentados, veios, concreções, nódulos ou crostas ferruginosas superficiais (figura 6.19A).

Exemplos desse processo foram observados no topo dos aluviões do terraço aluvial e da paleo-ilha, onde ocorrem concreções e nódulos ferruginosos. Nos taludes do aterro hidráulico experimental, as crostas ferruginosas observadas à superfície do terreno (figura 6.4) devem ter sido originadas a partir da lixiviação do ferro contido na areia, após sua migração, concentração e precipitação imediatamente a jusante, em condições fortemente oxidantes (figura 6.19B).

c. Na zona de oscilação do nível da água

A oxigenação do meio aumenta de baixo para cima no perfil de solo, sendo já bastante significativa na zona de oscilação do nível da água, onde ocorre precipitação do ferro. Esta faixa inclui a franja capilar, cuja amplitude é função direta das evaporações que ocorrem na superfície, e função inversa da permeabilidade do material.

Com o avanço da "frente de migração" (movimento do nível da água para cima), além do aporte de íons, parte do ferro contido nos aluviões é mobili

zada, por se instalarem condições mais redutoras, e transportada para níveis mais altos, onde irá precipitar. Com o seu recuo (movimento do nível da água para baixo), o ferro oxidado é retido nos vazios do solo e grande parte dos íons Fe^{2+} permanece na água intersticial, sendo posteriormente fixado. Pequenas variações no equilíbrio físico-químico do meio e a presença de bactérias redutoras ou precipitadoras do ferro podem, portanto, determinar a sua desestabilização ou fixação.

Desta forma a migração do ferro se dá na vertical, predominantemente para cima, e sua fixação ocorre ao longo de níveis horizontais cuja disposição é governada pelo comportamento do nível da água (figura 6.8). A "frente de migração" apresenta grande extensão na horizontal mas sua faixa de atuação na vertical é limitada pelos níveis máximo e mínimo da superfície do lençol freático (figura 6.19C).

Este mecanismo é o principal responsável pela formação dos níveis laterizados da margem direita e das lajes de conglomerado e arenito presentes nos depósitos aluviais do leito do rio. Os demais processos devem, porém, atuar e ter atuado simultaneamente nos perfis de solo submetidos às flutuações do nível da água.

6.5.2.2 Precipitação do Ferro Abaixo do Nível da Água

Abaixo do nível da água o ferro pode precipitar segundo três mecanismos geoquímicos:

- a. Em ambiente subaquático raso, na presença ou não de bactérias e algas que oxidam o ferro.

Quando soluções ricas em ferro atingem um meio mais oxigenado ou quando este se torna mais oxidante graças a uma maior aeração, associada ou não a presença de bactérias ou algas, ocorre a precipitação do ferro em condições subaquáticas. Este processo se verifica imediatamente abaixo da zona de oscilação do nível da água nos perfis de solo, ou a pequenas profundidades nas águas do Rio Paraná.

Alguns níveis concrecionados detectados nos depósitos aluviais da margem direita e do leito do rio podem ter se originado desta forma, em especial aqueles observados junto ao topo do maciço rochoso, no fundo do atual canal principal. Em época de paleo-clima seco, as águas efluentes do Arenito Caiuá ao atingirem águas pouco profundas do Rio Paraná, teriam encontrado um ambiente bastante oxigenado que provocaria a precipitação do ferro, fixando-o à superfície dos aluviões ou da própria rocha.

b. Quando as "frentes de migração" atingem barreiras de permeabilidade

A percolação no perfil de solo é governada pelo gradiente hidráulico e pela permeabilidade dos materiais. Sempre que uma solução rica em ferro passa de um meio mais permeável para um menos permeável ocorre uma sensível redução na sua velocidade de percolação e, conseqüentemente, da vazão. A interface onde se dá a mudança funciona, portanto, como uma barreira que retarda o fluxo das soluções, fazendo com que aumente a dissipação das cargas hidráulicas e as concentrações de ferro, provocando a sua precipitação.

Essa fixação se dá nos contatos entre sedimentos rudá-

ceos ou areias, com argilas e concreções ferrugíneas já existentes. A formação de crostas ferrugíneas ao redor de pelotas de argila, conforme observado no leito do rio, e de concreções ao redor de núcleos impermeáveis formando nódulos ferrugíneos, constituem exemplos desse processo. Pequenos níveis ou zonas de impregnação ou cimentação nos contatos entre cascalhos e areias, e crostas ferrugíneas na superfície dos seixos também podem significar precipitação ao longo de barreiras de permeabilidade (figuras 6.18C e 6.18D).

No caso da "frente de migração" atingir um ambiente mais permeável passando, por exemplo, de uma camada de argila ou areia fina para uma camada de cascalho arenoso, haverá precipitação do ferro se a camada mais permeável situar-se mais próxima à superfície da água, apresentando maior aeração e, portanto, pressão parcial de O_2 mais elevada.

- c. Quando as "frentes de migração" atingem soluções ricas em carbonatos ou sulfetos.

O ferro pode precipitar na forma de carbonato ou sulfeto, desde que seja atingido o seu produto de solubilidade com as concentrações de íons HCO_3^- e CO_3^{2-} ou S^{2-} , respectivamente.

O primeiro caso se verifica quando a "frente de migração" atinge águas carbonatadas, ou uma solução ferruginosa contendo também íons HCO_3^- e CO_3^{2-} sofre intensa evaporação, tornando-se alcalina. O ferro precipita na forma de siderita, que depois evolui para um óxido segundo a equação:

Este mecanismo, típico de ambiente oxidante, ocorre no leito do Rio Paraná a pequena profundidade, nos locais onde soluções provenientes da superfície, ou efluentes do Arenito Caiuá, entram em contato com as águas do rio. O ferro é fixado no próprio aluvião ou à sua superfície, na forma de níveis horizontais, manchas, veios ou diques subverticais (figura 6.14).

A precipitação do ferro, atingido o seu produto de solubilidade com as concentrações de S^{2-} , dá-se em ambiente redutor. O íon Fe^{2+} forma um sulfeto que evolui para pirita, e havendo um aumento do Eh do meio se dissocia em sulfato e óxido de ferro estável segundo a equação:

Localmente a reação é catalizada por bactérias que utilizam a energia liberada no processo (KRAUSKOPF, 1910).

Este processo apresenta pequena expressão e ocorre localmente na margem direita do Rio Paraná, principalmente na planície aluvial, quando "frentes de migração" ascendentes provenientes do Arenito Caiuá atingem as águas que saturam os aluviões, formando níveis ou manchas incipientes de natureza ferruginosa.

6.5.3 Modelo Evolutivo

6.5.3.1 Perfil de Solo e Topo-seqüência

A evolução dos níveis lateríticos no perfil de solo se dá no sentido oposto ao da percolação das soluções. Como se observa na figura 6.19, equivale dizer que a "frente de acumulação" se opõe à "frente de migração".

Inicialmente ocorre impregnação do solo por compostos de ferro e sua permeabilidade é reduzida, passando o horizonte impregnado a funcionar como uma barreira de permeabilidade. A partir daí o ferro encontra uma frente de oposição à sua migração e precipita, reduzindo ainda mais a permeabilidade do meio. À medida que o grau de cimentação aumenta, a "frente de acumulação" avança, fazendo com que a "frente de migração" recue.

Caso as soluções tenham movimento ascendente no perfil, a laterização se desenvolve de cima para baixo, e no caso de soluções descendentes ocorre o inverso. Mudanças no sentido de percolação determinam mudanças no sentido de evolução das "frentes de acumulação".

Os níveis mais evoluídos apresentam maior grau de cimentação e elevada resistência mecânica, porém sua espessura é função direta da granulometria do material ferruginizado. De modo geral as lajes de conglomerado apresentam maiores espessuras que as de arenito ferruginoso, pois os solos mais permeáveis possibilitam uma maior percolação das soluções, mesmo estando já parcialmente cimentados.

Uma vez instalado no perfil de solo, o nível ferruginoso passa a atuar como modelador do relevo, dada a sua maior resistência. Um rebaixamento do nível de base determina o seu isolamento em terrenos de cotas mais elevadas, como ocorreu no terraço colúvio-aluvial, e o sentido de evolução da acumulação se inverte, pois surgem "frentes de migração" com movimento descendente, formadas a partir da infiltração de águas superficiais. Em função das concentrações de ferro nessas soluções, pode haver crescimento do horizonte laterizado, do topo do horizonte para cima, ou a sua li

xiviação do topo para baixo, surgindo vazios, tubos e outras estruturas que evoluem, promovendo a fragmentação da laje, como se observa na parte superior da camada concrecionada do terraço colúvio-aluvial (figura 6.19A).

Na topo-seqüência a evolução dos perfis se dá, de forma análoga, de jusante para montante. Como se observa nas seções das figuras 6.2 e 6.5, os níveis lateríticos se apresentam em maior número e com maior resistência no leito do Rio Paraná, tendo sido formados a partir de soluções provenientes da margem direita e do trecho de montante do próprio canal. Seu número e grau de cimentação diminuem no sentido do terraço aluvial, e deste no sentido do terraço colúvio-aluvial, evidenciando uma evolução governada por soluções que se movimentam do terraço colúvio-aluvial para o leito do rio (figura 6.20).

As lajes de conglomerado e de arenito ferruginoso participam na modelagem do relevo, controlando os processos erosivos e contribuindo para a preservação dos terraços existentes, principalmente no leito do Rio Paraná, onde os níveis laterizados mantêm o fluxo principal do rio ao longo do seu atual canal. Neste depósito, a formação de níveis sucessivos garantiu a preservação do pacote aluvial e alterou os padrões de percolação das soluções, permitindo ainda que outros níveis se instalassem através de oscilações do nível da água do rio.

Apesar de resistentes, as couraças ferruginosas, quando expostas, sofreram desagregação mecânica, principalmente através de ressecção e erosão fluvial. Mesmo tendo sido submetidas à ação das águas do Rio Paraná, muitas das lajes se apresentam preservadas, constituindo um importante elemento de controle morfológico e inversão de relevo.

6.5.3.2 Unidades Geomorfológicas

De forma análoga ao modelo deposicional é apresentada, na figura 6.21, uma proposta de modelo evolutivo para os níveis ferruginizados, nas unidades geomorfológicas.

Foram considerados 5 diferentes estágios não necessariamente correlacionáveis aos estágios de formação dos depósitos aluviais, mas que certamente sucedem um ou mais destes, já que a laterização se processou após a formação de cada depósito. Cada estágio representa o início ou instalação de um processo que evoluiu durante os estágios seguintes, até os dias atuais.

ESTÁGIO I

Formação e retrabalhamento parcial das couraças ferruginosas do topo dos aluviões do terraço colúvio-aluvial. Após a deposição dos sedimentos aluviais, no estágio 1 do modelo deposicional, esses sedimentos foram submetidos ao nível da água do Rio Paraná em condições de paleoclima semi-árido. A precipitação dos compostos de ferro teria se dado no topo do depósito, na zona de oscilação do nível da água, favorecida também por fortes evaporações.

Após a laterização, ocorrida provavelmente no Pleistoceno, as águas do rio promoveram o retrabalhamento parcial das couraças formadas.

ESTÁGIO II

Formação do nível laterizado da base dos colúvios e da camada basal dos aluviões do terraço e planície aluvial. No final do estágio 2 do modelo deposicional, os extensos colúvios que se formaram na margem

direita teriam sido submetidos a processos de laterização, em condições de paleoclima úmido, durante o Pleistoceno. A percolação de soluções ricas em ferro e as oscilações do nível da água durante o ciclo erosivo que esculpiu o talude do terraço colúvio-aluvial teriam originado o nível laterizado da base deste depósito.

A grande quantidade de ferro disponível no substrato rochoso e nos colúvios, apoiados diretamente sobre os aluviões da margem direita, teriam favorecido a formação de níveis ferruginosos descontínuos, veios e diques no interior desses aluviões, que teriam sido retrabalhados durante a deposição dos sedimentos do terraço, assumindo a forma de concreções ferruginosas.

ESTÁGIO III

Formação da laje de arenito ferruginoso da cota 240m, nos sedimentos do terraço aluvial. Após a deposição dos sedimentos do terraço aluvial, no estágio 3 do modelo deposicional, segue-se o estágio 4, durante o qual fatores paleoclimáticos e/ou tectônicos promovem o terraceamento parcial dos sedimentos e profundas incisões que originariam os canais atuais dos rios Baía e Paraná.

Durante esse evento teria se iniciado o estágio III da laterização, à medida que o talude do terraço aluvial fosse submetido às flutuações do nível da água, que teria se instalado em torno da cota 240m. A precipitação dos compostos de ferro ao longo dessa elevação teria ocorrido, de forma descontínua, graças à percolação de soluções, lixiviações e às oscilações do nível da água junto ao talude, onde se formaram fluxos laterais no sentido da planície.

ESTÁGIO IV

Formação das couraças do leito do rio, da base para o topo de depósito aluvial. Este estágio de laterização teria se iniciado no final do estágio 4 e evoluiu ao longo dos estágios 5 e 6 do modelo deposicional, à medida que são depositados os sedimentos do leito do rio e da planície aluvial, ainda no Pleistoceno.

Em condições paleoclimáticas semi-áridas, instala-se um padrão fluvial entrelaçado-meandrante. Nas épocas secas as oscilações do nível da água do rio teriam originado as couraças, ferruginizando o topo dos bancos de cascalho e areia parcialmente emersos. Durante as cheias essas couraças teriam sido parcialmente retrabalhadas e cobertas por nova camada de sedimentos, formando-se assim uma sucessão de lajes de conglomerado e arenito que evoluem no sentido do topo do depósito.

A mobilização do ferro do Arenito Caiuá na margem direita, em ambiente redutor, e sua migração para o canal do rio teriam contribuído significativamente no processo e ainda promovido a evolução do nível laterizado da camada basal dos aluviões da planície, aproximadamente na cota 235m, no sentido do terraço.

ESTÁGIO V

Evolução do nível laterizado da base dos colúvios e formação das concreções ferruginosas do topo do terraço aluvial e da paleo-ilha. Este estágio de laterização deve ter se iniciado, provavelmente, junto com o estágio anterior, quando houve rebaixamento do nível de base regional, continuando a evolução até os dias atuais.

No terraço coluvial o nível laterizado, já fortemente cimentado, passa a sofrer um processo de lixiviação evoluindo, de baixo para cima, para uma fase concrecionada no topo. No terraço aluvial a infiltração de águas superficiais mobiliza o ferro existente nos se dimentos, provocando a sua precipitação na forma de concreções. O mesmo mecanismo se instala nos sedimen tos da paleo-ilha após o seu afeiçãoamento, quando as águas do Rio Baía e do Rio Paraná já se encontram confinadas aos seus canais atuais.

6.6 Conclusões

- 6.6.1 A origem e evolução das lateritas são regidas pelas condições físico-químicas do meio, ação de microorga nismos e fatores ambientais representados pelo clima, natureza da rocha-matriz, relevo e condições de drenagem. Nos depósitos aluviais do Rio Paraná, no Pontal do Paranapanema, esses fatores compõem um qua dro ambiental bastante favorável ao desenvolvimento de lateritas ferruginosas.
- 6.6.2 A principal fonte primária de ferro, nos processos de laterização, parece ser representada pelos arenitos da Formação Caiuá e, secundariamente, pelos aluviões cenozóicos e basaltos da Formação Serra Geral.
- 6.6.3 Existem dois mecanismos geoquímicos atuando, simultâ neamente, nos perfis em evolução e na topo-sequência. Um deles provoca a eluviação do meio, através da sub tração de materiais, enquanto o outro provoca sua i luviação, através de acumulação dos materiais provenientes dos horizontes eluvionados a montante. Toda subtração provoca, em outro local, uma acumulação.
- 6.6.4 O mecanismo de mobilização do ferro se dá em ambiente redutor, na presença de agentes complexantes ou de

microorganismos ferro-redutores, e pode ocorrer abaixo ou acima do nível da água. Na região do Pontal do Paranapanema verifica-se, predominantemente, no maciço rochoso arenítico da margem direita do Rio Paraná, abaixo do nível da água, em ambiente pouco oxigenado e acidulado pela infiltração de águas superficiais.

6.6.5 O mecanismo de precipitação do ferro se dá em ambiente oxidante, na presença de microorganismos que oxidam o ferro, ou quando as concentrações de ferro e outros íons em solução atingem o seu produto de solubilidade. Pode ocorrer acima ou abaixo do nível da água, porém a grande maioria das lateritas existentes nos aluviões do Rio Paraná teria sido formada acima deste, na sua zona de flutuação dentro dos perfis de solo.

6.6.6 O avanço da "frente de acumulação de Fe" se dá no sentido oposto ao da "frente de migração". Na topo-seqüência a evolução das couraças ocorre, portanto, de jusante para montante, por concentração absoluta de material transportado. No perfil de solo, em função do sentido de percolação das soluções, a ferruginização pode evoluir do topo para a base ou vice-versa.

6.6.7 A disposição dos níveis lateríticos nas unidades geomorfológicas, seu grau de cimentação, resistência e retrabalhamentos permitem supor que esses níveis tenham se originado no Pleistoceno e evoluído até os dias atuais. A seqüência de formação estabelecida e sua relação com o modelo deposicional proposto na primeira parte deste trabalho é a seguinte:

I. Couraças ferruginosas do topo dos aluviões do terraco colúvio-aluvial, após o estágio 1 do modelo deposicional.

II. Nível de base dos colúvios e da camada basal dos aluviões do terraço e planície aluvial, a pós o estágio 2.

III. Laje da cota 240m do terraço aluvial, durante o estágio 4.

IV. Couraças do leito do rio, da base para o topo do depósito, no final do estágio 4 e durante os estágios 5 e 6.

V. Concreções ferruginosas do topo do terraço aluvial e da paleo-ilha, após o estágio 6.

6.6.8 A reconstituição da história pedológica de uma região é extremamente difícil, pois os processos de laterização hoje em andamento foram desencadeados por fatores já desaparecidos, ocorridos no passado. Os perfis de solo devem, no entanto, registrar muitos desses processos, cabendo ao pesquisador reconhecê-los e interpretá-los.

PARTE III

POSSIBILIDADES DE COLMATAÇÃO QUÍMICA DOS
FILTROS E DRENOS DA BARRAGEM DE
PORTO PRIMAVERA POR COMPOSTOS DE FERRO

7

COLMATAÇÃO QUÍMICA DO SISTEMA DRENANTE DE BARRAGENS- CONHECIMENTO ATUAL

7.1

Introdução

Os filtros e drenos de uma barragem de terra têm, por finalidade, o controle das águas que percolam através do corpo e da fundação da mesma. Os filtros interceptam as linhas de fluxo, captando a água proveniente de montante, para que esta seja descarregada a jusante através dos drenos. Isso impede que ocorram surgências de água no talude de jusante, provocando a sua erosão, ou que as pressões hidrostáticas atinjam níveis perigosos para a segurança da barragem.

Esses elementos são dimensionados e posicionados no interior do corpo da barragem de forma a concentrar as linhas de fluxo e dar vazão, com grande margem de segurança, a toda a água captada. São construídos com materiais suficientemente permeáveis para que, durante a percolação, sejam dissipadas as cargas piezométricas, e segundo critérios de filtro que impeçam o carreamento de partículas mais finas do maciço argiloso para o seu interior.

O estudo da colmatação química dos filtros e drenos de barragens de terra por compostos de ferro vem sendo realizado, no Brasil, somente a partir dos últimos 20 anos. Trata-se de um processo cujos mecanismos geoquímicos apresentam estreita relação com os processos de laterização, típicos de regiões de clima equatorial, tropical e sub-tropical.

A obstrução do sistema drenante de barragens ocorre devido à precipitação do ferro transportado em solução pelas águas percolantes, o qual passando de um

meio redutor para outro oxidante, perde sua solubilidade e precipita na forma de hidróxido ou óxido. O acúmulo desses compostos estáveis, que aumenta ao longo do tempo, tende a preencher os vazios dos filtros e drenos diminuindo sua permeabilidade, alterando suas características originais e provocando um aumento das subpressões com a conseqüente redução da estabilidade dos taludes de jusante da barragem.

O presente capítulo tem, por finalidade, apresentar uma síntese do conhecimento do problema no Brasil e uma análise dos mecanismos geoquímicos que originam o fenômeno e governam a sua evolução ao longo do tempo.

7.2 Histórico do Conhecimento do Problema no Brasil

O primeiro registro sobre colmatção de drenos de barragens por compostos de ferro data de 1963 quando, após inspeção do subdreno da Barragem do Rio Grande, construída em 1937 sobre gnaisse, no Rio Pinheiros, verificou-se a precipitação e o carreamento de material ferruginoso, associada à redução de sua permeabilidade. A mesma barragem já vinha apresentando, desde 1940, fenômenos de afundamentos e deslizamentos localizados, sempre relacionados ao subdreno, possivelmente provocados pela colmatção em evolução (GUERRA, 1980). A escavação do subdreno em 1967, para uma inspeção mais detalhada, mostrou que o mesmo se encontrava parcialmente obstruído por um material de "coloração alaranjada, aspecto ferruginoso, lodoso adesivo", suscitando o desenvolvimento de uma campanha específica de investigação que, em 1978, foi intensificada.

As análises químicas e mineralógicas efetuadas sobre os materiais coletados na Barragem do Rio Grande levaram KANJI, em 1972, à formulação de um primeiro modelo geoquímico, retomado mais tarde, com maior detalhe por

INFANTI JR. e KANJI (1974),

Preocupado com a possível colmatção de filtros e drenos de barragens de terra brasileiras, Casagrande sugeriu à CESP, em 1974, uma análise do comportamento de barragens com longo tempo de funcionamento, acompanhada de uma pesquisa de laboratório para o estudo dos mecanismos da colmatção. Os ensaios de laboratório, simulando as condições de percolação em uma barragem, foram desenvolvidos por FERREIRA (1978), no Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) de Ilha Solteira. A análise de nove barragens foi efetuada, a posteriori, por LIDIQUIST E BONZEGNO (1981). Cinco dessas barragens estavam construídas sobre basalto e duas sobre Arenito Botucatu e basalto.

Além dos casos mencionados, que constam da literatura técnica específica, outras barragens em operação, a maioria assentada sobre gnaisses, apresentam evidências de precipitação de compostos de ferro no seu sistema drenante, conforme KANJI et al. (1981). Tratam-se das barragens de Guarapiranga (São Paulo), Saracuruna (Rio de Janeiro), Juqueri (São Paulo), Taiaçupeba (São Paulo), Pampulha (Belo Horizonte), São Simão (Minas Gerais) e a barragem principal do Complexo de Rasgão (Pirapora do Bom Jesus).

Tentando ainda reproduzir, em laboratório, o fenômeno da colmatção química em modelos de filtros, foi iniciado em 1978, por Furnas Centrais Elétricas, um programa de ensaios de laboratório para a Barragem de Itumbiara (KANJI et al., 1981). Foram também desenvolvidos ensaios por MACIEL FILHO (1982), conforme apresentado em sua tese de doutoramento para o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

Em 1985, NOGUEIRA JR. relacionou os casos de colmatção química do sistema drenante de barragens à litolo

gia de seus reservatórios, analisando-os sob o ponto de vista geoquímico.

7.3 Mecanismos Geoquímicos

Dois mecanismos geoquímicos governam o processo de colmatção. Um mecanismo, denominado mobilização, atua imediatamente a montante dos filtros e drenos e provoca a remoção do ferro existente nos solos e rochas da região, materiais da fundação e aterro da barragem.

O outro mecanismo, denominado precipitação, se manifesta nas regiões drenantes da barragem, provocando a concentração absoluta dos compostos de ferro.

Excetuando-se a temperatura, considerada praticamente constante durante a migração do ferro pela barragem, os demais fatores físico-químicos e biológicos que governaram a sua dinâmica são aqueles já analisados no estudo dos processos de laterização. Esses fatores são representados pelo potencial iônico, pH, Eh, condições complexantes, pressão parcial de gases, produtos de solubilidade e a ação enzimica ou não enzimica de microorganismos.

7.3.1 Mobilização do Ferro

O mecanismo de mobilização, como descrito por INFANTI JR. e KANJI (1974), é típico de condições redutoras, sendo favorecido pela diminuição do pH das águas, diminuição do potencial de oxi-redução e complexação do ferro. Em reservatórios de barragens pode ser provocado ou intensificado pela presença de ácidos oriundos de resíduos industriais, oxidação de sulfatos, existência de matéria orgânica, atividade biológica e presença de agentes complexantes.

A relação entre o ferro e os demais elementos existentes nas águas naturais é de grande importância no estudo da mobilização e precipitação do ferro, quer pelas alterações físico-químicas que estes elementos provocam no meio, quer pelo seu relacionamento direto com o ferro.

SZIKSZAY (1973), pesquisando os principais rios da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo, incluindo os reservatórios de Jupiá e Ilha Solteira, determinou as seguintes concentrações médias para as águas analisadas:

íon	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Si ⁴⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺
Concentração média (mg/l)	2,00	1,40	3,40	1,90	7,20	0,72	0,86

íon	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Total
Concentração média (mg/l)	2,10	18,4	7,40	1,25	46,43

Observa-se um teor elevado de silício, sulfato e carbonato, sendo as águas classificadas como carbonatadas, típicas de climas tropicais e subtropicais, e estando o pH médio em torno de 7,0. O CO₃²⁻ é proveniente da precipitação das águas de chuva, ricas em H₂CO₃. Estes dados encontram-se de acordo com os produtos esperados dos processos de laterização, em que os alcalinos e alcalino-terrosos são lixiviados juntamente com a sílica (concentrações baixas nos solos e elevadas nas águas), aumentando a concentração relativa do ferro e alumínio nos solos (concentrações mais baixas nas águas).

Os trabalhos desenvolvidos por MACIEL FILHO(1982), em reservatórios de barragens confirmam, ainda, a existência de estratificação térmica e química e condições redutoras

nos mesmos, em especial na Barragem do Rio Grande, onde é recolhido o esgoto da Cidade de São Paulo. De modo geral, foram observados baixos teores de ferro (0 a 3 mg/l) e pH ácido a neutro (5,0 a 7,0).

Pode-se estabelecer como fonte primária de ferro as rochas que compõem as fundações e o arcabouço regional do reservatório, e como fonte secundária os solos laterizados (enriquecidos em ferro e alumínio na forma de minerais neoformados) e as águas da região. O ferro é removido dos minerais primários e secundários em meio redutor ou por agentes redutores e/ou complexantes.

7.3.2 Precipitação do Ferro

O modelo geoquímico proposto por INFANTI JR. e KANJI (1974) prevê a precipitação do ferro sob condições ambientais em que ocorre aeração do potencial de oxi-redução, aumento das concentrações de ferro, ou o meio se torne oxidante por ação de agentes biológicos. A decomposição de complexos orgânicos ferrosos leva, também, a sua precipitação.

A presença de sílica e metais alcalinos e alcalino-terrosos nas águas de percolação assume vital importância na dinâmica do ferro. Estes agentes são responsáveis pela formação de complexos com o mesmo, sendo possível estabelecer-se estreita relação entre o fenômeno da colmatção e as rochas do reservatório e fundação da barragem (NOGUEIRA JR., 1985).

Segundo MELFI (1972), que estudou a evolução de geles amorfos de ferro III* sob a influência da sílica, o ferro forma complexos férricos ou ferrissilícicos com o silício, não evoluindo para fases cristalinas mais estáveis. Sua precipitação só ocorre em condições ambientais especiais, quando há quebra desses complexos.

(*) Fe^{3+}

Em rios e reservatórios de barragens, no Estado de São Paulo, as concentrações de sílica encontradas têm variado entre 7,0 e 12,0 mg/l (SZIKSZAY, 1973; LINDQUIST e BOZEGNO, 1981 e MACIEL FILHO, 1982), o que corresponde a valores bastante elevados. PARAGUAÇU (1972) encontrou concentrações de sílica de até 31,3 mg/l em fontes no Arenito Botucatu, no Estado de São Paulo; e na Barragem de Xavantes, poços de alívio instalados também no Arenito Botucatu mostraram concentrações de SiO_2 de até 60 mg/l (MACIEL FILHO, 1982). Estas concentrações de sílica seriam responsáveis, portanto, pela mobilidade do ferro, pois a formação de complexos ferrissilícicos nas á-guas que percolam pelo Botucatu manteria o ferro em solução, evitando ou retardando sua precipitação nos drenos das barragens construídas sobre esses arenitos.

Da mesma forma, os metais alcalinos e alcalino-terro-sos e os íons OH^- formam polímeros com o ferro, manten-do-o móvel. Embora suas concentrações sejam relativa-mente baixas nas águas dos rios, onde atingem valores entre 1,5 e 3,5 mg/l (SZIKSZAY, 1973), os modelos de laterização estudados mostram a influência desses elementos na precipitação do ferro (MELFI e PÉDRO, 1977). Assim como a laterização se processa mais rápida e intensamente em solos de rochas ácidas, a colmatação quími-ca dos drenos de barragens por compostos de ferro tem sido registrada apenas em barragens contruídas sobre rochas ígneas ácidas ou metamórficas, ou seus produtos de alteração.

7.4

Evolução dos Compostos de Ferro

A migração do ferro através do sistema drenante de uma barragem se dá, exclusivamente, na forma de íons em solução, pois a porção do material que é transportada em suspensão fica retida no maciço da barragem ou na areia dos filtros (MACIEL FILHO, 1982).

A precipitação do ferro nos materiais granulares dos filtros e drenos leva, portanto, à formação de minerais secundários. Existem, porém, poucas informações sobre a natureza desses minerais, uma vez que as análises publicadas referem-se, quase que exclusivamente, à composição química dos compostos, não incluindo a sua mineralogia.

De modo geral tem-se observado a formação de geles amorfos de ferro na saída dos sistemas drenantes (INFANTI JR. e KANJI, 1974 e 1976; GUERRA, 1980; KANJI et al., 1981; LINDQUIST e BONZEGNO, 1981; GUERRA, 1982 e MACIEL FILHO, 1982) ou hidróxidos, identificando-se, nesse caso, a goethita (GUERRA, 1980 e 1982). Espera-se, assim, a ocorrência de minerais de ferro hidratados, uma vez que as condições de intensa drenagem favorecem a formação dessas espécies minerais.

NAHON (1976) descreveu a suíte mineralógica evolutiva dos compostos de ferro em solos lateríticos, envolvendo compostos hidratados e formas transitórias com maior ou menor porcentagem de substituição isomórfica por alumínio em função da sua concentração. Segundo este autor, as formas hidratadas predominam em regiões de melhor drenagem e tendem a evoluir para hematita ou outros óxidos.

Dessa maneira formar-se-ia, inicialmente, um composto de ferro amorfo que evoluiria para goethita e finalmente para hematita, por perda gradativa de água da estrutura cristalina. Obviamente devem predominar a goethita e eventualmente a limonita nas cimentações dos drenos de barragens, mas regiões já obstruídas e ressecadas podem apresentar óxidos mais estáveis como a hematita, maghemita e magnetita.

Com os dados disponíveis não é possível se estabele-

cer uma relação entre a natureza dos minerais de ferro acumulados nos drenos de barragens e o grau de colmatação atingido, mas pode-se inferir que a ocorrência de geles amorfos significa retenção inicial ou precipitação incipiente de ferro, enquanto que compostos precipitados na forma de hidróxidos retratam um estágio mais avançado no desenvolvimento do processo.

7.5 Estudos de Colmatação em Barragens

Os estudos desenvolvidos em barragens, relatados na bibliografia brasileira, restringem-se àqueles publicados por GUERRA (1980 e 1982) sobre a Barragem do Rio Grande e LINDQUIST e BONZEGNO (1981), que pesquisaram nove barragens da CESP. Conforme mencionado no item 7.2, os demais casos registrados correspondem a suspeitas ou relato de ocorrências de compostos de ferro nas drenagens.

Na bibliografia internacional conhecem-se alguns casos ocorridos em países de clima favorável à laterização, a exemplo da Barragem de Kalé na Nova Guiné (ANAGNOSTI, 1970), Corin na Austrália e Shek Pik em Hong Kong, todos citados por INFANTI JR. e KANJI (1974) e MACIEL FILHO (1982) e da Barragem de Hedi na província de Guangdong - China, citado por MACIEL FILHO (1982). Como pode ser observado, o pouco que se conhece sobre o fenômeno em barragens atingiu alguma expressão somente a partir da década de 70.

7.5.1 Barragem do Rio Grande

Foi estudada detalhadamente a partir de 1978 visando-se, especificamente, o comportamento do subdreno e a origem de sua colmatação. Esses estudos complementaram aqueles desenvolvidos em 1967 que consistiram apenas de algumas análises químicas e mineralógicas e revelaram a presença de goethita no material que impregnava

as camadas do filtro do subdreno, expostas pela escavação.

GUERRA (1980) descreveu detalhadamente as investigações efetuadas, que consistiram de coleta de amostras da água do reservatório em diferentes profundidades, das fundações da barragem e do seu sistema drenante. Foram, também, executadas sondagens, poços e trincheiras e instalados piezômetros e inclinômetros.

As amostras de água foram analisadas visando a obtenção de dados quanto à temperatura, pH, Eh, resíduos, O_2 dissolvido, CO_2 livre, dureza, alcalinidade, sulfatos, enxofre, cálcio, Fe^{2+} e Fe^{3+} , manganês e atividades biológicas. Os resultados obtidos permitiram caracterizar as águas do reservatório como ambiente redutor, tipicamente favorável à mobilização do ferro, e as águas dos poços e canaletas de jusante como meio favorável a sua precipitação. GUERRA conclui, em seu trabalho, que a água da represa constitui a principal fonte de ferro, uma vez que não se verificou nenhuma variação entre as densidades medidas para o aterro da barragem desde 1967 até 1978, não havendo indícios de lixiviação. Como solução para o problema propôs, ainda, o afogamento do subdreno por meio de septos colocados nas caixas de inspeção impedindo, na medida do possível, as condições de oxidação.

7.5.2 Barragens da CESP

Os efeitos de uma possível colmatção do sistema drenante de uma barragem devem refletir na instrumentação instalada, podendo ser a sua análise uma das ferramentas para a detecção do fenômeno. A partir desta idéia a CESP desenvolveu esse estudo em nove barragens de terra da Companhia, quase todas construídas há mais de 10 anos (LINDQUIST e BONZEGNO, 1981).

Embora a instrumentação tenha sido limitada, totalizando apenas 25 instrumentos (piezômetros e medidores do nível da água), verificou-se que, das quatro barragens que têm por fundação rochas basálticas e/ou arenito, nenhuma apresentou elevações significativas de níveis piezométricos. No entanto, das cinco barragens apoiadas sobre gnaisses, três apresentaram grandes elevações em pelo menos um dos instrumentos instalados. Das barragens estudadas registraram-se ocorrências de precipitações ferruginosas em Armando Laydner, Caconde e Paraibuna, que foram submetidas a análises químicas. Efetuou-se, também, a análise química completa das águas de todos os reservatórios e dos sistemas de drenagem.

Um quadro apresentado por estes autores, comparando as características das águas de drenagem de barragens em basalto e/ou arenito com barragens em gnaisses, mostra maiores quantidades de óxidos de ferro nos casos de gnaisses (5,0mg/l) do que para basaltos e/ou arenitos (1 mg/l). Inversamente, os teores médios de sílica e cálcio são menores (6,4 contra 11,0 mg/l e 8,8 contra 15,0 mg/l, respectivamente).

Como conclusão principal o trabalho atesta, ainda, que não deve ter havido colmatção físico-química-bacteriológica significativa nos sistemas de drenagem das barragens apoiadas sobre arenitos e/ou basaltos. As barragens apoiadas sobre gnaisses apresentaram aumentos de pressão relativamente grandes, que poderiam ter sido provocados pela colmatção química de seus drenos, ainda que o fenômeno não tenha sido comprovado por observação direta.

7.6.1 Ensaios Realizados pela CESP no Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) de Ilha Solteira

Os ensaios realizados por FERREIRA (1978) no LCEC, conforme sugerido por Casagrande, mostraram ser possível a reprodução do fenômeno em laboratório sob condições controladas. Estes ensaios consistiram na simulação, em permeâmetros verticais, das condições de percolação de água através de um solo coluvial de basalto (representando o maciço de terra de uma barragem) e de uma areia lavada de rio (filtro) a carga variável. Foram realizados três ensaios com água natural do Rio Paranapanema a um gradiente hidráulico de 40, sendo dois ensaios com luz natural e um na ausência total de luz.

Os ensaios foram conduzidos durante cerca de um ano e meio, tendo sido feitas, antes do seu início, análises químicas da água, do solo e da areia envolvidos. A água efluente foi analisada após uma semana e três meses depois do início. A camada de filtro foi subdividida em 5 regiões, sendo três acima do nível da água e duas abaixo do mesmo, na zona saturada. As regiões submersas não apresentaram nenhum indício de precipitação de ferro, enquanto que as outras três apresentaram, desde uma coloração levemente avermelhada nas proximidades do nível da água até uma coloração preta e fortemente avermelhada no sentido do topo, onde se observaram círculos concêntricos vermelhos e pretos. O ferro precipitado, proveniente do solo coluvial, diminuiu a permeabilidade da areia de 12 a 38 vezes, enquanto a sua remoção e de outros elementos do coluvião, por lixiviação, aumentou em cerca de 3 vezes a permeabilidade do mesmo.

As análises químicas realizadas mostraram uma diminuição nos teores de ferro do solo com aumento na areia e águas efluentes. Constatou-se, também, que houve li-

xiviação de cátions do solo, porém apenas na primeira semana de ensaio, decaindo no restante do período.

Os ensaios desenvolvidos por FERREIRA retratam, portanto, condições em que a fonte principal de ferro é o maciço da barragem, situação que pode não ocorrer devido às baixas permeabilidades e aos baixos gradientes atuantes.

7.6.2 Ensaio Realizados por FURNAS para a Barragem de Itumbiara

Conforme relatado por KANJI et al. (1981), os ensaios realizados por FURNAS se basearam no modelo geoquímico de INFANTI JR. e KANJI (1974) e visaram, também, reproduzir a colmatção em permeâmetro.

Foi construído um permeâmetro horizontal transparente, com 15 cm de diâmetro, no qual foram colocados argila residual de basalto compactada e três camadas de material filtrante com granulometria progressivamente maior, denominadas A, B e C. No trecho compreendido por A e B foi instalado um tubo de PVC para permitir a aeração da zona A e a eventual adição de compostos químicos para limpeza através da zona B. A água utilizada foi a do Rio Parnaíba, a gradiente hidráulico constante.

Os ensaios foram iniciados em 1978, tendo se estendido por um período superior a três anos. Após 6 meses do seu início foi detectada a ocorrência de um precipitado escuro nos filtros.

7.6.3 Ensaio Realizados no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (MACIEL FILHO, 1982).

Os trabalhos mais recentes, desenvolvidos em laboratório

rio para estudo da colmatção, foram realizados por MA CIEL FILHO (1982). A pesquisa abrangeu, além da intensa consulta bibliográfica e estudos de campo em barragens já construídas, simulações em laboratório e suas análises. Os ensaios de laboratório foram subdivididos em dois tipos, de acordo com as finalidades visadas. O primeiro tipo objetivou o controle dos fatores não geoquímicos do processo, tais como a influência de microorganismos e do gradiente hidráulico. O segundo tipo abrangeu o estudo dos fatores geoquímicos em um sistema argila-areia, enfocando-se a aeração da água e a precipitação dos hidróxidos de ferro.

As amostras utilizadas foram representadas por areias finas a médias puras e combinações de camadas de solo argiloso e areia, com material dos maciços das barragens de Xavantes e Euclides da Cunha. A água de percolação se apresentou deaerada e sob pressão constante.

Os corpos de prova foram montados em porta-amostras com comprimentos de 40, 30, 15, 8 e 2 cm e diferentes larguras, com diversas capacidades de aeração. Construíram-se, assim, diferentes permeâmetros, todos ligados a um sistema de alimentação que permitia a utilização de um ou outro corpo de prova, variando-se também o sentido de percolação.

a. Estudo dos Fatores não Geoquímicos

Foram estudados com fluxo de água de baixo para cima, sob gradiente 15,4. As vazões de saída foram medidas periodicamente de forma a se determinar as variações de permeabilidade das amostras. A influência dos fatores biológicos foi constatada a partir da percolação de água do abastecimento público (sem qualquer tratamento químico) em amostras de areia. Houve diminuição da permeabilidade com o tempo veri

ficando-se, ainda, o aparecimento de uma substância viscosa no contato da areia com a água, rica em bactérias sulfato-redutoras (Desulfovibrio).

Para se estudar a influência do gradiente hidráulico, a água foi esterilizada com pentaclorofenato de sódio, variando-se apenas o valor do gradiente hidráulico. Em amostras de areia o aumento dos mesmos com o tempo provocou uma diminuição de permeabilidade, porém em amostras compostas (solo argiloso + areia) o material argiloso manteve constante o valor de K.

b. Estudo dos Fatores Geoquímicos

Em alguns casos foi acrescentado bicarbonato ferroso à água deaerada e a percolação foi efetuada na horizontal ou vertical, porém passando primeiramente pelo material argiloso e em seguida pelo arenoso. O acompanhamento dos ensaios abrangeu um controle da temperatura, O_2 dissolvido, teor de ferro, dureza, HCO_3^- e pH. Quanto à aeração pôde-se observar que a água sempre saiu do sistema com teor elevado de O_2 , após ter entrado com teor baixo ou nulo. Houve, ainda, concentração maior de ar abaixo das camadas de argila, sendo ocupado o espaço deixado pela saída de água.

A cimentação das areias por hidróxidos de ferro, visível pelas paredes transparentes dos permeâmetros, pôde ser verificada em 4 ensaios, após cerca de 28 horas, pelo aparecimento de material de cor ocre na faixa não saturada, dominada pela flutuação do nível da água e pela capilaridade. Constatou-se, também, que o material ferruginoso, ainda na forma coloidal, "migrou" pela areia ensaiada.

As análises químicas mostraram que houve diminuição das concentrações de bicarbonato e aumento das concentrações de ferro e oxigênio entre a entrada e a saída da água no sistema. Os potenciais de oxi-redução também sofreram elevações de até 700 vezes (-490 a 250 mv), sendo irregulares as variações de pH.

Os estudos desenvolvidos por MACIEL FILHO introduziram a idéia de que o íon Fe^{2+} se encontra reduzido nas águas dos reservatórios na forma de carbonato ferroso e esse modelo é utilizado em seus experimentos. Ficou também demonstrado que, com a percolação pelo interior de uma barragem, o ambiente tende a passar de redutor para oxidante, favorecendo a precipitação do ferro na forma de hidróxido. Essa precipitação seria governada, preferencialmente, pelo aumento do Eh decorrente da oxigenação dos drenos a jusante, única região onde é possível uma contínua renovação do oxigênio consumido no processo.

8 MODELO GEOQUÍMICO

8.1 Introdução

A colmatção química dos filtros e drenos de barragens em operação e a sua previsão nas futuras barragens de terra podem ser devidamente equacionadas com a utilização de modelos geoquímicos. No primeiro caso, como as características do meio ambiente, considerando-se a introdução do lago, já se encontram definidas, o modelo obtido se aproxima mais da realidade. Nas barragens projetadas parte-se de um modelo teórico que tem como base, apenas, condições ambientais hipotéticas.

Conhecendo-se os processos de laterização que atuam na região de implantação da barragem e as características do seu sistema de drenagem e do futuro reservatório po

de-se, no entanto, antecipar os mecanismos que irão reger a colmatação, pois a formação de níveis ferruginizados nos solos representa um modelo natural desses mecanismos. O modelo geoquímico assim obtido, embora preliminar e tentativo, fornece subsídios para a adoção de medidas preventivas na fase de projeto e pode ser aferido após o início da operação da barragem, orientan-do as medidas corretivas que se fizerem necessárias.

Neste capítulo são descritas as características gerais da futura Barragem de Porto Primavera e de seu reservatório, e tecidas algumas considerações sobre a dinâmica do ferro, desde a sua mobilização a montante dos filtros até a sua possível precipitação no sistema de drenagem da barragem. Esses mecanismos, que têm como pano de fundo os processos de laterização já descritos na parte II deste trabalho, são apresentados na forma de um modelo geoquímico preliminar para uma possível colmatação desta e de outras barragens de terra brasileiras.

8.2 Características Gerais da Barragem de Terra de Porto Primavera

A barragem de terra deverá ser construída na margem direita do Rio Paraná e em parte do seu leito, possuindo uma extensão da ordem de 9 Km. Na figura 8.1 é apresentada uma seção transversal típica pelo corpo da barragem na paleo-ilha que, para os objetivos deste trabalho, é representativa para quase toda a sua extensão.

O maciço será construído com solo argiloso compactado proveniente da área de empréstimo do terraço colúvio-aluvial. Nas análises de estabilidade e percolação foi considerado anisotrópico, com permeabilidades horizontal e vertical de 5×10^{-5} e 5×10^{-6} cm/s, respetivamente.

O sistema de drenagem da barragem é constituído por um filtro vertical, um filtro horizontal suspenso e uma trincheira drenante, que deverão captar e descarregar as águas provenientes do maciço de terra e da fundação, que percolam através das linhas de fluxo mostradas na figura 8.1.

Os filtros e drenos foram dimensionados com base na Lei de Darcy e segundo o critério granulométrico proposto por TERZAGHI e PECK (1969), que admitem como satisfatória a relação: $D_{15} \text{ do filtro} < 4 \text{ a } 5 D_{85} \text{ do solo}$, para a granulometria, onde D_{15} e D_{85} representam, respectivamente, os diâmetros das partículas correspondentes a 15% e 85% nas curvas granulométricas.

8.2.1 Filtro Vertical

O filtro vertical da barragem deverá ser construído com areia proveniente do leito do Rio Paraná, junto à margem direita e a jusante do eixo da barragem, que após compactada deverá apresentar uma permeabilidade média de $2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

Para o seu dimensionamento considerou-se uma vazão coletada três vezes superior à calculada, da ordem de $0,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$, e uma capacidade de descarga dez vezes maior que a realmente necessária, obtendo-se uma vazão final de $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Adotou-se um gradiente hidráulico unitário e espessura de 0,7m para o filtro, por esta corresponder à exi

gencia mínima construtiva, uma vez que o cálculo da es p_{essura} necessária, para as vazões consideradas, indi cou um valor muito inferior (0,15m).

8.2.2 Filtro Horizontal Suspenso

Deverá ser construído com areia proveniente da mesma jazida que fornecerá material para o filtro vertical, cuja permeabilidade será da ordem de 2×10^{-2} cm/s para compacidades relativas de 60% a 65%.

Da mesma forma que no filtro vertical, a vazão coleta da foi multiplicada por 3 e a capacidade de descarga por 10, para se chegar à espessura do filtro, calcula da em 2,2m. A vazão de entrada, incluindo a coletada pelo filtro vertical, foi estimada em $0,6 \times 10^{-5}$ m³/s/m e a vazão total descarregada em 6×10^{-5} m³/s/m.

Para o coeficiente de segurança de 10 adotado, prevê-se uma carga piezometrica inicial da ordem de 7m, que vai se reduzindo ao longo do filtro até se anular no seu final. A linha de saturação correspondente a essa situação deve se apresentar linear no seu interior.

A análise de estabilidade do talude de jusante da barragem considerou o filtro em carga.

8.2.3 Trincheira Drenante

A trincheira drenante tem por finalidade escoar, com gradientes baixos, toda a água proveniente do filtro horizontal e mais uma parcela considerável da vazão que percola pela fundação da barragem. Em quase toda a planície aluvial deverá penetrar totalmente nos aluviões, atingindo o topo do maciço rochoso ou seu so lo residual. No terraço aluvial atravessará apenas a ca

mada superior e parte da camada intermediária do depósito sedimentar.

Como pode ser observado na figura 8.2 consiste, basicamente, num elemento composto de areia e cascalho, ligado ao filtro horizontal através de uma camada arenosa. Os materiais a serem utilizados na sua construção deverão provir da Jazida do Braço Esquerdo do Óleo Cru, esperando-se uma permeabilidade média de 3×10^{-2} cm/s para a areia e 1 cm/s para o cascalho.

A ligação da trincheira com o filtro horizontal deverá apresentar 4,5m de comprimento por 0,67m de espessura (1,5m medidos na horizontal), com capacidade para escoar uma vazão de até $8,9 \times 10^{-5}$ m³/s/m.

A vazão total a ser coletada pela trincheira foi calculada como sendo da ordem de 23×10^{-5} m³/s/m que, multiplicada por um fator de segurança 10, levou a uma capacidade de drenagem de 23×10^{-4} m³/s/m, com um gradiente hidráulico máximo, no interior do cascalho, de 0,12.

Na figura 8.2.B pode-se observar como a água é eliminada pelo sistema. Sua saída se dá pela parte superior da trincheira fazendo com que o cascalho, elemento principal da drenagem, se mantenha permanentemente afogado. Através de um tubo longitudinal de concreto com diâmetro de 0,4m, toda a água é transportada para caixas de coleta posicionadas a cada 200m, e a partir destas descarregada no terreno natural, devidamente protegido contra a erosão, por meio de um tubo de concreto com diâmetro de 0,7m.

8.3 Características Previstas para o Reservatório de Porto Primavera

O Reservatório de Porto Primavera estará completamente formado dentro de um a três meses após o início do seu enchimento, em função do regime de cheias ou estiagem que venha se verificar na época do fechamento de comportas. Ocupará uma área de 2.250 km^2 e conterá um volume de 20 km^3 de água, cujos remansos atingirão distâncias entre 150 e 233 km, conforme se observa no mapa da figura 8.3.

Com a sua implantação irão ocorrer importantes perturbações nos meios físico e biológico, sendo este impacto mais significativo até cerca de 100 km a montante do eixo da barragem (CANHOLI et al., 1981).

O lago irá operar normalmente na cota 259,0m, com uma depleção máxima inferior a 4,5m em Porto Primavera e de cerca de 3m a 140 km do seu eixo, nas épocas de grandes cheias. Apresentará uma profundidade média de 3m e largura média da ordem de 6 km ocupando uma região que é dominada, quase que exclusivamente, por Arenito Caiuá e depósitos aluviais cenozóicos.

As velocidades médias de escoamento das águas situam-se, em geral, abaixo de 1 m/s, para vazões que variam entre 4.000 e 6.000 m^3/s , chegando a 10.000 m^3/s nos meses mais úmidos. Na metade inferior do futuro reservatório as planícies de inundação ficarão submetidas a escoamentos lentos, enquanto na sua calha principal as velocidades serão pouco mais elevadas.

A existência do reservatório modificará as condições naturais de deflúvio, em virtude da regularização das vazões e das amplitudes de propagação de enchentes. Promoverá, também, a elevação do lençol freático, principalmente nas várzeas, e um maior escoamento superficial durante as precipitações. Nas áreas baixas da planície aluvial formar-se-ão lagoas de pequeno porte e

áreas alagadiças.

O represamento das águas transformará o atual ambiente lótico em ambiente lântico, instalando-se uma estratificação térmica que, segundo Birge (1910, in MACIEL FILHO, 1982) é caracterizada por três camadas distintas: uma camada superficial ou de circulação denominada epilímnio; uma camada profunda ou de estagnação, denominada hipolímnio; e uma camada transicional ou termoclina.

No epilímnio a água irá manter suas atuais características de temperatura e densidade. Irá apresentar pH alcalino e pressões parciais de O_2 e CO_2 adequadas à preservação da fauna e da flora atualmente existentes no Rio Paraná.

No hipolímnio, de maneira diversa, irão se instalar condições francamente redutoras. Segundo CANHOLI et al. (1981) a destruição, por submersão, da biomassa vegetal e animal remanescente do desmatamento da área do reservatório, e a falta de uma circulação eficiente e trocas diretas com a atmosfera, promoverão os seguintes efeitos físico-químicos e biológicos:

- Decréscimo da pressão parcial de O_2 com a profundidade, devido a reações químicas produzidas no seio da massa líquida e à degradação da biomassa depositada no fundo.
- Presença de CO_2 e H_2S dissolvidos.
- Acidificação das águas, com pH sensivelmente inferior a 7.
- Quantidades variáveis de sais de Ca, Mg, Fe e Mn dissolvidos.

- Produção e liberação de gases tóxicos.
- Liberação de nutrientes na água, tornando o lago eu- Mortandade de peixes, répteis, insetos aquáticos e microorganismos aeróbios.
- Acumulação de lodo orgânico na camada bentônica, pela decantação de organismos mortos.
- Proliferação considerável de microorganismos.

Quanto ao potencial de oxi-redução, MACIEL FILHO (1982) relata casos de lagos citados na bibliografia internacional, cujos estudos dos sedimentos de fundo indicaram valores negativos ou em torno de 0 év.

Além desses efeitos, gerados pelo desequilíbrio ambiental que será provocado pelo lago, outros efeitos de difícil previsão e controle poderão se instalar, influenciando as características físico-químicas da água. Nesse sentido pode-se citar a sua contaminação pela inundação de terras cultivadas que contém defensivos agrícolas e fertilizantes, cuja atenuação se dará sómente a longo prazo.

Alterações nos volumes de material sólido transportados pelo Rio Paraná e nas condições climáticas da região também estão previstas, assim como taxas de assoreamento do reservatório. Essas modificações, no entanto, dado a sua pequena intensidade em relação à longa vida útil do lago não irão influenciar, significativamente, o meio ambiente aquático, no contexto do presente trabalho.

8.4 A Dinâmica do Ferro após o Enchimento do Reservatório

Embora se verifiquem, após o enchimento do Reservatório de Porto Primavera, os mesmos mecanismos de mobilização e precipitação do ferro já descritos, a introdução do lago na paisagem provocará um importante desequilíbrio na sua dinâmica, favorecendo alguns mecanismos e desfavorecendo outros. O afogamento de extensas áreas de Arenito Caiuá e aluviões, por águas com características redutoras, deverá intensificar os processos de solubilização do ferro nessas áreas, inibindo a sua precipitação.

Quanto ao modelo evolutivo adotado para os perfis lateríticos e a topo-seqüência as modificações serão significativas, uma vez que os processos de laterização e de modelagem do relevo serão bruscamente interrompidos. Essas modificações serão de difícil verificação, pois seus efeitos irão se manifestar num prazo relativamente longo se considerarmos a vida útil da barragem e a impossibilidade de observação direta.

A elevação do nível de base regional irá condicionar a formação de horizontes ferruginosos diversos dos atuais, onde as novas condições físico-químicas e ambientais permitirem a fixação do ferro. No interior da barragem de terra, onde as características dos materiais e as condições de percolação são razoavelmente conhecidas, os mecanismos de mobilização do ferro a montante dos filtros e sua precipitação no sistema de drenagem a jusante podem ser previstos estabelecendo-se, assim, um modelo que permita o acompanhamento e controle de uma possível colmatação química dos drenos por compostos de ferro.

8.4.1 Mobilização do Ferro a Montante dos Filtros

Os principais fatores responsáveis pela mobilização do ferro nos reservatórios de barragens são representados pela diminuição do pH, diminuição do potencial de oxi-redução e pela complexação do ferro (INFANTI JR. e KANJI, 1974). A sua solubilização na região do Pontal do Paranapanema é regida, fundamentalmente, por essas condições físico-químicas, estando relegados a um segundo plano os demais fatores, entre os quais a ação de microorganismos, ainda pouco conhecida.

Como já discutido no item 8.3, o enchimento do Reservatório de Porto Primavera favorecerá essas condições, criando um ambiente de características francamente reductoras no contato das águas do lago com as rochas e solos que compõem o seu arcabouço. Essas águas deverão receber, ainda, um importante aporte de íons dos afluentes do Rio Paraná e das regiões circunvizinhas ao reservatório, constituídas por Arenito Caiuá e seus produtos de alteração.

Estando já enriquecidas com o ferro na sua forma reduzida, as águas serão conduzidas para os filtros e drenos da barragem através do seu maciço argiloso ou da própria fundação, sendo descarregadas a jusante. Durante esse percurso será mobilizada, também, uma parte do ferro presente no solo coluvial compactado, que compõe o corpo da barragem. A migração do ferro dar-se-á segundo as linhas de fluxo indicadas na figura 8.1.

Quanto aos teores de ferro que se estabelecerão nas águas do reservatório é difícil uma avaliação, pois são inúmeros os fatores intervenientes e seus sinergismos não podem ser antecipados. Mesmo que esses teores não sejam elevados, uma taxa de ferro pouco superior à normal favorecerá a sua precipitação nos drenos da barragem, uma vez que estes representarão um ponto de estrangulamento do sistema, com concentração de fluxo e

possibilidades de elevação dessas taxas sob condições mais oxidantes.

8.4.1.1 Abaixo do Nível da Água

A mobilização do ferro irá se verificar, predominantemente, abaixo do nível da água, no contato do hipolimnio com os solos e rochas da região do reservatório. Dar-se-á, também, por infiltração de águas com características redutoras que, governadas por gradientes regionais, deslocarão o ferro dos aluviões e do maciço arenítico, e atingirão o fundo do lago ou a fundação da barragem.

Nas lagoas e áreas alagadiças, formadas em áreas de baixios pela elevação do nível de base, a mobilização do ferro será intensificada pela menor oxigenação das águas e pela presença de ácido húmico, agentes complexantes e microorganismos. Através de gradientes locais essas soluções enriquecidas em ferro irão se incorporar às águas drenadas pela calha principal do reservatório.

8.4.1.2 Acima do Nível da Água

Acima do nível da água o ferro será mobilizado numa escala significativamente menor, contribuindo muito pouco com o balanço de íons em solução nas águas do lago. Essa mobilização dar-se-á nas áreas circunvizinhas ao reservatório e no maciço da barragem, por infiltração da água das chuvas e ao longo da franja capilar associada ao lençol freático.

Desta forma, o ferro será reduzido nos aluviões e solos residuais emersos, e no solo coluvial compactado que constituirá o corpo da barragem. Sua migração, governada por gradientes locais e susceptível a peque-

nas variações físico-químicas do meio, será extremamente restrita.

8.4.2 Precipitação do Ferro no Sistema Drenante da Barragem

Os fatores que determinam a precipitação do ferro, provocando a obstrução dos drenos de barragens, foram já discutidos no item 7.3.2, conforme apresentado no modelo geoquímico proposto por INFANTI JR. e KANJI (1974). Na futura Barragem de Porto Primavera, caso ocorra aeração na saída do sistema drenante, o aumento das pressões parciais de oxigênio e do potencial de oxi-redução, associado a maiores concentrações de ferro, poderá levar a um processo de colmatação química, por precipitação deste elemento.

A participação de microorganismos no processo estará vinculada a sua evolução após o enchimento do lago. Como as análises de águas coletadas a jusante da enseca deira do leito do rio mostraram a presença de bactérias e algas que oxidam o ferro a ação desses agentes também poderá ser significativa, desde que se estabeleçam condições favoráveis ao seu desenvolvimento.

O ferro iria precipitar, inicialmente, na forma de hidróxidos amorfos, evoluindo lentamente para formas mais estáveis em função do aporte de íons, da eliminação das moléculas de água presentes na sua estrutura e do tempo de renovação do oxigênio no meio ambiente.

Mesmo na forma de geles amorfos, o precipitado poderia provocar uma redução na permeabilidade do dreno, passando a funcionar como uma barreira que iria reter novos íons e dificultar a eliminação da água estrutural e o acesso do oxigênio. Esta barreira evoluiria para compostos mais estáveis a jusante (onde seria possível o acesso do oxigênio) e passaria a acumular mai

or quantidade de geles ferruginosos no sentido de montante.

O período de tempo necessário para que a colmatação química dos drenos pudesse produzir efeitos relevantes para a barragem seria, certamente, longo em relação a sua vida útil, porém o processo de precipitação do ferro tenderia a se instalar rapidamente, caso não se tomem medidas preventivas.

De forma a minimizar esses efeitos, ou mesmo inibir a precipitação do ferro, foi previsto o afogamento da trincheira drenante, conforme descrito no capítulo 9. Pretende-se, assim, impedir a entrada do oxigênio no sistema, reduzindo-se a sua pressão parcial e os potenciais de oxi-redução do meio ambiente.

8.4.2.1 Acima do Nível da Água

Conforme previsto no projeto, os filtros vertical e horizontal não trabalharão totalmente afogados, devendo se instalar, em ambos, uma linha de saturação. Como a ferruginização dos aluviões da região se deu, predominantemente, ao longo da zona de flutuação da superfície freática, e os materiais cimentados são, basicamente, os mesmos que serão utilizados na construção do sistema de drenagem, a mesma forma de precipitação do ferro poderá se verificar nesses componentes do sistema.

No filtro vertical a superfície freática irá se formar próximo à extremidade superior, uma vez que todo o maciço argiloso da barragem, imediatamente a montante do filtro, permanecerá saturado (figura 8.1). O contato do ferro com o ar contido no solo compactado poderá, portanto, determinar a sua precipitação, de acordo com o mecanismo descrito no item 6.5.2.1. Como

a quantidade de oxigênio disponível, no entanto, é pequena, praticamente não havendo renovação, e o seu campo de atuação muito restrito, o ferro será fixado em quantidades limitadas e não chegará a interferir com a permeabilidade total do filtro.

No filtro horizontal suspenso a linha de saturação irá se instalar ao longo de toda a extensão. Junto ao filtro vertical permanecerá elevada, diminuindo linearmente no sentido da trincheira drenante, à medida que forem dissipadas as cargas piezométricas. Da mesma forma que no filtro vertical, o ferro irá precipitar ao longo dessa linha, porém de forma ainda menos significativa, pois a amplitude da faixa de oscilação do nível da água é muito reduzida e a renovação do oxigênio praticamente nula.

A trincheira drenante deverá operar totalmente afogada, pois é o elemento de descarga do sistema e, conseqüentemente, o mais susceptível a aeração. O seu afogamento impedirá a formação de uma linha freática na camada de cascalho que, em contato com o ar atmosférico, teria na sua zona de oscilação uma forte oxigenação, associada a um processo de renovação constante de oxigênio. Essas condições, favoráveis à precipitação do ferro, seriam transmitidas para a porção final do filtro horizontal, determinando a sua evolução para montante.

Nos tubos longitudinais de concreto e caixas de coleta situados a jusante, o contato das águas efluentes do sistema de drenagem com o ar atmosférico deverá provocar a precipitação do ferro, provavelmente com a participação de microorganismos no processo.

8.4.2.2 Abaixo do Nível da Água

A precipitação do ferro abaixo do nível da água no sis-

tema de drenagem é de difícil avaliação, pois não se conhecem, no momento, as condições ambientais que prevalecerão na barragem e sua fundação.

As formas de precipitação descritas no modelo de laterização, características de ambientes subaquáticos rasos, dificilmente se verificarão, pois o sistema se encontrará confinado no interior da barragem, sem possibilidade de aeração. A elevada permeabilidade dos drenes também não favorecerá a precipitação do ferro, já que o oxigênio não se encontrará presente, a não ser na saída do sistema drenante.

Uma vez estabelecido o padrão de drenagem condicionado pelo lago, a concentração iônica das águas que entrarão no sistema de drenagem deverá se manter estabilizada. O seu fluxo contínuo pela fundação e corpo da barragem, através de uma rede regular, não permitirá o encontro de diferentes soluções, sendo remota a possibilidade de compostos de ferro precipitarem por atingirem o seu produto de solubilidade.

A não ser pela presença de microorganismos precipitadores do ferro tudo indica, portanto, que a sua fixação abaixo da linha de saturação é improvável, considerando-se as características físico-químicos que deverão se estabelecer no meio ambiente.

8.5 Modelo Geoquímico Preliminar

A tabela 8.1 representa uma proposta de modelo geoquímico para o processo de colmatação de barragens, aplicável à Barragem de Porto Primavera. Trata-se de um modelo geral baseado no que foi sugerido por INFANTI JR. e KANJI em 1974, e nos processos de laterização que atuam no Pontal do Paranapanema.

Sua forma de apresentação tem, por objetivo, facilitar a visualização dos mecanismos atuantes, em relação às características ambientais e fatores intervenientes. Abrange as variáveis já conhecidas, que poderão ser adequadas e/ou complementadas em função de dados obtidos em estudos específicos para cada caso.

Não foram indicados limites ou fixados valores para os parâmetros adotados, uma vez que a interação entre os mesmos é bastante complexa. Ademais, a existência ou não, ou mesmo a maior influência de um determinado fator, irá alterar o equilíbrio de cada mecanismo.

Para a Barragem de Porto Primavera previu-se a possibilidade de precipitação do ferro na camada de cascalho da trincheira drenante, pelos mesmos mecanismos que originaram os níveis de conglomerado ferruginoso, na zona de oscilação do nível da água. Essa possibilidade determinou o afogamento deste componente do sistema de drenagem, de forma a impedir o acesso do oxigênio a essa região do dreno.

Os demais fatores, considerados secundários ou eventuais, poderão ser melhor investigados somente após o enchimento do reservatório, quando estiverem definidas as características físico-químicas e ambientais do sistema, permitindo assim uma aferição do modelo geoquímico.

9 MEDIDAS ADOTADAS E RECOMENDAÇÕES PARA OUTRAS BARRAGENS DE TERRA BRASILEIRAS

9.1 Medidas Preventivas e Corretivas

O fenômeno da colmatação, embora se instale com certa rapidez, tem uma evolução relativamente lenta, a exemplo do que se observa na literatura, onde somente barragens mais antigas (Guarapiranga, 1909 e Rio Grande, 1937) apresentaram acentuada obstrução dos drenos. Levando-se em conta a vida útil de uma barragem, o processo de obstrução pode não apresentar problema, porém a influência do fator tempo deve ser considerada para cada caso particular.

A precipitação de geles amorfos de ferro pode constituir, por si só, elemento suficiente para reduzir a permeabilidade de um filtro, mesmo que estes não evoluam para compostos mais estáveis. Deve-se, portanto, evitar ou minimizar a sua formação e, nos casos em que se note uma colmatação já acentuada, reduzir os seus efeitos ou recompor as partes do sistema afetadas, através de medidas corretivas.

INFANTI JR. e KANJI(1974) consideram que as medidas corretivas devem ser aplicadas a curto ou longo prazo visando sempre, porém, impedir a continuidade ou repetição do processo, ou mesmo eliminá-lo. A curto prazo propõem a reconstrução parcial ou o reforço do filtro, ou sua limpeza por processos químicos através da injeção de substâncias dentro da barragem, a montante da zona afetada. As medidas a longo prazo visariam impedir a mobilização ou precipitação do ferro e abrangeriam a utilização de métodos de cloração, aeração, bactericidas ou fungicidas, adição de substâncias químicas à água do reservatório ou o tratamento de eventuais resíduos industriais contaminantes. Propõem, ainda, a injeção de produtos químicos na barragem.

GUERRA (1980 e 1982) e MACIEL FILHO(1982) propõem o afogamento dos filtros horizontais e drenos de barragens como medida preventiva ou corretiva, de forma a impedir a aeração do sistema drenante, evitando-se o contato

das águas efluentes com o oxigênio do ar.

Com base no que foi visto anteriormente é possível, ainda, a adoção de outras medidas preventivas, apenas mantendo-se o ferro em solução. A disponibilidade de agentes complexantes, como a sílica e alguns cátions no meio, funciona como inibidor da precipitação do ferro na natureza e pode atuar da mesma forma no interior de uma barragem.

A experiências de MELFI (1971), que impediu a evolução de geles a morfos de ferro III para compostos estáveis, através da percolação de água rica em sílica, levam a crer que uma concentração relativamente elevada de silício nas águas percolantes pode manter o ferro em solução até que o mesmo atravesse todo o sistema de drenagem de uma barragem. PARAGUAÇU (1972) e MACIEL FILHO (1982) relatam a existência de teores de até 31,3 mg/l e 60 mg/l de sílica respectivamente, em águas naturais, podendo ser obtidas concentrações ainda menores através de determinados artifícios.

De forma a aumentar essas concentrações, NOGUEIRA JR. (1985) sugere a colocação de uma camada de cascalho fluvial nos locais onde as águas efluentes do maciço e da fundação penetram nos filtros. Este cascalho, de preferência constituído por minerais amorfos de sílica (p.ex. opala e calcedônia) deve ser britado para permitir a exposição do material no seu estado fresco e aumentar sua superfície específica de contato com a água, fazendo com que a mesma se enriqueça de sílica antes de penetrar no sistema drenante. Essas camadas seriam dimensionadas em função das concentrações iônicas que se deseja obter e de sua vida útil de funcionamento.

Podem, ainda, ser utilizadas camadas de brita de rochas alcalinas ou até mesmo basalto, de forma a se obter elevadas concentrações de K^+ , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} para a complexação do ferro. Deve-se lembrar porém que, assim como na utilização de sílica amorfa, há necessidade de uma comprovação experimental de que serão obtidos os efeitos desejados, em cada caso analisado.

9.2 Medidas Adotadas para a Barragem de Porto Primavera

Três medidas preventivas deverão garantir a eficiência do sistema de drenagem da Barragem de Porto Primavera durante a sua vida útil, quais sejam: O seu superdimensionamento, a elevação do filtro horizontal e o afogamento da trincheira drenante.

O superdimensionamento dos filtros de barragens é uma prática comum em engenharia, tanto para facilitar a sua construção quanto para garantir uma drenagem segura e eficiente, sem que o sistema trabalhe em carga. Conforme descrito no item 8.2, os elementos drenantes da barragem foram dimensionados para descarregar vazões dez vezes maiores do que o triplo daquelas que serão coletadas.

A suspensão do filtro horizontal por meio de um tapete argiloso pouco permeável, evitará o seu contato direto com a fundação. A introdução dessa camada de maciço compactado irá reduzir sensivelmente o afluxo de soluções provenientes da fundação, promovendo o seu desvio para a trincheira drenante, situada imediatamente a jusante.

Como os filtros vertical e horizontal não manterão contato direto com os materiais da fundação, responsáveis pelo maior aporte de ferro, e não constituem ambientes muito favoráveis a sua fixação devido à falta de aeração, qualquer precipitação, portanto, será pouco significativa e não irá interferir com a permeabilidade total dos filtros, dada a sua elevada capacidade de drenagem.

No caso da trincheira drenante, único elemento do sis

tema com possibilidade de aeração, será necessário o afogamento, de forma a impedir o acesso do oxigênio à camada de cascalho. Embora sua capacidade de descarga tenha sido, também, superdimensionada, a provável precipitação do ferro na zona de oscilação do nível da água nesta camada determinaria a sua colmatção devido à forte oxigenação, reduzindo rapidamente a permeabilidade total do dreno.

No trecho compreendido entre as estacas 330 e 475, correspondente à planície aluvial, o afogamento se dará naturalmente pelo nível da água de jusante da barragem. No terraço aluvial, onde as cotas de fundação são mais elevadas e a trincheira será parcialmente penetrante, ele será provocado artificialmente.

Como se observa na figura 8.2.B a elevação do nível da água até a parte superior da trincheira será garantida por um tubo de concreto perfurado, com diâmetro de 0,4m, situado na cota 239,80m. Toda a água do sistema será eliminada por esse tubo, que funcionará como um vertedouro livre e irá descarregar em caixas de coleta regularmente espaçadas. O nível da água no interior da trincheira deverá, portanto, se elevar até essa cota, mantendo-a totalmente submersa.

O acompanhamento das subpressões e das vazões efluentes, durante a operação da barragem, será realizado por meio de piezômetros instalados na fundação e de medições de vazão nas caixas de coleta. A detecção de precipitados ferruginosos nas águas poderá ser feita pela simples inspeção visual dessas caixas ou, se necessário, através de análises químicas e mineralógicas.

9.3

Metodologia para Investigação do Fenômeno

A metodologia a ser adotada para a investigação da

colmatação depende, fundamentalmente, se a barragem se encontra em operação, com evidências da existência do fenômeno ou se, ainda na fase de projeto, suspeita-se que o mesmo poderá ocorrer. As medidas que serão adotadas, de caráter corretivo ou preventivo respectivamente, orientarão a pesquisa.

9.3.1 Barragens em Operação

Nas barragens em operação suspeita-se de que esteja havendo colmatação do sistema drenante por evidências indiretas, como a elevação de subpressões, ou pela constatação direta da existência de compostos de ferro precipitados a jusante. Evidentemente pode estar ocorrendo a formação de geles amorfos ou compostos de ferro mais estáveis, devido à eliminação do ferro pelo sistema, sem contudo haver colmatação (MACIEL FILHO, 1982).

Para se obter um modelo geoquímico, conforme apresentado no capítulo anterior, pode-se estabelecer uma diretriz básica de pesquisa. Os estudos, de modo geral, devem abranger análises de campo e de laboratório, de acordo com os itens relacionados a seguir:

9.3.1.1 Estudos de Campo

- Medidas de pH e Eh e das pressões parciais de O_2 e CO_2 (para a água de montante e jusante da barragem).
- Contagem e identificação de colônias de microorga-nismos (para a água de montante e jusante da barragem).

- Inspeção direta, através de escavações, dos locais possivelmente colmatados.

9.3.1.2 Estudos de laboratório

- Análise química completa de amostras da água do reservatório, do solo utilizado para a construção do maciço de terra da barragem, dos materiais da fundação e da água e compostos de ferro do sistema drenante. Deverão ser analisadas as concentrações de Fe^{2+} , Fe^{3+} , óxidos, sulfatos, nitratos, carbonatos, cátions, sílica, alumínio, sólidos em suspensão e elementos traços. Para os materiais da fundação deverão ser medidos os valores de pH e Eh.
- Análise mineralógica dos materiais da fundação, do material utilizado para a construção do maciço da barragem e dos precipitados de ferro, incluindo microscopia óptica, difratometria de raios X, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varregura para identificação dos minerais de argila e de ferro.
- Análise biológica completa da água do reservatório, das águas efluentes da barragem e de piezômetros.
- Caracterização geotécnica dos materiais de empréstimo (na jazida), do maciço da barragem e dos materiais da fundação.

Para uma perfeita caracterização das condições ambientais e das principais fontes de ferro poderão também, ser estudados os solos e rochas que compõem o arcabouço do reservatório. Os resultados obtidos permitirão a elaboração de um modelo geoquímico que levará a uma melhor compreensão dos mecanismos de mobilização e precipitação do ferro e norteará as medidas que deverão ser tomadas.

9.3.2 Barragens em Fase de Projeto

Para as barragens a serem construídas em regiões favoráveis à colmatção, a metodologia de estudo deverá ser mais abrangente, pois ainda não se instalaram as condições que prevalecerão durante a operação da barragem. Com o enchimento do reservatório as condições ambientais certamente serão alteradas, devendo-se prever medidas que evitem ou minimizem a colmatção dentro de um modelo geoquímico que ainda irá se instalar. Os trabalhos de investigação deverão, portanto, dividir-se em três etapas:

9.3.2.1 Caracterização Ambiental

Consiste na realização de análises químicas, mineralógicas e biológicas sobre os solos, rochas e águas da região. Basicamente serão aplicadas as mesmas análises descritas anteriormente, visando-se um conhecimento da natureza das águas que compõem o rio principal e seus afluentes, os solos de empréstimo e os diferentes tipos litológicos.

Caso ocorram carapaças ou couraças ferruginosas na região, as mesmas deverão ser estudadas dentro do mesmo critério, pois constituem modelos naturais do fenômeno e permitirão uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos.

9.3.2.2 Ensaios de Campo

São de vital importância para o estudo da colmatção e sua realização fornecerá informações sobre a influência das águas provenientes da fundação. Evidentemente as condições ambientais envolvidas ainda não são as que irão prevalecer quando do enchimento do reservatório, mas se aproximam mais daquelas que regem a

dinâmica do ferro na natureza.

Os ensaios deverão ser realizados em trincheiras de dimensões tais que permitam a construção de filtros e drenos na mesma proporção e com os mesmos materiais que serão adotados na construção da barragem. A circulação da água será garantida por um sistema de bombeamento que forçará sua passagem da fundação para os materiais filtrantes, atravessando-os e sendo bombeada para fora da trincheira.

O acompanhamento do ensaio, com amostragens periódicas na região de oscilação do NA dentro do filtro, permitirá a observação da evolução do fenômeno. Sobre as amostras coletadas e a água que percola pelo material granular deverão ser realizadas as análises químicas, mineralógicas e biológicas já descritas.

9.3.2.3 Ensaios de Laboratório

A execução de ensaios de laboratório prevê a reprodução do fenômeno sob condições controladas havendo, inclusive, a possibilidade de se utilizar água de algum reservatório já formado (cujas condições se aproximam das condições previstas) e a aplicação de medidas preventivas (como a alteração de pH, adição de produtos químicos, etc.).

Podem-se realizar dois tipos de ensaios, sendo um em permeâmetros verticais ou horizontais e outro em extrator Soxhlet, ambos os tipos se complementando quanto aos objetivos visados.

Os ensaios em permeâmetros encontram-se fartamente descritos por FERREIRA (1978) e MACIEL FILHO (1982) e constituem modelos em que a água percola pelo maciço da barragem (solo argiloso compactado) e o filtro (areia).

Caso se queira simular a circulação a partir da fundação (filtro horizontal), pode-se substituir o solo argiloso compactado por fragmentos de rocha e/ou solo da fundação.

Os ensaios em extrator Soxhlet permitem reproduzir um ciclo completo da água na natureza provocando-se, na amostra, uma zona de oscilação do nível da água, abaixo da qual ocorre saturação e acima da qual se dá a precipitação do vapor (simulando chuva) e infiltração de água. A simulação dessas condições é importante para o conhecimento das condições de solubilização e precipitação do ferro levando-se em conta suas fontes primárias, porém não permite o estudo da influência de fatores biológicos, devido ao aquecimento da água.

A amostra a ser ensaiada é representada pelo material fonte do ferro (solo ou rocha da fundação ou solo do maciço da barragem) sobre a areia do filtro, na qual será mantido um nível de água relativamente constante. Será garantida, desse modo, a infiltração da água através do primeiro material e a precipitação do ferro no material granular, em diferentes condições de aeração.

As análises químicas, mineralógicas e biológicas (quando possível) nesses ensaios, fornecerão dados sobre o predomínio de um ou outro fator sobre os demais, uma vez que essas condições podem ser controladas. Essas informações, se analisadas no contexto geral, com os resultados dos estudos e ensaios de campo, levarão a um diagnóstico bastante preciso quanto à possibilidade de colmatção, sua evolução e as medidas preventivas a serem adotadas.

9.4 Conclusões

- 9.4.1 O ferro se mobiliza em condições redutoras, mantendo-se em solução na forma de íon e migrando ao longo da fundação, corpo e sistema de drenagem da barragem. Ao encontrar condições oxidantes precipita na forma de geles amorfos e evolui para hidróxidos e óxidos estáveis.
- 9.4.2 O principal meio de migração é representado pela fundação da barragem, normalmente mais permeável que o maciço argiloso. A colmatção dos filtros verticais é, portanto, pouco significativa se comparada com a dos filtros horizontais e drenos, que recebem as águas efluentes das fundações.
- 9.4.3 A precipitação de compostos de ferro no sistema de drenagem da barragem ocorre, geralmente, na zona de oscilação do nível da água, ou acima desta por capilaridade.
- 9.4.4 Quanto maior o grau de aeração do sistema de drenagem, mais rápido e intenso se torna o fenômeno. Barragens com drenos tubulares e filtros tipo "sanduiche" tendem a apresentar colmatção mais acentuada e evolução mais rápida do que aquelas que apresentam tapetes ou filtros arenosos, desde que essas partes se encontrem em contato com o ar.
- 9.4.5 Barragens construídas sobre rochas ácidas colmatam-se mais rapidamente do que aquelas construídas sobre rochas básicas e alcalinas, devido à presença de metais alcalinos e alcalino-terrosos nas águas que percolam por essas últimas. Esses cátions formam complexos estáveis com o ferro, mantendo-o em solução.

9.4.6 Na Barragem de Porto Primavera, o superdimensionamento do sistema de drenagem, a suspensão do filtro horizontal e o afogamento da trincheira drenante deverão evitar o fenômeno da colmatação ou reduzir a sua incidência a níveis mínimos. A instalação de piezômetros na fundação e a inspeção e/ou análise química e mineralógica das águas efluentes do sistema permitirão a verificação de sua eficiência durante a vida útil da barragem.

9.4.7 De forma a prevenir, minimizar ou corrigir a colmatação química dos filtros e drenos de barragens, devem ser tomadas medidas que mantenham o ferro em solução e/ou evitem a sua precipitação, controlando-se esses mecanismos. Essas medidas devem ser adotadas a partir de um modelo geoquímico baseado em investigações de campo e laboratório, cujos quantitativos dependerão das características das águas regionais e microorganismos presentes, litologia e grau de ferruginização das fundações e na natureza dos materiais naturais de construção a serem empregados.

10

CONCLUSÕES FINAIS

10.1 Os depósitos aluviais cenozóicos do Rio Paraná no Pontal do Paranapanema encontram-se dispostos ao longo da margem direita do rio, em três unidades geomorfológicas distintas que se desenvolveram na seguinte sequência: terraço colúvio-aluvial; terraço aluvial e planície aluvial. Estas feições foram moldadas por processos deposicionais e erosivos relacionados a eventos de flutuações paleoclimáticas ocorridas durante o Pleistoceno.

10.2 O embasamento dos depósitos aluviais é representado, predominantemente, pelos arenitos da Formação Caiuá, mais profundamente erodidos junto à margem esquerda do vale fluvial. A natureza fortemente assimétrica do vale do Rio Paraná na região, com a margem direita essencialmente deposicional e a esquerda erosiva, de

ve refletir um basculamento regional ocorrido no Cenozôico, com eixo aproximadamente paralelo ao traçado do rio.

10.3 Os níveis de arenitos e conglomerados ferruginosos presentes nos sedimentos rudáceos do Rio Paraná formaram-se devido à cimentação parcial ou total desses sedimentos, principalmente na zona de flutuação do nível da água nos perfis de solo. A principal fonte primária de ferro parece ser representada pelo Arenito Caiuá presente na margem direita do rio, de onde o ferro é mobilizado em condições redutoras, precipitando a seguir em ambiente oxidante, dentro de um quadro ambiental bastante favorável ao desenvolvimento de lateritas ferruginosas.

10.4 A evolução dos níveis lateríticos se deu a partir do Pleistoceno, através do avanço remontante de "frentes de acumulação de Fe", que se opuseram à percolação de soluções ricas em ferro denominadas "frentes de migração". Os diferentes níveis identificados nas unidades geomorfológicas devem ter se estabelecido e desenvolvido na seguinte ordem: topo dos aluviões do terraço colúvio-aluvial; base dos colúvios e dos aluviões do terraço e planície aluvial; laje da cota 240m do terraço aluvial; lajes do leito do Rio Paraná e concreções do topo do terraço e planície aluvial.

10.5 Os mesmos mecanismos geoquímicos que regem os processos de laterização na região do Pontal do Parapanema deverão governar a dinâmica do ferro após a construção da Barragem de Porto Primavera. O ferro deverá ser mobilizado no reservatório, migrando ao longo da fundação, corpo e sistema de drenagem da barragem, podendo precipitar na saída desse sistema ao encontrar um meio mais oxidante. Da mesma forma

que os sedimentos aluviais se apresentam cimentados por hidróxidos e óxidos de ferro estáveis, a trincheira drenante da barragem, construída com os mesmos materiais granulares, também será susceptível a obstrução por colmatção química.

10.6 De forma a se evitar essa colmatção ou reduzir a sua incidência a níveis mínimos, foram tomadas medidas preventivas no projeto da Barragem de Porto Primavera, superdimensionando-se o seu sistema de drenagem, suspendendo-se o seu filtro horizontal e afogando-se a trincheira drenante. O acompanhamento dos níveis piezométricos e a inspeção das águas efluentes do sistema possibilitarão a detecção do fenômeno caso ele se instale durante a vida útil da barragem.

10.7 Para se prevenir, minimizar ou corrigir a colmatção química dos filtros e drenos de barragens, devem ser tomadas medidas que mantenham o ferro em solução e/ou evitem a sua precipitação, controlando-se estes mecanismos. A aplicação de uma metodologia adequada para a investigação do fenômeno permitirá a obtenção de um modelo geoquímico mais compatível com a realidade e um melhor equacionamento do problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - 1975 - Ensaio de perda d'água sob pressão: diretrizes. São Paulo, ABGE. 16p. (Boletim n. 02).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - 1977 - Diretrizes para execução de sondagens- 2a. tentativa. São Paulo, ABGE. 24p. (Boletim n. 03).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - 1980 - Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia: equipamentos de sondagens. São Paulo, ABGE. 62p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - 1981 - Ensaio de permeabilidade em solos no campo - 1a. tentativa . São Paulo, ABGE, 36p. (Boletim n. 04).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - 1955 - MB-6: amostragem de agregados. Rio de Janeiro, ABNT, 2p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - 1968 - MB.32: análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, ABNT, 7p.
- ALEVA, G.J.J.- 1983 - Suggestions for a systematic structural and textural description of lateritic rocks. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 443-454.
- ALMEIDA, F.F.M. de & BARBOSA, O. - 1953 - Geologia das quadriculas de piracicaba e rio claro, estado de s.paulo. Rio de Janeiro, DGM / DNPM. (Boletim DNPM n. 143).

- ALMEIDA, F.F.M. de - 1980 - Tectônica da bacia do paranã no brasil. São Paulo, IPT. 187p. (Relatório Interno n. 14.091 para a Paulipetro) (Inédito).
- ALMEIDA, M.A. de; STEIN, D.P.; MELLO, M.S. de; BISTRICHI, C.A.; PONCANO, W.L.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. de - 1980. - Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos estados de mato grosso do sul e paranã. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú. Anais... Florianópolis, SBG. v. 5, p. 2799-2812.
- ALMEIDA, M.A. de; DANTAS, A.S.L.; FERNANDES, L.A.; SAKATE, M.T.; GIMENEZ, A.F.; TEIXEIRA, A.L.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M. de - 1981 - Considerações sobre a estratigrafia do grupo bauru na região do pontal do paranapanema no estado de são paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Atas... Curitiba, SBG. v.2, p. 77 - 89.
- AMARAL, G.- 1977 - Padrões fotogeológicos das litofácies da formação baurú no estado de são paulo, como observadas em imagens landsat. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, São Paulo. Atas ... São Paulo, SBG. p.439-449.
- ANAGNOSTI, P. - 1970 - A lateritic soil as watertight dam core. In: CONGRÈS DES GRANDES BARRAGES, 10. Montreal. Comptes Rendus... Paris, CIBG. v.1, Q.36, R.14, p.225 - 232.
- BAKER, C.L. - 1923 - The lava field of the paranã basin. Journal of Geology, Illinois, (31): 66 - 79.
- BARBOSA, O.; BRAUN, O.P.G; DYER, R.C.-1970 - Geologia do triângulo mineiro. Rio de Janeiro, DNPM. 140p. (Boletim DNPM n.136).
- BARDOSSY, G.Y.-1979 - Paleoenvironments of laterites and lateritic bauxites effect of global tectonism on bauxite formation. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrun. Proceedings... Rotterdam, A. A.Balkema. p.287 - 294.

BARROS MACHADO, A. de - 1983 - The contribution of termites to the formation of laterites. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho . p.261-270.

BIGARELLA, J.J. - 1949 - Contribuição à petrografia dos arenitos da série são bento. Arquivo de Biologia e Tecnologia, Curitiba, (4): 141 - 214.

BLATT, H.; MIDDLETON, G.; MURRAY, R. - 1972 - Origin of sedimentary rocks. New Jersey, Prentice-Hall. 634p.

→ BOCQUIER, G.; BOULANGE, B.; ILDEFONSE, P.; NAHON, D; MÜLLER, D. - 1983 - Transfer, accumulation modes, mineralogical transformations and complexity of historical development in lateritic profiles. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 331-343.

BOGGIANI, P.C.; COIMBRA, A.M.; FAIRCHILD, T.R. - 1985 - Seixos sílicos das cascalheiras dos rios paranã e araguaia: nomenclatura e proveniência. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 5, São Paulo. Boletim de Resumos... São Paulo, SBG. p.11.

BÓRIO, N.J. & LANDIM, P.M.B. - 1970 - Um estudo sedimentológico sobre a formação caiua. Boletim Paranaense de Geociências. Curitiba, (28/29): 145-157.

BRANDT NETO, M. - 1977 - Estratigrafia da formação bauru na região do baixo tietê. São Paulo, Instituto de Geociências/ USP. (Dissertação de Mestrado) (Inédita).

CAMPOS, J. de O. - 1981 - Propriedades geotécnicas e comportamento tecnológico de arenitos da formação caiua. São Paulo, Instituto de Geociências/USP. (Tese de Doutorado) (Inédita).

CANHOLI, A.P.; BEEKMAN, G.B.; da ROSA, S.L. - 1981 - Reservatório de porto primavera: influências sobre o meio ambiente físico. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 14, Recife. Anais... Recife, CBGB. v.3, p.7 - 30.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1974a - Pesquisa de cascalho jupiá - guaira. avaliação preliminar da ocorrência da ilha do veado. Ilha solteira, LCEC. 17p. (Relatório n.G-30/74) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1974b - Pesquisa de cascalho jupiá- guaira. sondagens na ocorrência da ponte maurício jopert, foz do rio pardo. Ilha Solteira, LCEC. 5p. Relatório n. G-33/74) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1974c - Pesquisa de cascalho jupiá- guaira. avaliação preliminar da ocorrência da ilha do jacaré. Ilha Solteira, LCEC. 23p. (Relatório n. G-35/74). (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1974d - Pesquisa de cascalho jupiá - guaira. avaliação preliminar da ocorrência da ilha baunilha. Ilha Solteira, LCEC. 11p. (Relatório n. G-37/74) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1974e - Pesquisa de cascalho jupiá - guaira. avaliação preliminar das ocorrências de cascalho da região de rosana . Ilha Solteira, LCEC. 178p. (Relatório no. G-38/74). (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1975a - Pesquisa de cascalho jupiá-guaira. cubagem e caracterização preliminar da cascalheira da ilha do ivaí. Ilha Solteira, LCEC. 144p. (Relatório n. G-03/75) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. - 1975b - Pesquisa de cascalho jupiá- guaíra. sondagens realizadas na foz do rio iguatemi e na ocorrência próximo à ilha da barra. Ilha Solteira, LCEC, 23p. (Relatório n. G-09/75) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1975c - Pesquisa de cascalho jupiá - guaíra. avaliação preliminar das ocorrências de cascalho da região de porto morumbi (mt). Ilha Solteira, LCEC. 99p. (Relatório n. G-13/75) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1975d - Pesquisa de cascalho jupiá- guaíra. sondagens realizadas na região de guaíra (pr). Ilha Solteira, LCEC. 48p. (Relatório n. G-17/75) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1975e - Pesquisa de cascalho jupiá - guaíra. análise mineralógica de amostras de areia das cascalheiras de santa ilídia - eixo II, da ilha do óleo cru e da ilha do ivaí - rio paraná. Ilha Solteira, LCEC. 14p. (Relatório no. G-35/75) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1976a - Caracterização tecnológica sobre amostras de arenitos que afloram na área do eixo II, margem esquerda da usina de porto primavera. Ilha Solteira, LCEC. (Relatório n. G-03/76) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1976b - Pesquisa de cascalho jupiá - guaíra. informes sobre as ocorrências de cascalho ilha fina, ilhas junqueira, porto maria e ilha pajaú. Ilha Solteira, LCEC. 86p. (Relatório n. G-05/76) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1977 - Ensaios geotécnicos sobre amostras de areia extraídas das jazidas ilha do veado, ilha do ivaí, ilha do jacaré, ilha baunilha, ilha pajaú, fazenda santa ilídia, ilha do óleo cru e ilha da comissão geográfica, situadas no rio paraná, entre jupiá e guaíra, para fins de utilização em filtros e transições de barragens. Ilha Solteira, LCEC. 447p. (Relatório n. S-26/77) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1978 - Obra de porto primavera - caracterização da cascalheira do óleo cru. Ilha Solteira, LCEC. 204p. (Relatório n. C - 34/78) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979a - Análise mineralógica de amostras de cascalho da cascalheira do óleo cru - rio paranã. Ilha Solteira, LCEC. 7p. (Relatório n. G-07/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979b - Lixiviação de amostras de arenito e de rochas basálticas em extrator soxhlet - porto primavera. Ilha Solteira, LCEC. (Relatório n. G-20/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979c - Ensaio de ciclagem água-estufa em rochas basálticas e em arenito - porto primavera. Ilha Solteira, LCEC. (Relatório n. G-21/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979d - Obra de rosana. caracterização das cascalheiras banco da curva, ilha da garça e banco croinha. Ilha Solteira, LCEC. 209p. (Relatório n. C-26/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979e - Obra de rosana - caracterização das cascalheiras ilha do corvo, banco da anta e ilha da anta. Ilha Solteira, LCEC. 22lp. (Relatório n.27/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1979f - Obra de porto primavera. caracterização da cascalheira santa ilídia. Ilha Solteira, LCEC. 103p. (Relatório no. C-32/79) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1980a - Ensaio de ciclagem natural em rochas basálticas e em arenito - porto primavera. Ilha Solteira, LCEC. (Relatório n. G-15/80) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1980b - Obra de porto primavera - análise mineralógica da areia e do cascalho das cascalheiras do óleo cru e santa ilídia. análise petrográfica do basalto da casa de força e reatividade, pelo método das barras, da areia, cascalho e basalto. Ilha Solteira, LCEC. 46p. (Relatório n. C-38/80) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1982(?)a - Determinação do coeficiente de permeabilidade de meios porosos em laboratório. Método de ensaio n. MSL-09. Ilha Solteira, LCEC. 27p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1982b - Cascalheira ilha do tigre - caracterização e cubagem . Porto Primavera. 59p. (Relatório n. PP/TC/01/48/RT-0395) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO.- 1982c - Cascalheira jacutinga - caracterização e cubagem. Porto Primavera. 45p. (Relatório n. PP/TC/01/44/RT-0373) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1982d - Cascalheira ilha da garça - caracterização e cubagem. Rosana. 52p. (Relatório n. RO-TC-01-11-RT-0178) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1982e - Ensaio geotécnicos sobre amostras provenientes da área de empréstimo para aterro hidráulico - margem direita. Porto Primavera. 528p. (Relatório n. PP/TS/00/37/RT-0344v vols. 1 e 2) (Inédito).

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - 1983 - Análise da granulometria dos aluviões da jazida do óleo cru, braço esquerdo do rio paraná. Porto Primavera. 53p. (Relatório n. pp- 1.02-RT-1014) (Inédito).

- CHAUVEL, A.; BOULET, R.; JOIN, P.; BOCQUIER, G. - 1983 - Aluminium and iron oxi-hidroxide segregation in nodules of latsolos developed on tertiary sediments (barreiras group), near manaus (amazon basin), brazil. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho Ed., p. 507-526.
- COIMBRA, A.M. - 1976 - Arenitos da formação bauru - estudos de áreas fontes. Instituto de Geociências /USP. (Dissertação de mestrado) (Inédita).
- COPEL - 1984 - Reconhecimento geológico expedito do baixo ivaí - relatório preliminar para a visita dos consultores. Curitiba. 65p. (Relatório Interno e fotografias aéreas esc. 1:25.000) (Inédito).
- ✓ FERREIRA, R.C. - 1978 - Colmatação físico-química de filtros - tentativa de simulação em laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 6, Rio de Janeiro. Anais... ABMS, Rio de Janeiro, v.1, p. 81-100.
- FREITAS, R.O. de - 1955 - Sedimentação, estratigrafia e tectônica da série bauru (estado de são paulo). São Paulo. 185p. (Boletim da FFCL da USP n. 194, Geologia, 14).
- FREITAS, R.O. de - 1964 - Grupo bauru na geologia do estado de são paulo. São Paulo, Instituto Geográfico e Geológico, 41, p.23-35.
- FREITAS, R.O. de - 1973 - Geologia e petrologia da formação caiuá no estado de são paulo. São Paulo, Instituto Geográfico e Geológico (Boletim IGG n. 50).
- FREITAS, R.O. de - 1982 - Definição estratigráfica do grupo bauru por sedimentogramas. São Paulo, IG. (Boletim n. 6).

FULFARO, V.J. - 1974 - Depósitos de cascalho da bacia hidrográfica do rio paran. IPT, 20p. (Relatrio Interno de Viagem) (Indito).

FULFARO, V.J.; ANGELI, N.; BARCELOS, J.H. - 1983 - Depsitos de cascalho da bacia hidrogrfica do rio paran. In: SIMPSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4, Boletim de Resumos, So Paulo, SBG. p.25.

GARRELS, R.M. - 1960 - Mineral equilibria. New York, Harper & Bro. 254 p.

GARRELS, R.M. & CHRIST, C.L. - 1965 - Solutions, minerals and equilibria. New York, Harper and Row, cap.7.

GILKES, R.J. & SUDDHIPRAKARAN, A. - 1979 - Mineralogical and chemical aspects of lateritisation in southwester austrlia. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. Proceedings... Rotterdam, A.A. Balkema. p.34-44.

GONZAGA de CAMPOS, L.F. - 1905 - Reconhecimento da regio compreendida entre bauru e itapura (estrada de ferro noroeste do brasil). So Paulo, Tip. Ideal, 40p.

GRUBB, P.L.C. - 1983 - A review of current information and research on laterite and lateritic weathering products in South frica. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, So Paulo. Proceedings... So Paulo, Melfi and Carvalho. p. 455-464.

GUERRA, M.O. - 1980 - Ao qumica e biolgica na colmatao de filtros e drenos - implicaes no comportamento da barragem do rio grande. In: SEMINRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 13, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, CBGB, v.2, p.257-289.

- GUERRA, M.O. - 1982 - Ação química e biológica em filtros e drenos de barragens de terra - implicações no comportamento da barragem do rio grande. (Palestra proferida na THEMAG Engenharia, São Paulo) (Inédito).
- GUIDICINI, G. & FERNANDES DA SILVA, R. - 1972 - Sobre a ocorrência de uma extensa bacia de acumulação de sedimentos rudáceos na região de três lagoas, sudeste de mato grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Belém. Anais... Belém, SBG, v.1, p.155-165.
- GUIDICINI, G. - 1973 - Estudo de ocorrências de materiais naturais granulares no interior da bacia do alto paranã. São Paulo, IPT. 103p. (Relatório n. 7.242) (Inédito).
- HASUI, Y. - 1969 - O Cretáceo no oeste mineiro. São Paulo, SBG. (Boletim n. 1, vol. 18), p.19-56.
- HVORSLEV, M.J. - 1965 - Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes. New York, United Engineering Center. 521p.
- INFANTI JR., N. & KANJI, M.A. - 1974 - Preliminary considerations on geochemical factors affecting the safety of earth dams. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, ABGE, v.1, Tema 4/33.1-33.11.
- INFANTI JR., N. & KANJI, M.A. - 1976 - Considerações preliminares sobre fatores geoquímicos que afetam a segurança de barragens de terra. Construção Pesada, São Paulo, 5/6 (63): 48-54, abr.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - 1976a - Estudos geológicos preliminares no eixo II da usina de porto primavera I - rio paranã e no eixo A da usina de porto primavera II - rio paranapanema. São Paulo, IPT. (Relatório n. 9.267) 3v. (Inédito).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO -
1976b - Pesquisa de areia e cascalho no leito do rio paranã
entre presidente epitácio e guaíra. São Paulo, IPT. 42p.
(Relatório n. 8.947) (Inédito).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
- 1979 - Caracterização petrográfica de nove amostras de are-
nito caiuá (porto primavera). São Paulo, IPT. 30p. (Relató-
rio n.12.264) (Inédito).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
-1984 - Análises de água na enseadeira de 1a. fase - 2a.
etapa - barragem de porto primavera. São Paulo, IPT. 30p.
(Relatório n.20.594) (Inédito).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO -
1985a - Análises petrográficas pormenorizadas e análises
mineralógicas por difratometria de raios-X- treze amostras de
rocha. São Paulo, IPT. 30p. (Certificado n. 721.123)
(Inédito).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO
- 1985b - Análises petrográficas pormenorizadas e
determinação de argilo-minerais por difratometria de raios
X- duas amostras de rocha. São Paulo, IPT. 7p. (Certificado n.
724.395) (Inédito).

JABUR, I.C. & SANTOS, M.L. dos - 1984 - Revisão estratigráfica da
formação caiuá. Boletim de Geografia, Maringá, 2:91-106. Jan.

KANJI, M.A.; FERREIRA, R.C.; GUERRA, M.O.; INFANTI JR., N. - 1981
- Geoquímica do ferro nas obras de engenharia em solos
tropicais: breve histórico do conhecimento. (Separata do
Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de
Janeiro).

- KARUNAKARAN, C. & SINHA ROY, S. - 1979 - Laterite profile development linked with polycycle geomorphic in south kerala. In: INTERNATIONAL SEMMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. **Proceedings...** Rotterdam, A.A. Balkema, p. 221-231.
- KRAUSKOPF, K.B. - 1910 - **Introdução à geoquímica.** São Paulo, EDUSP. v.1, 294p., v.2, 311p.
- LANDIM, P.M.B. & FULFARO, V.J. - 1971 - Nota sobre a gênese da formação caiua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SBG, v.1, p. 277-280.
- LANDIM, P.M.B. & SOARES, P.C. - 1976 - Estratigrafia da formação caiua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29, Ouro Preto. **Anais...** SBG, v. 2, p. 195-206.
- LANGE, A.N. - 1961 - **Handbook of chemistry.** 10.ed., New York, McGraw-Hill, 1969p.
- LEONARDI, G. - 1977 - Two new ichnofaunas (vertebrates and invertebrates) in the eolian cretaceous sandstones of the caiua formation in northwest paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SBG, v. 1, p. 112-128.
- LEONARDS, G. - 1962 - Foundation engineering. In: MANSUR, C.J.; KAUFMAN, R.I. **Dewatering.** New York, MAC GRAW HILL. Chapter 3, p. 241-350.
- LEPRUN, J.C. - 1979 - Some principal features of ironcrusts in dry western áfrica. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. **Proceedings....** Rotterdam, A.A. Balkema, p. 144-153.

- LINDQUIST, L.N. & BOZEGNO, M.C. - 1981 - Análise de sistemas drenantes de nove barragens de terra da CESP através da instrumentação instalada. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 19, Recife. Anais... Recife, CBGB, v.1, tema 2, p.267-290.
- MAACK, R. - 1941 - Algumas observações a respeito da existência e da extensão do arenito superior são bento ou caiuá no estado do paranã. Arquivo do Museu Paranaense. Curitiba, 1: 107-129.
- MACIEL FILHO, C.L. - 1982 - Estudo do processo geoquímico de obstrução de filtros de barragens. São Paulo, Instituto de Geociências/ USP. 136p. (Tese de Doutorado) (Inédita).
- MAIGNIEN, R. - 1966 - Review of research on laterites. Bélgica, Unesco, Vaillant - Carmanne. 148p.
- MELFI, A.J. - 1971 - Influência da sílica na evolução dos geles amorfos de ferro (III): estudo experimental simulando condições tropicais úmidas e bem drenadas. São Paulo. Instituto de Geociências e Astronomia / USP. (Tese de Livre Docência) (Inédita).
- MELFI, A.J. & PÉDRO, G. - 1977 - Geochimie des couvertures pédologiques du Brésil - part II: le fer dans les couvertures pédologiques du Brésil. Versailles, Departement de Science du Soil, 96p.
- MELFI, A.J. - 1982 - Geoquímica da superfície. São Paulo, Instituto de Geociências/ USP. (Curso de pós graduação, anotações de aula).
- DE MELLO, V.F.B & TEIXEIRA, A.H. - 1967 - Mecânica dos solos. São Carlos, Escola de Engenharia/USP. v.1. 188p. (Publicação EESCUSP n. 137).

- MERCADO, J.M.O - 1979 - Geochemistry of the laterites in nonoc islands, surigao province, philippines. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. Proceedings... Rotterdam, A.A. Balkema, p. 45-57.
- MEZZALIRA, S. & ARRUDA, M.R. - 1965 - Observações geológicas na região do pontal do paranapanema, estado de são paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 37 (1): 69-77.
- MEZZALIRA, S. - 1974 - Contribuição ao conhecimento da estratigrafia e paleontologia do arenito bauru. São Paulo, IGG. (Boletim no. 51).
- MONTICELLI, J.J. & PEREIRA, N.A.M. - 1976 - Ocorrências de areia e cascalho entre presidente epitácio e guaira. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 11, Fortaleza. *Anais...* São Paulo, CTH/DAEE/SOMA. v.1, trab.10.
- NAHON, D. - 1976 - Cuirasses ferrugineuses et encroûtements calcaires au senegal occidental et en mauritanie. systèmes evolutifs: geochimie, structures, relais et coexistence. (Thèse présentée à la Faculté des Sciences et Techniques de St. Jérôme, France, Université D'Aix, Marseille III) (Inédita).
- NOGUEIRA JR, J. - 1985 - Influence of lithology on the chemical clogging of dam drainage systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1, Brasília. *Anais...* v.2, p. 195-201 (2).
- NUSKE, M.J. & OLIVEIRA, J.A.N. - 1972 - Prospeção de cascalho e areia em leitos de rios - dois exemplos e uma sugestão de metodologia. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo. *Anais...* São Paulo, APGA, p. 409-428.
- PARAGUAÇU, A.B. - 1972 - Experimental silicification of sandstone. *geological society of américa bulletin*, 83: p. 2853 - 2858.

- PÉDRO, G. & MELFI, A.J. - 1983 - The superficial alteration in tropical region and the lateritisation phenomena. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, Melfi and Carvalho, p.3-13.
- PIERUCETTI, J.A. e BRANDT NETO, M. - 1974 - Comportamento do cimento calcário da formação bauru na região de São José do Rio Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre. SBG., v.2, p. 113-117.
- RICOMINI, C.; GIMENEZ FILHO, A.; STEIN, D.P.; ALMEIDA, F.F.M. de; PIRES NETO, A.G.; DEHIRA, L. K.; MELO, M.S. de; BRAGA, T. de O.; PONÇANO, W.L. - 1981 - Características da porção basal da formação Caiuá no nordeste do Paraná". In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. **Anais...** Curitiba, SBG, v.2, p. 34-46.
- RUIZ, M.D. - 1963 - Geologia aplicada à barragem de Jupiá (sistema Urubupungá). São Paulo, IPT. 30p. (Relatório Interno) (Inédito).
- SAHASRABUDHE, Y.S. & DESHMUKH, S.S. - 1979 - The laterites of the Maharashtra state. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. **Proceedings...** Rotterdam, A.A. Balkema. p.209-220.
- SALAMUNI, R.; LANDIM, P.M.B.; SLONGO, T.T.; SOBREIRO NETO, A.F.; PAIVA FILHO, A. - 1981 - Observações sobre o ambiente de deposição da formação Caiuá no noroeste do estado do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. **Anais...** Curitiba, SBG, v.2, p. 25-33.
- SAPOJNIKOV, D.G. - 1979 - Lateritic formations in USSR. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. **Proceedings...** Rotterdam, A.A. Balkema. p. 185-189.

- SCHELLMANN, W. - 1979 - Considerations on the definition and classifications of laterites. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 1, Trivandrum. Proceedings... Rotterdam, A.A. Balkema. p. 1-10.
- SCHWERTMANN, U. - 1983 - The role of aluminium on iron oxide systems. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 65-68.
- SCORZA, E.P. - 1952 - Considerações sobre o arenito caiuá. Rio de Janeiro, DGM./DNPM. 62p. (Boletim n. 139).
- SETZER, J. - 1948 - Algumas contribuições geológicas dos estudos dos solos realizados no estado de São Paulo. Rio de Janeiro, Revista Brasileira de Geografia. 10 (1): p. 41-104.
- SILVEIRA, C.O. da & FREITAS, F.G. da - 1973 - Levantamentos básicos da bacia do rio paran no trecho entre Jupiá e Guaira. São Paulo, v.1, 144p (Relatório Técnico para a CESP) (Inédito).
- SOARES, P.C.; SINELLI, O.; PENALVA, F.; WERNICK, E.; SOUZA, A.; CASTRO, P.R.M. - 1973 - Geologia do noroeste do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracajú. Anais... Aracaju, SBG.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FULFARO, V.J.; AMARAL, G.; SUGUIO, K.; COIMBRA, A.M.; SOBREIRO NETO, A.F.; GIANCURSI, F.D.; CORREA, W.A. G.; CASTRO, G.G.J. - 1979 - Geologia da região sudoeste do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, Rio Claro. Anais... São Paulo, SBG, v. 2, p. 307-319.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FULFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F., - 1980 - Ensaio de caracterizao estratigráfica do Cretáceo no estado de São Paulo: grupo Bauru. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, 10. 177-185.

SOBREIRO NETO, A.F.; BARTORELLI, A.; ARAÚJO, C.H.A.; SEIGNE MARTIN, C.; COUTO, E.A.; SUGUIO, K. - 1981a - Fácies fanglomerática das formações caiuá e Santo Anastácio no norte do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Anais... Curitiba, SBG, v. 2, p.47-59.

SOBREIRO NETO, A.F.; PAIVA FILHO, A.; ARAÚJO, C.H.A.; SEIGNER MARTIN, C.; COUTO, E.A.; SALAMUNI, R.; SLONGO, T.T. - 1981b - Estruturas sedimentares primárias de ambiente flúvio-deltaico da formação caiuá. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Anais... Curitiba, SBG, V.2, P.60-69.

SOMBROEK, W.G. & CAMARGO, M.N. - 1983 - Groundwater laterite and ironstone soil in Brazil, with examples from the Amazon region. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 541-552.

STEIN, D.P.; MELO M.S. de; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A. de; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; ALMEIDA, F.F.M de - 1979 - Geologia de parte dos vales dos rios Paraná e Paranapanema. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, Rio Claro. Anais... São Paulo, SBG, v. 2, p. 291-306.

SUAREZ, J.M. - 1976 - Contribuição à geologia do extremo oeste do estado de São Paulo. Boletim Geográfico, Rio de Janeiro. 34 (248): 119-155.

SUGUIO, K. & BARBOUR, A.P. - 1969 - Morfologia e genese das estruturas limoníticas dos sedimentos da bacia de São Paulo. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro. 41 (2): 161-180.

SUGUIO, K. - 1973 - Calcários e sedimentos detríticos associados à formação Bauru. São Paulo, Instituto de Geociências/USP. 2 v. (Tese de Livre-Docência) (Inédita).

- SUGUIO, K.; FULFARO, J.V.; AMARAL, G.; GUIDORZZI, L.A. - 1977 - Comportamento estratigráfico e estruturas da formação bauru nas regiões administrativas 7 (bauru), 8 (são josé do rio preto) e 9 (araçatuba) no estado de são paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, São Paulo. Anais... São Paulo, SBG., P.231-244.
- SUGUIO, K.; NOGUEIRA JR., J.; TANIGUCHI, H.; VASCONCELLOS, M.L. - 1984 - Quaternário do rio paranã em pontal do paranapanema: proposta de um modelo de sedimentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro. SBG. v.1, p.10-18.
- SZIKSZAY, M. - 1973 - Dados hidrogeoquímicos de rios da bacia do paranã. São Paulo, Instituto de Geociências/USP, p.97-108 (Boletim IG v.4).
- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. - 1969 - Mecânica dos solos na prática da engenharia. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 659p.
- THEMAG ENGENHARIA LTDA - 1978 - Usina e eclusa porto primavera - projeto básico. São Paulo. 5v. (Relatório elaborado para a CESP) (Inédito).
- TRESSOLDI, M.; GUEDES, M.G.; VAZ, L.F. - 1986 - Ocorrências de basalto de baixa densidade na usina de porto primavera e aspectos de interesse ao projeto. IN: SIMPÓSIO SUL AMERICANO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 2, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, ABMS/CBMR. vol. 2, p. 238-251.
- VOLKOFF, B. - 1983 - Iron constituents of the latosolic cover in northeast brazil. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho , p. 527-540.
- WASHBURNE, C. - 1930 - Petroleum geology of the state of são paulo. São Paulo, Boletim da Comissão Geográfica e Geológica do Estado de São Paulo.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ARAUJO, J.S.; OLIVEIRA, C.A.; MARANESI, D.A. - 1987 - Derrames secundários em basaltos de porto primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo. Atas... São Paulo, ABGE. v.1, p.373-377.
- BANERJI, P.K. - 1983 - A morphotectonic classification of laterite and iron stone covered basements in gondwanaland - a case study from orissa, India. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho. p. 371-400.
- BARROS MACHADO, A. de - 1983 - Termitic remains in some bauxites In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings.... São Paulo, Melfi and Carvalho. p.251-254.
- BHASKARA RAO, A.; BARROS, J.G.C.; ADSUMILLI, M.S. - 1983 - Lateritic gold project. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho. p. 159-176.
- CANT, D.J. - 1982 - Fluvial facies models Oklahoma and their application. In: Sandstone depositional Enviroments. Oklahoma, USA. Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, Scholle and Spearing, p.115-137.
- CURTIS, C.D. & SPEARS, D.A. - 1968 - The formation of sedimentary iron minerals. U.S.A., Econ. Geol., USA. (63): 258-270.
- DUNHAM, K.C. - 1960 - Syngenetic and diagenetic mineralization. Proc. Yorkshire Geol. Soc., 32:229-284.

- ESCHENBRENNER, V. & GRANDIN, G. - 1970 - La séquence de cuirasses et différenciations entre agnibilékrou (cote d'ivoire) et diebougou (haute-volta)... Cah. Orstom, Ser. Geol. 2, (2):205-245.
- ESWARAN, H.; GUTHRIER, R. & HOLZHEY, S. - 1983 - The place of laterites on soil taxonomy. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo, 1983. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 491-497.
- EVANS, D. Le C. - 1981 - Laterization as a possible contributor to gold placers. *Engineering and Mining Journal.*, p. 86-91, August.
- GRANT, K. - 1974 - Laterites, ferricretes, bauxites and silcretes In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo. IAEG, v.1, tema 4, p.31.1 - 31.8.
- GRANT, K. - 1974 - The composition of some australian laterites and "lateritic" gravels. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo. Proceedings... São Paulo, IAEG, v.1, tema 4, p.32.1 - 32.16.
- JAMES, H. L. - 1966 - Data of geochemistry. U.S. Geological Survey, Professional Paper, Chapter W - Chemistry of the Iron-rich Sedimentary rocks, 61p.
- LOHNES, R. A. & DEMIREL, T. - 1973 - Strength and structure of laterites and lateritic soils. *Engineering Geology.* Amsterdam, 7:13-33.
- MACIEL FILHO, C. L. - 1987 - Condições geoquímicas em algumas barragens de terra e as possibilidades de cimentação do filtro. Solos e Rochas - Rev. Bras. de Geotecnia, Rio de Janeiro, 10, (1):3-8, abr.

MARANESI, D.A. - 1984 - Considerações sobre aspectos geológico-geotécnicos dos arenitos da formação caiuá na construção de barragens. São Carlos, Escola de Engenharia / USP, 139 p. (Dissertação de Mestrado) (Inédita).

MARQUES, J. D.; ARAUJO, J.S.; OLIVEIRA, C.A. DE & MARANESI, D.A. - 1987. Considerações genéticas sobre o basalto pouco denso de porto primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. Atas... São Paulo, ABGE. V.1, P.39-390.

MEDEIROS, R.A. de - 1980 - Sistemas deposicionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camboriú. SBG, (Boletim n.5), 31p.

MENDES, J.C. - 1977 - Paleontologia geral. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos, EDUSP, 342p.

NOGUEIRA JR., J.; VASCONCELLOS, M.L.; TAGLIAVINI, R. - 1983 - Comportamento geotécnico do arenito caiuá nos taludes de escavação das eclusas de porto primavera. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANA, São Paulo, 1983. Atas... São Paulo, ABMS/ ABGE/ CBMR, v. 2B, p. 243-260.

POLLACK, H.R. - 1983 - Land surfaces and Land lateritisation in suriname. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LATERITISATION PROCESSES, 2, São Paulo, 1983. Proceedings... São Paulo, Melfi and Carvalho, p. 295-308.

SCHUMM, S.A. - 1972 - Fluvial paleochannels. In: RYGBY; HAMBLIN. Recognition of ancient sedimentary environments. Oklahoma, U.S.A., Soc. of Econ. Geol., Special Publication n.16, p.98-107.

STEEL, R.J. & THOMPSON, D.B. - 1983 - Structures and textures in triassic braided stream conglomerates ("bunter") pebble beds in the sherwood sandstone group, north staffirdshire, england". London, p.341-367 (Sedimentology 30).

- SUGUIO, K. & BIGARELLA, J.J. - 1979 - Ambientes de sedimentação - sua interpretação e importância - ambiente fluvial. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Associação de Defesa e Educação Ambiental. 183p.
- SUGUIO, K. - 1980 - Rochas sedimentares. São Paulo, 1980, Edgard blücher ; EDUSP. 500p.
- SUGUIO, K. & BARCELOS, J.H. - 1983 - Calcretes of the bauru group (cretaceous), brazil: Petrology and geological significance. Boletim do Instituto de Geociências da USP. 14: 31-47.
- THEMAG ENGENHARIA LTDA. - 1981 - Geologia de detalhamento da área de conglomerados das formações caiuá e santo anastácio - área de mairá - estado do paraná. São Paulo, THEMAG (Relatório PAULIPETRO sobre o bloco SG-22-0- ACS-43) (Inédito).
- THEMAG ENGENHARIA LTDA. - 1981 - geologia da região limitada pelos paralelos 22º e 23º S e meridianos 51º e 52º W. São Paulo, THEMAG (Relatório PAULIPETRO sobre o bloco SG-22-0 ACS-43) (Inédito).
- TRESSOLDI, M. - 1987 - Aspectos hidrogeológicos dos derrames basálticos das fundações das estruturas de concreto da usina de porto primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo. Atas... São Paulo, ABGE. v.1, p. 357-371.
- VISHER, G.S.-1972 - Physical characteristics of fluvial deposits. In: RIGBY; HAMBLIN. Recognition of ancient sedimentary environments. Oklahoma, Soc. of Econ. Geol. Special Publication n. 16, p.84 - 97.
- WALKER, R.G. & CANT, D.J. - 1979 - Sandy fluvial systems. In: WALKER, R.G. ed.- Facies models. Ontário, Geol. Ass. of Canadá, 1981, chap. 3, p.23-31.