

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DAS
DESCONTINUIDADES ROCHOSAS, "PILLOW LAVAS" E
PALEOCANAL NOS BASALTOS DE FUNDAÇÃO DA
BARRAGEM DE NOVA AVANHANDAVA, RIO TIETÊ (SP)

Vinicius Gomes Taveira Mano

Orientador : Prof. Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração : Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo

1987

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DAS
DESCONTINUIDADES ROCHOSAS, "PILLOW LAVAS" E
PALEOCANAL NOS BASALTOS DE FUNDAÇÃO DA
BARRAGEM DE NOVA AVANHANDAVA, RIO TIETÊ (SP)

Vinicius Gomes Taveira Mano

Orientador : Prof. Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente :	<u>Dr. J.E.S.Farjallat</u>	<u>[Signature]</u>
Examinadores :	<u>Dr. J.O.Campos</u>	<u>[Signature]</u>
	<u>Dr. G.R.Sadowski</u>	<u>[Signature]</u>

São Paulo

1987

ESTUDOS GEOLOGICOS E GEOTECNICOS DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS,
"PILLOW LAVAS" E PALEOCANAL NOS BASALTOS DE FUNDAÇÃO DA BARRAGEM
DE NOVA AVANHANDAVA, RIO TIETE (SP)

VINICIUS GOMES TAVEIRA MANO

DEDALUS - Acervo - IGC



30900005277

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA AO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



ORIENTADOR: PROF. DR. JOSE EDUARDO SIQUEIRA FARJALLAT

SÃO PAULO

1987

A TURMA DO IMBÉ.

ABSTRACT

Nova Avanhandava dam complex is located at the downstream part of Tietê River, São Paulo State. The purpose of the project is to generate electrical energy as well as to keep the development of the Tietê/Paraná waterway project.

The geological units mapped in the surroundings of the site chosen for this study are basalts of "Serra Geral" Formation, sandstones of "Adamantina" Formation and Superficial Formations. Geomorphologically, the site is located in the Occidental Plateau of the State of São Paulo.

As regards geological studies for the foundation of the dam and of the embankment four basaltic spillings were identified and chief rock discontinuities were geotechnically characterized.

Special attention was given to the occurrence of a spilling of basalt pillow lava, the macro and microscopic fractures of which being described in details. The study also contains considerations on the geotechnical behaviour of this rock material which had not been removed and even served as the foundation of the power station.

Comments are also made on the existence of a Tietê river ancient channel, its geometry and the modifications which were deemed necessary on the Executive Project in order to render it adequate. As a conclusion one may say that despite adopting a routine prospecting work, geomorphological features which barely occur must be specially noticed.

Results obtained when improving the foundation of concret structures and soil embankments have fully reached the objectives estimated, thus significantly reducing affluent water flows towards the drainage system and also reducing sub-pressures exercised on the foundations.

As a final conclusion it must be pointed out that geological knowledge is very important as a means of obtaining perfect interaction between the construction and the implementation site.

RESUMO

O Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava localiza-se no trecho do Baixo Tietê, no Estado de São Paulo. As obras objetivam a geração de energia elétrica e a continuidade da hidrovía Tietê/Paraná.

As unidades geológicas mapeadas nas proximidades do local de estudo são os basaltos de Formação Serra Geral, os arenitos de Formação Adamantina e as Formações Superficiais. Geomorfologicamente a área situa-se no Planalto Ocidental do Estado de São Paulo.

Quanto aos estudos geológicos para a fundação da barragem e da eclusa foram identificados quatro derrames basálticos e caracterizadas geotecnicamente as descontinuidades rochosas mais importantes.

Especial destaque é dado a ocorrência de um derrame de "pillow lavas" basálticas, onde se desceve, em detalhe, as feições macro e microscópicas. Apresenta-se considerações sobre o comportamento geotécnico deste material rochoso, que resultaram na sua não remoção, mesmo servindo como fundação da Casa de Força.

E relatada, também, a existencia de um paleocanal no Rio Tietê, sua geometria e as modificações que se fizeram necessárias no Projeto Executivo para a sua compatibilização. Conclui-se que apesar de adotar-se uma rotina nos trabalhos de prospecção, deve-se estar atento para com feições geomorfológicas de ocorrência pouco frequente.

Os resultados obtidos nos tratamentos de fundação das estruturas de concreto e obras de terra atingiram plenamente os objetivos esperados, com reduções significativas das vazões afluentes ao sistema de drenagem e das subpressões atuantes nas fundações.

Conclui-se que foi muito importante o conhecimento geológico como instrumento de uma perfeita interação da obra e seu local de implantação.

AGRADECIMENTOS

A realização do presente trabalho só foi possível graças ao apoio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT e da CESP-Companhia Energética de São Paulo, bem como do Geólogo Alvaro Rodrigues dos Santos e dos Engenheiros Jeanderney Luiz Ribeiro, Dilermando Hermínio Bispo, Paulo Palazzo Neto e Antonio Carlos Leister de Castro.

O Prof. Dr. José Eduardo Siqueira Farjallat orientou o estudo e vários colegas prestaram inestimável colaboração nas investigações e em discussões sobre diversos aspectos, como os Geólogos Antonio Marrano, José Augusto Mioto, Jesus Sebastião Araújo, Adalberto Aurélio Azevedo e Sérgio Sussumo Tokudo, a Engenheira Eda Freitas de Quadros e os Profs. Drs. Moacyr Vianna Coutinho, Fernando Flávio Marques de Almeida e Yociteru Hasui.

No trabalho de editoração, contou-se com os préstimos do Enc. Técnico José Henrique Figueiredo, Secr. Maria Lúcia Solera, Progr. Tr. Bernardete de Lourdes Silva Pastore, Des. Leonel Takeji Nakasima, Des. Francisco Ubirajara de Oliveira, Des. Aluizio de Souza Frota, Enc. Téc. Arturo Enrique Prieto Ybars, Des. Gilson Belarmino dos Santos, Des. Luiz Antonio Ribeiro, Des. Waldir Dantas Cortez, Téc. Valter Dias, Fot. Alvaro Camargo Kupezynski, Bibl. Maria Solange de Oliveira Pereira, Rev. Ana Cláudia Ferreira Pastore, Rev. Débora Fiuza de Figueiredo Orsi, Publ. Lourdes Mangiullo Mioto do IPT e da CESP.

A todas essas instituições e pessoas o autor consigna aqui os seus agradecimentos.

SUMARIO

	P.
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações Gerais	01
1.2 Objetivos	04
2 GEOLOGIA REGIONAL	04
2.1 Basaltos da Formação Serra Geral	05
2.2 Arenitos da Formação Adamantina	08
2.3 Formações Superficiais	09
3 GEOMORFOLOGIA	10
4 GEOLOGIA E GEOTECNIA LOCAIS	10
4.1 Generalidades.....	10
4.2 Rochas Basálticas	13
4.3 Solo de Alteração de Basalto e/ou Basalto Extremamente Alterado	21
4.4 Depósitos Aluvionares	23
4.5 Solos Coluvionares	25
4.6 Feições Geotécnicas mais Importantes	25
4.7 Descontinuidades Rochosas e sua Implicações para as Obras Civis	41
5 "PILLOW LAVAS" BASALTICAS	42
5.1 Definição do Termo e Ocorrências	42
5.2 Ocorrência de Nova Avanhandava	44
5.2.1 Observações na fase do projeto básico	44
5.2.2 Observações na fase do projeto executivo	47
5.2.2.1 Distribuição espacial	49
5.2.2.2 Formas e dimensões	50
5.2.2.3 Características macroscópicas	52
5.2.2.4 Características microscópicas	52
5.2.3 Resenha sobre as feições, gênese e implicações para	

as obras civis das "pillow lavas"	64
6 PALEOCANAL	68
6.1 Investigações Geofísicas	68
6.2 Investigações Geológicas	69
6.3 Síntese sobre o Paleocanal e suas Implicações para as Obras Civis	74
6.3.1 Região do muro de contenção esquerdo	74
6.3.2 Região dos vertedouros de superfície	75
6.3.3 Região da bacia de dissipação	78
6.3.4 Locais das obras temporárias e de apoio	80
7 TRATAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA BARRAGEM	81
7.1 Considerações sobre os Métodos Executivos	81
7.2 Considerações sobre as Feições Geotécnicas mais Importantes	83
7.3 Resumo sobre o Tratamento das Fundações	87
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	91

ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	P.
01	Planta de localização do Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava 02
02	Arranjo geral da obra (Modificado de MARRANO et alii, 1984a) 03
03	Mapa geológico simplificado das proximidades do local de estudos (Modificado de IPT, 1979a) 06
04	Seção geológica pelo eixo da barragem (Modificado de PALAZZO NETO et alii., 1982) 12
05	Identificação das descontinuidades rochosas transversalmente ao eixo da barragem na região da Tomada d'Água 27
06	Identificação das descontinuidades rochosas ao longo do eixo das Eclusas 28
07	Compartimentação hidrogeotécnica dos maciços basálticos da fundação de Nova Avanhandava (Modificado de IPT, 1982) 29
08	Mapas de contornos estruturais dos contatos entre os derrames basálticos I/II e II/III (IPT, 1982) 32
09	Mapas de contornos estruturais das juntas das cotas nominais 300 e 310 m (IPT, 1982) 35
10	Mapa de contorno estrutural da junta da cota nominal 305 m (IPT, 1982) 39
11	Histograma das frequências relativas das permeabilidades verificadas nas regiões de contato entre derrames e nas principais juntas rochosas (IPT, 1982) ... 40
12	Resultado do mapeamento geológico das paredes do Poço de Drenagem (Casa de Força) mostrando a ocorrência das "pillow lavas" 48
13	Esquema detalhado da FOTO 13 54
14	Esquema detalhado da FOTO 14 55
15	Planta de localização do traçado aproximado do paleocanal (Modificado de PALAZZO NETO et alii., 1982) 70
16	Bloco diagrama representando os maciços rochosos de Nova Avanhandava, a localização do paleocanal e os

	limites das fundações das estruturas de concreto (PALAZZO NETO et alii., 1982)	72
17	Seções transversais ao eixo das estruturas do Vertedouro de Superfície e Muro de Contenção Esquerdo, com indicação das medidas de consolidação de suas fundações (Modificado de PALAZZO NETO et alii., 1982)	77
18	Seções transversais ao eixo das estruturas do Dente e da Laje da Bacia de Dissipação (Modificado PALAZZO NETO et alii., 1982)	79

QUADROS

01	Graus de alteração de maciços rochosos e principais feições associadas (Conforme IPT, 1979a)	14
02	Graus de fraturamento de maciços rochosos e seus critérios classificatórios (Conforme IPT, 1979a)	14
03	Classificação geotécnicas do maciços rochosos de de Nova Avanhandava, com base nos graus de alteração e fraturamento (Modificado de JOHN & MÜLLER, 1968 apud IPT, 1979a)	15

TABELAS

01	Características geológicas e geotécnicas do derrame I	18
02	Características geológicas e geotécnicas do derrame II ("pillow lavas")	19
03	Características geológicas e geotécnicas do derrame III	20
04	Características geológicas e geotécnicas do derrame IV	22
05	Resumo dos resultados das injeções de calda de cimento nas fundações das principais estruturas de concreto de Nova Avanhandava (Modificado de MARRANO et alii., 1984b)	85
06	Distribuição das permeabilidades por litologia/feição, antes e após as injeções de calda de cimento	

(Modificado de MARRANO et alii., 1984b) 86

FOTOS

01	Aspecto do contato selado entre os derrames basálticos I e II	31
02	Aspecto do contato entre os derrames basálticos II e III (IPT, 1979a)	31
03	Aspecto do contato entre os derrames basálticos III e IV	34
04	Aspecto da Junta da cota nominal 300 m (IPT, 1979a).	34
05	Aspecto da Junta da cota nominal 305 m	38
06	Aspecto da Junta da cota nominal 310 m (IPT, 1979a).	38
07	Brecha basáltica argilosa (hidrotermal) (IPT, 1979a)	46
08	Brecha basáltica argilosa (hidrotermal) e brecha basáltica calcária (IPT, 1979a)	46
09	Bloco de "pillow lava" basáltica com pedúnculo	51
10	Corte longitudinal de um bloco de "megapillow"	51
11	Bloco de "pillow lava" basáltica côncavo/convexo ...	53
12	Bloco de "pillow lava" basáltica retirado da escavação do Poço de Drenagem	53
13	Detalhe de dois blocos de "pillow" envolvidos em brecha basáltica argilosa	54
14	Detalhe da matriz de brecha basáltica argilosa	55
15	Aspecto do contato entre a "pillow" e a brecha basáltica argilosa	57
16	Aspecto do contato mostrando a borda vítrea	57
17	Aspecto da textura intersertal do basalto compacto da zona central da "pillow"	58
18	Idem acima, com nicóis cruzados	58
19	Basalto compacto da zona central da "pillow" seccionado por uma fissura preenchida por argilo-mineral .	59
20	Basalto compacto com vesículas e amígdalas da zona próxima à borda da "pillow"	59
21	Aspecto da borda vítrea da "pillow"	61
22	Aspecto da borda vítrea da "pillow" mostrando as for	

	P.
mas esféricas vítreas fraturadas	61
23 Aspecto da brecha basáltica argilosa (hidrotermal) .	63
24 Detalhe da brecha basáltica argilosa (hidrotermal) próxima da borda vítrea	63
25 Aspecto de uma marmita totalmente preenchida com ma- terial aluvionar (PALAZZO NETO et. alii., 1982)	73
26 Aspecto de uma marmita preenchida com material alu- vionar (PALAZZO NETO et. alii., 1982)	73
27 Trabalhos de concretagem do Muro de Contenção Es- querdo e da ponte de sustentação dos trilhos dos guindastes (PALAZZO NETO et. alii., 1982)	76
28 Vista de montante para jusante mostrando a continui- dade do paleocanal (PALAZZO NETO et. alii., 1982) .	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava, em fase final de construção, está situado na região do Baixo Tietê, nos municípios de Buritama e Coroados, Estado de São Paulo, distando cerca de 450 km da capital.

O acesso pode ser feito a partir da cidade de São Paulo pela SP-280 (Rodovia Castelo Branco) até o encontro com a SP-255, seguindo em direção a São Manoel e daí pela SP-300 (Rodovia Marechal Rondon) até Birigüi. A partir de Birigüi o acesso é feito pela SP-461 (Rodovia Gabriel Melhado), que liga a Buritama num percurso de 30 km. A FIGURA 1 mostra a planta de localização do aproveitamento hidráulico.

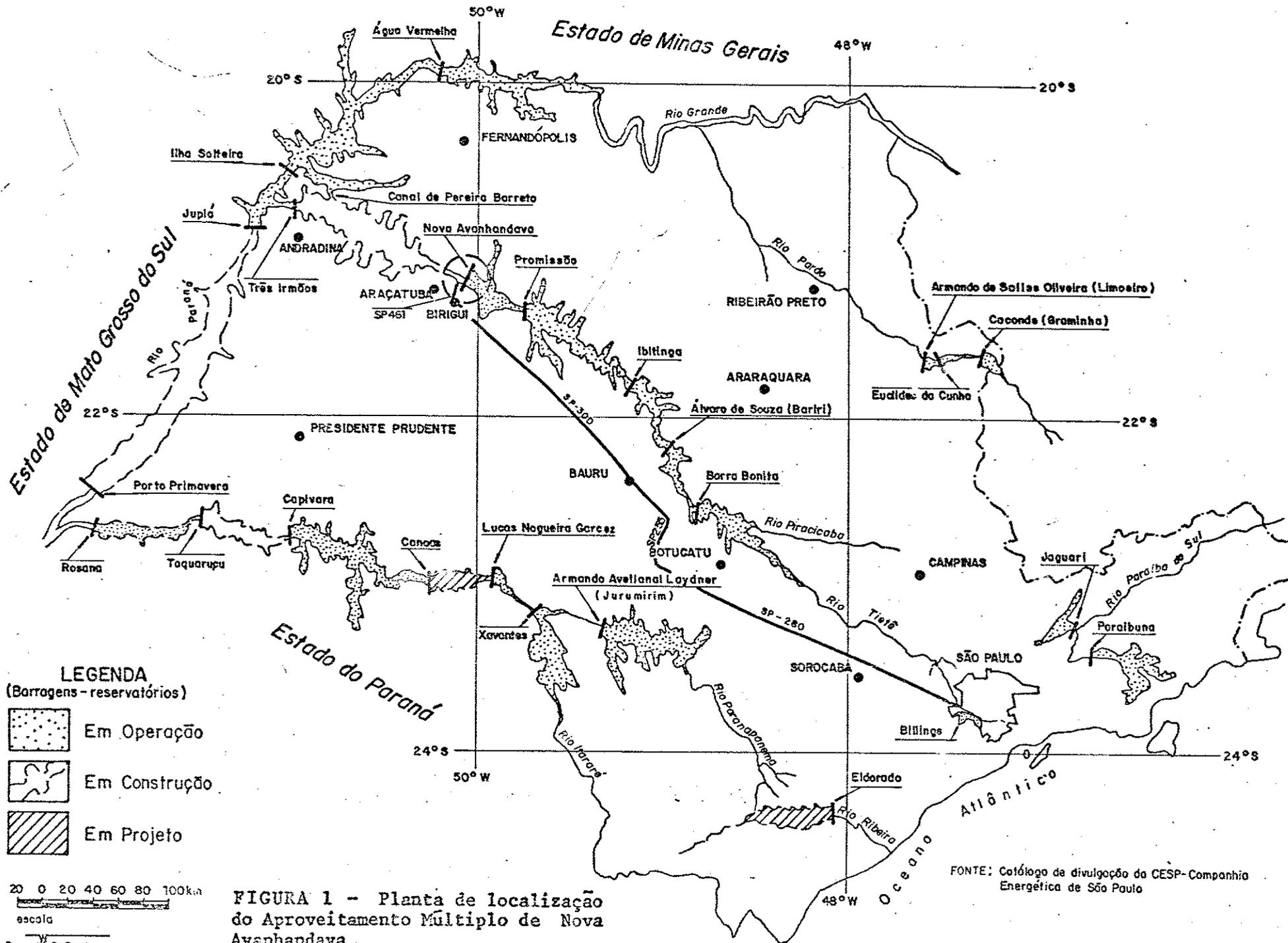
O projeto foi concebido objetivando a geração de energia elétrica e a continuidade da navegação na Hidrovia Tietê-Paraná.

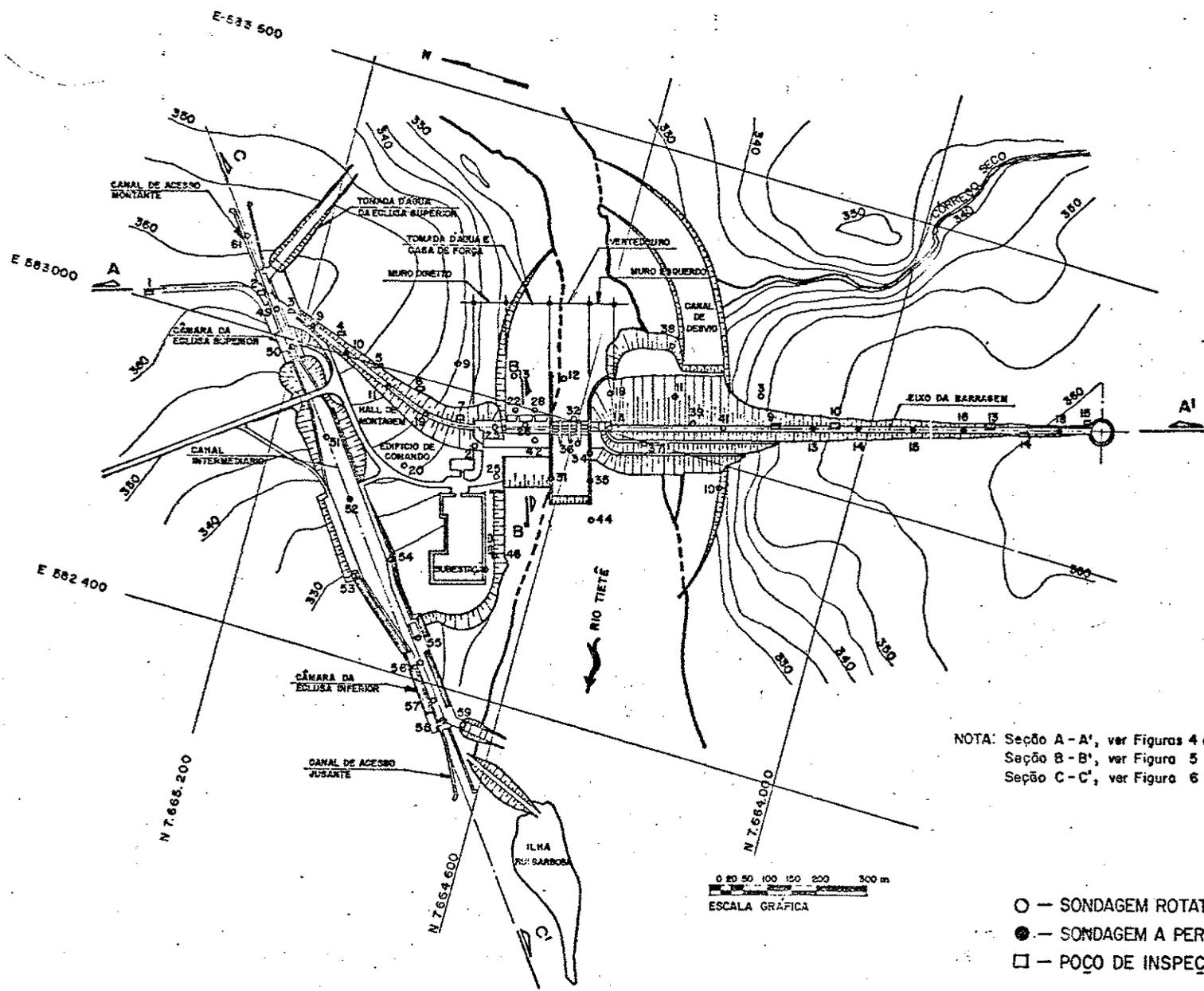
As características gerais da obra podem ser resumidas em:

- Tomada d'água (três unidades) de capacidade máxima de engolimento de 400 m³/s;
- Casa de Força (três unidades) de 100.800 kw de potência cada uma, utilizando-se turbinas tipo Kaplan, com rotor de 7,4 m de diâmetro;
- Vertedouro de Superfície (quatro comportas radiais) de 15 m x 15,7 m, permitindo uma descarga de 7.790 m³/s com o lago na cota 358,50 m acima do nível do mar;
- Eclusa de navegação com duas câmaras declusagem interligadas por um canal, vencendo um desnível de 36 m;
- Barragem de Terra na margem esquerda, e Barragem de Enrocamento na margem direita; coroamento na cota 361,50 m acima do nível do mar;
- Muros de Transição, "Hall" de Montagem, Edifício de Comando e Subestação; e
- Reservatório ocupando parte de uma bacia hidrográfica de 62.300 km², com uma área de inundação de 214,5 km² e acumulando um volume de água de 3.100 x 10⁶ m³.

A FIGURA 2 apresenta o arranjo geral da obra.

Quando os trabalhos de construção do Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava estiverem concluídos, terão sido





NOTA: Seção A - A', ver Figuras 4 e 7
 Seção B - B', ver Figura 5
 Seção C - C', ver Figura 6

0 20 50 100 150 200 300 m
 ESCALA GRÁFICA

- — SONDAGEM ROTATIVA
- — SONDAGEM A PERCUSSÃO
- — POÇO DE INSPEÇÃO

FIGURA 2 - Arranjo geral da obra (Modificado de MARRANO et alii, 1984a)

executadas as seguintes quantidades:

- concreto	753.800	m ³
- escavação em solo	1.026.600	m ³
- escavação em rocha	714.500	m ³
- aterro compactado	1.603.220	m ³
- enrocamento compactado	274.000	m ³
- "rip-rap"	75.200	m ³
- transição e filtros de areia	185.200	m ³
- montagem	8.410	ton

O desenvolvimento dos estudos e os trabalhos técnicos desta obra foram realizados pelas equipes da CESP-Companhia Energética de São Paulo e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

As diversas etapas cumpridas desde os trabalhos iniciais de Inventário e Viabilidade, dos projetos Básico e Executivo, da fase de Construção até o registro de toda a experiência adquirida através do "as built", constituem a memória técnica de uma obra.

No caso específico do Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava, estas etapas, apesar de seguirem os trâmites normais, mostraram alguns aspectos geológicos peculiares.

1.2 Objetivos

A presente Dissertação tem por objetivos focalizar esses aspectos peculiares que são:

- a presença das "pillow lavas" basálticas nas fundações da Barragem de Nova Avanhandava mostrando seus aspectos estruturais e comparando-os com outras ocorrências na Bacia do Paraná;
- a ocorrência de um paleocanal no Rio Tietê e as suas implicações no Projeto Executivo e na fase de construção da obra; e
- discutir, sucintamente, os tratamentos de fundação executados nas estruturas de concreto e barragens de enrocamento e de terra, analisando-se as técnicas executivas e os resultados obtidos.

2 GEOLOGIA REGIONAL

As unidades geológicas mapeadas nas proximidades do local de

estudo são os basaltos da Formação Serra Geral, os arenitos da Formação Adamantina e as Formações Superficiais.

A FIGURA 3 apresenta o mapa geológico com a distribuição de cada uma das unidades.

2.1 Basaltos da Formação Serra Geral

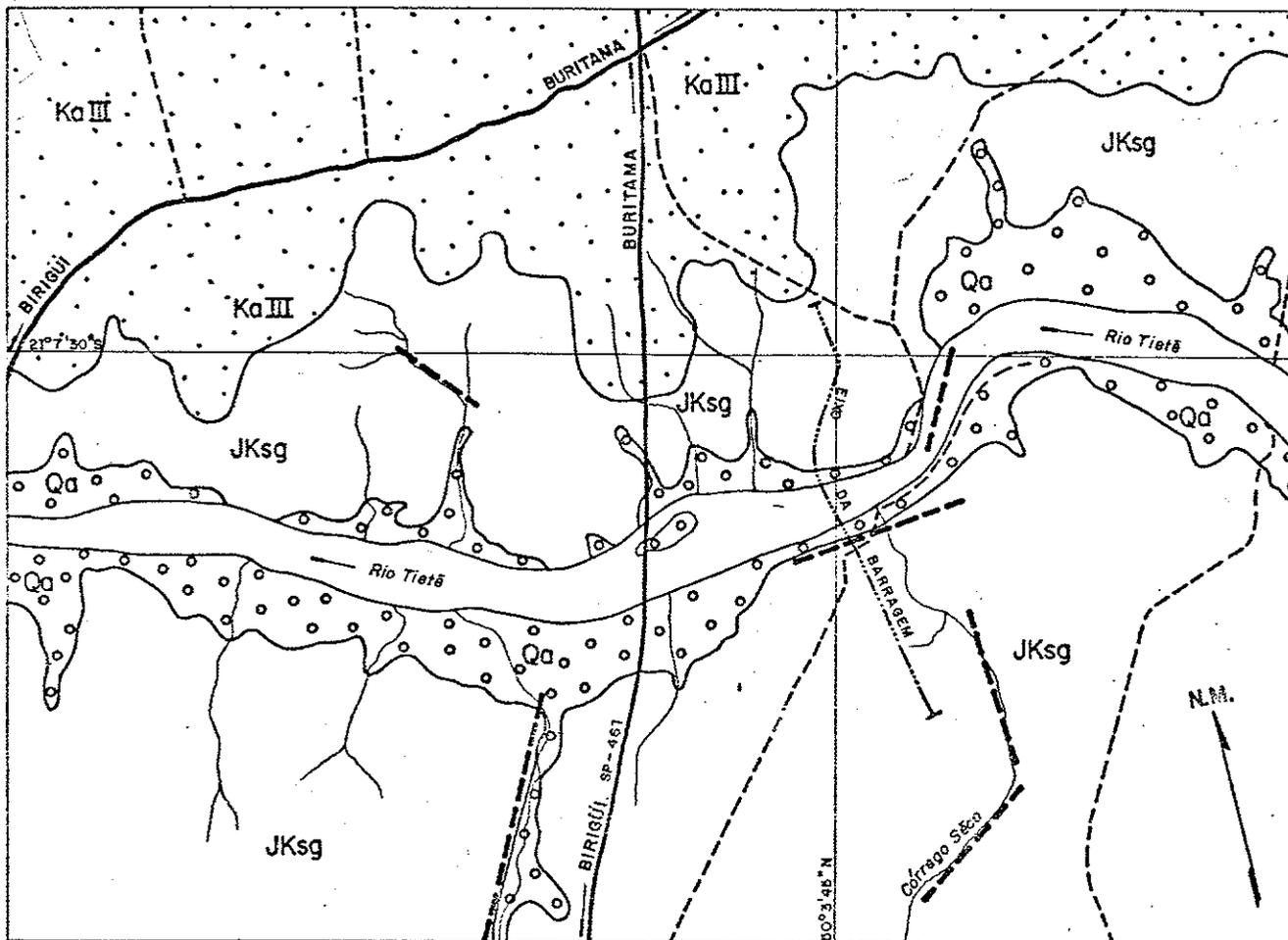
A Bacia Sedimentar do Paraná ocupa no sul do Brasil uma área superior a um milhão de quilômetros quadrados, sendo formada por uma sequência de depósitos sedimentares predominantemente continentais, com algumas intercalações de sedimentos marinhos. Desta sequência estratigráfica merecem destaque os basaltos e os sedimentos intertrapeanos da Formação Serra Geral, sobre os quais foram construídas as obras das Usina de Nova Avanhandava (ALMEIDA et alii, 1981).

Os basaltos da Bacia do Paraná recobrem uma área maior do que os derrames similares de Deccan (Índia) e os basaltos de Columbia (EUA). No Karroo (África) o pacote de lavas atinge 9 km de espessura e uma extensão lateral em área de dois milhões de quilômetros quadrados, provavelmente a maior da Terra.

Os basaltos, formados por derrames de lavas cretáceas (140-100 milhões de anos), sobrepõem-se aos arenitos da Formação Botucatu (Triássico) e, se acham, em parte, recobertos pelos sedimentos do Grupo Bauru (Cretáceo Superior). A sucessão de derrames com espessura média unitária da ordem de algumas dezenas de metros pode ultrapassar 1.000 m de espessura total. Na síntese realizada pelo IPT (1980b) sobre a Bacia do Paraná é indicada a espessura de 1500 m na região SW do Estado de São Paulo e NW do Estado do Paraná.

No estudo desenvolvido por LEINZ (1949) são feitas referências aos derrames basálticos do ponto de vista regional e suas relações estratigráficas, bem como ao número de derrames, suas possanças, direções das corridas de lavas, a petrologia, a composição química das efusivas e sua tectônica. O Autor discute as variações texturais e estruturais dentro de um corpo de derrame, que resultam na diferenciação em zonas de diaclasamento horizontal próximas ao topo e à base do derrame, e em zona de diaclasamento vertical no núcleo derrame.

GUIDICINI & CAMPOS (1968) descreveram as feições típicas das porções basal, central e superficial dos derrames. Os Autores propõem uma classificação das descontinuidades que as separam em



LEGENDA

- Aluviões (Qa)
- Formação Adamantina (Unidade de Mapeamento Ka III)
- Formação Serra Geral (JKsg)
- Contato Geológico (inferido)
- Lineamentos Fotointerpretados
- Rodovia Estadual
- Rodovia Municipal
- Estradas Vicinais

ESCALA - 1:25 000

FIGURA 3 - Mapa geológico simplificado das proximidades do local de estudos (Modificado de IPT, 1979a)

primárias e secundárias; além disto, fazem especial referência a uma feição denominada "junta-falha". Em outro estudo GUIDICINI (1970) comentou os derrames secundários dos basaltos.

Segundo SOARES (1974), a Bacia do Paraná apresenta três compartimentos, tendo cada um feições características de homoclinal. Na homoclinal do Paranapanema o mergulho médio é de 10 m/km, ou seja, menor do que 1 para N/NNW. Segundo o Autor, "como as camadas mesozóicas, inclusive a Formação Serra Geral, estão arqueadas e não há variação faciológica, é possível concluir que o tectonismo não foi contínuo no tempo e mais provavelmente foi contemporâneo com o vulcanismo ou posterior. A não perturbação do Bauru, pelo menos na ordem de grandeza das camadas que lhe são sotopostas, limita a principal fase tectônica ao Cretáceo Inferior. Somos inclinados a crer que a tectônica teve seu início com os primeiros esforços associados ao vulcanismo basáltico, durante a Reativação Wealdeniana".

Nos trabalhos desenvolvidos pelo IPT (1980a) há indicações de que as camadas geológicas mergulham de uma forma suave para W de 0,5° a 1°. São relatadas as dificuldades para definir a gênese das fraturas em rochas basálticas e sedimentares quando apresentam disjunções colunares, em função das semelhanças entre os dois tipos de planos. Os fraturamentos associados à disjunção colunar não apresentam padrões constantes, já que as colunas podem ter suas bases na forma hexagonal, pentagonal, quadrangular ou triangular. Nas rochas basálticas o fraturamento tectônico foi mais facilmente identificado, a partir da análise de suas características geométricas complementadas com a presença de estrias de fricção. As características geométricas são as superfícies planas e persistentes, com padrões regulares de espaçamento e paralelismo, bem como a distribuição por extensa área. A interpretação de imagens de satélite indicou uma concentração de lineamentos no setor NNE.

Para BJORNBERG & KUTNER (1983), "um derrame individualizado apresenta, quando de grande espessura, duas zonas distintas: a inferior, densa, de melhores propriedades geomecânicas, e a superior, vesicular ou vesículo-amigdaloidal, resultante de acumulação de gases oriundos da porção basal. O contato entre ambos, quando não tectonizado, não apresenta limite nítido". Na síntese elaborada por estes Autores são mencionadas várias

feições presentes em basaltos, tais como: cavidades e túneis de lava, corpos brechóides, estruturas circulares, além de descontinuidades específicas do basalto, tais como contatos, diáclases, fraturas, juntas-falhas, falhamentos etc.

O autor desta Dissertação acredita que a divisão em três zonas distintas, no corpo de um derrame basáltico, está mais condizente com as observações efetuadas nas obras das Usinas de Capivara, Agua Vermelha e Nova Avanhandava, no período de 1972 a 1980. Assim, considera-se que cada derrame basáltico apresenta alternâncias texturais bem definidas, que lhe confere uma certa "estratificação". Os basaltos vesiculares e/ou amigdaloidais caracterizam o topo, geralmente mais espesso, e a base dos derrames, correspondendo a um terço ou um quarto de espessura total. Os basaltos compactos constituem a faixa central dos derrames. Admite-se ainda um sistema de diáclases predominantemente verticais na zona do núcleo do derrame, enquanto que acima e abaixo existem sistemas de diáclases preferencialmente horizontais.

Além dos tipos litológicos mencionados, podem também ocorrer brechas basálticas com matrizes variáveis (desde arenosa, siltosa, argilosa até calcária) nas porções superiores dos derrames.

2.2 Arenitos da Formação Adamantina

Imediatamente acima dos basaltos encontram-se os sedimentos do Grupo Bauru. Os estudos efetuados pelo IPT (1980a) indicam, nas proximidades do local da barragem, a presença da Formação Adamantina - Unidade de Mapeamento Ka III (Cretáceo Médio-Superior). Esta unidade foi descrita como sendo constituída por arenitos muito finos, quartzosos, e bem selecionados, além de siltitos e argilitos siltosos; localmente, ocorrem pelotas de argila, cimento carbonático generalizado e nódulos localizados nos arenitos em diversos tons de cinza. Foram identificados bancos e lentes predominantemente maciços, por vezes alternados, com estratificações plano-paralela e cruzada de baixa inclinação e porte variado.

Segundo STEIN et alii (1979) e ALMEIDA et alii (1980) esta unidade pode apresentar até 160 m de espessura no interflúvio Tietê-São José dos Dourados, diminuindo para 40 m nas proximidades do Rio Paraná. Comentam ainda que esta unidade,

apresenta-se localmente em discordância erosiva sobre os basaltos.

Nos trabalhos desenvolvidos pelo IPT (1980a) as fraturas observadas nos sedimentos do Grupo Bauru foram consideradas como resultado de fragmentações sub-horizontais e subverticais que desaparecem com a profundidade; em superfície podem, às vezes, confundirem-se com estruturas tectônicas. É mencionado que, nos arenitos e siltitos da Formação Adamantina, o aparecimento dessas fragmentações próximas à superfície do terreno é generalizado, variando as características de acordo com a litologia e o grau de alteração da rocha em cada unidade de mapeamento. Outras feições observadas são as fraturas paralelas às encostas dos vales que ocorrem nas porções topográficas mais elevadas; a sua origem vem sendo atribuída ao alívio da carga devido à evolução do processo erosivo de entalhamento da drenagem. Estas fraturas possuem grande dispersão e baixa densidade. O fraturamento tectônico nas rochas sedimentares não foi observado e as evidências são extremamente tênues uma vez que "... não foram encontradas fraturas cujas relações geométricas permitissem relacioná-las a fraturamento tectônico". A interpretação de imagens de satélite indicou uma concentração dos lineamentos no quadrante NE.

2.3 Formações Superficiais

As formações Superficiais recobrem os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da Formação Adamantina.

Segundo ALMEIDA et alii (1980), os depósitos cenozóicos podem ser divididos em cascalheiras e aluviões pré-atuais, depósitos coluvionares e aluviões atuais. Quanto às cascalheiras, elas estão situadas acima do nível de base atual e são constituídas por seixos (alongados e tabulares) e blocos de quartzito e calcedônia dispersos em matriz arenosa. Os aluviões pré-atuais também estão acima do nível de entalhamento da drenagem atual, distribuem-se em pequenas áreas não mapeáveis, sendo comuns intercalações de leitos arenosos e argilosos. Os depósitos coluvionares ocorrem nos atuais divisores de água e suas encostas; são constituídos por areias de diversas granulometrias, com porcentagens variadas de silte e argila de coloração avermelhada. Os aluviões atuais situam-se ao longo das calhas dos rios, sendo constituídos por areias com granulometria, arredondamento e seleção variáveis, com intercalações de argila

de coloração clara; ainda, são registrados depósitos de cascalhos atuais, resultantes do retrabalhamento de cascalheiras mais antigas.

3 GEOMORFOLOGIA

A área do Aproveitamento Múltiplo de Nova Avanhandava situa-se integralmente no Planalto Ocidental do Estado de São Paulo. O relevo predominante é o de degradação, em planaltos dissecados pela erosão. Junto às margens do Rio Tietê foram observadas concentrações aluvionares caracterizando relevo de agradação.

A feição geomorfológica mais comum é a constituída pelas colinas amplas; neste domínio "predominam interflúvios com áreas superiores a 4 km², topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos e convexos; drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes" (PONÇANO et alii, 1981).

O domínio das colinas médias apresenta feições onde "predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos; drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes" (PONÇANO et alii, 1981).

O terceiro domínio geomorfológico são as planícies aluviais nas margens do Rio Tietê, descritas como sendo "terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos periodicamente a inundações" (PONÇANO et alii, 1981).

O enchimento do Reservatório de Nova Avanhandava introduziu modificações nestas formas de relevo: as planícies aluviais do Rio Tietê desapareceram com a formação do lago e, nas proximidades das suas margens, foi observado o aparecimento de novas lagoas em decorrência da elevação do nível freático regional.

4 GEOLOGIA E GEOTECNIA LOCAIS

4.1 Generalidades

No local de implantação das obras civis de Nova

Avanhandava, o vale do Rio Tietê apresenta-se amplo e levemente assimétrico, sendo a margem direita mais íngreme. O curso da drenagem muda de NW para SW na porção montante do eixo da barragem, seguindo na direção E-W imediatamente a jusante.

As rochas mais antigas são os basaltos da Formação Serra Geral, que se acham recobertas pelos sedimentos da Formação Adamantina em zonas topográficas mais elevadas e distantes das margens do rio.

Nas ombreiras os basaltos estão recobertos por coluviões, aluviões (terraços aluviais antigos) e solos de alteração do próprio basalto. Nas margens e leito do rio ocorrem aluviões antigos (preenchendo o paleocanal) e atuais.

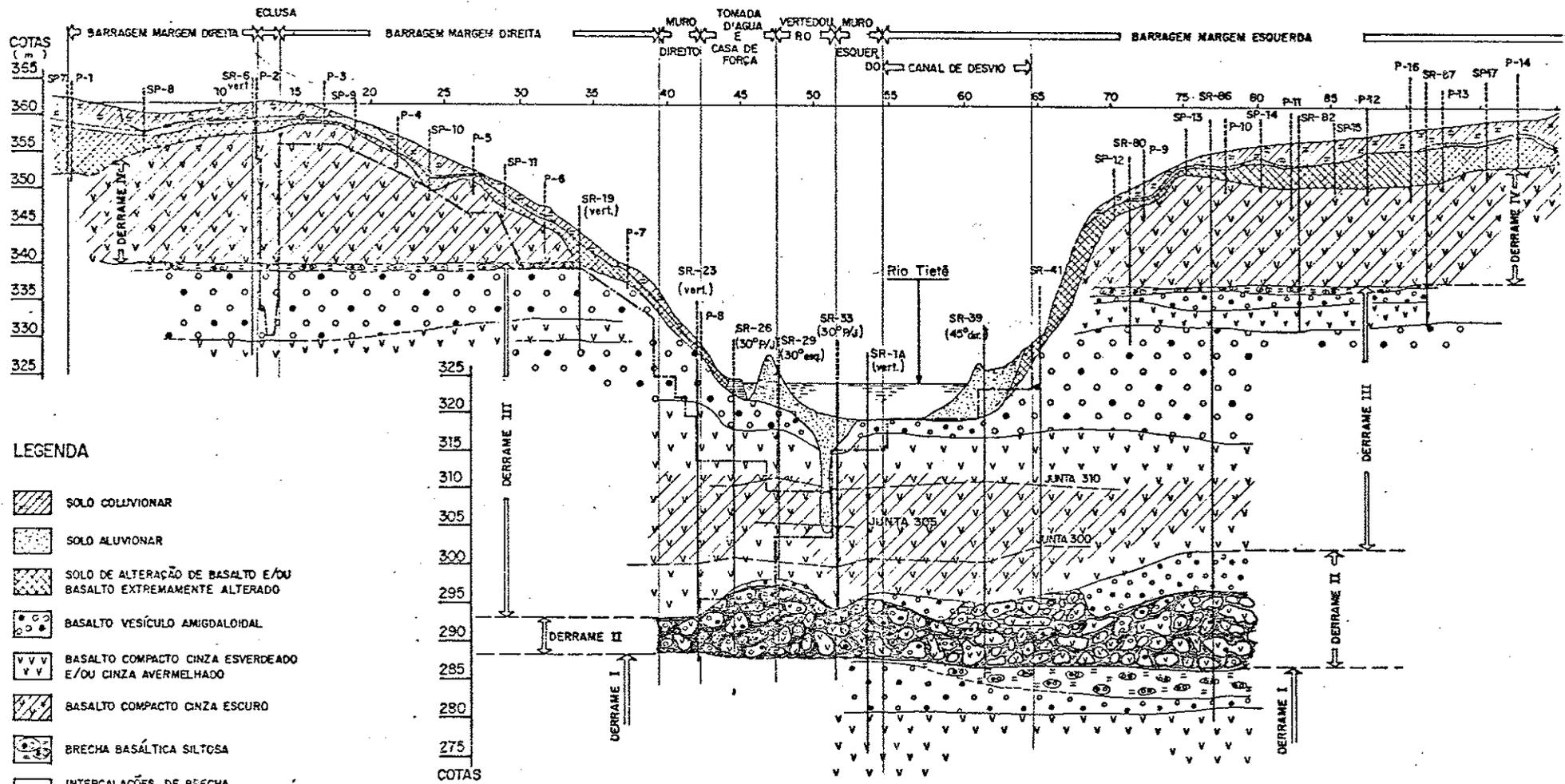
Os trabalhos de prospecção por poços de inspeção, sondagens à percussão e rotativas estenderam-se entre as cotas 242 m (SR-27) e 362 m (SP-7); eles permitiram identificar uma coluna estratigráfica composta de baixo para cima por quatro derrames basálticos, uma faixa de solos de alteração de basalto, e níveis de terraços aluvionares, coluviões e aluviões atuais. Estes trabalhos consistiram de 93 m de poços de inspeção, 278 m de sondagens à percussão, 3014 m de sondagens rotativas convencionais e 219 m com amostragem integral. Estes valores não incluem aqueles referentes às sondagens para pedreiras, instrumentação das estruturas de concreto e terra, e canteiro de obras.

A FIGURA 4 apresenta uma seção geológica pelo eixo da barragem, onde se pode notar a configuração assimétrica do vale do Rio Tietê, a distribuição espacial dos quatro derrames basálticos e suas coberturas.

Estudos realizados para a obtenção do mergulho regional do pacote basáltico a partir das cotas do contato entre os derrames III e IV, nas duas margens, indicaram um caimento de 1,3 m/km no sentido SE.

A partir de fotos aéreas, foram inferidos alguns lineamentos de pequena extensão, com base na forma retilínea das drenagens; estas feições estão indicadas na FIGURA 3. Nos estudos de campo não foram observados indícios de falhamento, e os lineamentos considerados não se refletiram em descontinuidades rochosas.

Nos itens subsequentes são apresentadas as considerações sobre as rochas basálticas, o solo de alteração proveniente das



LEGENDA

- SOLO COLLUVIONAR
- SOLO ALUVIONAR
- SOLO DE ALTERAÇÃO DE BASALTO E/OU BASALTO EXTREMAMENTE ALTERADO
- BASALTO VESÍCULO AMIGDALOIDAL
- BASALTO COMPACTO CINZA ESVERDEADO E/OU CINZA AVERMELHADO
- BASALTO COMPACTO CINZA ESCURO
- BRECHA BASÁLTICA SILTOSA
- INTERCALAÇÕES DE BRECHA BASÁLTICA CALCÁRIA
- INTERCALAÇÕES DE BRECHA BASÁLTICA ARGILOSA (HIDROTHERMAL)
- "PILLOW LAVA" BASÁLTICA
- ZONA FRATURADA (JUNTA)
- LINHA DE ESCAVAÇÃO
- CONTATO GEOLÓGICO
- CONTATO GEOLÓGICO INFERIDO
- NÍVEL D'ÁGUA

NOTA: Ver localização desta seção na Figura 2



FIGURA 4 - Seção geológica pelo eixo da barragem (Modificado de PALAZZO NETO et alii, 1982)

mesmas, os solos coluvionares e os depósitos aluvionares.

4.2 Rochas Basálticas

Os quatro derrames prospectados foram denominados, de baixo para cima, de derrames I, II, III e IV.

Para uma melhor visualização das características de cada um dos derrames foram elaboradas tabelas individuais com os seguintes elementos: identificação do derrame, espessura total, zoneamento, litologia, mineralogia, cõr, espessura média, grau de alteração, grau de fraturamento, classe de rocha e permeabilidade.

Os critérios para estabelecimento dos graus de alteração e fraturamento do maciço rochoso com finalidades geotécnicas foram os mesmos definidos nos estudos do Projeto Básico pelo IPT em (1979a). Os QUADROS 1 e 2 resumem as características dos vários graus utilizados.

A associação entre os parâmetros de alteração e de fraturamento foi feita por JOHN e MÜLLER (1968) que estabeleceram as classes de rocha para o maciço rochoso de Ilha Solteira. Posteriormente, o IPT (1979a) adaptou-as para o maciço rochoso de Nova Avanhandava, com a introdução da classe de rocha IIIX, que corresponde a uma rocha praticamente sã e com mais do que 20 fraturas/m. A classificação do maciço rochoso torna-se importante em obras civis porque permite orientar decisões construtivas com base nas feições geológicas e propriedades mecânicas e hidráulicas das rochas. O QUADRO 3 resume as classes de maciço rochoso de Nova Avanhandava.

A classificação adaptada para Nova Avanhandava mostrou-se funcional, permitindo uma compartimentação do maciço rochoso a partir dos testemunhos de sondagem. Quando da escavação para implantação das estruturas de concreto e das barragens de terra e enrocamento, a compartimentação apresentou pequenas discrepâncias na não linearidade das principais juntas e no contato entre as rochas muito e extremamente alteradas.

Para as obras de barramento de Taquaruçu, Rosana e Porto Primavera, localizadas na região do Pontal do Paranapanema, o IPT (1979b) introduziu na classificação do maciço rochoso o parâmetro índice de qualidade da rocha (I.Q.R), que representa a recuperação expressa em percentagem do somatório dos testemunhos de rocha sã ou alterada dura maiores do que 10 cm.

GRAU DE ALTERAÇÃO	SIGLA	CARACTERÍSTICAS
Rocha Praticamente sã	sã	Sã, propriamente dita-não apresenta vestígios de ter sofrido alterações físicas e químicas dos materiais. Quando pouco fraturada sã pode ser escavada a fogo.
	pa	Pouco alterada ou quase sã-apresenta sinais de alterações incipientes dos minerais, em geral é ligeiramente descolorida apresenta praticamente as mesmas propriedades físicas, e mecânicas da rocha sã.
	med	Rocha medianamente alterada-apresenta-se com os minerais medianamente alterados, é bastante descolorida e suas propriedades físicas e mecânicas são inferiores às da rocha pouco alterada, sendo, entretanto, uma rocha bastante resistente, quebrando-se com relativa dificuldade sob ação de martelo e, quando pouco fraturada, sã pode ser escavada a fogo. É uma rocha adequada como fundação de obras de concreto.
Rocha muito alterada	mto	Apresenta-se com os minerais muito alterados às vezes pulverulentos e friáveis. Suas propriedades físicas e mecânicas são acentuadamente inferiores às da rocha medianamente alterada. Quebra-se facilmente com as mãos e é escavável a picareta.
Solo de alteração de Rocha	ext.	Ou rocha decomposta, ou rocha extremamente alterada-solo em que se mantem ainda as estruturas da rocha original. Escavável a enxada.

QUADRO 1 - Graus de alteração de maciços rochosos e principais feições associadas (Conforme IPT, 1979a).

ROCHA	SÍMBOLO	NÚMERO DE FRATURAS POR METRO
Ocasionalmente fraturada	F1	< 1
Pouco fraturada	F2	1 - 5
Medianamente fraturada	F3	6 - 10
Muito fraturada	F4	11 - 20
Extremamente fraturada	F5	> 20
Em fragmentos	F6	torrões ou pedaços de diversos tamanhos caoticamente dispostos.

QUADRO 2 - Graus de fraturamento de maciços rochosos e seus critérios classificatórios (Conforme IPT, 1979a).

CLASSIFICAÇÃO GEOLÓGICA	CLASSIFICAÇÃO		GEOTÉCNICA	
	CLASSE ROCHA	GRAU DE ALTERAÇÃO	FRATURAMENTO	
			GRAU	Nº PEÇAS/m
BASALTO COMPACTO BASALTO VESÍCULO-AMIGDALOIDAL BRECHA BASÁLTICA SILTOSA BRECHA BASÁLTICA ARGILOSA	V	ROCHA EXTREMAMENTE ALTERADA	FRATURAMENTO IRREGULAR	
	IV	ROCHA MUITO ALTERADA	ROCHA EXTREMAMENTE FRATURADA	> 20
	III*	ROCHA PRATICAMENTE SÃ	MUITO FRATURADA	11 - 20
	III		POUCO A MED. FRATURADA	1 - 10
	II		NÃO FRATURADA	< 1
	I			

QUADRO 3 - Classificação geotécnica dos maciços rochosos de Nova Avanhandava, com base nos graus de alteração e fraturamento (Modificado de JOHN & MÜLLER, 1968 apud IPT, 1979a).

Em se tratando da permeabilidade dos maciços rochosos (facilidade com que o fluxo de água se processa no seu interior), os métodos de ensaio escolhidos, a periodicidade das medidas e as unidades adotadas foram considerados a partir das sugestões da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1975). A utilização do equivalente ao coeficiente de permeabilidade (K_{eq}) deve-se à adaptação para o meio rochoso de um parâmetro normalmente aplicado a solos. Para as sondagens com 86 mm de diâmetro foi estabelecida pela ABGE (1975), uma equivalência entre 1×10^{-4} cm/s e 1 l/min ($m/kgf/cm^2$), para ensaios de perda d'água em trechos de 3 m.

Com os valores obtidos para cada um dos cinco estágios dos ensaios de perda d'água sob pressão foram feitas médias aritméticas simples, desprezando-se os valores discrepantes. Este valor médio foi associado a outros obtidos em ensaios executados no mesmo derrame e distribuído em percentagem por faixas de permeabilidade.

Quanto a permeabilidade chama-se a atenção para as questões da metodologia utilizada e da adoção de um equivalente ao coeficiente de permeabilidade, que são bastante discutíveis. De fato, quando Lugeon propôs o seu ensaio, ele pretendia somente caracterizar as zonas mais permeáveis do maciço rochoso para avaliar sua injetabilidade. Não havia a preocupação de obter-se um valor numérico para este coeficiente.

Posteriormente, os resultados do ensaio proposto, foram sendo empregados cada vez mais, para a definição de um valor mínimo indicativo de permeabilidade, no meio que se estava estudando.

Existem hoje, diversos trabalhos que discutem estas questões, inclusive no Brasil, refletindo uma preocupação do meio técnico, em geral, neste sentido. Esta evolução passa pela metodologia de execução dos ensaios e pela interpretação dos resultados obtidos. Uma das propostas, para modificação do ensaio Lugeon, consiste em ampliar-se o número de estágios de pressão, de modo a caracterizar-se o regime de escoamento envolvido.

Um dos grandes problemas do ensaio com cinco estágios, está justamente associado ao fato de que, sendo o diagrama obtido, muito simplificado, torna-se difícil saber o que utilizar para o

cálculo do equivalente ao coeficiente de permeabilidade. Observa-se que no meio técnico alguns utilizam os valores iniciais, pressões baixas correspondentes ao primeiro e quinto estágios, outros a média aritmética simples dos cinco estágios. Entretanto, a adoção de um ou outro valor dificilmente refletem a permeabilidade do meio, constituindo-se apenas em um valor indicativo.

Nos casos de ensaios em que os cinco estágios apresentam o mesmo resultado de perda d água específica - $l/min (m/kgf/cm^2)$ - significa que o regime de fluxo através do maciço rochoso é do tipo laminar, isto é, a relação entre a vazão e a pressão é constante. Para os casos em que haja mudanças no comportamento, os resultados obtidos nos valores de perda d água específica serão inferiores e o regime de escoamento será não linear.

A formulação apresentada pela ABGE (1975) é apropriada para meios porosos, contínuos e em condições de fluxo laminar, o que restringe bastante sua aplicação. QUADROS (1982) demonstrou que nas imediações do furo de ensaio, devido aos altos gradientes envolvidos, quem comanda o fluxo é o regime turbulento, sendo mais difícil justificar-se a adoção da metodologia proposta pela ABGE (1975).

O ensaio de múltiplos estágios, proposto no Brasil pelo IPT (1983), tem a vantagem de permitir a visualização do regime de fluxo envolvido e o emprego de uma formulação adequada para os resultados encontrados.

A TABELA 1 mostra as características geológicas e geotécnicas do derrame basáltico I. O contato inferior do derrame I situa-se abaixo do nível 242 m, que foi a cota mínima prospectada; o contato superior com o derrame II oscila entre as cotas 286 e 289 m.

A TABELA 2 apresenta as características geológicas e geotécnicas do derrame basáltico II ("pillow lavas"). As particularidades do derrame II serão discutidas com detalhe no ítem 5. O contato superior deste derrame oscila, no geral, entre as cotas 292 e 302 m; em apenas um local (SR-45) o derrame III está em contato direto com o derrame I, na cota 289 m.

A TABELA 3 apresenta as características geológicas e geotécnicas do derrame basáltico III. Foi dada atenção especial ao zoneamento observado entre as cotas 317 e 337 m, onde foram descritos três níveis de basalto vesículo-amigdaloidal e dois

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DO DERRAME I

IDENTIFICAÇÃO DO DERRAME	ESPESSURA TOTAL	ZONEAMENTO	LITOLOGIA	MINERALOGIA	COR	ESPESSURA MÉDIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO (Nº FRATURAS/m)	CLASSE DE ROCHA	PERMEABILIDADE Keq. (cm/s) (33 ensaios)
I	desconhecida; mínima prospectada: 43m	topo	brecha basáltica siltosa	fragmentos de basalto vesicular-amigdaloidal em matriz siltosa (grãos de quartzo, feldspato, minerais opacos e cimento argilo-ferruginoso)	cinza avermelhada	2m (alguns dm até 5,5m)	praticamente são a medianamente alterada	< 5 (zonas localizadas > 10)	II III	$< 10^{-6} = 45\%$ $10^{-5} \text{ a } 10^{-6} = 15\%$ $10^{-4} \text{ a } 10^{-5} = 20\%$ $> 10^{-3} = 20\%$
			basalto vesicular-amigdaloidal	amígdalas preenchidas por calcita, calcedônia e minerais verdes; fraturas subverticais com siltito	cinza avermelhada	2m	praticamente são	< 5	II	
		núcleo e base	basalto compacto	labradorita: 30-40%; augita: 30-40%; argilo-minerais + vidro devitrificado + hidróxido de ferro: 20%; opacos: 10%	cinza escuro a cinza avermelhada	mínima prospectada de 39m	praticamente são	< 5	II	

OBSERVAÇÃO: Cerca de 5% do total das investigações efetuadas foram neste derrame.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DO DERRAME II ("PILLOW LAVAS")

IDENTIFICAÇÃO DO DERRAME	ESPESSURA TOTAL	ZONEAMENTO	LITOLOGIA	MINERALOGIA	COR	ESPESSURA MÉDIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO (Nº FRATURAS/m)	CLASSE DE ROCHA	PERMEABILIDADE Keq. (cm/s) (47 ensaios)
II	média = 8m; variando de 4 a 13m; não constatado na SR-45	topo	basalto vesicular-amigdaloidal (distribuição muito irregular)	amígdalas com calcita e calcedônia	cinza avermelhado	mínima = 0,5 a 0,3 m máxima = 7m	pouco alterado	< 5	II	
		núcleo e base	blocos de basalto compacto com bordas vesiculares, em matriz de brecha basáltica argilosa/calcarária (hidrotermal)	amígdalas com calcita, calcedônia e minerais verdes; matriz: fragmentos de basalto compacto e vesicular-amigdaloidal envolto por massa de argilo-minerais, sendo 80-100% grupo das montmorilonitas e 0-20% zeólitas + opacos + carbonatos	cinza avermelhado (veios brechos = maior incidência verde pálido)	dos veios = poucos cm até 2m; dos blocos = poucos cm até 2m; maior incidência 0,2 e 0,7m	pouco alterado, exceto veios brechóides de muito a extremamente alterados	< 5 exceção trechos brechóides > 20	II III* e IV	< 10 ⁻⁶ = 62% 10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶ = 15% 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵ = 18% > 10 ⁻³ = 5%

OBSERVAÇÃO: Cerca de 9% do total das investigações efetuadas foram neste derrame.

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DO DERRAME III

IDENTIFICAÇÃO DO DERRAME	ESPESSURA TOTAL	ZONEAMENTO	LITOLOGIA	MINERALOGIA	CCR	ESPESSURA MÉDIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO (Nº FRATURAS/m)	CLASSE DE ROCHA	PERMEABILIDADE Req. (cm/s) (406 ensaios)
III	média = 44 m	topo	brecha basáltica silteosa	fragmentos angulosos de basalto vesicular-amigdaloidal em matriz com grãos de quartzo, mica e minerais opacos, dispersos em cimento argilo-feruginoso	cinza avermelhada	0,40 m a 2 m	medianamente a muito alterado	5 a 10 com trechos > 20	II III*	$< 10^{-6} = 76\%$ $10^{-5} \text{ a } 10^{-6} = 10\%$ $10^{-4} \text{ a } 10^{-5} = 12\%$ $> 10^{-3} = 2\%$
			basalto vesicular-amigdaloidal (entre 317 e 337 m, 3 níveis de basalto vesicular-amigdaloidal e 2 níveis de basalto compacto)	amígdalas com calcita, calcedônia e minerais verdes	cinza avermelhada / cinza esverdeado	20 m	praticamente são	< 5 com trechos de 5 a 20	II II/ III	
		núcleo e base	basalto compacto	labradorita = 40%; augita = 40%; opacos = 10%; argilo-mineral + vidro devitrificado = 10%	cinza esverdeado cinza escuro cinza avermelhado	22 m	praticamente são	< 5 com trechos de 5 a 20; zonas localizadas > 20 (juntas 300, 305 e 310m)	II II/ III III*	

OBSERVAÇÃO: Cerca de 61% do total das investigações efetuadas foram neste derrame.

níveis de basalto compacto. Nos estudos para o Projeto Básico ocorreram dúvidas sobre tais feições serem decorrentes de resfriamento de lava seguido de cristalização descontínua ou de pequenos subderrames, conforme definiu GUIDICINI (1970). Na fase de Projeto Executivo a observação das paredes escavadas indicou a primeira hipótese como a mais correta.

Foram detectados, em algumas sondagens, níveis de basalto vesículo-amigdaloidal estratigraficamente anômalos, entre as cotas 299 e 304 m (SR-23, SR-25 e SR-29). Após as escavações concluiu-se que a continuidade e distribuição destas feições eram bastante restritas.

Outra feição observada foi um nível de basalto brechado, entre as cotas 312 e 318 m, constituído de fragmentos decimétricos de basalto vesículo-amigdaloidal e/ou basalto compacto soldado por basalto vesículo-amigdaloidal. Também, após as escavações, não se observaram correlações laterais.

Ainda neste derrame, foram diagnosticados três níveis de rocha extremamente fraturadas (classe IIIK) que foram denominadas, simplificadamente, de juntas das cotas nominais 300, 305 e 310 m. As suas características geológicas e geotécnicas, bem como as suas implicações no projeto serão discutidas mais adiante, no item 4.6.

O contato superior deste derrame varia na margem direita entre as cotas 339 e 340,5 m e na margem esquerda, entre as cotas 337 e 338 m.

A TABELA 4 mostra as características geológicas e geotécnicas do derrame basáltico IV. A espessura total deste derrame é desconhecida, uma vez que na área prospectada seu topo foi erodido.

As estruturas de concreto do setor de geração de energia elétrica foram implantadas nos basaltos pertencentes ao derrame III; as estruturas para navegação foram construídas em parte nos basaltos do derrame IV, e em parte no derrame III.

4.3 Solo de Alteração de Basalto e/ou Basalto Extremamente Alterado

O solo de alteração de basalto e/ou basalto extremamente alterado (classe V) encontram-se recobertos nas ombreiras por coluviões e aluviões antigos, e nas margens do rio, por aluviões atuais. Na ombreira esquerda afloram em um trecho da meia encosta.

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS DO DERRAME IV

IDENTIFICAÇÃO DO DERRAME	ESPESSURA TOTAL	ZONEAMENTO	LITOLOGIA	MINERALOGIA	COR	ESPESSURA MÉDIA	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRATURAMENTO (Nº FRATURAS/m)	CLASSE DE ROCHA	PERMEABILIDADE Keq. (cm/s) (75 ensaios)
IV	desconhecida, topo erodido, mínima = 20 m	núcleo e base	basalto compacto	labradorita = 40%; augita = 40%; argilo-minerais + vidro devitrificado = 10%; opacos = 10%; traços de carbonato	cinza escuro	ocorre somente nas ombreiras, acima da 339 m; a tinge até 20 m	praticamente são; próximo a superfície, mediana a extremamente alterado	< 5 com trechos > 10	II III	< 10^{-6} = 71% 10^{-5} a 10^{-6} = 6% 10^{-4} a 10^{-5} = 9% > 10^{-3} = 14%

OBSERVAÇÃO: Cerca de 25% do total das investigações efetuadas foram neste derrame.

Segundo estudos do IPT (1979a), "... o solo de alteração de basalto é constituído por argila pouco siltosa, marrom escura a esverdeada, com fragmentos centimétricos, geralmente arredondados, de basalto muito a extremamente alterado ... com o aumento da profundidade verifica-se o aumento da incidência de blocos".

Na ombreira direita a espessura varia de 1 a 2,5 m; entretanto, pode atingir um máximo de 6 m, como entre as estacas 0 e 17. Na seção mostrada pela FIGURA 4, pode-se observar o espessamento desta camada de solo de alteração. Na ombreira esquerda, a espessura varia de 3 a 5 m entre as estacas 80 e 100, adelgaçando-se para 1 a 2 m entre as estacas 64 e 80.

Em termos de características geotécnicas, a execução dos ensaios penetrométricos do tipo SPT (Standard Penetration Test) indicou, geralmente, valores superiores a 10 golpes para penetrar os últimos 30 cm. Os ensaios de infiltração mostraram valores menores do que 5×10^{-5} cm/s (conforme sugestão da ABGE, 1981).

4.4 Depósitos Aluvionares

Nos estudos para o Projeto Básico foram definidas três gerações de aluviões: sendo duas delas mais antigas, que ocorrem, respectivamente, nas porções mais elevadas das duas ombreiras (na forma de terraços) ou então preenchendo o paleocanal escavado no Rio Tietê; a geração mais jovem se estende pelas margens e pelo leito atual do rio.

Os aluviões na forma de terraço estão sobrepostos ao solo de alteração de basalto e/ou basalto extremamente alterado (classe V) e sotopostos aos solos coluvionares. A espessura destes na ombreira direita varia de poucos centímetros até 1,90 m, enquanto que na ombreira esquerda não ultrapassa a 0,40 m.

Estes depósitos são constituídos de argila pouco siltosa a arenosa, marrom escura, contendo seixos arredondados de quartzito (secundariamente de quartzo e calcedônia) com diâmetro máximo de 15 cm. Os trechos mais significativos desta ocorrência, na ombreira direita estão entre as estacas 0 e 33; próximo da estaca 20 afloram em superfície, e as cotas variam entre 344 e 359 m. Na ombreira esquerda os aluviões se estendem descontinuamente entre as estacas 71 e 100, com as cotas variando de 349 a 359 m. A comparação entre as duas ombreiras mostra que o depósito da ombreira direita apresenta espessura, diâmetro e quantidade de seixos maiores que o da ombreira esquerda (FIGURA 4).

Quanto aos ensaios penetrométricos do tipo SPT, eles não foram executados nestes níveis de solos. Os ensaios de permeabilidade mostraram valores entre 10^{-4} e 2×10^{-3} cm/s para a ombreira direita, e valores entre 5×10^{-5} e 4×10^{-4} cm/s para a ombreira esquerda.

Conforme os estudos realizados por GUIDICINI (1973) "apud" MELO & PONÇANO (1983) a classificação dos depósitos de Nova Avanhandava seria do tipo "... altos terraços, 20 a 80 m acima do leito dos rios". Estes autores fazem referência, também, ao trabalho de FULFARO (1974), que descreveu dois tipos de terraços, sendo um mais antigo denominado de "geração quartzítica" com seixos de quartzo e quartzito predominantes e, subordinadamente, sílica criptocristalina (Sílex, Sílex Dolítico) e arenito silicificado, e outro tipo mais jovem chamado de "geração calcedônia", constituído por seixos de quartzo, quartzito e calcedônia bem arredondados, sendo que os primeiros seriam provenientes do retrabalhamento da geração anterior. Ainda para FULFARO (1974), existem as "cascalheiras, de meia encosta", que apresentam uma disposição caótica dos seixos, em associação com sedimentos arenosos de origem coluvionar, sendo interpretadas como retrabalhamento dos níveis anteriores. Para Nova Avanhandava os depósitos seriam do tipo "cascalheira de meia encosta".

Os aluviões que preenchem o paleocanal do Rio Tietê (segunda geração) serão discutidos em detalhe no item 6.3.

Os aluviões mais jovens da terceira geração situam-se, predominantemente, nas partes baixas das duas margens e no leito atual do rio. A sua área de ocorrência varia de alguns metros até centenas de metros de extensão lateral e a espessura varia desde decímetros até um máximo de 6 m.

Estes aluviões nas margens são constituídos por níveis de areia fina a média com lentes de argila cinza escura, indicando alternância de regimes deposicionais de maior e menor energia. No leito do rio os sedimentos são constituídos por areia fina a média predominantemente quartzosa.

Na fase de Projeto Executivo esses sedimentos foram totalmente removidos, nos locais em que foram implantadas estruturas definitivas e obras temporárias como o canal de desvio escavado na margem esquerda.

4.5 Solos Coluvionares

Estes depósitos encontram-se nas porções topograficamente mais elevadas, recobrando os terraços aluviais e/ou os solos de alteração de basalto e/ou basalto extremamente alterado (classe V). São constituídos por argila siltosa a arenosa marrom escura, com fragmentos angulosos e milimétricos de quartzo, quartzito, calcedônia e grânulos de limonita. Estes grânulos concentram-se na base da camada ou estão dispersos. Podem ocorrer ainda fragmentos centimétricos de basalto extremamente a muito alterados.

Na ombreira direita os coluviões ocorrem entre as estacas 0 e 43, com espessura média de 3,5 m, que diminui em direção ao rio. Os ensaios penetrométricos do tipo SPT indicaram valores menores do que 10 golpes para penetrarem os últimos 30 cm. Os ensaios de permeabilidade acusaram valores entre 10^{-4} e 8×10^{-4} cm/s.

Na ombreira esquerda os coluviões estendem-se entre as estacas 68 e 102; a maior espessura observada foi de 5,5 m acunhando-se em direção ao rio. Os valores de SPT foram sempre inferiores a 10 golpes. Os ensaios de infiltração mostraram valores entre 2×10^{-5} e $1,7 \times 10^{-3}$ cm/s.

Na fase de Projeto Executivo foram abertos "cut off" nas duas margens, assentando-se o núcleo da barragem de enrocamento da margem direita em basalto compacto pouco alterado e pouco fraturado (classe II/III) pertencente ao núcleo do derrame IV; na barragem de terra da margem esquerda o "cut off" foi escavado até o solo de alteração de basalto, removendo-se o solo coluvionar e o terraço aluvionar.

4.6 Feições Geotécnicas mais Importantes

As feições geotecnicamente mais importantes para as fundações basálticas das obras de Nova Avanhandava são as juntas das cotas nominais 300, 305 e 310 m; e os contatos entre os derrames I/II, II/III e III/IV.

Estas feições mereceram grande atenção durante a fase construtiva por causa das suas áreas de ocorrência mais abrangentes, suas características geométricas, seus parâmetros de resistência e suas permeabilidades.

As FIGURAS 4 e 5 mostram o desenvolvimento destas feições ao longo do eixo da barragem e, transversalmente, através da seção

que passa pela Tomada d'Água e Casa de Força. A FIGURA 6 apresenta as feições através da seção que passa pelo eixo da Eclusa.

Segundo MELLO (1972) "... em fundações de barragens de concreto, quando ocorrem juntas sub-horizontais que possam comprometer a estabilidade perante o cisalhamento, cabe realizar ensaios de cisalhamento direto para investigar os parâmetros de resistência a se atribuir à junta". MELLO & KANJI (1970) fazem referências aos pontos que merecem atenção quanto a resistência ao cisalhamento.

No caso de Nova Avanhandava os valores adotados como os de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir de uma série histórica de ensaios "in situ" executados em feições semelhantes nas fundações das Usinas de Ilha Solteira e Água Vermelha, e ensaios laboratoriais de cisalhamento direto em testemunhos de sondagem.

Na análise do comportamento hidrogeotécnico do maciço rochoso (IPT, 1981 e 1982) diagnosticou-se uma grande anisotropia, indicando uma concentração de grandes permeabilidades nestes horizontes, em relação ao restante dos derrames.

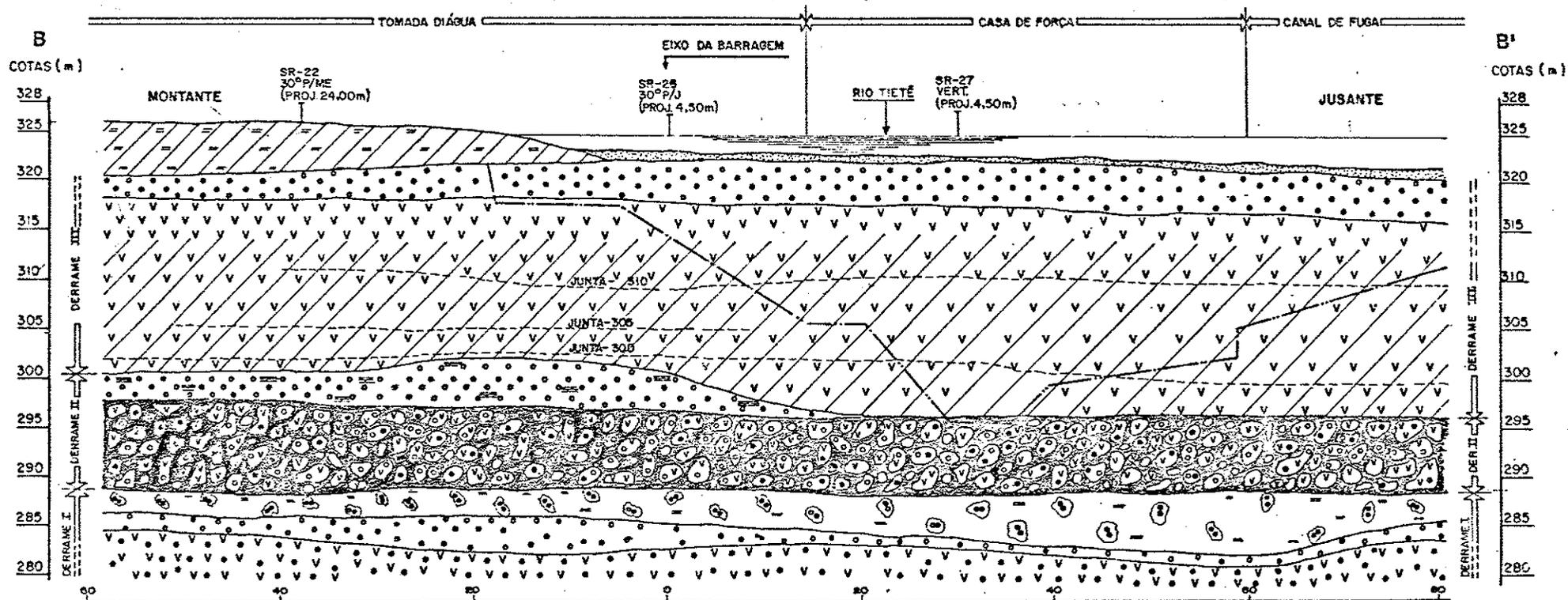
A FIGURA 7 apresenta a compartimentação hidrogeotécnica dos maciços basálticos de Nova Avanhandava, onde estão considerados o número do derrame, o nome/cota das feições geotécnicas mais importantes, as suas maiores permeabilidades e um esquema com suas distribuições espaciais.

Apresenta-se, a seguir, cada uma das feições geotécnicas mais importantes, discutindo-se as suas características individuais e implicações a nível dos projetos Básico e Executivo.

Contato I/II

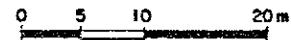
O contato entre os derrames I e II oscila entre as cotas 286 e 289 m, mostrando-se bastante regular. A zona do contato encontra-se pouco a medianamente fraturada (classe II); as fraturas não têm preenchimento; foram constatadas pequenas evidências de lixiviação; também foram observados em algumas sondagens, contatos do tipo soldado (FOTO 1).

A FIGURA 8a apresenta o mapa de contorno estrutural do



LEGENDA

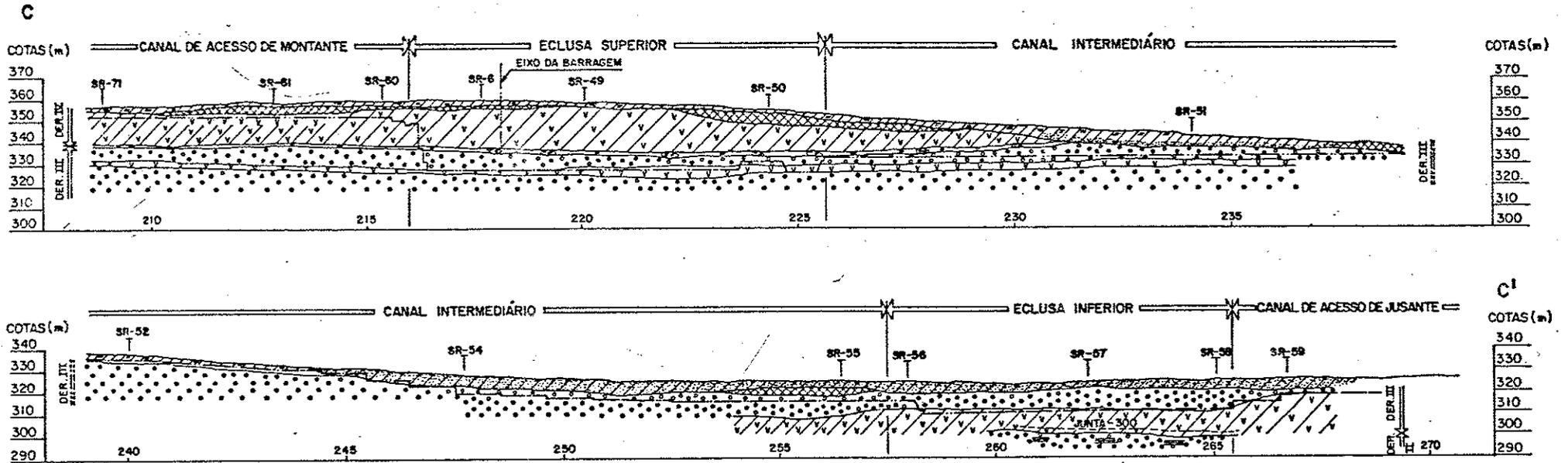
- SOLO COLLUVIONAR
- SOLO ALUVIONAR
- BASALTO VESICULO-AMBDALCIDAL
- BASALTO COMPACTO CINZA ESVERDEADO E/OU CINZA AVERMELHADO
- BASALTO COMPACTO CINZA ESCURO
- BRECHA BASÁLTICA SILTOSA
- INTERCALAÇÕES DE BRECHA BASÁLTICA CALCÁRIA
- "PILLOW LAVA" BASÁLTICA
- INTERCALAÇÕES DE BRECHA BASÁLTICA ARGILOSA (HIDROTHERMAL)
- ZONA FRATURADA (JUNTA)
- LINHA DE ESCAVAÇÃO
- CONTATO GEOLÓGICO



ESCALA GRÁFICA

NOTA: Ver localização desta seção na Figura 2

FIGURA 5 - Identificação das discontinuidades rochosas transversalmente ao eixo da barragem na região da Tomada d'Água e Casa de Força



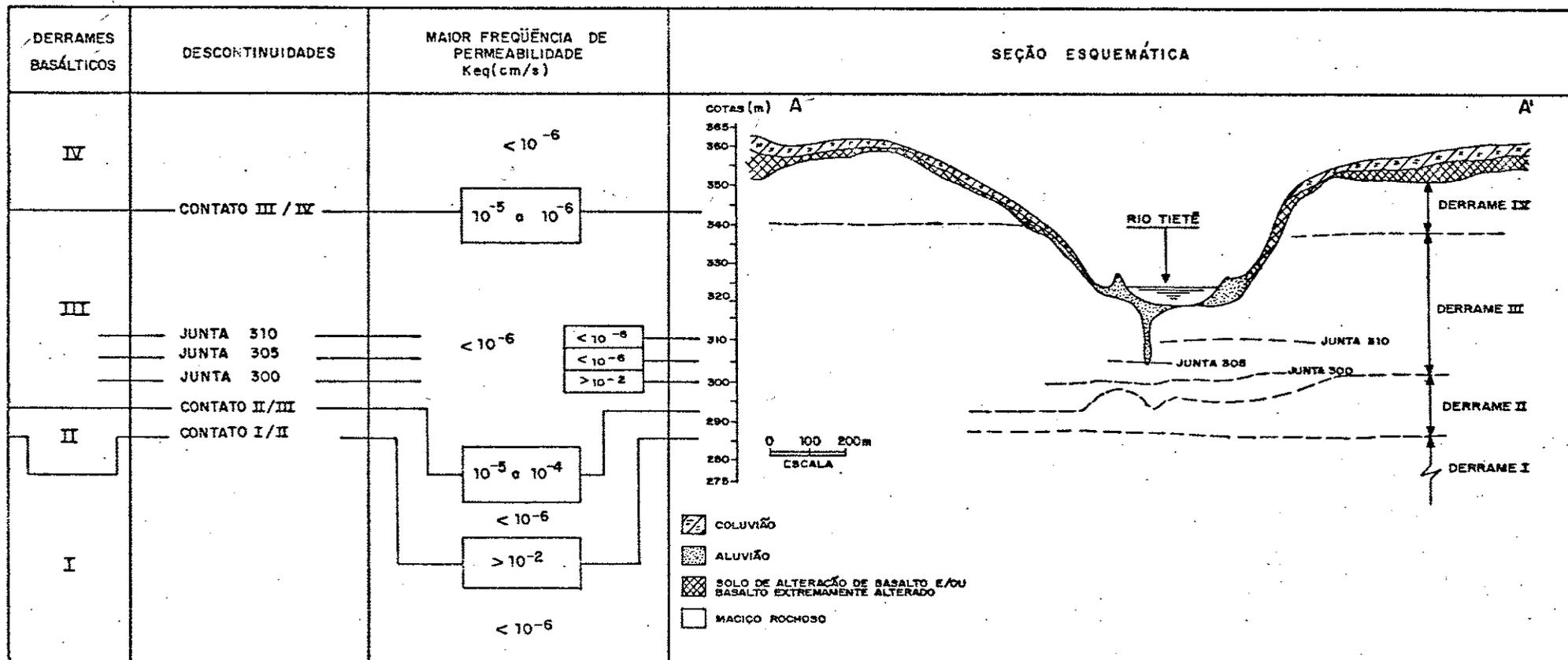
LEGENDA

-  SOLO COLLUVIONAR
-  SOLO ALUVIONAR
-  SOLO DE ALTERAÇÃO DE BASALTO E/OU BASALTO EXTREMAMENTE ALTERADO
-  BASALTO VESÍCULO-AMIGDALOIDAL
-  BASALTO COMPACTO CINZA ESVERDEADO E/OU CINZA AVERMELHADO
-  BASALTO COMPACTO CINZA ESCURO
-  BRECHA BASÁLTICA SILTOSA
-  INTERCALAÇÕES DE BRECHA BASÁLTICA CALCÁRIA
-  ZONA FRATURADA (JUNTA)
-  LINHA DE ESCAVAÇÃO
-  CONTATO GEOLÓGICO

0 50 100m
ESCALA GRÁFICA

NOTA: Ver localização desta seção na Figura 2

FIGURA 6 - Identificação das descontinuidades rochosas ao longo do eixo das Eclusas



NOTA: Ver localização desta seção na Figura 2

FIGURA 7 - Compartimentação hidrogeotécnica dos maciços basálticos de fundação de Nova Avanhandava (Modificado de IPT, 1982)

contato I/II: as evidências são de leves oscilações nas cotas topográficas, sem uma tendência de mergulho definida.

Em termos de permeabilidade, mais de 50% dos ensaios efetuados mostraram valores superiores a 10^{-4} cm/s; por outro lado, cerca de 30% dos ensaios indicaram valores menores do que 10^{-5} cm/s. Estes resultados podem ser observados no histograma da FIGURA 11a, que trata da variação de frequência relativa de permeabilidade no contato entre os derrames I e II.

As maiores permeabilidades se encontram na região de fundação da Casa de Força. As soluções adotadas para minimizar tais permeabilidades, a nível dos projetos Básico e Executivo, foram os tratamentos das fundações com a injeção de calda de cimento no maciço rochoso e a drenagem do contato I/II.

Contato II/III

O contato entre os derrames II e III mostra-se espacialmente muito irregular, oscilando entre as cotas 292 e 302 m; no local da sondagem SR-45 o contato é direto entre os derrames I e III.

Este contato apresenta-se normalmente selado, de pouco a medianamente fraturado (classe II), com trechos localizados de muito a extremamente fraturados (classes III e III*); as fraturas normalmente se encontram sem preenchimento e por vezes com vestígios de lixiviação (FOTO 2).

A FIGURA 8b apresenta o mapa de contorno estrutural deste contato, indicando como ponto mais elevado o limite entre o Vertedouro de Superfície e o Muro de Transição Esquerdo, mergulhando para jusante e para a margem direita.

A FIGURA 11b representa o histograma da frequência relativa das permeabilidades, indicando uma tendência a valores médios, já que mais do que 40% dos resultados situam-se entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s.

A distribuição dos resultados de permeabilidade mostrou-se irregular, não havendo concentração de valores sob as diferentes estruturas de concreto.

As soluções adotadas para contornar o problema de fluxo d'água nível dos projetos Básico e Executivo foram aprofundar uma parte da Casa de Força até a cota 296 m, ultrapassando o contato II/III, bem como os tratamentos com injeção de calda de cimento



FOTO 1 - Aspecto do contato selado entre os derrames basálticos I e II. (SR-533; 30,70 m).



FOTO 2 - Aspecto do contato entre os derrames basálticos II e III. O horizonte vesicular é de 0,30 m. (SR-31; de 31,50 m a 33,73 m). Fonte: IPT, 1979a.

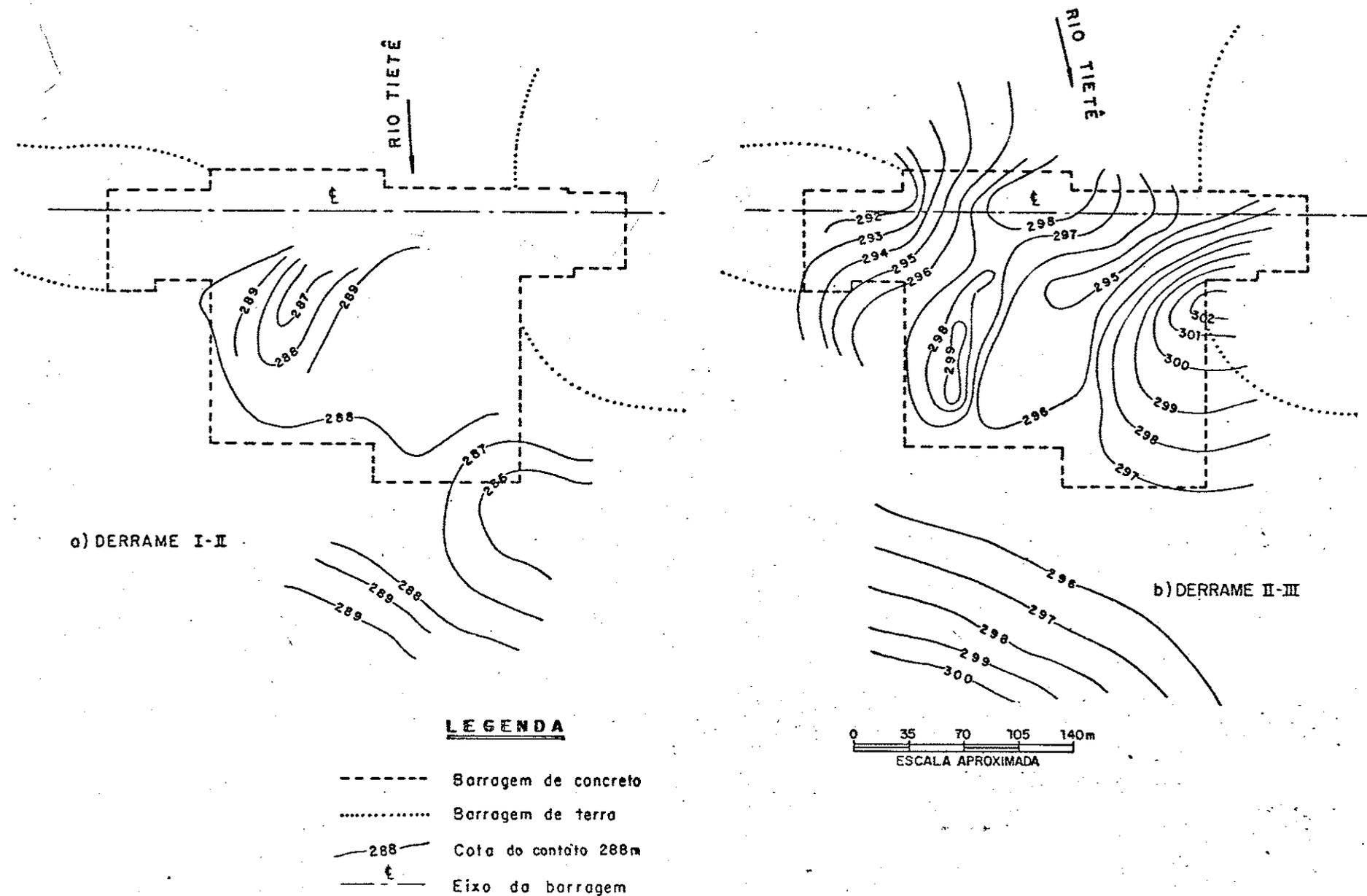


FIGURA 8 - Mapas de contornos estruturais dos contatos entre os derrames basálticos I/II e II/III (IPT, 1982)

no maciço rochoso e drenagem do contrato.

Contato III/IV

O contato entre os derrames III e IV foi observado na região das ombreiras (nas duas margens do rio), sendo, na direita entre as cotas 339 e 340,5 m, enquanto que na esquerda entre as cotas 337 e 338 m. Esta zona apresenta um comportamento espacial bastante regular, a exemplo do contato I/II; o grau de fraturamento varia de mediana a extremamente fraturado (classes II, III e III*), sendo comuns as superfícies das fraturas apresentarem películas argila alaranjada (FOTO 3).

A FIGURA 11c se refere ao histograma da frequência relativa das permeabilidades; cerca de 30% dos resultados situam-se entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s.

As soluções adotadas foram a escavação do "cut off" nas duas ombreiras para fundação das barragens de enrocamento e de terra, bem como o tratamento do maciço rochoso por injeção de calda de cimento a partir do fundo do "cut off".

Junta da Cota Nominal 300 m

Trata-se de uma das feições geotécnicas mais importantes no maciço rochoso de Nova Avanhandava; ocorre no núcleo do derrame III e caracteriza-se por uma faixa de rocha de muito a extremamente fraturada (classes III/III*), com espessura variando de poucos centímetros até 4 m, com desenvolvimento subparalelo à base do derrame. No pacote fraturado desenvolvem-se um ou mais horizontes de rocha III*, constituídos por pequenos fragmentos de basalto compacto, sendo as superfícies das fraturas revestidas por fina película de argila branca e creme e/ou material silto-arenoso de alteração de basalto, por vezes com estrias de fricção. Em alguns casos as películas argilosas podem não ocorrer. Observou-se também a presença de calcita soldando fragmentos tabuliformes de basalto compacto, conferindo à junta um aspecto brechóide (FOTO 4).

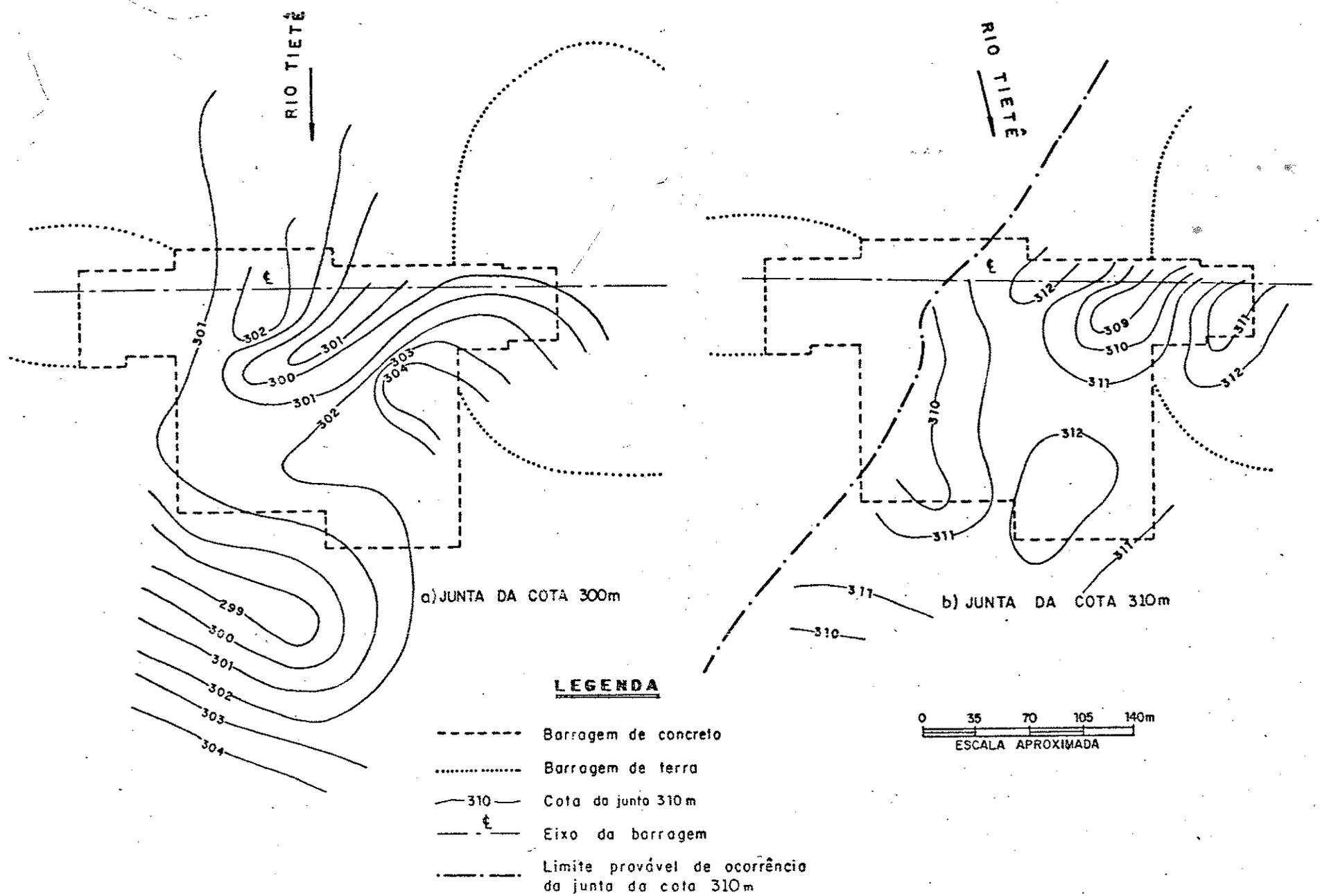
Na FIGURA 9a acha-se representado o mapa de contorno estrutural da junta da 300 m, indicando um "alto topográfico" próximo da parede esquerda do Vertedouro de Superfície e



FOTO 3 - Aspecto do contato entre os derrames basálticos III e IV (SR-49; 26,40 m).



FOTO 4 - Aspecto da junta da cota nominal 300 m. Notar a calcita cimentando fragmentos de basalto compacto (SR-45; de 23,60 m a 26,38). Fonte: IPT, 1979 a.



LEGENDA

- Barragem de concreto
- Barragem de terra
- 310 — Cota da junta 310m
- E — Eixo da barragem
- · - · - · Limite provável de ocorrência da junta da cota 310m

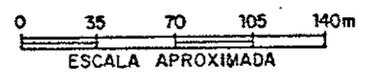


FIGURA 9 - Mapas de contornos estruturais das juntas das cotas nominais 300 e 310 m (IPT, 1982)

mergulhos para jusante e para montante em direção à margem direita; mais à jusante, na região do Canal de Fuga/Bacia de Dissipação, a junta volta a subir topograficamente.

A FIGURA 11d mostra o histograma da frequência das permeabilidades, sendo que 37% dos resultados têm valores maiores do que 10^{-2} cm/s (permeabilidade alta), enquanto que os valores restantes encontram-se distribuídos entre 10^{-6} e 10^{-3} cm/s. Os maiores valores foram registrados sob o local de implantação das estruturas de concreto da Tomada d'Água/Casa de Força e Vertedouro de Superfície.

Nesta feição foram executados seis ensaios de perda d'água usando-se uma metodologia diferente da usual, que consiste em um grande número de estágios de pressão e vazão, tanto na sequência ascendente quanto na descendente. Para CRUZ et alii (1983) os resultados mostraram que "a não linearidade da vazão versus pressão, bem como o valor sistematicamente decrescente da relação vazão dividida pela pressão efetiva, são indicativos do regime de fluxo que se estabelece, e que se inicia por um regime quase laminar, passando por um regime de transição e possivelmente alcançando o regime turbulento". Isto indica que os valores do equivalente ao coeficiente de permeabilidade obtidos pelo ensaio convencional (ABGE, 1975), certamente não representam adequadamente os valores reais de permeabilidade da junta da 300 m.

As soluções adotadas a nível dos projetos Básico e Executivo foram a escavação do maciço rochoso, abaixo do nível da descontinuidade rochosa, na fundação da Casa de Força e do Vertedouro, bem como os tratamentos com a injeção de calda de cimento e a drenagem da junta.

Junta da Cota Nominal 305 m

Esta feição possui uma área de ocorrência mais restrita, limitando-se às fundações da Tomada d'Água/Casa de Força, Vertedouro de Superfície, Muro de Transição Esquerdo e Canal de Fuga. Nos estudos para o Projeto Básico aventou-se a hipótese desta junta ser uma ramificação da junta da 300 m (IPT, 1979a); contudo o exame dos taludes rochosos após as escavações não permitiu uma conclusão neste sentido.

A junta da 305 m possui uma espessura variando de 10 cm até

2 m e se caracteriza por um conjunto de fraturas, de muito a extremamente fraturado (classes III/III*) que oscila entre as cotas 304 e 307 m (FIGURA 10), com dois "altos topográficos", sendo um na Tomada d'Água/Casa de Força e outro no Canal de Fuga. As fraturas ocorrem sem preenchimento ou, quando ele está presente, é constituído, principalmente, por material silto-arenoso de alteração do basalto; eventualmente ocorrem películas de argila branca e creme (FOTO 5).

A FIGURA 11e apresenta o histograma de frequência relativa das permeabilidades, característico de uma zona de permeabilidade baixa (concentração de 40% dos resultados menores do que 10^{-6} cm/s).

A solução recomendada a nível dos projetos Básico e Executivo para diminuir ainda mais o fluxo d'água na região foi a escavação do maciço rochoso abaixo do nível da referida junta nas fundações da Casa de Força, do Vertedouro de Superfície e da Bacia de Dissipação. Também, foram executados tratamentos com a injeção de calda de cimento e a drenagem da junta.

Junta da Cota Nominal 310 m

Segundo os estudos realizados pelo IPT (1979a), a junta da cota 310 m "... é caracterizada por uma faixa de rocha de muito a extremamente fraturada (classes III/III*) ... com uma espessura variando entre 5 cm até cerca de 1,5 m ...". A área de ocorrência se estende entre as Tomadas d'Água/Casa de Força 2 e 3, Canal de Fuga, Vertedouro de Superfície, Bacia de Dissipação e Muro de Transição Esquerdo.

As fraturas apresentam superfícies alteradas e/ou preenchidas por material silto-arenoso de alteração de basaltos, por vezes com fina película de argila branca e creme, eventualmente com estrias de fricção (FOTO 6).

A FIGURA 9b apresenta o mapa de contorno estrutural da junta 310 m; as variações das cotas estão entre 309 e 313 m, com "altos topográficos" no Canal de Fuga e no Muro de Transição Esquerdo.

A FIGURA 11f mostra o histograma com a distribuição das permeabilidades da referida junta indicando que a maioria dos resultados, cerca de 38%, é menor do que 10^{-6} cm/s (permeabilidade baixa). Apenas 10% dos resultados foram de valores superiores a 10^{-2} cm/s.

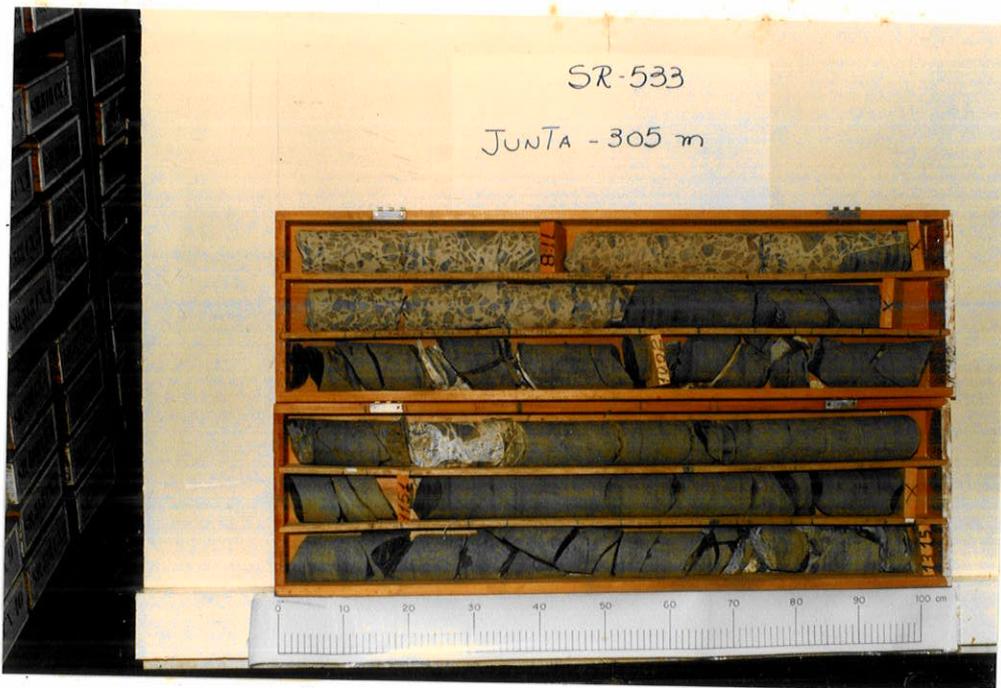
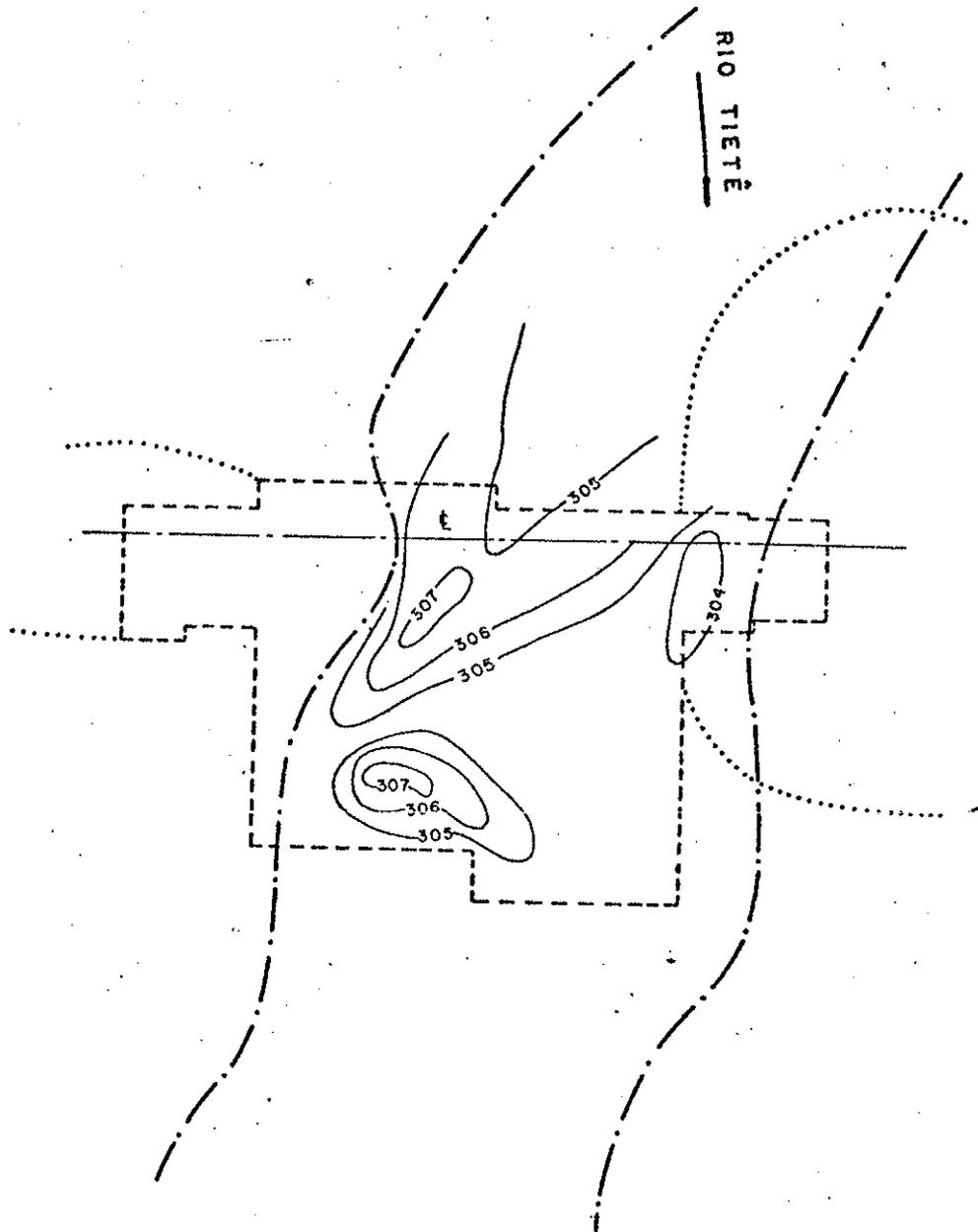


FOTO 5 - Aspecto da junta da cota nominal 305 m. Notar a feição brechada com a presença de calcita e as películas de argila creme revestindo a superfície das fraturas (SR-533; de 10,55 a 10,80 m).



FOTO 6 - Aspecto da junta da cota nominal 310 m. Notar a alteração mais pronunciada na zona de desenvolvimento da junta e as películas de argila branca revestindo as superfícies das fraturas (SR-44; de 5,49 m a 8,12 m). Fonte: IPT 1979a.



LEGENDA

- Barragem de concreto
- Barragem de terra
- 305— Cota da junta 305m
- t— Eixo da barragem
- · — · — Limite provável de ocorrência da junta da cota 305m

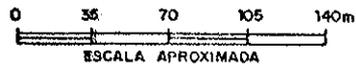


FIGURA 10 - Mapa da contorno estrutural da junta da cota nominal 305 m (IPT, 1982)

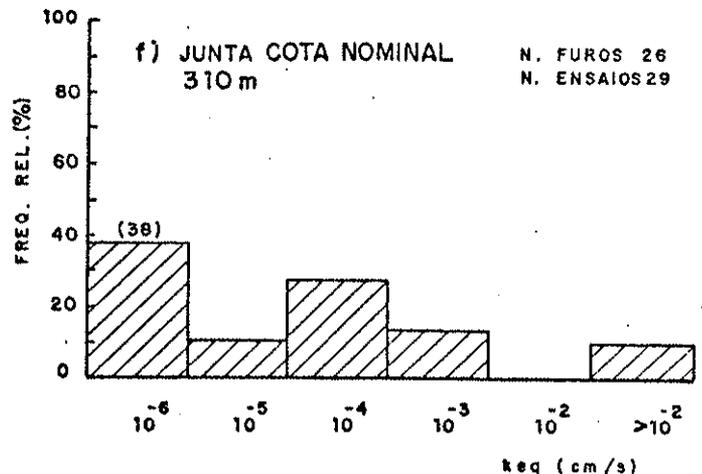
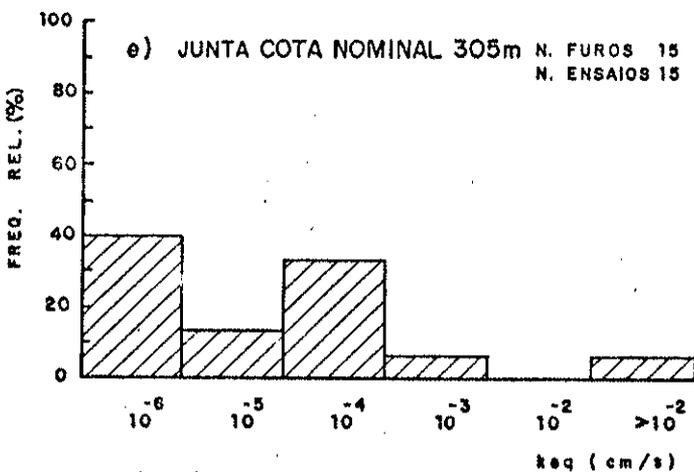
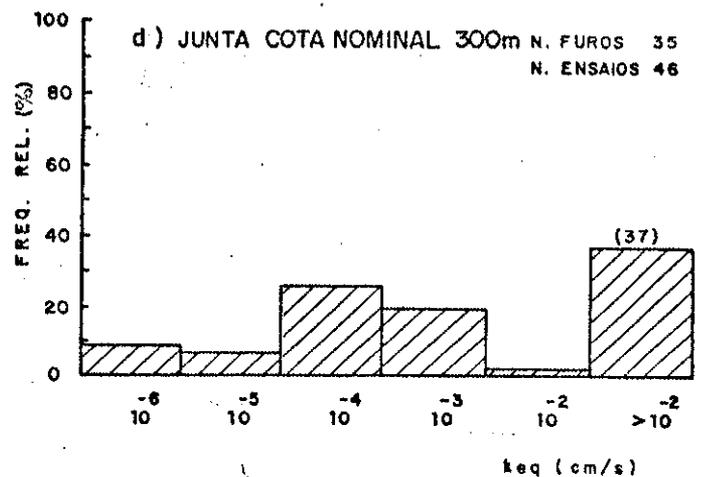
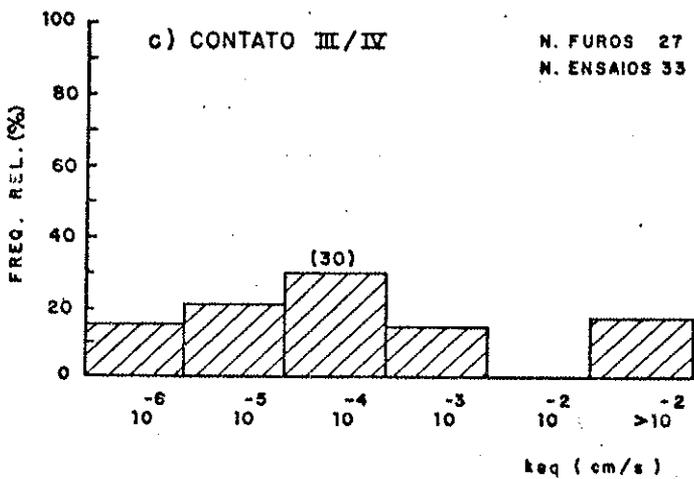
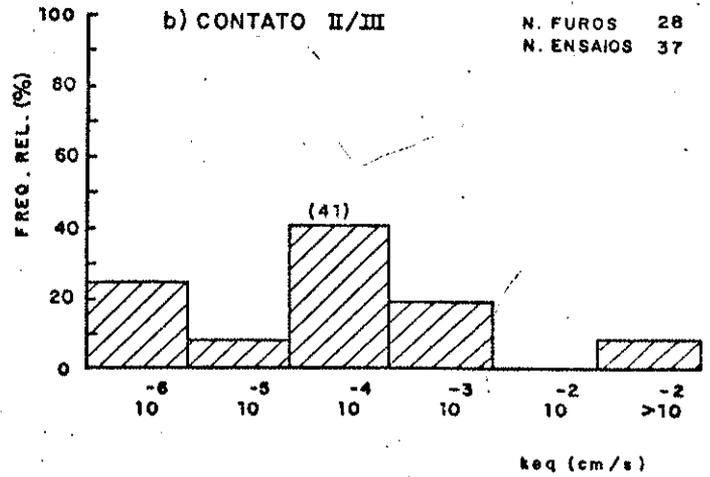
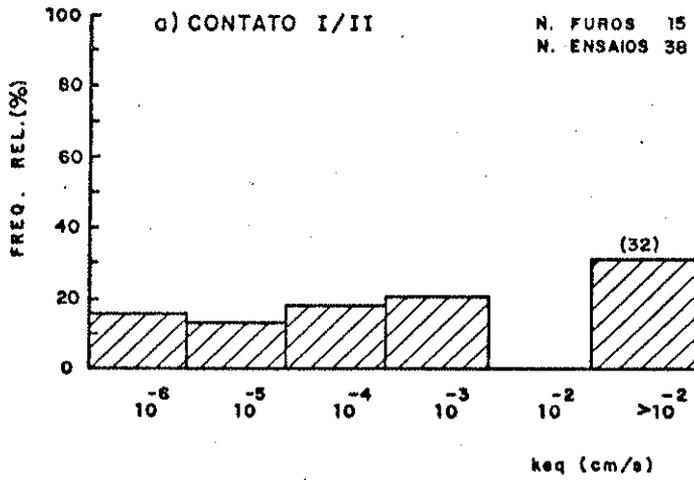


FIGURA 11 - Histograma das freqüências relativas das permeabilidades verificadas nas regiões de contato entre derrames e as principais juntas rochosas (IPT, 1982)

As soluções adotadas a nível dos projetos Básico e Executivo foram a execução das escavações já citadas anteriormente, incluindo-se também as do Muro de Transição Esquerdo e complementadas com os tratamentos de fundação com a injeção de calda de cimento e a drenagem.

Estudos mais recentes desenvolvidos por MARRANO et alii (1984a) decrevem uma junta na cota 315 m, na área de implantação do Muro de Transição Esquerdo, interpretada como uma ramificação da junta da 310 m.

4.7 Descontinuidades Rochosas e suas Implicações para as Obras Cíveis

As feições mais importantes do ponto de vista de fundações das obras cíveis nos basaltos de Nova Avanhandava são os contatos entre os derrames I/II, II/III e III/IV, além das juntas das cotas nominais 300, 305 e 310 m.

Segundo estudos do IPT (1982) "... das descontinuidades presentes, assume a maior importância a junta 300m pelas suas características físicas (continuidade, permeabilidade etc.) e pela sua posição em relação à obra". Igualmente, o contato entre os derrames I/II que favoreceu grande fluxo de água nos maciço rochoso e para o qual foi dispensado um tratamento específico no sentido de reduzir a permeabilidade elevada sob as principais estruturas de concreto.

Conforme mencionado anteriormente, as questões sobre a ocorrência de "pillow lavas" no derrame basáltico II e o desenvolvimento da feição do paleocanal, serão tratadas nos dois itens subsequentes.

A caracterização do contato entre os derrames III/IV com interferência nas estruturas da barragem de enrocamento da margem direita, na barragem de terra da margem esquerda e na eclusa para navegação do Rio Tietê, também foi importante e permitiu estabelecer melhor o nível de escavação, garantindo maior segurança às obras.

Enfim, o conhecimento do comportamento geológico e geotécnico das feições rochosas mais importantes de Nova Avanhandava, identificadas a nível de Projeto Básico, permitiu estabelecer várias adaptações e cuidados na fase do Projeto Executivo.

5 "PILLOW LAVAS" BASÁLTICAS

As "pillow lavas" basálticas de Nova Avanhandava ocorrem no interior do derrame II. A primeira descrição da ocorrência foi realizada por PALAZZO NETO et alii (1982): "... este derrame foi interpretado como possíveis estruturas tipo "pillow lava", onde podem-se notar "almofadas" de basalto compacto praticamente são, com bordas vesiculares e amigdaloidais, envoltos por material brechóide inteiramente decomposto".

A ocorrência desta feição demandou uma série de questionamentos durante a fase de Projeto Básico, tendo sido programadas várias sondagens rotativas com amostragem integral (recuperação de testemunhos rochosos pelo processo de reperfuração após solidificação de descontinuidades por injeção de calda de cimento ou resina; MANO et alii, 1982), para uma primeira avaliação do seu comportamento tridimensional. O exame da feição ocorreu durante o Projeto Executivo, através da inspeção das paredes do Poço de Drenagem.

5.1 Definição do Termo e Ocorrências

As feições rochosas conhecidas como "pillow lavas" são definidas como massas aproximadamente elipsoidais, que ocorrem principalmente em lavas básicas e que podem ter formas semelhantes a almofada, travesseiro, bolo, colchão, saco, bola ou balão.

Geneticamente, muitos pesquisadores consideram que as "pillow" constituem extrusões submarinas ou subaquosas; alguns admitem uma origem subaérea, enquanto que outros propõem uma origem intrusiva.

De acordo com TYREEL (apud SNYDER & FRASER, 1963b), o termo "pillow" foi usado pela primeira vez em 1890 por COLE & GREGORY para descrever estruturas elipsoidais em rochas variolíticas do Mont Genève na fronteira entre a Itália e a França.

LEWIS (1914) em seu clássico trabalho sobre a gênese das "pillow lavas" faz uma revisão da literatura existente sobre "pillow" e sugere uma origem subaérea, similar aos processos de formação de lavas "pahoehoe". Outros autores como COOKE et alii (apud WILSON, 1960) e STARK & SIMMONS (apud SNYDER & FRASER, 1963b) admitem parcial ou totalmente a origem subaérea.

Dentre os muitos autores que consideram as "pillow" como originadas de extrusões submarinas ou subaquosas ou de extrusão.

em corpos d'água citam-se: FOYE & FULLER (apud WILSON, 1960), HENDERSON (apud SNYDER & FRASER, 1963b) e WILSON (1960).

SNYDER & FRASER (1963b) concluíram após a revisão da literatura sobre "pillow lavas", não terem observado feições estruturais que confirmassem uma origem subaérea.

MOORE et alii (1971) descreveram o desenvolvimento de "pillow" como extrusões submarinas de fluxo recente de lavas no Monte Etna (Sicília). MOORE, em 1975, utilizando uma filmadora, documentou e descreveu o mecanismo de formação de "pillow lavas" nos derrames submarinos do vulcão Kilawea (Havai).

No Brasil, a ocorrência de "pillow lavas" foi constatada em diversos locais. Apenas para exemplificar foram escolhidos três casos relacionados a rochas diversas.

MARQUES FILHO et alii (1981) descreveram a ocorrência de "pillow lavas" observada durante os trabalhos de escavação do Vertedouro da Usina de Foz de Areia, no Rio Iguaçu (PR). Segundo estes autores um derrame espesso de rochas basálticas subdivide-se em vários subderrames, originando um conjunto extremamente complexo, onde se notam lentes irregulares, de basaltos densos separados por zonas brechóides e vesiculares; nestas estruturas, às vezes, verificam-se formas de almofadas tipo "pillow lavas". A complexidade do conjunto foi tão grande que somente após a escavação pôde-se entender um pouco da estrutura local.

Nos estudos de FIGUEIREDO et alii (1982) foi descrita uma ocorrência da estrutura "pillow" em metabasalto do Grupo São Roque, nas proximidades de Pirapora do Bom Jesus (SP). Os Autores compararam a ocorrência com as referências internacionais e concluíram que são idênticas; consideram, que em face da pequena deformação observada, elas provavelmente estão na posição, ou seja, com o pedúnculo para baixo e a superfície convexa para cima, e, que as estruturas "... representam derrames submarinos de lava basáltica associados a uma sequência clasto-química, constituída de metapelitos, quartzitos e rochas carbonáticas".

Os referidos autores reuniram alguns elementos sobre a textura das "pillow lavas" pelas quais "... as lavas almofadadas geralmente têm uma crosta vesicular e ocasionalmente vítrea, apresentando uma textura mais finamente granulada do que o interior. Frequentemente, essas estruturas mostram-se alongadas, podendo haver um paralelismo entre seus eixos maiores, que indi-

caria a direção do fluxo do derrame".

Nos estudos de FERREIRA (1985) foi descrita uma ocorrência de "pillow" em Araguari (MG), com estrutura em almofada, sobreposta a uma camada de sedimentos inconsolidados e plásticos, que teria sido deformada na parte superior durante o escoamento subaquático da lava.

5.2 Ocorrência de Nova Avanhandava

A abordagem do assunto para Nova Avanhandava considerou as dificuldades relatadas por MARQUES FILHO et alii (1981) para Foz do Areia; desse modo, foi adotada a segregação dos conhecimentos nas fases de Projeto Básico e de Projeto Executivo. Este critério permitiu traçar um perfil evolutivo e melhorar a interpretação da feição basáltica encontrada no derrame II.

5.2.1 Observações na fase do projeto básico

As observações obtidas durante a fase de Projeto Básico (IPT, 1979a) foram calcadas essencialmente nos resultados das sondagens rotativas dos tipos convencional e com amostragem integral.

A feição "pillow lava" ocorre na porção do núcleo do derrame II. A base deste derrame situa-se imediatamente acima da brecha basáltica siltosa do topo do derrame I, enquanto que o topo acha-se sotoposto ao basalto compacto pertencente ao núcleo do derrame III.

O derrame II não se enquadra no esquema estrutural observado nos demais derrames. Na zona do topo ocorre um delgado horizonte vesicular, e a zona de núcleo está entrecortada por veios preenchidos por material brechóide. A espessura dos veios varia de poucos centímetros até 2 m. Associado aos veios brechóides nos basaltos que os limitam, ocorre sistematicamente um aumento na densidade de vesículas e faixas avermelhadas (estas dispostas de forma simétrica em cada lado do veio, diminuindo à medida que se distanciam do mesmo):

O material de preenchimento dos veios, pouco alterado mineralogicamente, foi denominado brecha basáltica calcária, sendo constituído por fragmentos centimétricos subangulosos de basaltos compacto e vesículo-amigdaloidal, cinza avermelhado, que são englobados e cimentados essencialmente por calcita. Quando alterado, recebeu a denominação de brecha basáltica argilosa, sen

do também formado por fragmentos centimétricos, subangulosos de basaltos compacto e vesículo-amigdaloidal alterados, envolvidos por uma massa de argilo-minerais. Esta massa tem composição de 80 a 100% de argilo-minerais do grupo das montmorilonitas, e de 0 a 20% de zéolitas, opacos e carbonatos (FOTOS 7 e 8).

O exame microscópico da brecha basáltica calcária mostrou que o cimento é um basalto vesicular constituído por cristais euédricos de plagioclásio e subédricos de piroxênio, numa matriz de argilo-minerais e vidro. Ficaram evidenciadas também as semelhanças entre as feições texturais e estruturais do material dos veios.

O mesmo exame para a brecha basáltica argilosa indicou uma granulometria mais fina, uma matriz com características texturais sugestivas de uma composição original mais vítrea (agora alterada em argilo-minerais) e de um maior grau de brechação. Isto parece indicar que o maior grau de brechação tenha determinado um grau mais elevado de alteração deste material em relação à brecha basáltica calcária. Macroscopicamente os testemunhos de sondagem mostraram a gradação da brecha medianamente alterada para a brecha muito a extremamente alterada.

Na tentativa de explicar a gênese desta sequência basáltica com seus veios brechóides, foram, formuladas as seguintes hipóteses:

Hipótese 1 - O derrame II teria sofrido tectonismo, formando-se fendas e a posterior intrusão de lava por percolação de soluções hidrotermais através de zonas preferenciais de fraqueza. As soluções hidrotermais teriam alterado o material brechado dos veios.

Hipótese 2 - O derrame II seria constituído por uma série de subderrames ou derrames de pequena espessura;

Hipótese 3 - O derrame II seria um pavimento de blocos depositados como frente e posteriormente como base do derrame III. Isto porque o derrame basáltico durante o seu fluxo poderia depositar na sua frente uma camada de blocos, resultante da fragmentação da sua superfície superior resfriada; após o avanço do derrame III estes blocos teriam sofrido uma cimentação por lavas ou soluções hidrotermais.

Na análise final dos estudos para o Projeto Básico concluiu-se que a hipótese 3 seria a mais aceitável; e que as hipóteses 1.



FOTO 7 - Brecha basáltica argilosa (hidrotermal). Notar a densidade das vesículas e das zonas avermelhadas, mesmo quando as intercalações brechóides ocorrem em posição vertical (SR-27; de 34,86 m a 35,84 m). Fonte: IPT, 1979a.



FOTO 8 - Brecha basáltica argilosa (hidrotermal) e brecha basáltica calcária. Notar em A, a graduação na intercalação brechóide, passando de medianamente alterada (cinza claro) para muito alterada (esverdeado), sugerindo uma origem comum para os materiais das intercalações (SR-31; de 33,70 m a 35,94 m). Fonte: IPT, 1979a.

e 2 demandariam preocupações geotécnicas quanto às investigações complementares para verificação da continuidade lateral dos níveis brechóides, suas resistências ao cisalhamento e suas permeabilidades. Os levantamentos efetuados nos testemunhos das sondagens executadas durante o Projeto Básico, para a verificação da posição espacial do contato entre os veios brechados e o basalto compacto (com concentração de vesículas e amígdalas nas bordas) indicaram que 61% das medidas efetuadas eram inclinadas, sendo 23% horizontais a sub-horizontais e as restantes 16% verticais a subverticais.

Os ensaios de cisalhamento direto realizados em testemunhos de sondagem, da brecha basáltica argilosa, indicaram como valores médios de ângulo de atrito 51° e para a coesão $4,8 \text{ kg/cm}^2$. Estes valores, relativamente elevados para uma brecha argilosa, são decorrentes da quantidade de fragmentos de basalto e da presença, por vezes, de uma cimentação calcífera entre estes fragmentos, conforme os estudos realizados pela CESP (1980).

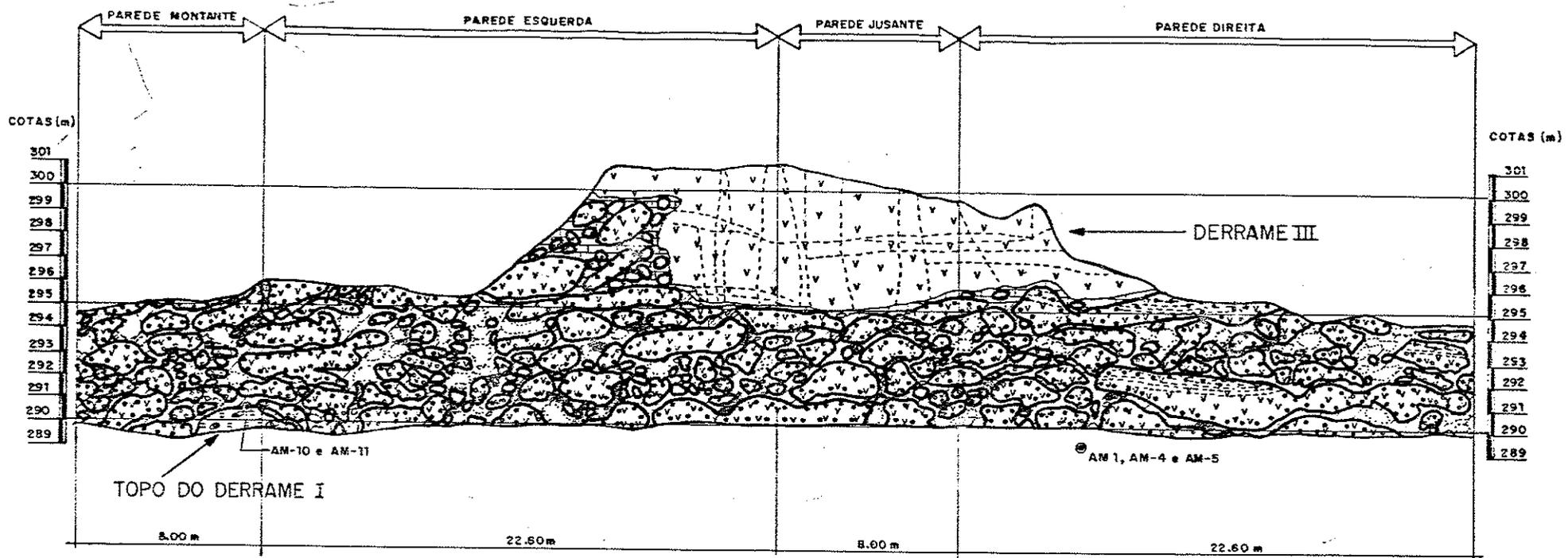
5.2.2 Observações na fase do projeto executivo

O derrame II, até então descrito por meio de testemunhos de sondagem, permitiu a visualização espacial da estrutura "pillow lava".

Com a escavação do Poço de Drenagem da Casa de Força foi possível começar a entender de modo mais efetivo a estrutura local. A FIGURA 12 mostra o resultado do mapeamento geológico das paredes do Poço de Drenagem. Observa-se a presença da brecha basáltica siltosa, pertencente ao derrame I, na base das paredes montante e esquerda.

A presença de blocos de basalto compacto, com bordas vesiculares e formas arredondadas, foi o indício inicial de que a estrutura presente seria, possivelmente, uma "pillow lava". Muitos blocos mostraram uma superfície convexa superior e uma superfície côncava, ou mesmo um pedúnculo, na porção basal.

Considerando-se o tempo limitado de exposição destas paredes em consequência dos trabalhos de concretagem, foram efetuados: mapeamentos geológicos e geotécnicos de detalhe; desenhos simplificados dos blocos; registros fotográficos de vários ângulos e distâncias; coleta de amostras para exame macroscópico e confecção de lâminas petrográficas. Paralelamente, a continuidade dos estudos exigiu um retorno ao exame dos testemunhos de sondagens,



LEGENDA

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | - Basalto compacto | | - Vazio |
| | - Basalto vesículo-amigdaloidal | | - Contato litológico |
| | - Brecha basáltica siltosa | | - Fratura com superfícies limpas e seladas |
| | - Brecha basáltica calcárea | | - Contorno identificado de bloco, recoberto pela brecha basáltica argilosa |
| | - Brecha basáltica argilosa muito alterada e pouco coerente | | - Local de coleta de amostra 1 |
| | - Brecha basáltica argilosa extremamente alterada e pouco coerente | | Escala aproximada - 1:250 |

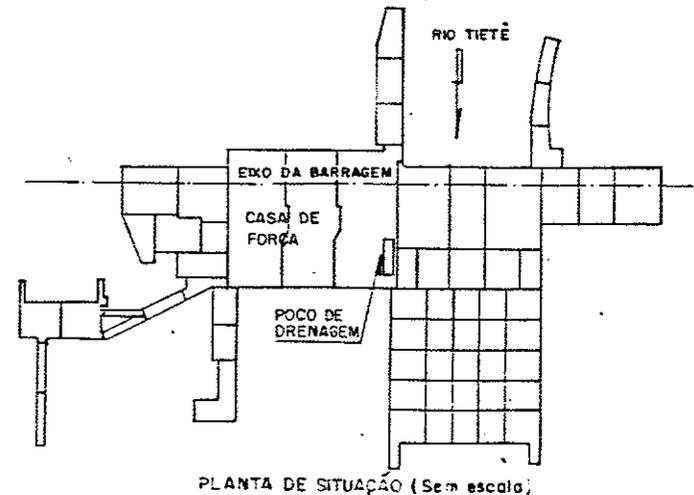


FIGURA 12 - Resultado do mapeamento geológico das paredes do Poço de Drenagem (Casa de Força) mostrando a ocorrência das "pillow lavas"

principalmente para a verificação da dimensão, forma e distribuição das estruturas.

Os estudos petrográficos foram efetuados em oito lâminas delgadas, sendo cinco em amostras coletadas no Poço de Drenagem (AM-01, AM-04, AM-05, AM-10 e AM-11) e três amostras de testemunhos de sondagens rotativas (AM-18 da SR-39, entre 45,68 e 45,91 m; AM-19 da SR-42 entre 41,42 e 41,55 m; e AM-20 da SR-101, entre 26,75 e 27,08 m). Na descrição das seções delgadas foram analisadas a textura, a mineralogia, o grau de alteração, além de uma estimativa visual da porcentagem de cada mineral. Foram preparadas Fichas de Análise Petrográfica Pormenorizada e reproduzidas algumas fotomicrografias.

Com estes elementos petrográficos e de distribuição espacial foram desenvolvidos os estudos complementares para caracterização das "pillow lavas".

5.2.2.1 Distribuição espacial

Com as informações obtidas através das sondagens rotativas realizadas para o Projeto Básico (IPT, 1979a), das sondagens com amostragem integral e do mapeamento das paredes do Poço de Drenagem durante o Projeto Executivo, foi determinada a disposição espacial do derrame II, os seus contatos inferior e superior, a sua espessura, a distribuição das "pillow" e o seu comportamento anômalo.

O contato inferior com a brecha basáltica siltosa (topo do derrame I) oscila entre as cotas 286 m e 289 m. Este contato geralmente se apresenta soldado. O contato com o basalto compacto (núcleo do derrame III) oscila entre as cotas 292 m e 302 m, com exceção ao contato verificado na SR-45 (cota 289 m), quando o derrame III está em contato direto com o derrame I.

Na SR-34, entre as cotas 297,5 e 302,5 m foi constatado um horizonte de basalto vesículo-amigdaloidal com feições semelhantes ao derrame II; entretanto, o basalto compacto imediatamente abaixo apresenta aspectos texturais, estruturais e de coloração bastante diferentes.

A espessura média do derrame II é de 8 m, variando desde 4 até 13 m, podendo não ocorrer como na SR-45.

O derrame II observado nas paredes do Poço de Drenagem (FIGURA 12) possui espessura variável de 4 a 9 m. Na parte superior da escavação verificou-se o contato das "pillow" com o

basalto compacto do derrame III, sendo separados por um delgado horizonte de basalto vesfculo-amigdaloidal ou de brecha basáltica calcária próximo da cota 295 m. No centro da parede esquerda a brecha basáltica se espessa, atingindo 4 m. Na parte inferior, próximo ao encontro entre as paredes montante e esquerda, na cota 290 m, foi detectada a brecha basáltica siltosa pertencente ao topo do derrame I.

5.2.2.2 Formas e dimensões

As "pillow lavas" de Nova Avanhandava possuem e formas arredondadas, em sua maioria aproximadamente elipsoidais, com variações para corpos esféricos, tabulares e alongados; e formas similares a almofadas, a colchão, a sacos e outras formas irregulares. São corpos individuais, isolados, sem conexão visível entre "pillow" e separadas por uma brecha basáltica (argilosa ou calcária) de espessura variável. Algumas formas mostraram pedúnculo na parte inferior (FOTO 9).

As dimensões também são variáveis, tendo sido medidas "pillow" de 0,20 m até 2 m; o valor máximo verificado foi 16 m. Algumas "pillow" menores do que 0,20 m sugerem origem a partir da fragmentação de blocos maiores. A média de suas dimensões está em torno de 0,50 x 0,80 x 1,50 m, sendo que a seção horizontal mostrou-se duas a três vezes maior que a vertical.

Algumas "pillow" possuem dimensões que fogem aos padrões médios, possuindo comprimentos que variam de 10 a 16 m. Constituem em corpos alongados com espessura variando de 0,5 a 2 m, amoldando-se às "pillow" de posição mais inferior. Corpos com estas dimensões são classificados, de acordo com a tabela de DIMROTH et alii (1978), como do tipo "pillow" de tamanho normal com poucas "megapillow" associadas. Segundo estes Autores, as "megapillow", devem ocorrer na parte inferior do derrame. Na parede direita do Poço de Drenagem foram observadas três "megapillow" sendo a mais inferior com comprimento de 12,5 m (e largura desconhecida), a intermediária tem 16 m de comprimento por 0,80 a 2 m de largura e a superior possui 12 m de comprimento por 0,50 a 2 m de largura. A FOTO 10 ilustra a ocorrência de uma "megapillow". A observação das paredes do poço indica que, de uma maneira geral, a maior dimensão das "pillow" está disposta paralelamente à direção atual do Rio Tietê neste trecho.



FOTO 9 - Bloco de "pillow lava" basáltica com pedúnculo. Ob
servar as juntas radiais nas bordas. Local: parede esquerda
do Poço de Drenagem.



FOTO 10 - Corte longitudinal de um bloco de "megapillow"
com 15 m de comprimento. Local: parede direita do Poço
de Drenagem.

5.2.2.3 Características macroscópicas

Todas as "pillow" de Nova Avanhandava são compostas por basalto compacto cinza avermelhado, gradando para uma borda de 0,50 a 2 cm, de tom cinza esverdeado. Nota-se que em "pillow" com dimensões maiores, o núcleo torna-se, também, cinza esverdeado. Nas "pillow" menores do que 0,10 m ocorre somente basalto vesículo-amigdaloidal cinza avermelhado.

Nas proximidades das bordas dos blocos de "pillow", numa faixa com aproximadamente 10 cm de largura, ocorre uma concentração de vesículas e amígdalas preenchidas por calcita, calcedônia e argilo-mineral verde. As vesículas e amígdalas possuem, na sua maioria, formas esféricas com diâmetro entre 1 e 5 mm; algumas vesículas e amígdalas maiores podem ter formas alongadas e se dispõem paralelamente à borda da "pillow" (FOTOS 11 e 12).

Em alguns testemunhos de sondagens rotativas foram observadas, no centro dos blocos, cavidades de 3 a 5 cm preenchidas por cristais de calcita, zeólita e argilo-mineral vermelho. Foram observadas juntas radiais nas bordas de algumas "pillow", como ilustrado na FOTO 9.

O material que envolve as "pillow" corresponde às descrições apresentadas no item 5.2.1, modificando-se apenas as referências quanto à espessura, que nas paredes do Poço de Drenagem estão na média 10 cm (com a espessura mínima de 1 cm e máxima de 40 cm).

Segundo LAURENT & HERBERT (1977) apud FIGUEIREDO et alii (1982)"... a matriz das "pillow", ou seja, a parte entre as almofadas individuais, pode se tratar de sedimentos ou ter essencialmente a mesma composição das "pillow", o que poderia ser o resultado do resfriamento do magma aprisionado entre as almofadas ou da fragmentação de suas crostas".

As FIGURAS 13 e 14 mostram os esquemas elaborados a partir das paredes do Poço de Drenagem. As FOTOS 13 e 14 constituem registros das feições dos mesmos locais. Nos esquemas também foram indicados os locais de coleta das amostras AM-01, AM-04, AM-05, AM-10 e AM-11, utilizadas na preparação de lâminas delgadas.

5.2.2.4 Características microscópicas

A análise das lâminas delgadas permitiu identificar quatro zonas distintas nos blocos das "pillow lavas": uma zona central, uma zona vítrea de borda, uma zona mais vesicular de borda e uma



FOTO 11 - Bloco de "pillow lava" basáltica côncavo/convexo. Notar as formas aproximadamente elipsoidais dos blocos en globados pela brecha basáltica argilosa (hidrotermal) e a forma côncava da parte inferior do bloco central. Local: pa rede esquerda do Poço de Drenagem.



FOTO 12 - Bloco de "pillow lava" basáltica retirado da esca vação do Poço de Drenagem. Notar a "borda de reação" e a grande quantidade de vesículas e amígdalas próximas da bor da.

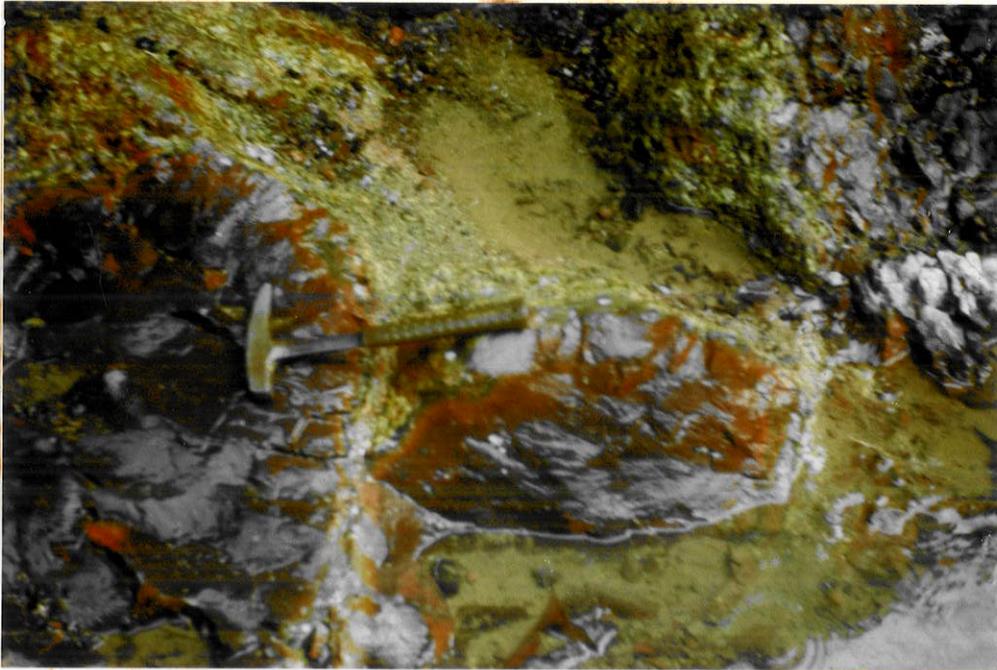


FOTO 13 - Detalhe de dois blocos de "pillow" envoltos em brecha basáltica argilosa. Local: piso montante/direito do Poço de Drenagem.

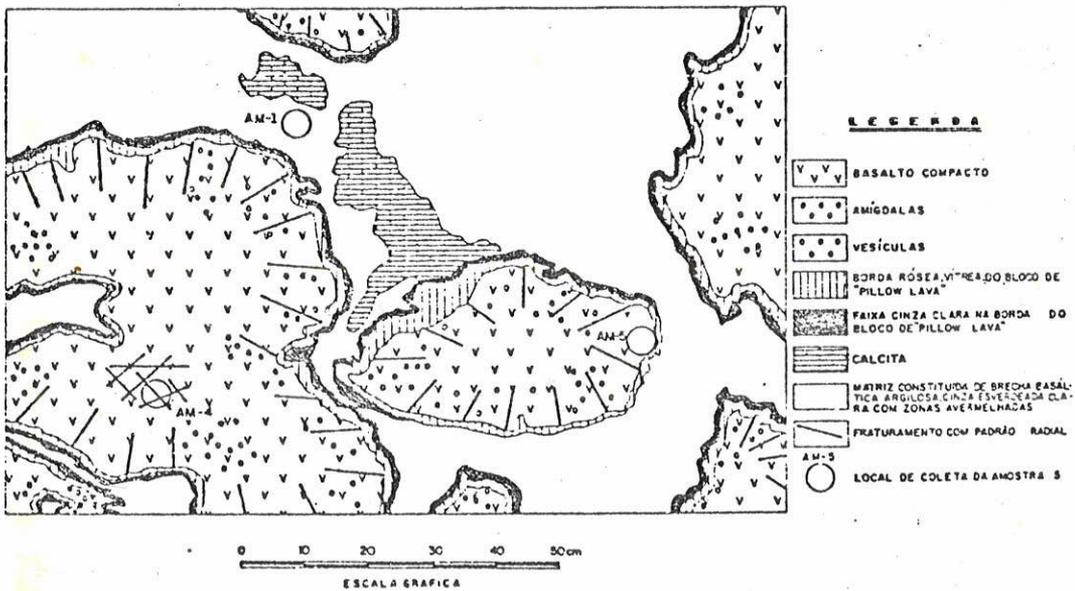


FIGURA 13 - Esquema detalhado da FOTO 13



FOTO 14 - Detalhe da matriz de brecha basáltica argilosa.
Local: parede jusante/esquerda do Poço de Drenagem.

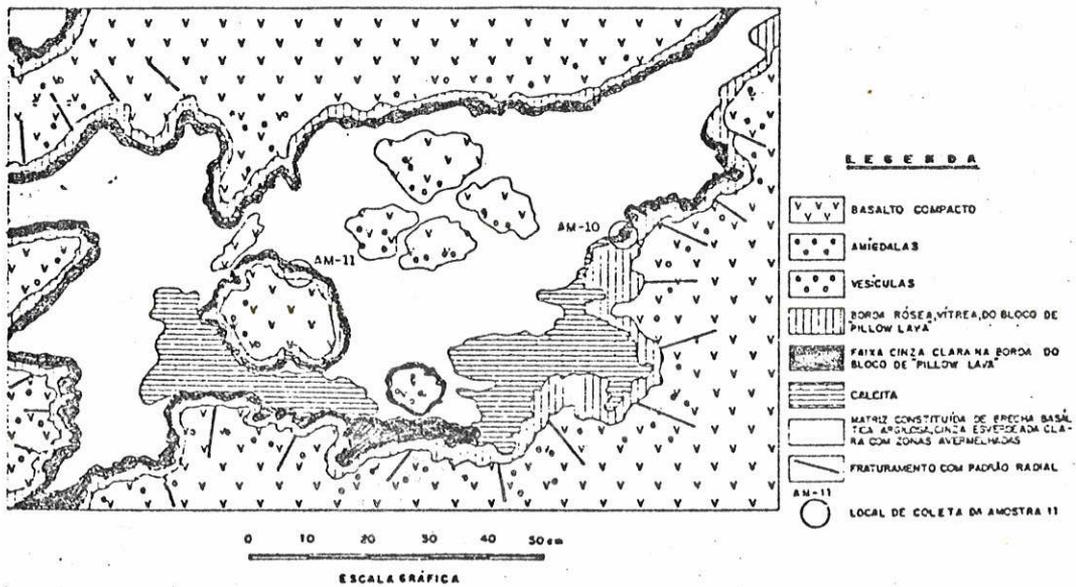


FIGURA 14 - Esquema detalhado da FOTO 14

zona de brecha basáltica. Três feições destas zonas podem ser observadas nas FOTOS 15 e 16, obtidas do registro da lâmina AM-18: basalto compacto a micro-amigdaloidal (A), borda vítrea (B) e brecha basáltica argilosa, hidrotermal (C).

Os subitens que se seguem resumem as características das quatro zonas anteriormente referidas.

a) Zona Central da "pillow"

Ela é constituída, essencialmente, de basalto compacto; sua coloração varia de um vermelho violáceo para um cinza acastanhado e esverdeado, muito comuns em blocos maiores do que 0,30 m. A coloração avermelhada é decorrente da presença de hidróxido e óxido de ferro na rocha.

A textura do basalto é intersertal com plagioclásio, grãos intersticiais de clinopiroxênio, vidro intersticial e pouca quantidade de opacos. As FOTOS 17 e 18 (fotomicrografias) mostram os aspectos texturais desta rocha.

A composição mineralógica principal consiste, em média, de 40% de cristais de plagioclásio (labradorita) idiomórficos e ripiformes, de 0,1 a 0,2 mm, e de 20% de cristais de clinopiroxênio (augita) subédricos, de 0,03 a 0,04 mm. Em menor proporção, mas com o importante indício de alteração hidrotermal, estão presentes: cerca de 15% de argilo-minerais (esmectita?), 10% de pseudomorfos de olivina (iddingsita - FOTOS 17 e 18), zeólitas e carbonatos. A FOTO 19 permite observar o basalto compacto seccionado por uma fissura preenchida por argilo-mineral. Constatou-se, ainda, a presença de vidro, hidróxido e óxido de ferro, além de cerca de 5% de opacos.

b) Zona próxima à borda da pillow

Esta zona é constituída por um basalto compacto com vesículas e amígdalas de cor cinza avermelhada. Ocupa uma faixa de 5 a 30 cm, rica em vesículas e amígdalas esféricas com 0,5 a 5 mm de diâmetro médio; formas elipsoidais ou alongadas também ocorrem com o eixo maior em posição paralela à borda da "pillow". Em direção ao centro do bloco, o número de vesículas e amígdalas diminui, ao contrário de suas dimensões, que aumentam para 2 e até 10 mm. A grande quantidade de hidróxido e óxido de ferro confere ao basalto uma forte coloração avermelhada.

A textura do basalto torna-se hialofítica nesta zona, com

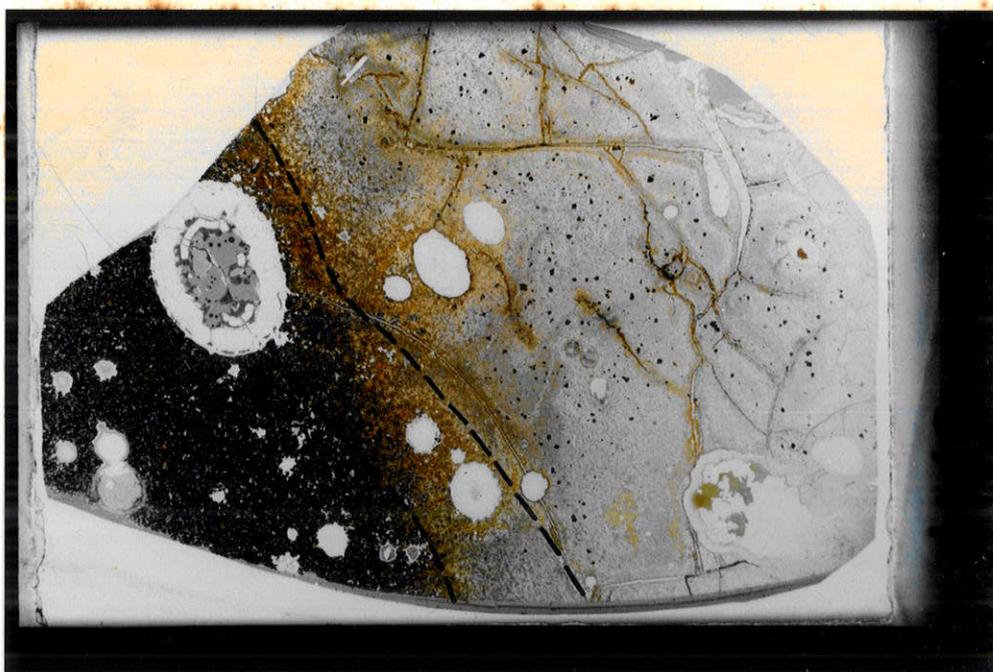


FOTO 15 - Aspecto do contato entre a "pillow" e a brecha basáltica argilosa. Lâmina AM-18 (SR-39; trecho de 45,68 m a 45,91 m). Aumento 3,5 x, sem polarizador.

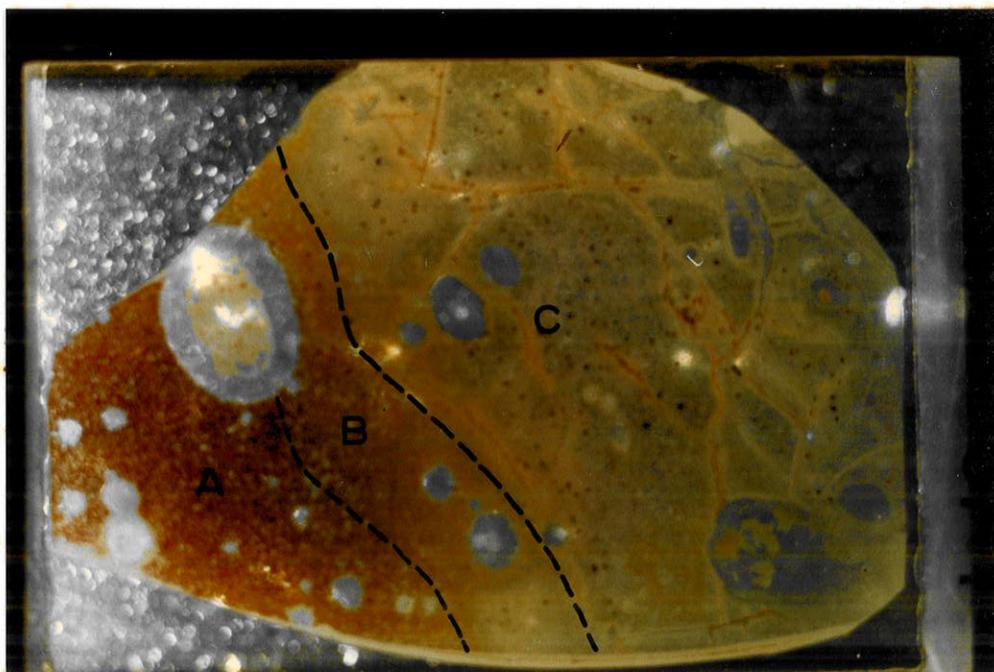


FOTO 16 - Aspecto do contato mostrando a borda vítrea. Lâmina AM-18 (SR-39; trecho de 45,68 m a 45,91 m). Aumento 3,5 x, com polarizador. A = basalto compacto a microamigdaloidal; B = borda vítrea; C = brecha basáltica argilosa (hidrotermal).

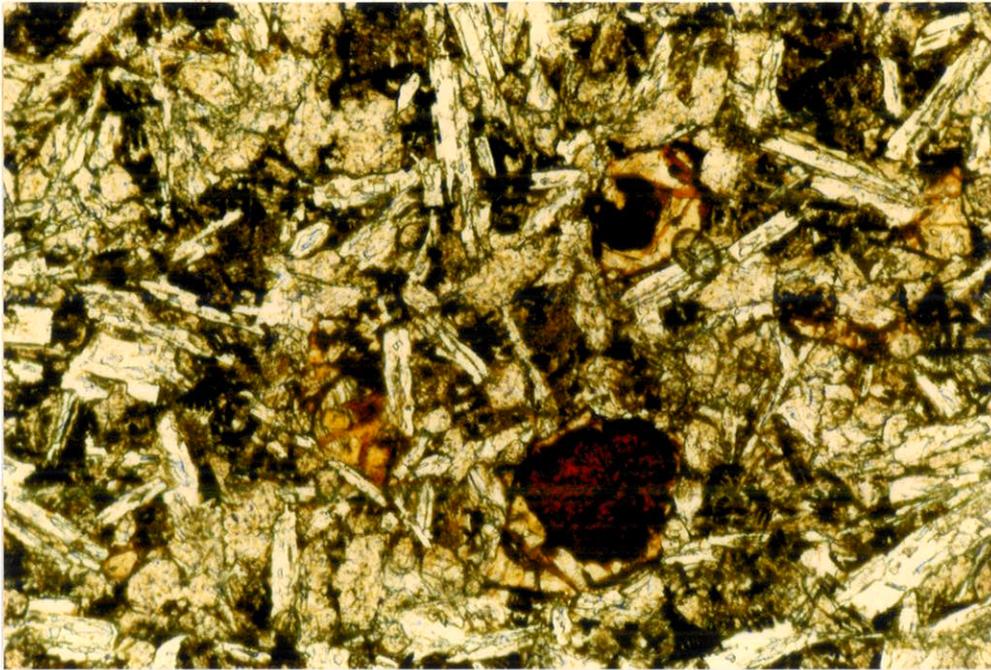


FOTO 17 - Aspecto da textura intersertal do basalto compacto da zona central da "pillow". Notar os cristais pseudomorfos de olivina (iddingsita) em vermelho. Lâmina AM-4. Aumento 150 x, nicóis paralelos.

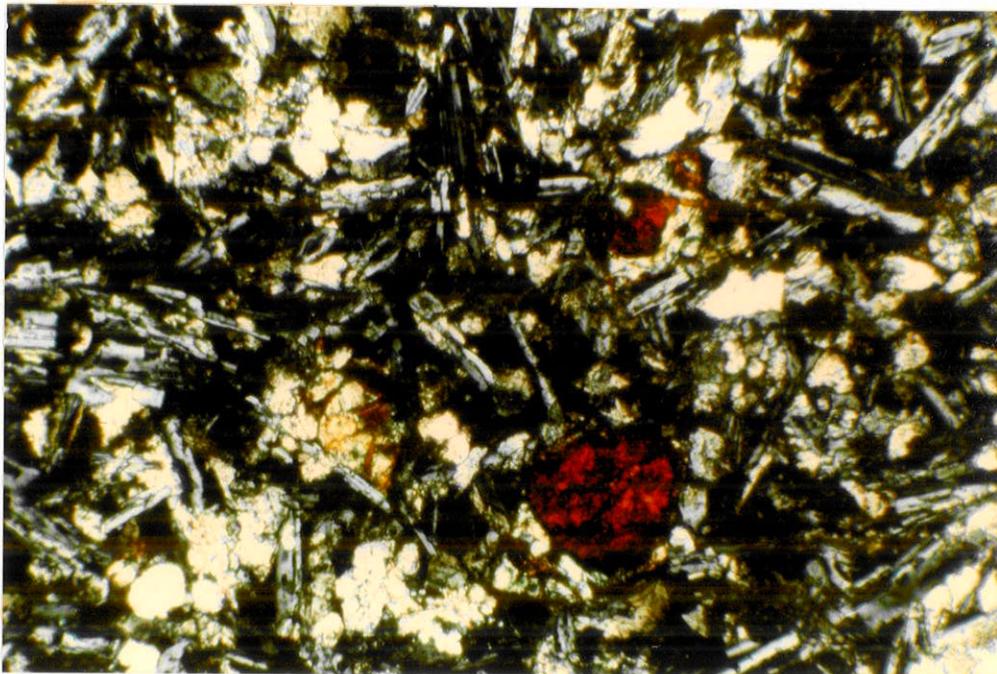


FOTO 18 - Idem acima, com nicóis cruzados.



FOTO 19 - Basalto compacto da zona central da "pillow" seccionado por uma fissura preenchida por argilo-mineral. Lâmina AM-4. Aumento 38 x, nicóis paralelos.

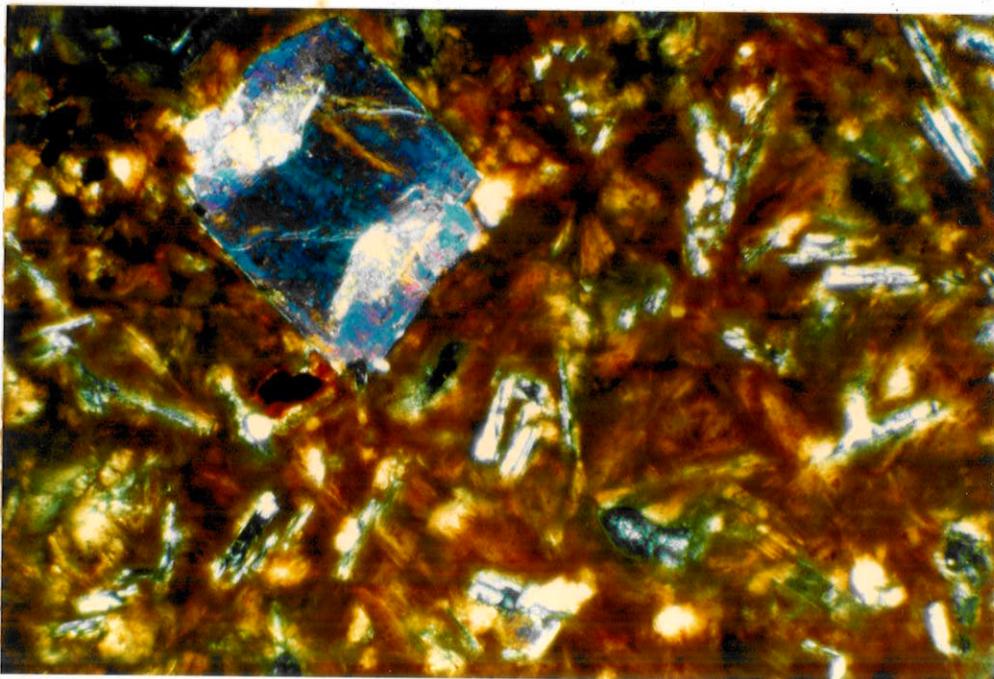


FOTO 20 - Basalto compacto com vesículas e amígdalas da zona próxima à borda da "pillow", com textura hialofítica a hialopilitica. Observar os micrólitos de plagioclásio dispersos em vidro devitrificado (cor avermelhada do hidróxido de ferro) e, na parte central, o cristal de piroxênio. Lâmina AM-18. Aumento 150 x, nicóis cruzados.

plagioclásio idiomórfico e ripiforme, além de grãos intersticiais de clinopiroxênio envoltos por vidro vulcânico.

O conteúdo mineralógico consiste, principalmente, de 40% de cristais idiomórficos de plagioclásio (labradorita) albitizado (0,1 a 0,2 mm), e de 20% de cristais subédricos de clinopiroxênio do tipo augita (de 0,03 a 0,04 mm). O vidro que engloba os minerais ocorre numa proporção de 35% e encontra-se em parte devitrificado e coberto por uma quantidade variável de hidróxido e óxido de ferro. A FOTO 20 mostra a textura hialofítica e os micrólitos de plagioclásio em vidro devitrificado.

Como acessórios tem-se a presença de pseudomorfos de olivina (iddingsita) e poucos opacos. Como indícios de alteração hidrotermal tem-se vidro devitrificado, iddingsita, argilo-minerais e carbonato.

c) Zona de borda da "pillow"

Nesta zona o basalto torna-se vesículo-amigdaloidal e microamigdaloidal, com uma menor quantidade de hidróxido e óxido de ferro, o que lhe confere uma coloração cinza esverdeada; a espessura desta faixa varia de 0,5 a 2,5 cm.

A textura é hialofítica a hialopilítica, com micrólitos de plagioclásio (labradorita) e poucos grãos intersticiais de clinopiroxênio em matriz vítrea.

A composição mineralógica é, predominantemente, de vidro na proporção de 40 a 50%, de cores pardo-esverdeado e verde amarelado; de 20 a 30% de cristais idiomórficos de plagioclásio albitizados (0,1 a 0,2 mm); e de 10 a 20% de cristais subédricos de piroxênio do tipo augita (0,03 a 0,09 mm). A FOTO 21 mostra os micrólitos de plagioclásio imersos na matriz vítrea. A FOTO 22 apresenta a textura hialofítica a hialopilítica desta zona e algumas formas esféricas vítreas e fraturadas concentricamente nas bordas e radialmente no interior. Esta feição poderia ser originária de microesferas de vidro vulcânico que se solidificaram prematuramente na lava e que durante o resfriamento (ou após) do derrame sofreram fraturamento por contração. O grau de alteração desta zona é menor do que o da zona descrita anteriormente.

Ocorrem, ainda, em menor proporção, argilo-minerais, hidróxidos de ferro, carbonato e pseudomorfos de olivina (iddingsita) totalizando não mais que 5% da rocha. Quase não.

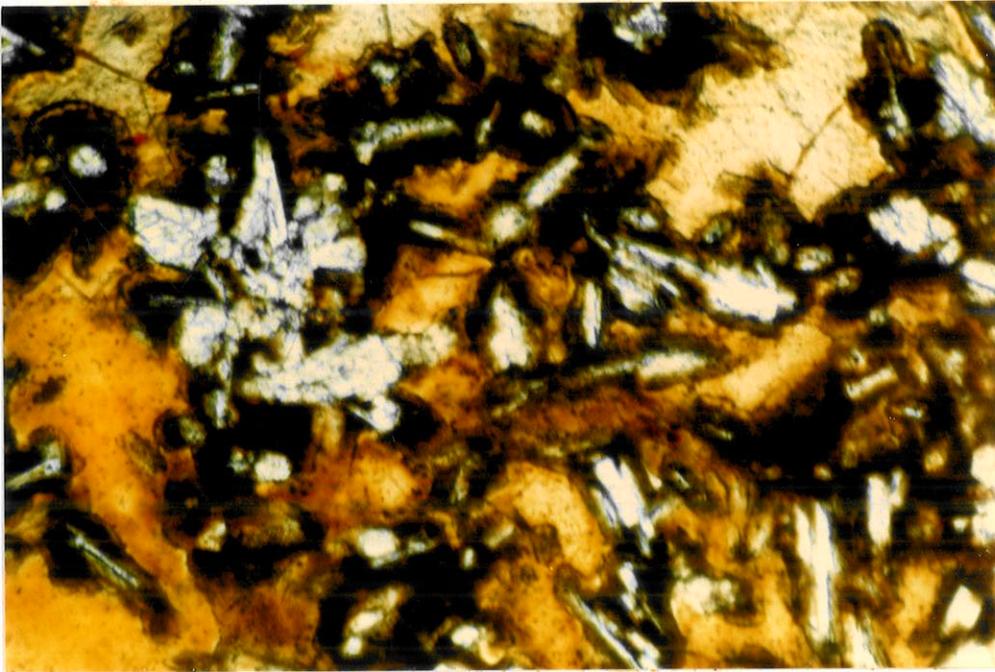


FOTO 21 - Aspecto da borda vítrea da "pillow" mostrando a
textura hialofítica a hialopilítica. Lâmina AM-18/SR-39 -
(45,68 m a 45,91 m). Aumento 150 x, nicóis paralelos.

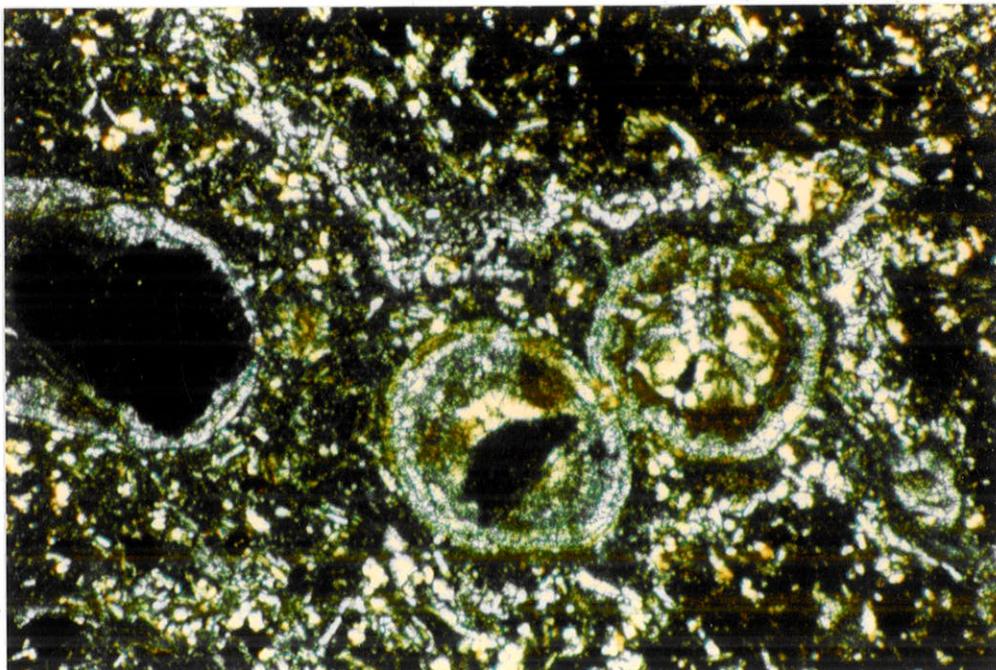


FOTO 22 - Aspecto da borda vítrea da "pillow" mostrando as
formas esféricas vítreas fraturadas e a textura hialofítica
a hialopilítica. Lâmina AM-18/39 (45,68 m a 45,91 m). Aument
to 38 x, nicóis cruzados.

existem minerais opacos nesta zona.

d) Zona da brecha basáltica argilosa (hidrotermal)

A partir da zona de borda da "pillow" os graus de fragmentação e de alteração tornam-se cada vez maiores em direção à brecha basáltica, que engloba os blocos de "pillow lavas". Compreendendo uma faixa de espessura variável (de 5 a 30 cm), a rocha encontra-se extremamente alterada, resultando em fragmentos angulosos de vários tamanhos (de milimétricos a centimétricos), de coloração verde pálida em matriz fina.

A FOTO 23 ilustra o aspecto microscópico da brecha basáltica argilosa com a borda dos fragmentos alterados para argilo-minerais (esmectita?) e os interstícios preenchidos por zeólitas e calcita. A FOTO 24 apresenta uma fotomicrografia mostrando a borda dos fragmentos extremamente alterados para argilo-minerais e "relictos" de micrólitos de plagioclásio (albitizado) em matriz argilosa, anteriormente constituída por vidro vulcânico.

Na porção superior do derrame II ocorre uma brecha basáltica calcária, que consiste macroscopicamente, de uma faixa brechada fortemente cimentada por carbonato, semelhante à brecha basáltica argilosa, porém menos alterada hidrotermalmente. A brecha possui fragmentos angulosos centimétricos avermelhados e alaranjados, com grande quantidade de vesículas e amígdalas (de 1 a 2 mm), preenchidas por zeólitas e carbonato.

A lâmina preparada deste material indicou que os fragmentos de basalto são constituídos de 30% de cristais idiomórficos de plagioclásios do tipo labradorita (de 0,1 a 0,2 mm), 20% de cristais subédricos de clinopiroxênio do tipo augita (de 0,03 mm) e 45% de vidro devitrificado e hidróxido de ferro; com participação menor, 5% de pseudomorfos de olivina (iddingsita) e argilo-minerais. Observou-se, também, algumas amígdalas preenchidas na sua base por material sedimentar fino (silte e/ou argila), e o restante preenchido por zeólitas (analcima e calcita).

Para complementar as informações sobre a brecha basáltica, buscou nas referências bibliográficas outros elementos das "pillow lavas" em ocorrências no Brasil Meridional.

Quando da visita a Usina Foz do Areia, Rio Iguaçu (PR), foram coletadas amostras da matriz que envolve as "pillow lavas"

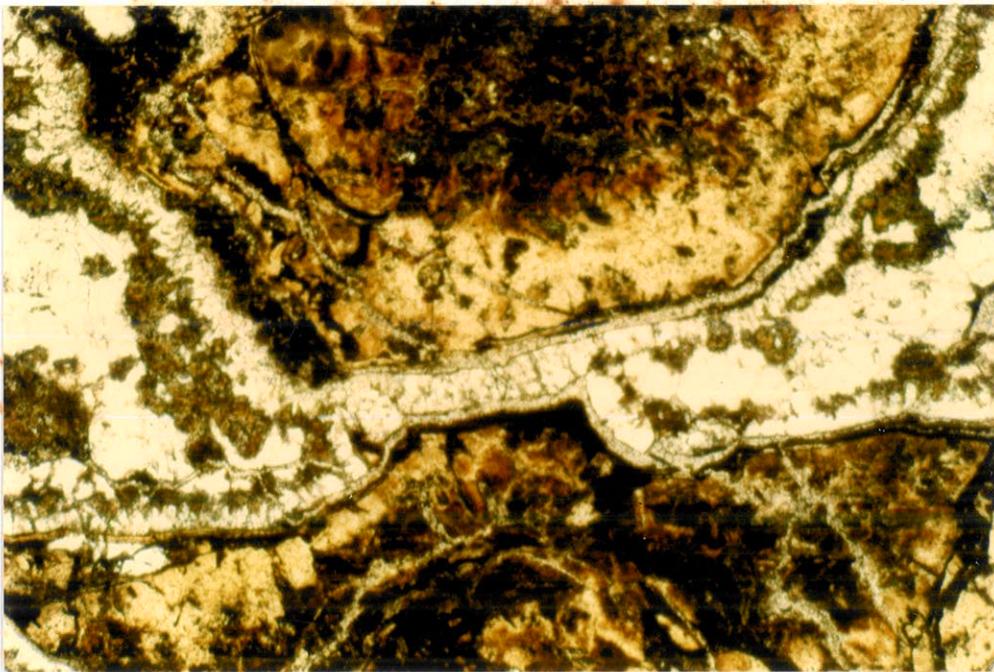


FOTO 23 - Aspecto da brecha basáltica argilosa (hidrotermal) mostrando as bordas dos fragmentos alterados para argilo-minerais e interstícios preenchidos por zeólitas e calcita. Lâmina AM-18/SR-39 (45,68 m a 45,91 m). Aumento 38 x, nicóis paralelos.

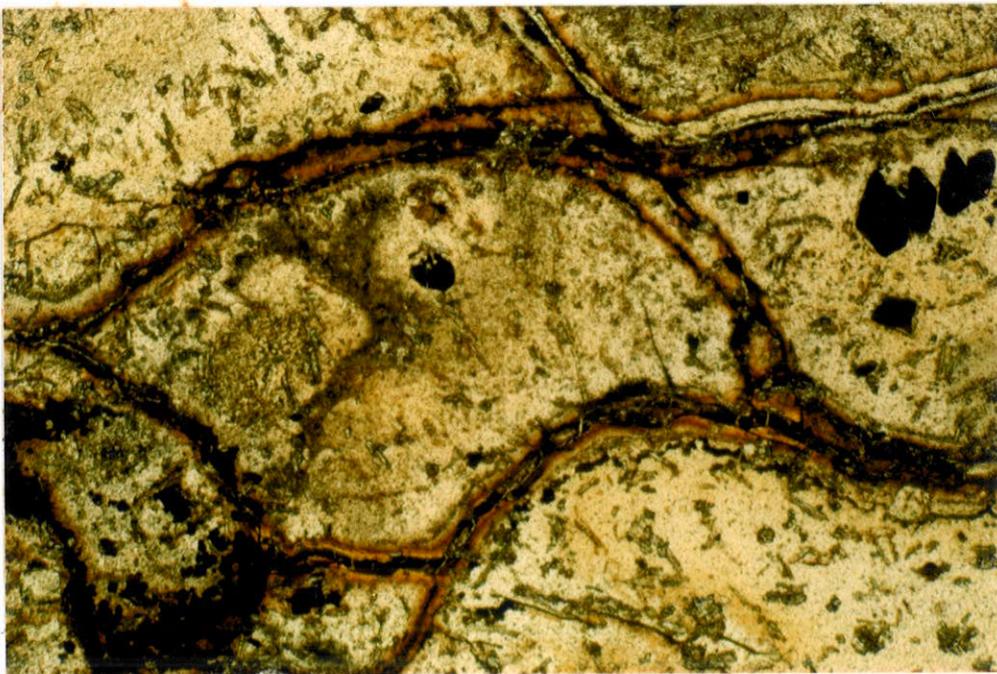


FOTO 24 - Detalhe da brecha basáltica argilosa (hidrotermal) próxima da borda vítrea. Observar micrôlitos de plagioclásio nos fragmentos da borda vítrea e a borda dos fragmentos alterados para argilo-minerais (esmectita?). Lâmina AM-19/SR-42 (41,42 m a 41,55 m). Aumento 38 x, nicóis paralelos.

descritas no trabalho de MARQUES FILHO et alii (1981). A lâmina deste material possui uma textura vítrea mais clástica, composta por fragmentos de vidro vulcânico (taquilito?) em contato com material clástico de granulação siltosa.

A brecha "basáltica" (vítrea) é composta de 70 a 80% de vidro vulcânico fragmentado em superfícies curvas, envoltos por 20 a 30% de argilo-mineral verde (celadonita?) e poucos opacos. O siltito é constituído, predominantemente, por quartzo e feldspato (60 a 70%) cimentados por material argiloso e zeólitas (10 a 20%); em menor proporção ocorrem as micas e os opacos.

Na "pillow" de metabasalto descrita por FIGUEIREDO et alii (1982) "...em lâmina delgada distingue-se fundamentalmente anfibólio, cumingtonita, esmectitas, epidotos, zoisita, pistacita e cristais amorfos de plagioclásio, em processo de saussuritização. Embora a epidotização seja intensa, reconheceu-se a textura ofítica original da rocha, no centro da "pillow", que preserva alguns fenocristais de plagioclásio. Na borda da "pillow" o epidoto pode apresentar-se em grandes cristais euédricos e os anfibólios também podem estar maiores sugerindo uma recristalização mais intensa".

Por outro lado, na lâmina delgada da "pillow" de Araguari (MG), FERREIRA (1985) descreveu as "pillow" como constituídas predominantemente por vidro, com poucos cristais de plagioclásio e piroxênio. Admite o autor que na superfície de contato com o sedimento, as vesículas que se abriram no momento do derrame foram preenchidas por este sedimento.

5.2.3 Resenha sobre as feições, gênese e implicações para as obras civis das "pillow lavas"

A ocorrência das "pillow lavas" basálticas em Nova Avanhandava mereceu uma análise criteriosa à medida que avançaram as etapas de edificação das obras civis; em determinado ponto, foi-lhe dispensado um tratamento especial tendo em vista a ocorrência geológica singular que é.

Desse modo, o estudo das "pillow lavas" foi segregado da análise dos derrames basálticos e suas descontinuidades (fraturas, juntas, contatos etc.) a fim de se registrar integralmente suas propriedades.

Neste sentido elas foram reunidas e sintetizadas em três conjuntos de dados, descritos a seguir:

a) Feições que caracterizam o derrame II como sendo de "pillow lavas"

As feições mais importantes que permitiram concluir sobre tal proposição foram:

- os corpos de basalto compacto possuem formas muito variadas: arredondadas, elipsoidais, esféricas, tabulares e alongados; também formas características de almofada, colchão, saco e mesmo irregulares;

- os corpos são individuais, isolados, sem conexão visível entre "pillow" e separados por brecha basáltica calcária ou argilosa de espessura variável;

- as dimensões variam de 0,20 a 2 m, sendo máxima a de 16 m; a média das dimensões é de 0,50 x 0,80 x 1,90 m com seção horizontal duas a três vezes maior que a vertical;

- "pillow" menores originadas da fragmentação de "pillow" maiores;

- "pillow" com dimensões maiores que o padrão médio são classificados como "megapillow" (DIMROTH et alii, 1978) e se acham na base do derrame;

- o maior comprimento das "pillow" está disposto segundo a direção aproximada do Rio Tietê neste trecho;

- a escavação do Poço de Drenagem revelou as "pillow" distribuídas de maneira irregular quanto aos seus tamanho e forma, sem um padrão uniforme;

- os blocos são compostos por basalto compacto esverdeado no centro, gradando para um basalto avermelhado próximo das bordas, numa faixa de 0,10 m;

- na borda dos blocos ocorre uma faixa cinza esverdeada, de 0,5 a 2 cm de espessura, separando a "pillow" da brecha basáltica argilosa ou calcária que a envolve;

- o exame microscópico revela que a variação de cor das "pillow" se deve à maior ou menor proporção de hidróxidos e óxidos de ferro na composição do basalto;

- a borda cinza esverdeada apresenta, através do exame microscópico, uma menor quantidade de hidróxidos e óxidos de ferro e uma proporção dominante de vidro vulcânico, caracterizando-se como uma borda vítrea;

- na faixa de 0,10 m nas bordas das "pillow" ocorre uma

concentração maior de vesículas e amígdalas, de 1 a 5 mm, com formas esféricas e/ou alongadas paralelamente à sua borda;

- as amígdalas encontram-se preenchidas por carbonato, calcedônia, zeólitas e argilo-minerais. Em algumas delas o exame microscópico revelou a presença de sedimento fino na sua base;

- algumas "pillow" apresentam juntas radiais que são características desta estrutura;

- a brecha basáltica que envolve todas as "pillows" possui uma espessura média de 0,10 m e é constituída por fragmentos angulosos do basalto compacto ou vesículo-amigdaloidal. Quando a brecha basáltica se mostrou sã, ela foi denominada de calcária, no caso de alterada hidrotermalmente ela foi chamada de argilosa;

- a brecha basáltica calcária, cinza avermelhada, encontra-se pouco fragmentada e possui matriz carbonática, cimentando firmemente os blocos de "pillow";

- a brecha basáltica argilosa (hidrotermal), verde-pálida, encontra-se extremamente fragmentada e alterada para argilo-minerais, cuja matriz é composta por argilo-minerais, calcita e zeólitas;

- o exame microscópico permitiu definir quatro zonas nos blocos das "pillow": (a) zona central da "pillow", constituída por basalto compacto; (b) zona próxima à borda do bloco, constituída por basalto vesículo-amigdaloidal com grande quantidade de hidróxidos e óxidos de ferro; (c) borda da "pillow", constituída por uma zona vítrea com grande quantidade de vidro vulcânico, são ou devitrificado; (d) brecha basáltica argilosa constituída por fragmentos da borda vítrea, alterados hidrotermalmente para argilo-minerais;

- o exame microscópico da brecha basáltica calcária mostrou fragmentos de basalto vesículo-amigdaloidal com grande quantidade de vidro vulcânico (devitrificado) fortemente cimentado por calcita; e

- na borda vítrea de algumas amostras o vidro devitrificado desenvolve o hábito fibroso ao redor dos cristais de plagioclásio, semelhante ao descrito por DIMROTH et alii (1978).

b) Considerações sobre o ambiente de formação das "pillow lavas"

De acordo com as observações do item 5.2, quando se admitiu a Hipótese 3 para gênese do derrame II, devem ser feitas as

seguintes complementações:

- o derrame I, após seu resfriamento e solidificação, teria sofrido um processo de alteração em sua porção superior originando-se uma crosta de aspecto escoriáceo, conforme relatam GUIDICINI & CAMPOS (1968), sob a influência de um ambiente aquoso (lago?), onde os sedimentos se depositaram penetrando nas fendas e cavidades existentes. Neste processo os sedimentos teriam englobado fragmentos de basalto vesículo-amigdaloidal, dando origem ao que se chamou de brecha basáltica siltosa;

- admite-se que as "pillow" ter-se-iam desenvolvido a partir do fluxo de lavas subaéreas penetrando em um lago (?) raso, a exemplo do que escreveu FISKE (1969). O fluxo de lavas teria sido contínuo, formando-se sucessivos níveis de "pillow" até o preenchimento total do lago. O contato entre os derrames II e III, através de um delgado horizonte vesicular favorece esta proposição. Assim, as "pillow" de Nova Avanhandava seriam, na verdade, um evento inicial do próprio derrame III;

- o movimento da lava sobre vários níveis de "pillow" já formados teria ocasionado a fragmentação de sua superfície vítrea. Esta brecha entre os blocos teria sofrido efeitos de soluções hidrotermais pene-contemporâneas ao derrame III;

- a brecha basáltica calcária mostra influência genética de soluções ricas em carbonato, uma vez que seu cimento é essencialmente calcita;

- a brecha basáltica argilosa sofreu efeitos de zeolitização, constituindo assim seu cimento por argilo-minerais, carbonato e zeólitas;

- a presença de óxidos e hidróxidos de ferro próximo às bordas das "pillow" indica que o processo de oxidação era mais intenso nesta região, talvez por estar em contato direto com o meio ambiente por ocasião da sua formação (água e/ou ar); e

- nos locais onde o derrame III está em contato direto com o derrame I, acredita-se que as lavas do derrame II podem não ter encontrado as condições ideais para a formação das "pillow lavas" como estar, por exemplo, próximo às margens do lago;

c) Comportamento geotécnico do derrame II e suas implicações no projeto das Obras Cívicas.

Todo o conjunto de "pillow lavas" de Nova Avanhandava foi

observado dentro das necessidades de projeto de fundação das estruturas de concreto da Casa de Força. Alguns resultados destes estudos são:

- o derrame II tem uma permeabilidade muito baixa. Segundo estudos do IPT (1982), a grande maioria dos ensaios de permeabilidade indicou resultados inferiores a 10^{-5} cm/s (cerca de 75% dos resultados), sendo que 62% são inferiores a 10^{-6} cm/s, 18% situam-se entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s e os restantes maiores do que 10^{-3} cm/s. Assim as preocupações do ponto de vista hidrogeotécnico não foram relevantes;

- as características geotécnicas dos contatos entre os derrames I/II e II/III que guardam relações de vizinhança com o conjunto das "pillow lavas" já foram discutidas no item 4.6; e

- a feição das "pillow lavas" lembra um enrocamento com blocos arredondados e cimentados entre si. Apesar da matriz que cimenta os blocos ser constituída por argilo-minerais, observou-se que a sua distribuição é extremamente irregular, indicando uma grande possibilidade dos veios brechados não serem contínuos e sub-horizontais. As considerações sobre o comportamento geotécnico deste material rochoso, baseadas na estrutura das "pillow lavas", permitiram decidir sobre a permanência do derrame II em seu estado natural, mesmo servindo como fundação das estruturas de concreto da Casa de Força.

6 PALEOCANAL

Na fase de Projeto Executivo durante os trabalhos de escavação para a implantação das estruturas de concreto, mais especificamente o Vertedouro de Superfície, o Muro de Contenção Esquerdo e a Bacia de Dissipação, foi detectado um paleocanal no Rio Tietê.

A ocorrência desta feição geomorfológica exigiu uma série de adaptações aos elementos do Projeto Básico em função do qual se processaram vários estudos e tratamentos de fundação das obras civis.

6.1 Investigações Geofísicas

Durante os estudos da Fase de Viabilidade foram executados diversos levantamentos geofísicos pelo método de sísmica de

refração.

Nos trabalhos desenvolvidos pela Companhia Brasileira de Geofísica-CBG (1976), foi adotado o método inverso nas proximidades do leito do rio. Este método consiste no levantamento de uma seção transversal ao rio, colocando-se os geofones nos lugares previstos para as detonações. Os resultados obtidos indicaram velocidades de propagação das ondas para o aluvião (cimentado e saturado) de 1800 m/s, enquanto que para a rocha alterada foi de 3000 m/s; destes valores foram descontados os efeitos da espessura de lâmina d'água sobre os tempos lidos nos sentidos direto e inverso. Assim, nas interpretações da geologia do fundo do Rio Tietê através das seções sísmicas cogitou-se da existência localizada de uma pequena espessura de rocha alterada, contida em maciço rochoso sã, sendo ambos recobertos por uma camada de aluvião saturado. As seções levantadas mostraram um baixo relativo no topo rochoso, com uma largura de 30-70 m, um comprimento pesquisado de 580 m e com o fundo próximo da cota 306 m.

Na fase de Projeto Básico foram programadas e executadas cinco sondagens rotativas (SR-32, SR-33, SR-34, SR-35 e SR-36) na área do baixo relativo. Elas indicaram um topo rochoso próximo da cota 318 m. Mais tarde verificou-se que os pontos sondados não coincidiram com as cotas mais baixas do paleocanal. A FIGURA 15 apresenta o traçado aproximado do paleocanal e a localização das sondagens executadas.

6.2 Investigações Geológicas

O abaixamento do topo rochoso detectado pela sísmica de refração, mostrou tratar-se de um paleocanal quando se concluíram os trabalhos de desvio do curso do Rio Tietê. Esta feição localizada próxima da margem direita, tinha seu eixo longitudinal paralelo ao curso atual do rio e o comprimento máximo pesquisado de 450 m, mostrando seguramente que tem continuidade a montante e a jusante da área de construção da barragem. A largura medida foi em torno de 25 m; outras tentativas de medidas foram prejudicadas pelos trabalhos simultâneos de escavação em rocha. A cota média do fundo do paleocanal (em torno da cota 308 m), permitiu deduzir como 12 m a sua profundidade. No Relatório apresentado pelo IPT (1982) atribuiu-se a cota 302 m para o fundo do paleocanal, um pouco diferente das obtidas por método geofísico e observação de campo. É admissível que se tenha confundido esta cota com a

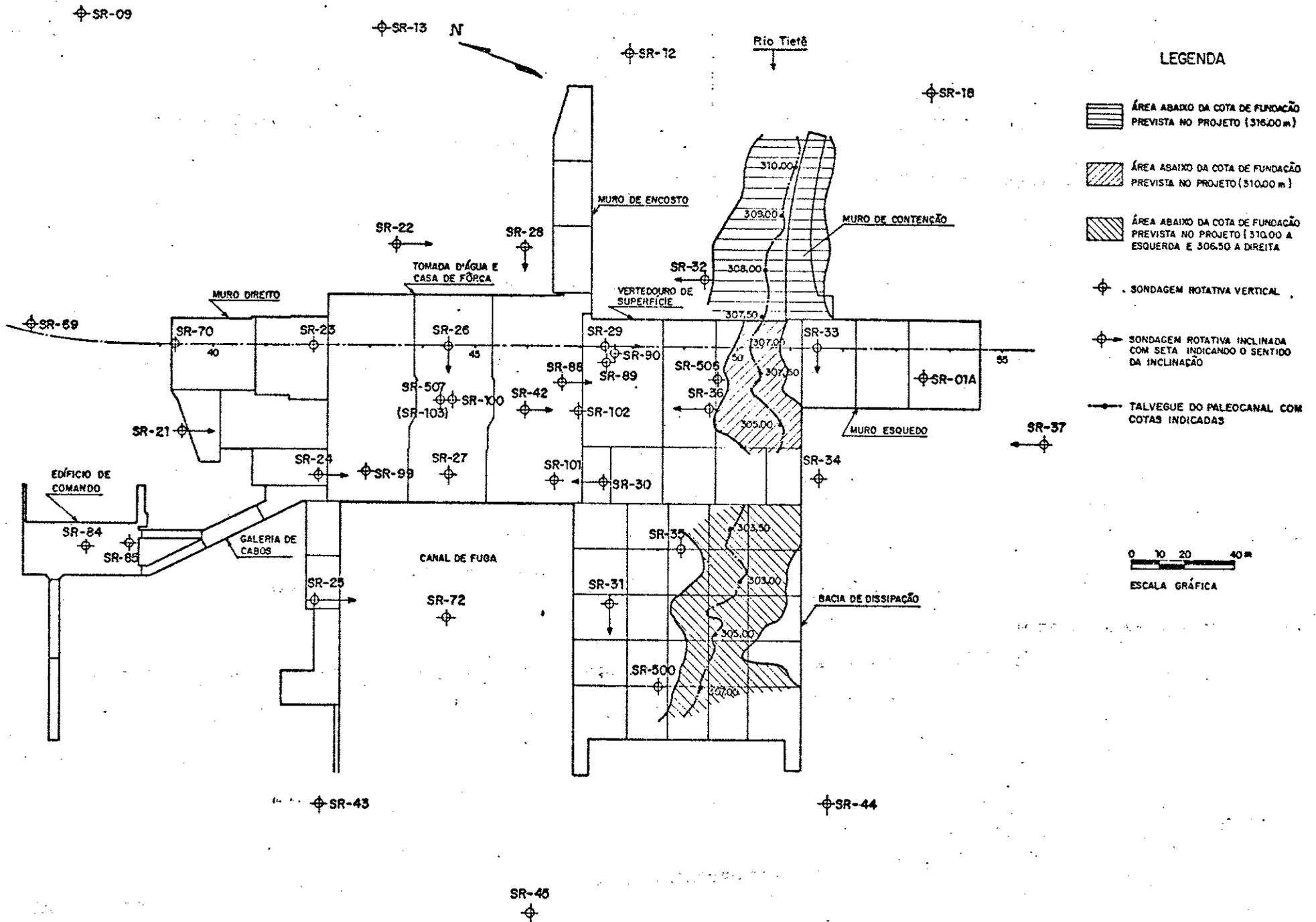


FIGURA 15 - Planta de localização do traçado aproximado do paleocanal (Modificado de PALAZZO NETO et alii, 1982)

das escavações para a implantação do Vertedouro de Superfície. A FIGURA 16 apresenta o desenvolvimento do paleocanal em um bloco diagrama contendo suas relações com a geologia local.

O Rio Tietê, na região do paleocanal, escavou o basalto compacto pertencente ao núcleo do derrame III e interpretou as juntas das cotas 310 e 305 m. Após a remoção do aluvião observou-se a configuração do topo rochoso em vários patamares, lembrando as atuais cachoeiras existentes em basalto. Foram registradas, também, feições como marmitas, pequenas cavernas de erosão e estrias de corrente (FOTOS 25 e 26).

A superfície rochosa entalhada pelo paleocanal encontrava-se totalmente preenchida por um depósito aluvionar de idade pleistocênica. Este depósito era constituído por conglomerados, com alguns níveis arenosos, de textura clástica (FOTO 26). Segundo a classificação de Wentworth, as amostras analisadas acusaram: blocos com seixos e grânulos (40%) de quartzito e basalto; areia grossa a fina (30-40%) constituída por quartzo, feldspato alcalino, sílica (microcristalina); argilo-minerais, quartzito e minerais pesados (turmalinas, estauroлита, granada) e cimento carbonático (20-30%). A difratometria de raios-X do cimento carbonático acusou essencialmente calcita.

Admitindo-se a hipótese de erosão remontante por curso d'água para o estabelecimento do paleocanal, a evolução da antiga cachoeira poderia estar associada a combinação dos fraturamentos verticais (representados pela disjunção colunar do basalto compacto cinza escuro, de colunas hexagonais bem desenvolvidas) e horizontais das juntas das cotas nominais 305 e 310 m.

Este tipo de feição geomorfológica foi estudado por ARID & LANDIM (1967) para a Cachoeira de Marimondo, no Rio Grande (SP/MG). Estes autores consideram que "... a tectônica epirogenética pós-cretácea, responsável pelo rejuvenescimento que está sofrendo a maior parte dos rios, deve ter contribuído também para o desenvolvimento de canais dessa natureza". Na oportunidade em que discutiram a origem, os autores relataram que não encontraram qualquer vestígio de falhamento e que a hipótese de aderimento é bem mais aceitável; e sugerem "... sua origem e desenvolvimento, a partir de uma retomada de erosão pela drenagem, condicionada pela diferença textural dos basaltos, aliada ao sistema de diaclasamento presente".

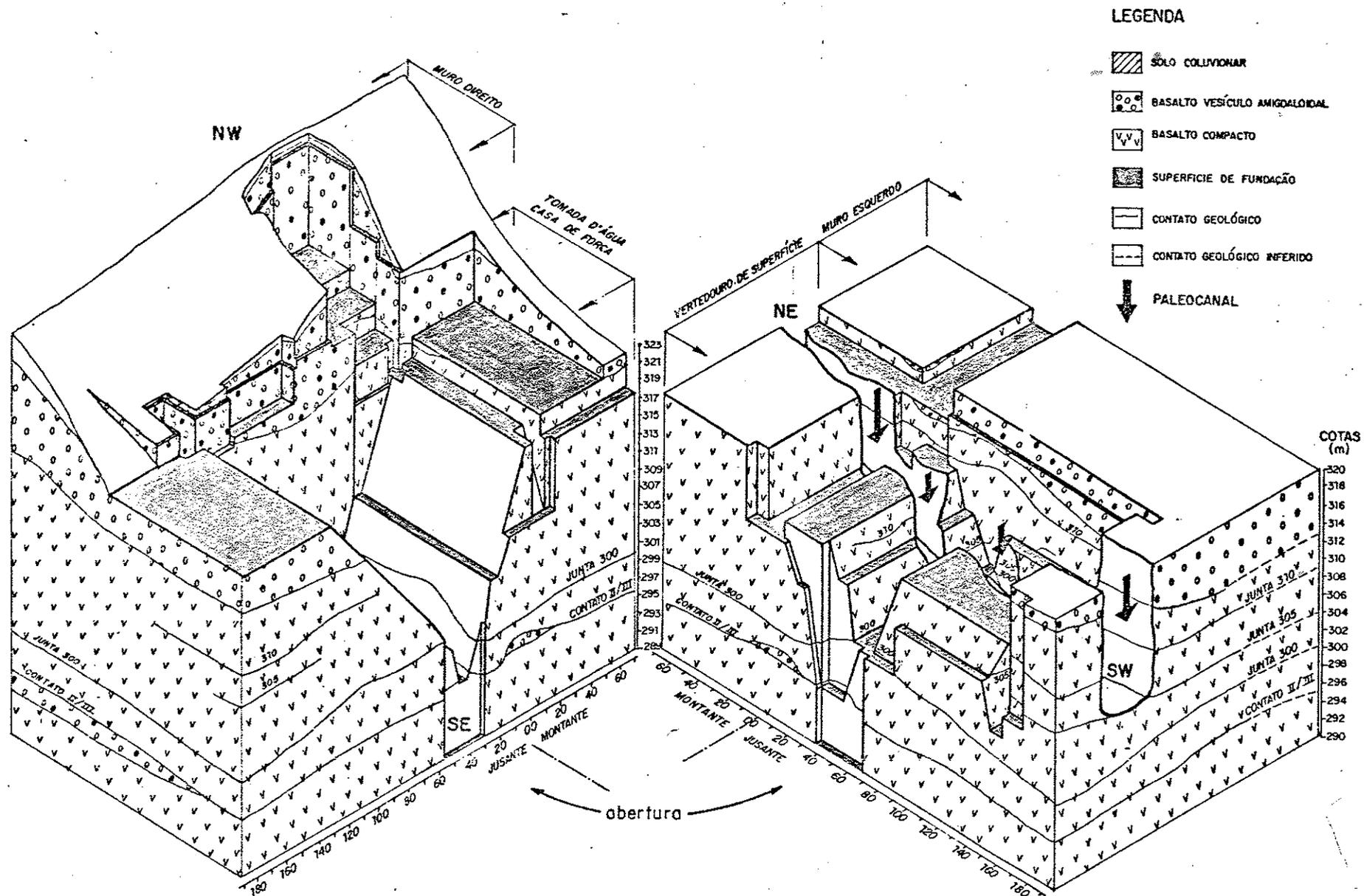


FIGURA 16 - Bloco diagrama representando os maciços rochosos de Nova Avanhandava, a localização do paleocanal e os limites das fundações das estruturas de concreto (PALAZZO NETO et alii, 1982)



FOTO 25 - Aspecto de uma marmitta to-
talmente preenchida com material
aluvionar. As paredes são de basal-
to compacto do derrame III. (Fonte:
PALAZZO NETO et alii, 1982).



FOTO 26 - Aspecto de uma marmitta preenchida com material
aluvionar. Notar o nível mais arenoso evidenciado pela
maior umidade local. (Fonte: PALAZZO NETO et alii, 1982).

Para PALAZZO NETO et alii (1982) em Nova Avanhandava "... a gênese do paleocanal e seu material de preenchimento devem estar intimamente ligadas a oscilações climáticas. A deposição deve ter ocorrido em um clima semi-árido, com estações secas prolongadas e bem demarcadas, sincrônico a um dos eventos glaciais identificados nas zonas de maiores latitudes. Os argumentos que sustentam esta hipótese são: a composição granulométrica da fase de morfogênese mecânica; a imaturidade mineralógica, indicativa de um intemperismo químico reduzido; e a elevada percentagem de cimento carbonático, é muito provavelmente de deposição singenética".

6.3 Síntese sobre o Paleocanal e suas Implicações para as Obras Civis

O fato da identificação do paleocanal somente durante o Projeto Executivo impediu que se conhecessem com antecedência as características do material aluvionar que o preenchia. Assim, não se dispunha de tempo no cronograma do projeto para a execução de ensaios que indicassem as propriedades geológicas e geotécnicas deste sedimento.

As alternativas adotadas foram a remoção completa do material aluvionar, a execução de algumas escavações adicionais em rocha e aplicações de concreto-massa, concreto-estrutural e enrocamento, estas três últimas no sentido de restabelecer as cotas para a fundação das estruturas da barragem.

A seguir são descritas as diversas opções adotadas para cada uma das estruturas da obra principal, bem como em algumas obras temporárias e de apoio à construção.

6.3.1 Região do muro de contenção esquerdo

Esta estrutura foi projetada para conter o pé do talude do enrocamento de abraço do Muro de Transição Esquerdo.

Segundo PALAZZO NETO et alii (1982) "... este muro, construído em concreto-massa tinha sua fundação prevista para a cota 316 m... a rocha adequada para a fundação foi encontrada na cota 306 m, exigindo, portanto, o preenchimento com concreto-massa até a cota inicialmente prevista, consumindo um volume de 5957 m³" (FOTO 27).

A FIGURA 17, no seu lado direito, mostra uma seção \overline{EB} através da fundação do muro, indicando a cota 307,50 m como o topo rochoso encontrado, bem como a reconstituição com concreto-

massa e o preenchimento com enrocamento para o pátio de serviços na cota 320,50 m.

Ambas, a FOTO 27 e a FIGURA 16, ilustram bem os contornos exigidos para a edificação do Muro de Contenção Esquerdo em função da existência do paleocanal.

6.3.2 Região dos vertedouros de superfície

A escavação dos três blocos dos Vertedouros de Superfície previa, no sentido de montante para jusante, patamares nas cotas 312, 310 e 304,50 m; este último, com a recomendação expressa de ultrapassar a junta da cota nominal 305 m. Com a ocorrência do paleocanal, no bloco VS-3, a rocha adequada para a fundação situou-se entre as cotas 307 e 305 m, por outro lado, o exame das condições de engaste da estrutura na fundação, efetuado pelo Projetista não se mostrou suficientemente adequado. A solução adotada foi uma escavação adicional, a montante do eixo da barragem, na forma hexagonal (212 m^2), até a cota 306 m, para aumentar o engastamento do VS-3.

Segundo PALAZZO NETO et alii (1982), "... o preenchimento desta escavação adicional e a recomposição do perfil até o topo rochoso previsto foi feito com concreto-massa, consumindo um volume de 3819 m^3 ".

Nas fundações das estruturas de concreto dos Vertedouros de Superfície estavam previstas cortinas de injeção e drenagem. A ocorrência do paleocanal coincidindo com a galeria de montante, exigiu algumas soluções complementares como a instalação de tubos de espera mais compridos, uma vez que o topo rochoso ficou em cotas topográficas mais baixas; na galeria de jusante foram suprimidos alguns tubos na forma de leques das injeções de calda de cimento.

Nos estudos desenvolvidos pelo IPT em 1982 foi alertado que o paleocanal do ponto de vista de percolação de água, poderia tornar-se importante, pois corta as descontinuidades das cotas 305 e 310 m, constituindo-se em pontos de entrada ou saída de água dos maciços rochosos. No local da barragem, a remoção total dos depósitos aluvionares e a sua substituição por concreto-massa minimizou tal preocupação impedindo o fluxo de água.

A FIGURA 17, em seu lado esquerdo, mostra uma seção AA pelo bloco VS-3 mostrando o nível do topo rochoso encontrado, a linha de escavação prevista em projeto e a escavação adicional para o

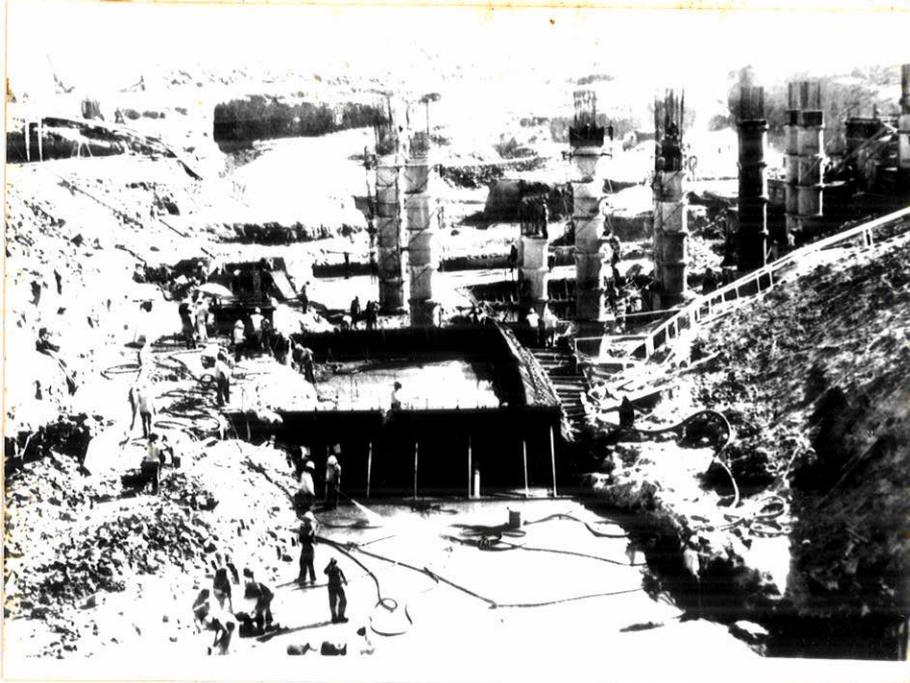


FOTO 27 - Trabalhos de concretagem do Muro de Contenção Esquerdo e da ponte de sustentação dos trilhos dos guindastes. Vista de montante para jusante no eixo do paleocanal. (Fonte: PALAZZO NETO et alii, 1982).

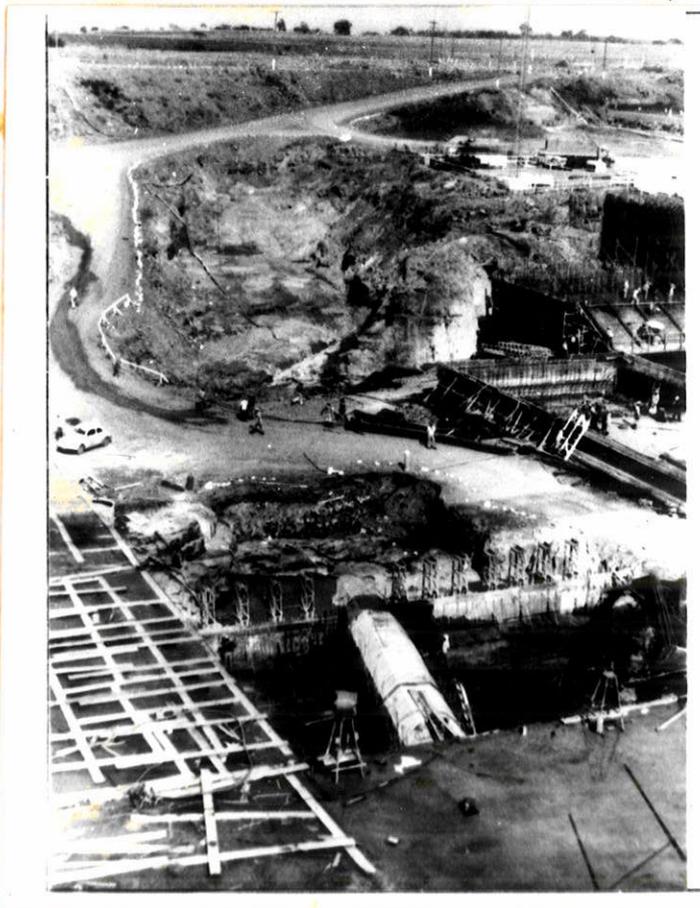


FOTO 28 - Vista de montante para jusante mostrando a continuidade do paleocanal. Notar a galeria em construção no local da Bacia de Dissipação. (Fonte: PALAZZO NETO et alii, 1982).

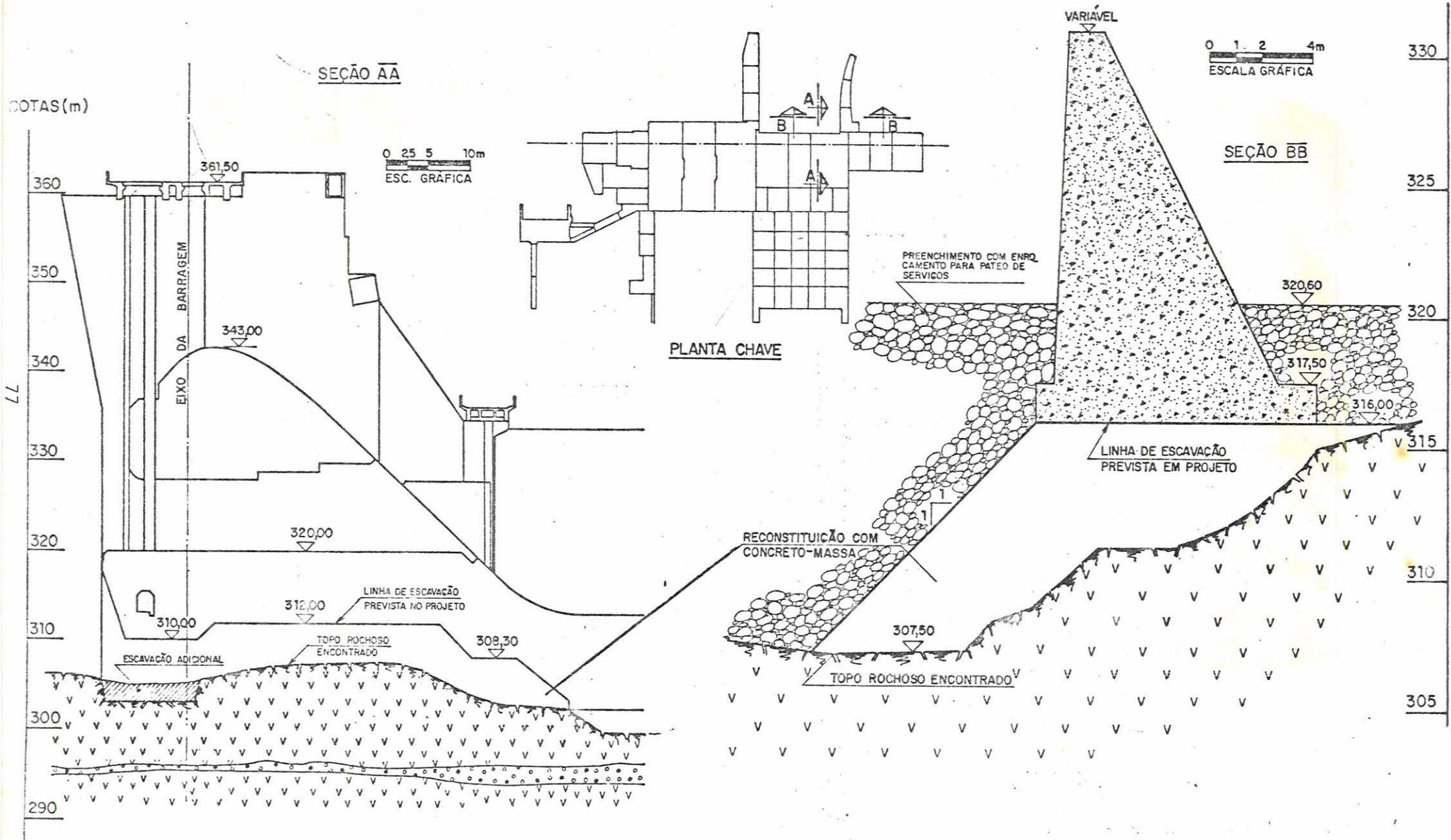


FIGURA 17 - Seções transversais ao eixo das estruturas do Vertedouro de Superfície e Muro de Contenção Esquerdo, com indicação das medidas de consolidação de suas fundações (Modificado de PALAZZO NETO et alii, 1982).

engaste da estrutura.

6.3.3 Região da bacia de dissipação

A Bacia de Dissipação compreende a região imediatamente contígua e a jusante dos Vertedouros, e é constituída pela Laje, Dente de Dissipação (ambas em concreto) e uma porção em rocha mais a jusante. Cada segmento destes é submetido a esforços diferentes quando se processo a escoamento de água pelos Vertedouros.

No local da Laje, a escavação preconizada na fase do Projeto Básico era um patamar central na cota 311 m e dois rebaixos laterais na cota 308 m, para construção dos Muros da Bacia de Dissipação. O paleocanal coincidia com toda a região central esquerda da Laje, com uma largura de 20 m e cotas de fundo entre 303 e 305 m. Esta situação conduziu a mudança no projeto. A solução encontrada foi a de otimização, com a construção de uma galeria de drenagem sob a Laje, permitindo o acesso aos drenos de meia-cana do contato concreto/rocha. Esta solução mostrou-se economicamente mais interessante que a construção das galerias no interior dos muros. O restante do topo rochoso foi preenchido com concreto-massa (FOTO 28).

No local do Dente de Dissipação o Projeto Básico previa um aprofundamento das escavações na cota 308 m. A nível de Projeto Executivo optou-se por um rebaixamento desta cota para o nível 304 m; isto permitiu um adequado engaste da estrutura e o restante foi preenchido por concreto-massa.

No local a jusante da Bacia foram efetuados dois tipos de tratamento: no primeiro caso, até cerca de 20 m do paramento de jusante do Dente de Dissipação, o topo rochoso foi reconstituído por concreto-massa até a cota 311 m. A escavação adicional do Dente (308 para 304 m) e a recomposição com concreto implicaram o volume adicional de 2.663 m^3 ; no segundo, mais a jusante do primeiro, foi efetuada uma escavação de 3.750 m^3 para adequar o topo rochoso remanescente a um novo perfil hidráulico.

A FIGURA 18 mostra, na sua parte superior, a seção \overline{AA} , pelo Dente de Dissipação, onde estão indicadas a escavação adicional e a reconstituição do topo rochoso. Na parte inferior, na seção \overline{BB} , estão indicados os Muros, a Laje, a galeria de acesso/drenagem e a recomposição do topo rochoso.

Como se depreende das observações da Bacia de Dissipação, os contornos aos problemas decorrentes da presença do paleocanal.

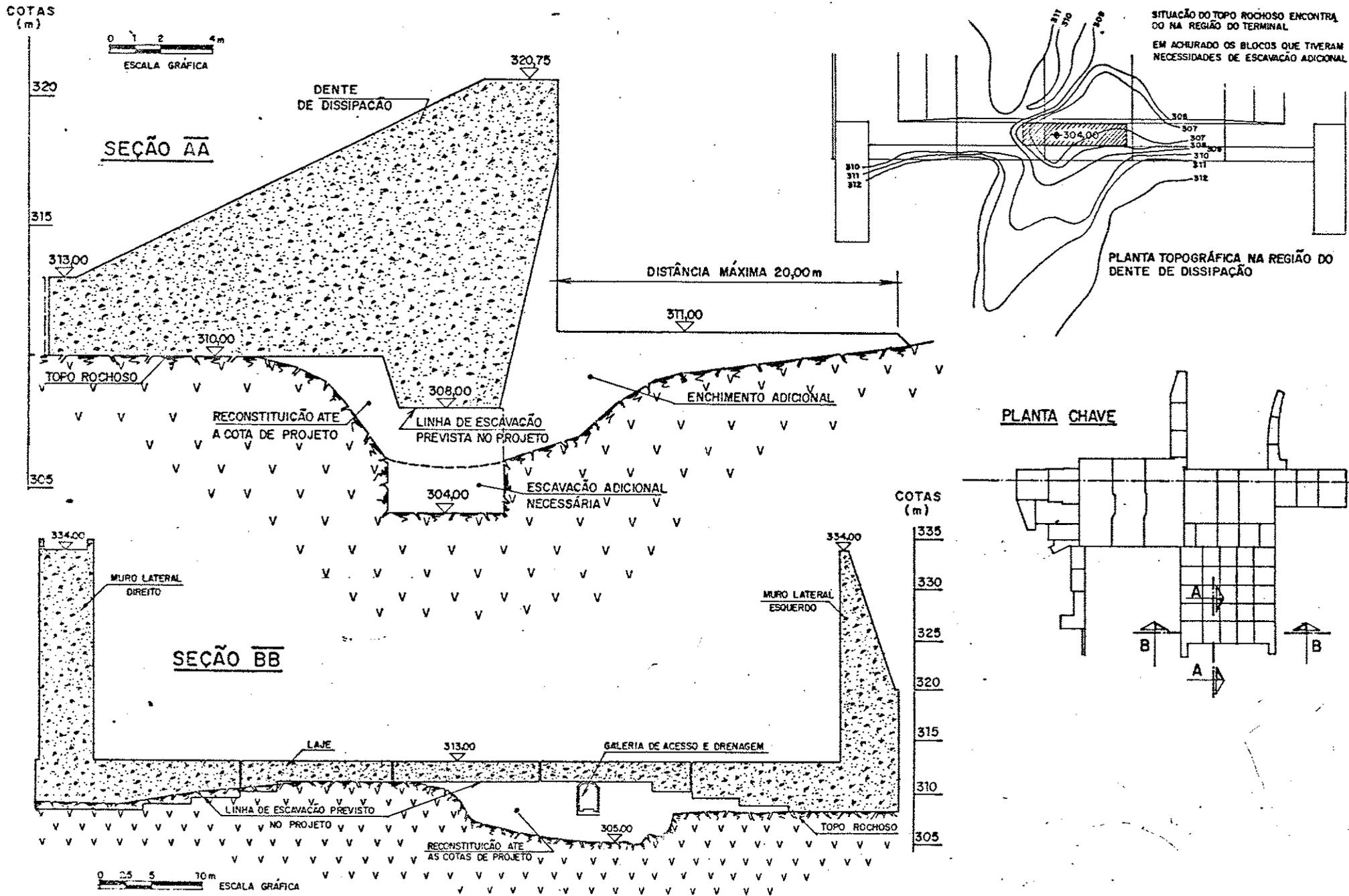


FIGURA 18 - Seções transversais ao eixo das estruturas do Dente e da Laje da Bacia de Dissipação (Modificado de PALAZZO et alii, 1982)

foram específicos a cada segmento da estrutura.

6.3.4 Locais das obras temporárias e de apoio

As obras temporárias e de apoio que sofreram a interferência do paleocanal foram: a ensecadeira da primeira etapa de desvio do curso do rio, os trilhos dos guindastes de montante e o pátio de serviços a montante do Vertedouro.

Para execução da ensecadeira da primeira etapa, no seu tramo de montante, foram necessários intensos trabalhos de dragagem sob uma lâmina d'água superior a 10 m. A remoção da areia tornou-se fundamental para se conseguir a vedação necessária da ensecadeira. O controle dos trabalhos de construção foi realizado por mergulhadores, antes da liberação das fundações para o lançamento de aterro submerso.

Quanto ao assentamento dos trilhos dos guindastes de montante, foi necessária a construção de uma ponte de concreto estrutural com 49 m de comprimento, e altura máxima dos pilares de 9,30 m. A finalidade dos guindastes era dar apoio durante a construção das estruturas de concreto. No local onde os pilares coincidiram com a recomposição do topo rochoso efetuada no Muro de Contenção Esquerdo, eles ficaram embutidos na estrutura (FOTO 27).

Para o pátio de serviços a montante do vertedouro, na área de ocorrência do paleocanal, foi efetuada a recombinação das cotas originais com enrocamento destinado ao bota-fora (depósito dos rejeitos rochosos) da obra.

As observações sobre o paleocanal, identificado apenas na fase de Projeto Executivo, permitiram outras avaliações que não as essencialmente geotécnicas, resumidas a seguir:

- ficou evidenciado que o Rio Tietê atualmente está entalhando seus próprios sedimentos, depositados em uma fase climática mais seca e, também, que a capacidade de transporte deste rio já foi bem maior em passado geológico recente;

- apesar de se adotar durante os trabalhos de prospecção um espaçamento de 50 m entre as sondagens (em áreas de basalto constitui quase uma rotina), deve-se estar sempre atento às feições geomorfológicas de ocorrências pouco frequentes;

- as modificações introduzidas durante a fase de Projeto Executivo muitas vezes contribuíram para a otimização dos elementos do Projeto Básico, mais especificamente a construção da

galeria de drenagem sob a Laje da Bacia de Dissipação; e

- a ocorrência do paleocanal em Nova Avanhandava implicou o aumento de cerca de 12.500 m³ de concreto e de 4.200 m³ de escavações adicionais.

7. TRATAMENTO DAS FUNDAÇÕES DA BARRAGEM

As principais feições geotécnicas das fundações da Barragem de Nova Avanhandava (discutidas no item 4.6) foram caracterizadas e avaliadas quanto ao seu comportamento frente às estruturas implantadas e ao reservatório na sua cota máxima.

Como resultado, concluiu-se pelo tratamento das fundações com injeção de calda de cimento, reduzindo assim a possibilidade da ocorrência de vazões e subpressões críticas, e a execução de um sistema de drenagem que captasse as águas remanescentes.

O tratamento na região das ombreiras foi especialmente dirigido ao contato entre os derrames III e IV. Na área das estruturas principais buscou-se tratar os contatos I/II e II/III, bem como as juntas das cotas nominais 300, 305 e 310 m.

Os métodos executivos e o resultados foram discutidos em detalhe nos trabalhos de MANO & PALAZZO NETO (1981), MARRANO et alii (1984a e 1984b) e GRAFF et alii (1984).

A seguir foram resumidas todas as informações de que se dispõe sobre o tratamento das fundações das estruturas civis da Barragem de Nova Avanhandava.

7.1 Considerações sobre os Métodos Executivos

Para o tratamento das fundações sob as principais estruturas de concreto foi necessária a instalação de uma central externa de injeção. Este esquema foi adotado devido às dimensões reduzidas das galerias de injeção de drenagem.

A solução não comprometeu as características reológicas das caldas de cimento injetadas, tendo sido analisados seus parâmetros de temperatura, tempo de escoamento e fator de sedimentação. As vantagens deste método executivo foram a economia de material, facilidade de transporte e ocupação de mão-de-obra. Quanto aos benefícios indiretos, podem-se relacionar a não utilização dos equipamentos de apoio (como guindastes) e a minimização do problema de insalubridade no interior das galerias.

O funcionamento do esquema partiu da escolha do local mais apropriado que facilitasse o transporte, a estocagem e o envio da calda para as diversas frentes de injeção. A comunicação entre as galerias e a central de injeção era feita através de telefones magnéticos; tão logo a calda era enviada aos conjuntos agitador/bomba injetora instalados dentro das galerias, era injetado ar comprimido na tubulação alimentadora para mantê-la sempre limpa.

Os resultados deste método foram apresentados por MARRANO et alii (1984a): as caldas não sofreram alterações significativas em suas características, havendo maior agilização no cronograma executivo e a relação entre o cimento perdido/cimento injetado ficou em 25%, quando as médias usuais são de 30%.

Considera-se importante o registro deste esquema, uma vez que foi adotado pela primeira vez em obras de barragem no Brasil.

Outro método executivo pouco usual adotado em Nova Avanhandava foi a execução de uma cortina experimental de injeção, no local onde seria escavado o "cut off" da barragem de enrocamento da margem direita.

O traço de calda de cimento adotado, na grande maioria das vezes, foi de 2:1 na relação água:cimento (em peso) com 10% de bentonita, em relação ao peso do cimento. Não foi utilizada pozolana. Nos trabalhos de preparação das caldas foram adicionados corantes para diferenciar os furos da linha jusante, central e montante. Após a conclusão da cortina experimental e quando da escavação definitiva do "cut off", fez-se coincidir um plano de escavação com a linha montante da cortina. O objetivo foi examinar as trajetórias e características das caldas no maciço rochoso. Segundo MANO & PALAZZO NETO (1981), o raio de ação da injeção foi pequeno, sendo ligeiramente maior que o próprio raio do furo (cerca de 4 cm); excepcionalmente atingiu 0,50 m. Este alcance em área restrita foi atribuído a preenchimentos argilosos das fraturas e à técnica de lavagem tradicional. Um outro aspecto observado foi o do caráter friável da calda injetada, causado pela elevada porcentagem de bentonita na mistura adotada.

A avaliação da cortina experimental orientou o método executivo da cortina definitiva. Assim, foram modificadas a geometria da cortina, a rotina de lavagem dos furos, o traço da calda de

cimento e a pressão de injeção. Os furos da cortina foram dispostos em uma única linha, com um espaçamento de 1,50 m entre eles. Para a lavagem dos furos foram perfurados módulos alternados de 5 furos e buscou-se a maior remoção possível das argilas de preenchimento. Nos furos em que foram observadas intercomunicações a injeção foi simultânea. Foi utilizada uma calda na relação, em peso, água/(cimento + pozolana) de 1:1, adicionando-se 3% de bentonita e sendo a relação cimento:pozolana de 2:1. A pressão de injeção, foi adotada a de $1,0 \text{ kg/cm}^2$ por metro de profundidade.

A observação direta da seção de uma linha de injeção foi feita pela primeira vez em obras de barragens no Brasil.

7.2 Considerações sobre as Feições Geotécnicas mais Importantes

Estas considerações complementam as informações contidas no item 4.6 sobre as maiores descontinuidades rochosas de Nova Avanhandava.

Contatos I/II e II/III, juntas das cotas nominais 300, 305 e 310 m

O objetivo principal do tratamento foi a redução das infiltrações d'água através das feições geotécnicas mais importantes, reduzindo assim as subpressões sob as estruturas.

Este tratamento foi executado nas fundações das estruturas do tipo Muros de Transição, Vertedouro de Superfície e Tomada d'Água/Casa de Força.

A avaliação das permeabilidades obtidas nos estudos para o Projeto Básico destacou o contato entre os derrames I e II, a junta da cota 300 m, bem como as feições que demandariam maior atenção nos trabalhos de injeção de calda de cimento.

A análise dos critérios de projeto indicou as estruturas da Tomada d'Água/Casa de Força e Vertedouro de Superfície, como as mais importantes quanto ao desenvolvimento subpressões em suas fundações.

O projeto geométrico das cortinas de injeção estabeleceu três linhas de furos nas galerias de montante e laterais da Tomada d'Água e Vertedouro, e uma linha única nos Muros de Transição e galerias de jusante. Foram executadas, também, injeções de ligação e consolidação do contato concreto/rocha. A profundidade das cortinas na região dos muros atingiu a cota de

298 m, enquanto que sob as demais estruturas a cota foi até 282 m. Foram verificadas as permeabilidades iniciais do maciço (ensaios de primeira fase), confrontando-se os resultados com novos ensaios, na fase final da injeção (ensaios de segunda fase). O critério de pressão para os ensaios de permeabilidade foi de 0,5 kg/cm² por metro. As relações água:cimento (em peso) utilizadas foram 1:1 + 5 a 2% de bentonita; 0,7:1 + 2 a 1% de bentonita; e 0,5:1 sem bentonita. As pressões de injeção adotadas foram 0,5 kg/cm² por metro. Na galeria de jusante do Vertedouro foram adotadas 0,25 kg/cm² por metro. Absorções superiores a 50 kg/m em qualquer trecho determinaram a execução e a injeção dos furos seqüenciais.

O resultado das injeções indicou que do total de sólidos injetados cerca de 53% o foram nas fundações da Tomada d'Água/Casa de Força, 43% no Vertedouro de Superfície e os restantes 4% nos Muros de Transição. Foi observado um caráter concentrador de altas absorções nas feições geotécnicas mais importantes, contrastando com o restante do maciço no qual se limitaram ao volume do próprio furo.

A TABELA 5 apresenta as quantidades perfuradas e injetadas por litologia/feição, os valores das absorções médias (em kg/m) das etapas inicial e final, considerando a geometria da cortina.

A TABELA 6 mostra a distribuição das permeabilidades por litologia/feição, antes e após as injeções.

Na feição geotécnica denominada de contato I/II constataram-se freqüentes inversões nas absorções, ou seja, a elevação das quantidades em kg/m de sólidos nas etapas subsequentes dos trabalhos. É possível que tal comportamento reflita a heterogeneidade na distribuição dos caminhos preferenciais de percolação. A eficiência das injeções não foi atingida por completo, uma vez que o fator de redução de "keq" foi de 1,61 (TABELA 6).

No derrame II algumas absorções mais elevadas foram atribuídas às feições de lixiviação da brecha basáltica calcária. O efeito do tratamento não se refletiu numa significativa redução dos valores de permeabilidade.

Quanto à junta da cota nominal 300 m, concluiu-se que apresentou uma resposta eficiente ao tratamento executado. A junta da 305 m apresentou baixas absorções, a níveis menores do

TABELA 5 - RESUMO DOS RESULTADOS DAS INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO NAS FUNDAÇÕES DAS PRINCIPAIS ESTRUTURAS DE CONCRETO DE NOVA AVANHANDAVA (Modificado de MARRANO et alii, 1984b).

DERRAME	LITOLOGIA/FEIÇÃO	PERFURAÇÃO VERTICAL		INJEÇÃO		VARIÇÃO DAS ABSORÇÕES MÉDIAS (kg/m)				
		m	%		kg	%		ETAPA	LINHA TRIPLA	LINHA SIMPLES
I	Basalto Compacto(+)Basalto Vesículo-Amigdaloidal(+)Brecha BAsáltica Siltosa	3048	25	25	375.767	61	61	INICIAL	70 a 432	68 a 192
								FINAL	29 a 126	48 a 178
II	Basalto Compacto	1975	16	26	48.409	8	17	INICIAL	7 a 46	24 a 65
								FINAL	12 a 42	9 a 11
	Basalto Vesículo-Amigdaloidal	1196	10		52.309	9		INICIAL	4 a 147	81
								FINAL	12 a 44	15
III	Junta da cota 300m	1629	13	38	90.307	15	20	INICIAL	23 a 207	7 a 306
								FINAL	12 a 115	23 a 48
	Junta da cota 305m	1130	9		11.532	2		INICIAL	3 a 67	138
								FINAL	4 a 36	4
	Junta da cota 310m	210	2		4.804	1		INICIAL	13	31
								FINAL	3	31
	Basalto Compacto (+) Basalto Vesículo-Amigdaloidal	1743	14		10.730	2		INICIAL	2 a 9	10 a 24
								FINAL	2 a 6	8 a 18
Contato Rocha x Concreto	1336	11	11	11.142	2	2	INICIAL	4 a 15	5 a 75	
							FINAL	5 a 23	7 a 44	

ETAPA INICIAL = Absorção média da ordem I da primeira linha injetada

ETAPA FINAL = Absorção média da ordem III da última linha injetada

TABELA 6 - DISTRIBUIÇÃO DAS PERMEABILIDADES POR LITOLOGIA/FEIÇÃO, ANTES E APÓS AS INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO (Modificado de MARRANO et alii, 1984b).

DERRAME	LITOLOGIA/FEIÇÃO	Keq ANTES DAS INJEÇÕES (cm/s)	Keq APÓS AS INJEÇÕES (cm/s)	FATOR DE REDUÇÃO DE Keq	DECRÉSCIMO CORRESPONDENTE
I	Brecha Basáltica Siltosa (+) Basalto Vesículo-Amigdaloidal (+) Basalto Compacto	$\leq 2,9 \times 10^{-2}$	$\leq 1,8 \times 10^{-2}$	1,61	37,93%
II	Basalto Compacto	$\leq 1,1 \times 10^{-3}$	$\leq 3,7 \times 10^{-4}$	2,97	66,36%
	Basalto Vesículo-Amigdaloidal	$\leq 6,3 \times 10^{-4}$	$\leq 5,1 \times 10^{-4}$	1,24	19,05%
III	Junta da Cota 300 m	$\leq 5,8 \times 10^{-3}$	$\leq 4,4 \times 10^{-4}$	13,18	92,41%
	Junta da Cota 305 m	$\leq 2,2 \times 10^{-3}$	$\leq 2,5 \times 10^{-3}$	88,00	98,86%
	Junta da Cota 310 m	$\leq 1,5 \times 10^{-4}$	$\leq 1,0 \times 10^{-6}$	150,00	99,33%
	Basalto Compacto	$\leq 8,8 \times 10^{-3}$	$\leq 1,1 \times 10^{-4}$	80,00	98,75%
contato rocha x concreto		$\leq 2,6 \times 10^{-2}$	$\leq 1,0 \times 10^{-3}$	26,00	96,15%

que 20 kg/m, concluindo-se que a feição encontrava-se no limite de sua injetabilidade. O mesmo comportamento foi observado com a junta da 310 m. A redução das permeabilidades parece indicar uma resposta eficiente ao tratamento executado.

As injeções do contato concreto/rocha acusaram valores inferiores a 25 kg/m, enquanto que o fator de redução indicou "keq" de $\leq 2,6 \times 10^{-2}$ cm/s (antes) contra $\leq 1,0 \times 10^{-3}$ cm/s (após), mostrando que a eficiência do tratamento não foi completa.

GRAEFF et alii (1984) analisaram a eficiência da cortina de injeção de Nova Avanhandava a partir de alguns ensaios hidrogeotécnicos, simulando a abertura e o fechamento de drenos além disso, avaliaram todas as respostas dos instrumentos durante o processo de enchimento do reservatório. Os autores compararam as leituras dos piezômetros a montante e a jusante da cortina, indicando para a junta da cota nominal 300 m uma redução de 39 a 48%, enquanto que para o contato entre os derrames I e II de 3 a 25%. Concluíram que a contribuição das perdas de carga pelo maciço foi responsável pela redução das subpressões da fundação, e que o sistema de drenagem do Muro de Transição Esquerdo mostrou uma eficiência considerável.

Contato III/IV

Este contato entre os derrames basálticos mais superiores mostrou interferência nas fundações da barragem de enrocamento da margem direita. Os resultados dos trabalhos de injeção no fundo do "cut off" indicaram valores de absorção que variaram entre 18 e 32 kg/m.

A avaliação do desempenho da injeção foi baseada na redução progressiva e sensível das absorções em função do número de ordem crescente dos furos, tendo MANO & PALAZZO NETO (1981) concluído que a metodologia de lavagem e a escolha da pressão de injeção foram responsáveis pelos bons resultados obtidos.

7.3 Resumo sobre o Tratamento das Fundações

A caracterização bem feita de todas as feições geotecnicamente importantes são fundamentais para o dimensionamento dos tratamentos de fundação a serem efetuados. Em segundo lugar, são importantes as técnicas utilizadas para definir as respostas do maciço rochoso frente ao tratamento por injeção de calda de cimento. Por último, são igualmente

importantes as simulações dos ensaios hidrogeotécnicos considerando todo o maciço tratado.

No caso de Nova Avanhandava, cada uma destas etapas foi seguida rigorosamente, mostrando que apesar de toda a experiência acumulada em obras já construídas em basaltos, muitas simplificações não puderam ser realizadas, sob pena de comprometer parcialmente a segurança das estruturas.

Para GRAEFF et alii (1984)"... considera-se que os tratamentos de fundação executados atingiram plenamente os objetivos esperados, propiciando reduções significativas das vazões afluentes ao sistema de drenagem e das subpressões atuantes nas fundações, principalmente na área de estruturas de geração e em menor grau, porém com eficiência satisfatória, na área dos Muros de Transição".

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande número de obras de barramento de cursos d'água já realizadas em basaltos da Bacia do Paraná têm mostrado que, em cada um dos locais, estas rochas exibem peculiaridades e comportamentos ímpares.

De um ou outro modo as "juntas-falhas" de Ilha Solteira (SP/MS), as estruturas circulares de Agua Vermelha (SP/MG), as falhas de Salto Santiago (PR), o contato entre o basalto e arenito de Xavantes (SP/PR), bem como a própria variação litológica de um derrame, todos interferiam no desenvolvimento do projeto das obras civis.

No caso da Barragem de Nova Avanhandava foi constatada a existência de um derrame de "pillow lavas" basálticas no local de fundação das estruturas de concreto, durante os estudos de Projeto Básico.

Na fase de Projeto Executivo, durante os trabalhos de escavação para a implantação das estruturas de concreto, foi constatada a existência de um paleocanal nas rochas basálticas, preenchido por sedimentos arenosos.

Ambas as feições - geológica e geomorfológica - demandaram estudos pormenorizados, os quais serviram para aproximar os elementos geológicos e geotécnicos nas soluções dos problemas de fundação da barragem.

Os maciços basálticos de Nova Avanhandava não mostraram evidências de tectonismo mesozóico-cenozóico, mas apresentaram extensas descontinuidades sub-horizontais dos tipos contato de derrames ou juntas (simples ou com faixas de intenso fraturamento) que nortearam os limites de escavação das fundações e os tratamentos através da injeção de calda de cimento e da drenagem.

Particularmente, o denominado derrame basáltico II constituiu-se de um conjunto de "pillow lavas", contendo blocos de formas e tamanhos variados, às vezes pedunculados ou côncavos, retratando parte de sua característica genética. Apresentando algumas características diferenciadas da ocorrência de Foz do Areia, o conjunto das "pillow lavas" mereceu estudos de detalhe para estabelecer suas particularidades microscópicas, macroscópicas e de gênese.

A evolução do conjunto das "pillow lavas" parece ter ocorrido concomitantemente à formação dos derrames basálticos II e III, pelo que se observou das feições de contato dos mesmos; e há indicadores litológicos que permitem formular a hipótese que corresponde a um evento inicial do derrame III, com sucessivos níveis de "pillow" acumulados em condições lagunares.

De todo o modo, a perfeita caracterização litológica das "pillow lavas" e a criteriosa avaliação de suas propriedades geotécnicas permitiram concluir sobre suas boas condições ao assentamento das estruturas de concreto.

O paleocanal constitui uma feição (geomorfológica) importante investigada durante a construção de Nova Avanhandava. Suas características geométricas e de desenvolvimento permitiram correlacioná-lo a uma fase erosiva cenozóica. Seus limites laterais interceptando as descontinuidades anteriormente referidas e sua profundidade variável implicaram a adoção de soluções muito particulares para a compatibilização das estruturas de concreto e a diminuição do fluxo de água no maciço rochoso.

As feições relativas ao conjunto das "pillow lavas", do paleocanal e as descontinuidades rochosas dos derrames basálticos poderiam ter sido abordadas no projeto da barragem como três ocorrências geotécnicas a serem consolidadas rotineiramente por vários métodos de tratamento. Entretanto,

também neste aspecto foram desenvolvidos estudos inovadores para observação dos resultados em escala experimental, que de certa forma compatibilizaram os elementos geológicos e geotécnicos do projeto da barragem de Nova Avanhandava.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). 1975. Ensaio de perda d'água sob pressão. São Paulo. 16 p. (ABGE Boletim, 2).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). 1981. Ensaio de permeabilidade em solos. São Paulo. 36 p. (ABGE Boletim, 4).
- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L., CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A. 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo. São Paulo. 2v. (IPT Monografia, 6).
- ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A.; PONÇANO, W.L.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. 1980. Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, Camburiú-SC, 1980. Anais... São Paulo, SBG, v.5, p.2799-2812.
- ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A.; PONÇANO, W.L.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. 1981. Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: Coletânea de Trabalhos e Debates, Publicação SBG, SP nº 7, p.31-47.
- ARID, F.M. & LANDIM, P.M.B. 1967. Contribuição ao estudo da geologia da Cachoeira do Marimbondo, Rio Grande. Bol. Soc. Bras. Geol., São Paulo. 15 (2).
- BOWN, G.M. 1967. Mineralogy of basaltic rocks. In: HESS, H.H. & POLDERVAART, A. ed. Basalts the poldervaart treatise on rocks of basaltic composition. New York, John Wiley. v.1, p.103-162.
- BJORNBERG, A.J.S. & KUTNER, A.S. 1983. Resumo das feições geológicas de interesse às fundações em rocha, em barragens da Bacia do Alto Paraná. In: SIMPOSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANA. São Paulo, 1983. Anais... São Paulo, ABMS/ABGE/CBMR. v.1A, p.263-297.
- COLE, A.G. & GREGORY, J.W. 1890. On the variolitic rocks of Mont Genevre. Geol. Soc. London Quart. Jour., 46:295-332.

- COMPANHIA BRASILEIRA DE GEOFISICA (CBG). 1976. Geofísica pelo método de sísmica de refração barragem de Nova Avanhandava. São Paulo. 15 p. (Relatório s/n).
- COMPANHIA ENERGETICA DE SÃO PAULO-CESP. 1980. Relatório emitido pelo Laboratório Central de Engenharia Civil nº G.10/80., Barragem de Nova Avanhandava. São Paulo.
- COOKE, H.C.; JAMES, W.F.; MACUDSLEY, J.B. 1931. Geology and ore deposits of Rouyn - Harricanan Region, Quebec. Geol. Survey of Canada (Mem. 166).
- CRUZ, P.T.; QUADROS, E.F.; CORREA FILHO, D. 1983. Análise da perda d'água e fluxo em fraturas de basaltos. In: SIMPOSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANA. São Paulo, 1983. Anais ... São Paulo, ABMS/ABGE/CBMR. v.2B, p. 113-126.
- DIMROTH, E.; CONSINEAU, P.; LEDUC, M.; SANSCHAGRIN, Y. 1978. Structure and organization of Archean subaqueous basaltic flows, Rouyn-Noronha Area, Quebec, Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 15 (6): 902-918.
- FERREIRA, C.M. 1985. Ocorrência de "pillow lava" em vulcanitos da Formação Serra Geral em Araguari, MG. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3, Belo Horizonte, 1985. Anais... Belo Horizonte. p. 235-239.
- FIGUEIREDO, M.C.H.; BERGMANN, M.; AGNALVA, F.; TASSINARI, C.C.G. 1982. Ocorrência de "pillow lavas" no Grupo São Roque, Estado de São Paulo. Ciências da Terra, 2: 6-7.
- FISKE, R. 1969. Flood basalts of the Columbia River plateau. In: ATLAS of volcanic phenomena. Washington, U.S. Geological Survey. Sheet 11.
- FOYE, W.G. 1924. Pillow structure in the triassic basalts of Connecticut. Geol. Soc. Am Bull., v.35, p. 329-346.
- FULFARO, V.J. 1974. Depósitos de cascalho da bacia hidrográfica do Rio Paraná. São Paulo, IPT/DMGA. (Relatório de Viagem). (Inédito).
- FULLER, R.E. 1931. The aqueous chilling of basaltic lava on the Columbia River plateau. Am. Jour. Sci. 5th Ser., v.21, p.281-

- GRAEFF, L.O.; GUEDES, M.G.; MARRANO, A. 1984. Verificação da eficiência do tratamento das fundações das estruturas de concreto do aproveitamento múltiplo de Nova Avanhandava. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. Anais ... São Paulo, ABGE, v.3, p. 43-64.
- GUIDICINI, G. 1970. Derrames secundários em basalto. Bol. Soc. Bras. Geol., São Paulo, 19 (1): 91-93.
- GUIDICINI, G. 1973. Terraços fluviais no interior da bacia do Alto Paraná. São Paulo. (Seminário de pós-graduação do Instituto de Geociências (USP) (Inédito).
- GUIDICINI, G. & CAMPOS, J.O. 1968. Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos. Bol. Soc. Bras. Geol., São Paulo, 17 (1):15-28.
- HENDERSON, J.F. 1953. On the formation of pillow lavas and breccias. Royal Soc. Canadá Trans., 3d Ser., v.47, Sec. 4, p.23-32.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT. 1979a. Investigações geológicas e geotécnicas para o projeto básico: Usina de Nova Avanhandava, Rio Tietê-SP. São Paulo 2v., (Relatório IPT, 12 366).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT. 1979b. Critérios para classificação de testemunhos de sondagens: Usina Porto Primavera. São Paulo. 1v. (Relatório Convênio CESP/IPT-PP/TC/01/01/RT-0002).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT. 1980a. Investigação geológico-estrutural em partes dos rios do Peixe, Aguapeí, Tietê e São José dos Dourados, e Rio Paraná a montante da Usina Jupia, nos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. São Paulo. 2v. (Relatório IPT, 13 941).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT. 1980b. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. (Relatório IPT, 14 091).

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT.
1981. Estudo das características hidrogeotécnicas das fundações da barragem de Nova Avanhandava: definição do modelo hidrogeológico regional. (Relatório IPT, 15 002).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT.
1982. Estudo das características hidrogeotécnicas das fundações da barragem de Nova Avanhandava, definição do maciço sem solicitação; modelo nº 1. São Paulo. (Relatório IPT, 16 240).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT.
1983. Tratamento de resultados de ensaios de permeabilidade de múltiplos estágios realizados no maciço de fundação da barragem de Nova Avanhandava, Rio Tietê, SP. São Paulo. (Relatório IPT, 19 633).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO-IPT.
Relatórios emitidos pelo Convênio CESP/IPT no período de 1977 a 1987; Barragem de Nova Avanhandava. São Paulo.
- JOHN, K.V. & MULLER, L. 1968. Report of site inspection and geotechnical construction - July 24 through August - 1, 1968.
- LAURENT, R. & HEBERT, Y. 1977. Fractures of submarine volcanism in ophiolites from Quebec Appalachians. In: BARAGAR, W.R.A.; COLEMAN, L.C.; HALL, J.M. (ed) volcanic regimes in Canada. s.L., Geol. Assoc. Can. p. 91-109. (Spec. Pap. 16).
- LEINZ, V. 1949. Contribuição a geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil. São Paulo. Fac. Filos. Ciênc. Letras. 61 p. (Boletim 103, Geologia, 5).
- LEWIS, J.V. 1914. Origin of pillow lavas. Bulletin of the Geological Society of America, 25 (4): 591-654.
- MANO, V.G.T. & PALAZZO NETO, P. 1981. Tratamento de fundação da barragem de enrocamento, Usina de Nova Avanhandava, Rio Tietê, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, Itapema, 1981. Anais... Itapema, ABGE. v.2, p.33-52.
- MANO, V.G.T.; SAMPAIO, A.J.M.; SOARES, L. 1982. A técnica da amostragem integral em sondagens rotativas: avaliação do conheci-

- mento atual. Constr. Pesada, São Paulo, 11 (137): 92-104, jun.
- MARQUES FILHO, P.L.; CORREIA, P.C.; LEVIS, P.; ANDRADE, C.A.V. 1981. Características usuais e aspectos peculiares do manto de alteração e transição solo-rocha em basalto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3, Itapema, 1981. Anais... São Paulo, ABGE, v.2, p.53-72.
- MARRANO, A.; MANO, V.G.T.; CESARI JUNIOR, O. 1984a. Injeções de calda de cimento na fundação da Usina de Nova Avanhandava - Considerações sobre o método de execução. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. Anais... São Paulo, ABGE. v.3, p. 113-122.
- MARRANO, A.; GUEDES, M.G.; MATSUMURA, T.; GRAEFF, L.O. 1984b. Cortinas de injeção e drenagem na fundação das estruturas de concreto do aproveitamento múltiplo de Nova Avanhandava. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. Anais... São Paulo, ABGE. v.3, p.87-112.
- MELO, M.S. & PONÇANO, W.L. 1983. Gênese, distribuição e estratigrafia dos depósitos cenozóicos no Estado de São Paulo. São Paulo. (IPT. Monografia, 9).
- MELLO, V.F.B. 1972. Recomendações referentes a estudos geológicos e geotécnicos para barragens. In: SEMINARIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 8, São Paulo, 1972. Anais... São Paulo, CBGB, v.2, p.1-72.
- MELLO, V.F.B. & KANJI, M.A. 1970. Mecânica de rochas no projeto de barragens. In: curso de aperfeiçoamento em mecânica das rochas e aplicações em engenharia civil, Rio de Janeiro, Assoc. Antig. Alun. Politéc. 5 p. il.
- MOORE, J.C. 1975. Mechanism of formation of pillow lava. American Scientist, 63 (3): 269-277.
- MOORE, J.G.; CRISTOFOLINI, R.E.; LO GIUDICE, A. 1971. Development of pillow on the submarine extension of recent lava flows. Mount Etna, Sicily. Washington, U.S. Geological Survey, p.89-97. (USGS Professional Paper 750C).
- PALAZZO NETO, P.; MANO, V.G.T.; CORREA FILHO, D.; MARRANO, A. 1982. Tratamento da fundação na área do paleocanal da Usina.

- Hidrelétrica de Nova Avanhandava, Rio Tietê (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7, Recife, 1982. Anais... Recife, ABMS. v.6, p.248-264.
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. 2v. São Paulo. (IPT. Monografia, 5).
- QUADROS, E.F. 1982. Determinação das características do fluxo de água em fraturas de rochas. São Paulo. (Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica-Universidade de São Paulo).
- SIMMONS, W.P. 1946. Note of pillow lavas at port Isaac, Cornwall. Royal Geol. Soc. Cornwall Trans., v.17, pt. 4, p.192-193.
- SNYDER, G.L. & FRAZER, G.D. 1963a. Pillowed lavas, I: intrusive layered lava pods and pillowed lavas, Unalaska Island, Alaska. Washington, US. Geological Survey, 23p. (USGS Professional Paper 454-B).
- SNYDER, G.L. & FRASER, G.D. 1963b. Pillowed lavas, II: a review of selected recent literature. Washington, U.S. Geological Survey. 7p. (USGS Professional Paper 454-C).
- SOARES, P.C. 1974. Elementos estruturais da parte nordeste da bacia do Paraná: classificação e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais... Porto Alegre, SBG, v.4, p.107-121.
- STARK, J.T. 1938. Vesicular dikes and subaerial pillow lavas of Borabora. Society Islands: Journal Geology, v.46, nº 3, pt.1, p.225-238.
- STEIN, D.P., MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; ALMEIDA, F.F.M. 1979. Geologia de parte dos rios Paraná e Paranapanema. In: SIMPOSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, Rio Claro-SP. Atas... São Paulo. SBG. v.2, p.291-306.
- TYRREL, G.W. 1929. The principles of petrology, 2nd.Ed. New York, E.P. Dutton and Co., Inc., 349 p.
- WILSON, M.E. 1960. Origin of pillow structure in early precambrian lavas of Western Quebec. Journal Geology, 68:97-102.