

## **Apêndice 7.7.10.1**

**Investigações e avaliação de riscos geológico-geotécnicos.  
Sítio Pimental, Canais de Adução, Sítio Belo Monte, Sítio bela Vista e  
Diques**

## SUMÁRIO

7.7.10.1.1	MAPEAMENTOS DE SUPERFÍCIE.....	2
7.7.10.1.2	INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DE SUBSUPERFÍCIE.....	3
7.7.10.1.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	11
7.7.10.2	AVALIAÇÃO DOS SÍTIOS.....	17
7.7.10.2.1	SÍTIO PIMENTAL.....	17
7.7.10.2.2	CANAIS DE ADUÇÃO E ÁREAS DE BOTA FORA.....	24
7.7.10.2.3	SÍTIO BELO MONTE.....	27
7.7.10.2.4	SÍTIO BELA VISTA.....	44
7.7.10.2.5	DIQUES.....	47

## LISTA DOS QUADROS

QUADRO 7.7.10-1	Investigações geológico-geotécnicas executadas (ELETRONORTE-2002).....	4
QUADRO 7.7.10-2	Canais de Adução - Investigações geológico- geotécnicas executadas – Estudos de viabilidade de 2ª etapa (ELETRONORTE- 2002).....	5
QUADRO 7.7.10-3	Investigações geológico-geotécnicas executadas na Usina Belo Monte e nos Canais de Adução- 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade (ELETRONORTE- 2002). ....	6
QUADRO 7.7.10-4	Sítio Bela Vista - Investigações geológico - geotécnicas executadas (ELETRONORTE- 2002). ....	8
QUADRO 7.7.10-5	Diques do Sítio Belo Monte – Investigações geológico-geotécnicas executadas (ELETRONORTE- 2002).....	10
QUADRO 7.7.10-6	AHE Belo Monte - Ensaios executados em solos (áreas de empréstimo e fundação) e areias (ELETRONORTE, 2002).....	14
QUADRO 7.7.10-7	AHE Belo Monte - Ensaios executados em rochas de fundação (ELETRONORTE, 2002).....	15
QUADRO 7.7.10-8	Diques do Sítio Belo Monte - Ensaios executados em solos das áreas de empréstimo (ELETRONORTE, 2002).....	16
QUADRO 7.7.10-9	Diques do Sítio Belo Monte - Ensaios executados em solos de fundação (ELETRONORTE, 2002).....	16
QUADRO 7.7.10-10	Canais de Adução - Ensaios executados em solos de fundação (ELETRONORTE, 2002).....	17

### 7.7.10.1 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS EFETUADAS

Na etapa atual dos estudos foram efetuados novos levantamentos geológico-geotécnicos nas áreas do Sítio Pimental (alternativas de barramento Ilha da Serra e Ilha do Canteiro), Canais de Adução e Sítio Bela Vista (alternativas do Vertedouro Complementar e alguns diques complementares), com apoio do mapeamento geológico regional na escala 1:250.000 executado em fases anteriores. As informações correspondentes à região do Sítio Belo Monte (antigo Kararaô) e dos diques que permaneceram no novo arranjo, foram integralmente aproveitadas.

As investigações geológico-geotécnicas efetuadas *in situ* e em laboratório, de uma maneira geral, contemplaram os tipos de investigação e metodologias que normalmente são utilizados em empreendimentos de natureza similar àquela do AHE Belo Monte. Foram efetuadas investigações geofísicas, com emprego de métodos de refração, de reflexão e caminhamento elétrico e sondagens diretas, manuais e mecânicas, ensaios *in situ* de infiltração, perda d'água e com o uso de sonda hidráulica multiteste, medidores de nível d'água e coleta de amostras deformadas e indeformadas para ensaios de laboratório. No sítio Belo Monte, os quantitativos e tipos de investigação efetuados ultrapassam em muito aqueles que normalmente são efetuados em estudos de viabilidade de empreendimentos de natureza e condições geológicas similares. Além dessas investigações, mapeamentos geológico-geotécnicos foram feitos em todos os sítios do empreendimento.

#### 7.7.10.1.1 MAPEAMENTOS DE SUPERFÍCIE

Os mapeamentos geológico e geológico-geotécnico locais, correspondentes aos Sítios Pimental e Bela Vista e Canais de Adução (trecho dos Canais de Derivação Direito e Esquerdo), realizados no período de estiagem compreendido entre os meses de outubro a dezembro/2001, foram executados na escala 1:25.000, apoiados nos mapas-base de mesma escala, provenientes de restituições aerofotogramétricas executadas pela empresa AEROSUL S.A, com vôo na escala 1:60.000 realizado no período de 1976/1977.

Esses trabalhos foram executados utilizando-se os recursos de fotografias aéreas em escala de 1:60.000, análise de testemunhos de sondagens rotativas, a percussão e geofísicas e do reconhecimento de campo, além das análises petrográficas disponíveis em cada local. Os trabalhos de campo exigiram descrição detalhada de afloramentos quanto à variedade litológica (cor, textura, granulometria e composição mineralógica) e de seus elementos estruturais (foliação, fraturas, veios e falhas).

Nos trabalhos de mapeamento no Sítio Pimental, as observações de campo foram facilitadas pela possibilidade de acesso por barco e exposição de extensa área de afloramento rochoso, permitindo a descrição de 61 afloramentos ao longo de uma área de 48 km<sup>2</sup>. Nos Canais de Derivação, com 193 pontos levantados e área de 88 km<sup>2</sup>, e do Sítio Bela Vista, com 60 pontos e área mapeada de 22 km<sup>2</sup>, devido a restrições de acessos terrestres e a pouca incidência de afloramentos rochosos, ocorreram maiores dificuldades na execução dos trabalhos de mapeamento.

Os dados obtidos foram processados, incluindo a análise de 24 lâminas petrográficas, 4 análises de difratometria de raios-X e o tratamento dos dados estruturais em rede estereográfica de igual área. As análises de difratometria foram feitas através do difratômetro RIGAKU-D/MAX-2AC, que opera com tubo de cobre com 40 kv e 20 mA, sendo que, a

partir dos difratogramas obtidos, os minerais foram identificados por meio do software JADE 3.0 da MDI e do banco de dados mineralógicos do International Centre for Diffraction Data (ICDD). Os dados estruturais em rede estereográfica de igual área foram tratados através do programa DIPS, version 2.0.

A interação de todas essas informações litológicas e estruturais, compatibilizadas em seções geológicas típicas, embasou a reinterpretação fotogeológica final, possibilitando a elaboração dos mapas geológicos locais.

#### **7.7.10.1.2 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DE SUBSUPERFÍCIE**

As investigações geológico-geotécnicas foram realizadas no período compreendido entre os meses de outubro de 2000 a outubro de 2001. Constataram-se poços de inspeção, sondagens a trado, a percussão e rotativas e, como método indireto, sondagens geofísicas, representadas por sísmica de refração e reflexão.

##### **a) Sítio Pimental**

As investigações tiveram por objetivo o conhecimento das condições geológico-geotécnicas gerais do Sítio Pimental, contemplando os dois arranjos propostos inicialmente (Eixo Ilha da Serra e Eixo Ilha do Canteiro). Verificou-se no local, durante o período de vazante, afloramentos com grandes dimensões (pedrais), capeados parcialmente por camada aluvionar e/ou matacões, bem como grande quantidade de matacões distribuídos nas ombreiras.

As investigações consistiram de mapeamento geológico-geotécnico mediante caminhamento nos locais de barramento e prováveis áreas de empréstimo, pesquisa de materiais naturais de construção, sondagens sísmicas, sondagens a trado, poços de inspeção e sondagens a percussão e rotativas. Foram executados ainda, estudos preliminares apoiados em restituição aerofotogramétrica e confirmados posteriormente com levantamento topográfico expedito, em seis prováveis pontos de fuga. Nestes locais foram executadas apenas algumas sondagens a trado para inspeção e amostragem nas fundações dos pontos de fugas identificados.

Assim, foram realizadas as seguintes investigações:

- 39 sondagens rotativas com ensaios de infiltração e de SPT em solo, ensaios de perda d'água sob pressão em rocha e orientação de testemunhos de sondagens;
- 17 sondagens a percussão Ø 2<sup>1/2</sup> " com ensaios de infiltração e de SPT e lavagem por tempo;
- 04 sondagens a trado no eixo de barramento;
- 24 sondagens a trado nas áreas de empréstimo;
- 18 sondagens a trado nas fundações dos prováveis pontos de fuga;
- 04 poços de inspeção;
- 25 sondagens a percussão Ø 6" para pesquisa de areia e cascalho;

- 50,0 km de sondagens sísmicas de reflexão e
- 12,4 km de sondagens sísmicas de refração.

O **QUADRO 7.7.10-1** e a **FIGURA 7.7.10-1** apresentam os quantitativos e as plantas de localização das investigações realizadas no Sítio Pimental.

### QUADRO 7.7.10-1

Investigações geológico-geotécnicas executadas (ELETRONORTE- 2002).

Tipo de investigação	Total	Metros Perfurados	Ensaios			Amostras Indeformadas	Comprimento Levantado (m)
			EI	SPT	EPA		
SR	39	690	48	50	219	-	-
SP 2 <sup>1/2</sup> "	17	113	98	105	-	-	-
SP 6"	25	83	-	-	-	-	-
ST	46	349	-	-	-	-	-
PI	04	13	-	-	-	01	-
Sísmica de refração	-	-	-	-	-	-	12447
Sísmica de reflexão	-	-	-	-	-	-	50000

Notas:

1) Relatórios

- perfis de sondagens - PROGEO –RPS 056 e 060 /2001
- perfis de poços – PROGEO-RPS 056/01/2001
- investigações geofísicas – GEOTEC -001/01, 004/01 e 013/01 (2001) e PROGEO/GEOWORK (2001)
- Documentação fotográfica das sondagens rotativas

#### b) Canais de Adução

Na área dos Canais de Derivação Esquerdo e Direito, as investigações constaram de mapeamento geológico-geotécnico através de caminhamento, onde se constatou poucos afloramentos de rocha *in situ*, manto de intemperismo formado pelo solo de alteração de migmatito e grande quantidade de matações em superfície.

Foram executadas 27 sondagens a percussão Ø 2 ½" com ensaios de SPT, infiltração e lavagem por tempo, 19 sondagens a trado, sísmica de refração (88,7 Km), além da instalação de 6 medidores de nível d'água.

Nos trechos correspondentes ao Canal de Derivação – Trecho da Junção e demais áreas dos Canais de Adução situadas nas transposições de vales, foram efetuadas prospecções com sísmica de refração que, juntamente com as investigações realizadas na 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade, permitiram caracterizar suficientemente as condições geológicas locais. As sondagens geofísicas, realizadas em seções transversais ao eixo dos canais, tiveram por finalidade determinar a espessura do manto de intemperismo, a cota provável do topo

rochoso, auxiliar o mapeamento geológico em áreas aluvionares e comprovar feições estruturais. A somatória das atividades de sísmica de refração realizada ao longo dos Canais de Adução totalizou 88,7 km .

Para subsidiar a análise alternativa de revestimento com solo-cimento que poderá ser utilizado no piso dos canais, foi investigada ainda, uma área de empréstimo localizada sobre arenitos da Formação Maecuru, distante cerca de 10 km do local previsto para ser utilizado. Nesta área foram realizadas 13 sondagens a trado e foi coletado, em afloramento, cerca de 150 kg de amostra deste material para ensaios de laboratório. Nos materiais coletados em algumas sondagens foram realizados ensaios de caracterização.

O **QUADRO 7.7.10-2** e as **FIGURAS 7.7.10-2** e **7.7.10-3** apresentam os quantitativos e as plantas de localização das investigações realizadas nos Canais de Adução.

### QUADRO 7.7.10-2

Canais de Adução - Investigações geológico- geotécnicas executadas – Estudos de viabilidade de 2ª etapa (ELETRONORTE- 2002).

Tipo de investigação	Total	Metros perfurados	Ensaio		Medidor de nível d'água	Comprimento levantado (m)
			EI	SPT		
SP 2 <sup>1/2</sup> "	27	329	113	316	06	-
ST	32	112	-	-	-	-
Sísmica de refração	-	-	-	-	-	88723

NOTA:

- 1) Relatórios
  - Perfis de sondagens – PROGEO-RPS-060/01 e RPS/056/01(2001)
  - Investigações geofísicas – GEOTEC-001/01, 004/01 e 013/01 (2001)

#### c) **Sítio Belo Monte**

As investigações geológico-geotécnicas do Sítio Belo Monte foram executadas na 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade, durante o período de outubro de 1981 a julho de 1987, com intervalos e abrangendo três campanhas. No período entre novembro de 1987 e julho de 1989 foram realizadas investigações complementares (4ª campanha), na fase inicial do Projeto Básico que foi paralisado posteriormente. O **QUADRO 7.7.10-3** apresenta os quantitativos das investigações realizadas e as **FIGURAS 7.7.10-4** e **7.7.10-5** mostram a planta de localização das investigações.

### QUADRO 7.7.10-3

Investigações geológico-geotécnicas executadas na Usina Belo Monte e nos Canais de Adução- 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade (ELETRONORTE- 2002).

			TOTAL	METROS PERFURADOS	ENSAIOS			M.N.A	PIEZÔ-METRO	AMOSTRAS INDEFORMADAS	DISTÂNCIA LEVANTADA (m)
					E.I.	SPT	EPA				
1ª CAMPANHA	Belo Monte	SR	13	743	63	113	166	-	-	-	-
		ST	111	851	-	-	-	-	-	-	-
		PI	05	26	-	-	-	-	-	07	-
		SS	97	-	-	-	-	-	-	-	16000
		SE	91	-	-	-	-	-	-	-	-
	Canal de Adução Belo Monte	SR	05	148	15	91	-	05	-	-	-
		ST	119	488	-	-	-	-	-	-	-
		PI	02	12	-	-	-	-	-	-	-
		SS	137	-	-	-	-	-	-	-	22600
		SE	38	-	-	-	-	-	-	-	-
2ª CAMPANHA	Belo Monte	SR	26	1183	72	248	234	15	03	-	-
		SP 2 1/2"	54	1174	226	846	-	23	-	-	-
		SP8"	31	372	-	-	-	-	-	-	-
		ST	11	67	-	-	-	-	-	-	-
		PI	14	59	-	-	-	-	-	16	-
		SS	139	-	-	-	-	-	-	-	22900
	C. Adução Belo Monte	SE	63	-	-	-	-	-	-	-	-
		ST	19	47	-	-	-	-	-	-	-
		SS	39	-	-	-	-	-	-	-	6400
		SE	27	-	-	-	-	-	-	-	-
3ª CAMPANHA	Belo Monte	SR	25	1237	137	160	260	10	-	-	-
		SP 2 1/2"	13	215	90	130	-	-	-	-	-
		ST	41	289	-	-	-	-	-	-	-
		PI	30	201	06	-	-	-	-	-	-
		SS	94	-	-	-	-	-	-	-	15500
		SE	68	-	-	-	-	-	-	-	-
		CAMINHA-MENTO ELÉTRICO	-	-	-	-	-	-	-	-	3700
4ª CAMPANHA	Belo Monte	SRB	28	897	66	124	147	-	-	-	-
		SPB	08	136	48	108	-	-	-	-	-

Notas:

- 1) Na 3ª Campanha foram realizados 312 ensaios com sonda hidráulica multiteste (SHM) e 21 ensaios com obturador de impressão (OI).
- 2) Relatórios:
  - logs de sondagens - IHX-10V-1146-RE e IHX-16V-1032-RE.
  - boletins de poços - IHX-16V-1051-RE(DB-34)
  - classificação de trados - IHX-16V-1026-RE, Vol II e IHX-10V-1066-RE.
  - investigações geofísicas - IHX-10V-1024-DT; IHX-10V-1085-DT; IHX-10V-1136-RE; IHX-10V-1070-DT; IHX-10V-1134-RE; IHX-10V-1013-RE e IHX-16V-1041-RE.
  - ensaios - SHM e OI - DG-01 BT/015 DT (IPT).
- 2) Os resultados da 4ª Campanha, denominada como início do Projeto Básico, não foram incorporados nesta etapa de Viabilidade, com exceção dos diques DIK-6A, DIK-6C, DIK-7A e DIK-7B.



Na primeira campanha, as investigações tiveram por principal objetivo definir a estratigrafia da área e o conhecimento dos aspectos geotécnicos associados aos diversos tipos litológicos presentes e, posteriormente, a pesquisa de áreas de empréstimo. As investigações constaram de mapeamento geológico-geotécnico através de caminhamento, execução de 44 sondagens a trado ao longo dos eixos alternativos, 111 sondagens a trado em áreas de empréstimo, 5 poços para inspeção e 13 sondagens rotativas. Foram realizadas sondagens geofísicas representadas por 97 bases sísmicas e 91 sondagens elétricas verticais. Nesta etapa foram também investigados os canais de adução à Usina de Belo Monte, através de 137 sondagens sísmicas, 38 sondagens elétricas e 5 sondagens rotativas, nas quais foram instalados medidores de nível d'água.

- Nas sondagens rotativas foram realizados ensaios de infiltração e de SPT no trecho em solo e ensaios de perda d'água sob pressão e orientação de testemunhos no trecho em rocha, bem como instalação de medidores de nível d'água em alguns furos.
- Nas sondagens a trado realizadas nas áreas de empréstimo, foram coletadas amostras de umidade natural a cada 2 m e amostras deformadas de 10 kg a cada metro, nas quais foram efetuados ensaios de caracterização e compactação. Em amostras selecionadas para cada tipo de solo, foram realizados ensaios de permeabilidade, adensamento e compressão triaxial.
- Os blocos de amostras indeformadas retiradas dos poços possibilitaram a realização de ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade, adensamento e compressão triaxial.

Na segunda campanha, as investigações geológico-geotécnicas abrangeram os vários arranjos propostos, tendo sido investigados também materiais naturais de construção (solo, areia e cascalho). Constaram de mapeamento geológico-geotécnico através de caminhamento ao longo de picadas, execução de 26 sondagens rotativas, 54 sondagens a percussão Ø 2 ½", 31 sondagens a percussão Ø 8", 11 sondagens a trado e 14 poços para inspeção e amostragem, além de investigações com 139 sondagens sísmicas e 63 sondagens elétricas. Nesta etapa, foi investigado mais um trecho dos Canais de Adução a Usina Belo Monte, através de mapeamento geológico-geotécnico e da execução de 39 sondagens sísmicas e 27 sondagens elétricas.

As investigações geológico-geotécnicas de fundação na terceira campanha foram dirigidas à alternativa escolhida, com o objetivo de melhor caracterizar as condições de fundação, principalmente na área das estruturas de concreto, sendo também efetuadas investigações complementares em áreas de empréstimo. Constaram de mapeamento geológico-geotécnico das fundações, execução de 25 sondagens rotativas com instalação de alguns medidores de nível d'água, 11 sondagens a percussão Ø 2 ½", 41 sondagens a trado e 30 poços para inspeção e amostragem e, como métodos indiretos, execução de 94 bases sísmicas, 68 sondagens elétricas e 3,7 km de caminhamento elétrico.

- Nas sondagens rotativas realizadas nesta campanha foram executados, além de ensaios de perda d'água sob pressão, 312 ensaios com sonda hidráulica multiteste (SHM) e 21 ensaios com obturador de impressão (O.I.).



- Em alguns poços executados nas fundações das barragens foram retiradas amostras indeformadas para ensaios de laboratório e efetuados ensaios de infiltração. De 30 poços executados, 8 foram abertos nas áreas de empréstimo para obtenção de amostras deformadas, as quais foram submetidas a ensaios de caracterização, compactação e compressão triaxial.
- As sondagens geofísicas executadas nesta fase foram dirigidas ao detalhamento do topo rochoso na área da Tomada d'Água e à determinação das espessuras de solo das áreas de empréstimo, além de algumas definições geológicas nessa região. Neste particular, foi utilizado o procedimento de caminhamento elétrico com estações de sondagens elétricas verticais a cada 20 m.

#### d) Sítio Bela Vista

As investigações constaram de mapeamento geológico-geotécnico através de caminhamento, execução de 15 sondagens rotativas, 17 sondagens a percussão Ø 2 1/2", 3 sondagens a trado e 11,535 km de sísmica de refração. Neste sítio, além das áreas de barramento para o Vertedouro Complementar, foram executadas investigações nos diques DIK-19A e DIK-23 a DIK-29. As sondagens a trado foram realizadas no local de implantação da área de empréstimo para os diques DIK 28 e DIK-29 e para a fundação dos diques DIK-19A, DIK-24A, DIK-25, DIK-26 e da Barragem Lateral Direita do Vertedouro Complementar.

As sondagens geofísicas realizadas em seções transversais ao longo dos possíveis eixos de barramentos, tiveram por finalidade determinar a espessura do manto de intemperismo, a cota provável do topo rochoso, auxiliar o mapeamento geológico em áreas aluvionares e comprovar feições estruturais.

O **QUADRO 7.7.10-4** e as **FIGURAS 7.7.10-6** e **7.7.10-11** apresentam respectivamente os quantitativos e a planta de localização das investigações realizadas no Sítio Bela Vista e diques desse sítio.

#### QUADRO 7.7.10-4

Sítio Bela Vista - Investigações geológico - geotécnicas executadas (ELETRONORTE-2002).

Tipo de investigação	Total	Metros Perfurados	Ensaio			Comprimento Levantado (m)
			EI	SPT	EPA	
SR	15	582	37	73	48	-
SP 2 1/2"	17	175	137	196	-	-
ST	20	65	-	-	-	-
Sísmica de refração	-	-	-	-	-	11535

Notas:

- 1) Relatórios
  - perfis de sondagens – PROGEO- RPS 056 e 060 /2001
  - investigações geofísicas – GEOTEC-001/01, 004/01 e 013/01 (2001)
- 2) Nos quantitativos apresentados não estão incluídas as investigações realizadas no Sítio Bela Vista para o antigo barramento Juruá, uma vez que não afetam diretamente às novas obras.
- 3) Documentação fotográfica das sondagens rotativas

#### e) Diques do Sítio Belo Monte

Os serviços de campo realizados ao longo e nas proximidades dos diques do Sítio Belo Monte objetivaram o reconhecimento geológico-geotécnico de suas fundações, caracterização e cubagem dos solos das áreas de empréstimo e seleção de áreas para aproveitamento de pedreiras.

As investigações nos eixos dos diques foram executadas através de poços de inspeção, sondagens a trado, investigações geofísicas mediante sondagens sísmica de refração e sondagens elétricas verticais, sondagens a percussão, além de mapeamento geológico e amostragem de solos e rochas. Nas áreas de empréstimo, as investigações foram feitas através de sondagens a trado e mapeamento geológico de superfície.

Nos eixos dos diques, foram executados poços de até 6 m de profundidade, distanciados a cada 400 m e intercalados com sondagens a trado de até 7 m de profundidade. Desta forma, para os diques de comprimentos inferiores a 500 m e alturas máximas superiores a 7 m, foram executados pelo menos um poço e duas sondagens a trado.

Essas investigações objetivaram a caracterização dos coluviões (CO), aluviões (AL), solos residuais (RS) e de alteração (SA), determinando-se suas espessuras, características granulométricas, compacidade, porosidade e permeabilidade, através de observações táteis e visuais. Nos poços, avaliou-se a compacidade dos solos por meio de ensaios expeditos de penetração (IPE) realizados a cada metro e a permeabilidade, quando possível, por ensaios de rebaixamento do lençol freático. Foram também selecionadas e retiradas amostras indeformadas de 15 cm x 15 cm para a realização de ensaios de caracterização e triaxiais.

As sondagens geofísicas realizadas nos eixos dos diques e em seções transversais tiveram por finalidade determinar a cota provável do topo rochoso, auxiliar o mapeamento geológico em áreas aluvionares, diferenciar pacotes de rochas sedimentares das cristalinas e comprovar feições estruturais, principalmente descontinuidades.

Nos diques DIK13, DIK14C e DIK19, cortados por igarapés, foram realizadas sondagens a percussão nos aluviões. Nestas sondagens, foram executados ensaios de resistência à penetração (SPT) a cada metro de profundidade e ensaios de infiltração nos materiais granulares. No dique DIK19 foram realizadas também quatro sondagens rotativas, correspondentes a 4ª campanha de investigações.

Para as áreas de empréstimo, o estudo foi realizado através de sondagens a trado, em malha aproximadamente regular, com furos espaçados de 200 a 400 m, em função, principalmente, das extensões das áreas. Estas foram programadas nos mapas topográficos em escala 1:10.000, sendo localizadas, sempre que possível, nas encostas dos morros próximos aos diques. As sondagens a trado atingiram profundidades de até 10 m, sendo retiradas amostras nas metragens ímpares (1º, 3º, 5º, 7º e 9º metros) para ensaios de umidade natural e, a cada intervalo de 1 m, amostras de 10 kg para ensaios de caracterização. Dentre essas amostras, foram posteriormente selecionados materiais mais representativos para ensaios de caracterização. O mapeamento geológico de superfície complementou as investigações nestas áreas. As localizações e quantitativos das investigações dos diques do Sítio Belo Monte estão apresentadas respectivamente no **QUADRO 7.7.10-5** e nas **FIGURAS 7.7.10-7 a 7.7.10-10**.

### QUADRO 7.7.10-5

Diques do Sítio Belo Monte – Investigações geológico-geotécnicas executadas (ELETRONORTE- 2002).

DIK	SR		SP 2 <sup>1/2</sup> "		STD		STE		POCOS		GEOFÍSICA		Pontos de mapeamento
	Quantidade	Profundidade total (m)	Quantidade	Profundidade total (m)	Quantidade	Profundidade total (m)	Quantidade	Profundidade total (m)	Quantidade	Profundidade total (m)	Refração (Bases)	Elétrica (Bases)	
1	-	-	-	-	1	6,0	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	1	5,3	-	-	-	-	-	-	5
3	-	-	-	-	-	-	12	63,4	2	5,4	1	-	5
4	-	-	-	-	1	4,7	-	-	-	-	-	-	-
6A	1	84,0	4	32,0	-	-	-	-	-	-	4	-	-
6B	1	79,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6C	1	32,0	4	84,0	-	-	-	-	-	-	5	-	-
7A	2	57,0	2	31,5	3	13,0	-	-	-	-	6	-	-
7B	1	26,5	2	34,0	2	8,5	-	-	-	-	6	-	-
7C	-	-	-	-	1	2,7	-	-	-	-	-	-	-
7D	1	17,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10A	-	-	-	-	2	11,0	3	22,5	1	0,5	2	1	1
11	-	-	-	-	2	14,0	3	20,2	1	6,0	4	2	2
12	-	-	-	-	1	7,0	-	-	-	-	-	-	7
13	-	-	2	13,66	5	28,9	43	313,5	4	24,0	20	8	4
14A	-	-	-	-	3	18,7	6	52,4	2	12,0	5	2	4
14B	-	-	-	-	2	12,5	-	-	-	-	1	-	4
14C	-	-	5	35,11	3	18,0	23	132,3	2	10,5	9	4	11
14D	-	-	-	-	2	14,0	9	76,0	1	6,0	6	3	5
14E	-	-	-	-	2	14,0	6	57,0	1	5,9	4	1	2
18	-	-	-	-	1	6,0	3	22,5	1	6,0	1	-	4
19	-	-	3	18,47	4	22,0	24	197,0	2	7,0	10	4	13
TOTAL	6	295,5	22	248,74	37	206,3	132	956,8	17	83,3	84	25	67

STD = Sondagem a Trado no Eixo do Dique

SP = Sondagem a Percussão

STE = Sondagem a Trado em Áreas de empréstimo

SR = Sondagem Rotativa

### 7.7.10.1.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Durante a 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade, no período de setembro de 1982 a setembro de 1987, foram executados vários ensaios de laboratório em materiais provenientes das áreas de empréstimo, jazidas e fundações do Sítio Belo Monte, do Sítio Bela Vista (antigo Juruá e seus diques), visando fornecer subsídios básicos para a elaboração do projeto das obras de terra, enrocamento e concreto e das escavações em solos e rochas.

A seguir estão listados os laboratórios utilizados para a execução dos diversos ensaios realizados durante o período citado:

- Laboratório de Solos do CNEC – São Paulo, SP;
- Laboratório de Solos da ELETRONORTE – Tucuruí, PA;
- Laboratório de Solos da ELETRONORTE – Altamira, PA
- Laboratório de Solos – IPT – São Paulo, SP;
- Laboratório de Concreto da ELETRONORTE – UHE Tucuruí, PA;
- Laboratório da UNESP – Rio Claro, SP;
- Laboratório Central de Engenharia Civil da CESP – Ilha Solteira, SP

Na fase de complemento dos estudos de Viabilidade, via de regra, os materiais pétreos e terrosos por apresentarem origem geológica semelhante aos estudados na 1ª etapa, não foram ensaiados, adotando-se os mesmos índices e parâmetros obtidos anteriormente para estes materiais. Porém, alguns materiais, como as areias aluvionares da calha do rio Xingu e o solo argilo-siltoso dos terraços aluvionares das ilhas do Sítio Pimental, foram ensaiados. Além desses, foram também ensaiadas amostras de material da alteração do migmatito e dos sedimentos da Formação Maecuru, para subsidiar a análise da alternativa de revestimento com solo-cimento para o piso dos Canais de Derivação. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UHE Tucuruí.

#### - **Materiais naturais de construção**

Os ensaios realizados em materiais terrosos e granulares provenientes do local das obras do Sítio Belo Monte e do Sítio Bela Vista (antigo Sítio Juruá), foram conduzidos em duas etapas. Os materiais dos diques foram submetidos unicamente aos ensaios da 1ª etapa, inferindo-se os seus parâmetros de projeto a partir daqueles obtidos em solos com características geológico-geotécnicas semelhantes existentes no local das obras principais.

Na 1ª etapa foram efetuados ensaios com o objetivo principal de obter a caracterização geotécnica e a classificação dos materiais naturais de construção existentes no local das obras e definir sua utilização para finalidades específicas, quer como solos de empréstimo, quer como materiais para filtros, transições e enrocamento e, ainda, como agregados finos para concreto.

As amostras ensaiadas nesta etapa foram obtidas da seguinte forma:

- solos – através de sondagens a trado com diâmetro de 4” e bloco indeformado de poços;
- areias e cascalhos – através de sondagens a percussão com diâmetro de 6” e 8”;
- rochas – através de sondagens rotativas com diâmetro HX ou NX.

Essas amostras foram pré-selecionadas por caracterização tátil-visual associada à sua classificação geológica.

Após os estudos preliminares, que compreenderam a caracterização e classificação dos materiais naturais de construção, seguiu-se a 2ª etapa, que consistiu na execução dos ensaios “especiais” para determinação dos parâmetros geotécnicos de projeto. Fundamentalmente, foram determinados parâmetros de permeabilidade, compressibilidade e resistência em solos de empréstimo e parâmetros de permeabilidade em areias e cascalhos previstos para filtros de barragens. Todos os ensaios foram conduzidos em amostras representativas, selecionadas com base na análise estatística dos resultados obtidos na 1ª etapa.

#### - **Materiais de Fundações**

Após classificação geológica dos materiais existentes nas fundações investigadas, foram efetuados ensaios, também em duas etapas, tal como adotado em materiais naturais de construção, para a obtenção dos parâmetros geotécnicos de projeto.

Na 1ª etapa, foram realizados ensaios de caracterização, de determinação dos índices físicos e, em quantidade menor, ensaios de compactação, todos em amostras de solo provenientes de sondagens rotativas ou, principalmente, de poços. Estes ensaios tiveram a finalidade básica de caracterizar os solos de fundações no que diz respeito a condicionantes à estabilidade de barragens. Os materiais rochosos foram caracterizados através da determinação de seus índices físicos e sua resistência à abrasão.

Na 2ª etapa, os ensaios especiais objetivaram o fornecimento dos parâmetros de resistência, permeabilidade e compressibilidade dos solos de fundações, tendo em vista o dimensionamento das obras de terra e enrocamento. Em rochas da fundação das estruturas de concreto, foi efetuada a determinação dos parâmetros de resistência e de deformabilidade para subsidiar o projeto das estruturas e das escavações. Todas as amostras ensaiadas foram selecionadas com base nos resultados de ensaios da 1ª etapa.

#### a) **Sítio Pimental (Alternativa Eixo Ilha da Serra)**

Os materiais naturais de construção e fundação encontrados na região do Eixo Ilha da Serra, por apresentarem origem geológica e petrográfica semelhante aos estudados anteriormente na 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade nos Sítios Belo Monte e Bela Vista (antigo Juruá), não foram ensaiados. Por isso, foram adotados os mesmos parâmetros obtidos anteriormente para estes materiais. Entretanto, alguns materiais de construção foram ensaiados, como as areias aluvionares da calha do rio Xingu e o solo argilo-siltoso dos terraços aluvionares das ilhas do Sítio Pimental, representados por um bloco indeformado de dimensões 30 x 30x 30 cm e amostras deformadas.

**b) Canais de Derivação Esquerdo e Direito**

Na região dos Canais de Derivação os materiais naturais de construção e fundação existentes, por apresentarem origem geológica e petrográfica semelhante aos estudados anteriormente na 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade nos Sítios Belo Monte e Bela Vista (antigo Juruá), não foram ensaiados. Por isso, foram adotados os mesmos parâmetros obtidos anteriormente para estes materiais. Porém, para subsidiar a análise da alternativa de revestimento com solo-cimento para os canais, foram ensaiadas amostras de material da alteração do migmatito e dos sedimentos arenosos da Formação Maecuru.

**c) Sítio Belo Monte**

Os ensaios em materiais do Sítio Belo Monte foram conduzidos em duas etapas, entre setembro de 1982 e setembro de 1987, conforme programação indicada nos **QUADROS 7.7.10-6** e **7.7.10-7**. Nestes quadros estão indicados os tipos e quantidades de ensaios efetuados em materiais, tanto de jazidas, como de fundações, abrangendo solos e rochas.

**QUADRO 7.7.10-6**

AHE Belo Monte - Ensaios executados em solos (áreas de empréstimo e fundação) e areias (ELETRONORTE, 2002).

ITEM	ENSAIO	FUNDAÇÕES - SOLOS					TOTAIS SOLOS DE FUNDAÇÃO	ÁREAS DE EMPRÉSTIMO			DEPÓSITO DE AREIA E CASCALHO	TOTAIS MATERIAIS NATURAIS DE CONSTRUÇÃO	
		CNEC - SP		EN - ALT	EN - TUC	I P T		CNEC - SP		EN - TUC			
		1ª FASE	2ª FASE	2ª FASE	2ª FASE	2ª FASE		1ª FASE	2ª FASE	1ª FASE			
01	Densidade dos Grãos	25	25		16	3	69	39	10	164	115	328	
02	Limites de liquidez e plasticidade	23	25		16	3	67	141	10	164		315	
03	Análise granulométrica por peneiramento										140	140	
04	Análise granulométrica com sedimentação	25	27		16	3	71	67	10	164		241	
05	Umidade natural	33	32			12	77	353				353	
06	Densidade natural	33	32		1	12	78						
	Compactação:												
07	a. Proctor normal MB-33								4			4	
08	b. MB-33 sem reuso e sem secagem prévia		2	3	16		21	30	10	94		134	
	Permeabilidade em permeâmetro por corpo de prova:												
09	a. Carga constante		6				6				6	6	
10	b. Carga variável		9				9						
11	Expansão, determinação da pressão com 3 pontos		6				6						
	Adensamento:												
12	a. Com inundação	8	31				39		13			13	
13	b. Determinação de permeabilidade por ponto	19	107				126		41			41	
14	c. Determinação do coeficiente de adensamento por estágio	20	85				105		39			39	
	Compressão triaxial tipo $\bar{Q}$ :												
15	a. Corpo de prova com $\phi = 2''$		70				70		52			52	
	Compressão triaxial tipo $\bar{R}$												
16	a. Corpo de prova com $\phi 1 \frac{3}{8}''$ .						2						
	Compressão triaxial tipo: $\bar{R}$ sat					2							
	Saturação do Corpo de prova por e contra pressão:		47										
17	a. Corpo de prova com $\phi = 2''$						47		24			24	
	Saturação do Corpo de prova por percolação:		3										
18	a. Corpo de prova com $\phi = 2''$						3						
	Compressão triaxial tipo S:		18										
19	a. Corpo de prova com $\phi = 2''$						18		20			20	
	Compressão triaxial tipo Ssat												
	Saturação do Corpo de prova por percolação:		1										
20	a. Corpo de prova com $\phi = 2''$						1						
21	Corpo de prova moldado estaticamente												
22	Índice de vazios máximo e mínimo de solos não coesivos										6	6	
	Cisalhamento direto lento												
23	a. Corpo de prova com 6x6x2cm					12	12						
24	Absorção				1		1						
PROGRAMAS N <sup>os</sup> : IHX-10V-1091-RE; IHX-10V-1092-RE; IHX-10V-1122-NT; IHX-10V-1123-NT; IHX-10V-1143-RE; GT/008-PG.		ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO FUNDAÇÕES: IHX-10V-1110-RE IHX-10V-1112-RE IHX-10V-1138-DT IHX-10V-1158-RE IHX-10V-1150-DT IHX-10V-1121-DT				ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO ÁREAS DE EMPRÉSTIMO: IHX-10V-1100-RE IHX-10V-1111-RE IHX-10V-1120-DT IHX-10V-1126-DT IHX-10V-1141-DT			GT/014 – RR IHX-10V-1130-RE; IHX-10V-1169-RE;		ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE LABORATÓRIO DEPÓSITOS DE AREIA E CASCALHO: IHX-10V-1153-DT (NOV/84); IHX-10V-1157-DT (FEV/85).		



### QUADRO 7.7.10-7

AHE Belo Monte - Ensaios executados em rochas de fundação (ELETRONORTE, 2002).

ROCHAS		ENSAIOS							
		Lâminas Petrográficas UNESP Rio Claro	Índices Físicos (TUC/LCEC)	Compressão Simples por Deformabilidade (TUC/LCEC)	Tração (TUC/LCEC)	Cisalhamento Direto (LCEC)	Expansão (LCEC)	Abrasão Los Angeles (TUC)	Raios X (IPT)
MIGMATITO	Amostras 1, 3 e 4 (pouca foliação)	3	3	3	3	-	-	1	-
	Amostras 2, 8, 9, 10 e 11 (sem foliação)	5	3	3	3	-	-	1	-
	Amostras 5, 6, e 7 (com foliação)	3	3	3	3	-	-	1	-
	Amostras 12 e 13 (cataclasado)	2	3	3	3	-	-	1	-
	Amostras 16 e 17 (alterado)	1	3	3	3	-	-	-	-
Cataclasito/ Milonito Amostras 14 e 15		3	3	3	3	-	-	-	-
Folhelho Amostras 18, 19 e 20		-	3	3	-	4	3	-	-
Ritmito Amostras 21, 22, 23 e 24		-	4	4	3	4	4	-	-
TOTAL		17	25	25	21	8	7	4	-

Programa N°: GT/012-PG

Relatórios N°: TUD-40-6449-RE

IHX-16V-1049-DT (DB-31)

IHX-16V-1050-DT (DB-32)

#### d) Sítio Bela Vista

Os materiais naturais de construção e fundação encontrados na região do Sítio Bela Vista, por apresentarem origem geológica e petrográfica semelhante aos estudados anteriormente na 1ª Etapa dos Estudos de Viabilidade nos Sítios Belo Monte e Bela Vista (antigo Juruá), não foram ensaiados. Por isso, foram adotados os mesmos parâmetros obtidos anteriormente para estes materiais.

#### e) Diques do Sítio Belo Monte

A quantificação dos ensaios executados para os materiais naturais de construção e de fundação está apresentada respectivamente nos **QUADROS 7.7.10-8 e 7.7.10-9**.

### QUADRO 7.7.10-8

Diques do Sítio Belo Monte - Ensaios executados em solos das áreas de empréstimo (ELETRONORTE, 2002).

Dique	Número de Áreas Investigadas	Volumes Investigados (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	TIPOS DE ENSAIOS					
			Granulometria com Sedimentação	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Densidade dos Grãos	Compactação	Umidade Natural
DIK-03	03	1,8	12	12	12	12	06	27
DIK-07	02	4,7	24	24	24	24	12	39
DIK-08	05	12,4	68	68	68	68	34	124
DIK-10A	01	0,5	10	10	10	10	05	11
DIK-11	01	0,8	06	06	06	06	03	10
DIK-13	05	12,4	70	70	70	70	35	156
DIK-14A	01	2,1	08	08	08	08	04	26
DIK-14C	03	5,4	24	24	24	24	12	69
DIK-14D	02	3,3	18	18	18	18	09	37
DIK-14E	01	1,9	12	12	12	12	06	28
DIK-18	01	0,6	08	08	08	08	04	11
DIK-19	03	8,9	44	44	44	44	22	98
TOTAL	28	54,8	304	304	304	304	152	636

Referência: Programa N<sup>os</sup> GT/010-PG  
 GT/011-PG  
 Relatórios N<sup>os</sup> IHX-16V-1013RE  
 GT/020-RR  
 GT/021-RR  
 GT/022-RR  
 GT/023-RR

### QUADRO 7.7.10-9

Diques do Sítio Belo Monte - Ensaios executados em solos de fundação (ELETRONORTE, 2002).

DIQUE	TIPOS DE ENSAIO										
	CARACTERIZAÇÃO						Permeabilidade (*)	Adensamento com Inundação	TRIXIAL		
	Granulometria com Sedimentação	Limite de Liquidez	Limite de Plasticidade	Densidade Natural	Densidade dos Grãos	Umidade Natural			$\bar{R}$	$\bar{R}_{sat}$	S
DIK-08	1	1	1	1	1	1					
DIK-11	1	1	1	1	1	1	1		1	1	
DIK-13	3	3	3	4	4	4	4	1	3	4	1
DIK-14C	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
DIK-14D	1	1	1	2	2	2					
DIK-19	1	1	1	2	2	2					
TOTAL	8	8	8	11	11	11	6	1	5	6	2

\* Determinada em ensaios triaxiais (Rsat), durante a saturação por percolação.

Referência: Programa N<sup>o</sup> IHX-AR-7 N<sup>o</sup> 031/G.T. (Ata de Reunião)  
 Relatório N<sup>o</sup> G.T./026RR

**f) Canais de Adução (Transposição Cobal - Santo Antônio)**

Os ensaios em solos ocorrentes neste trecho dos Canais de Adução resumiram-se à 1ª etapa, tal como ocorreu em relação aos materiais de construção dos diques.

Todos os ensaios foram efetuados no Laboratório de Solos do CNEC, em São Paulo, conforme apresentado no **QUADRO A 7.7.10-10**, e concluídos em março de 1983.

**QUADRO 7.7.10-10**

Canais de Adução - Ensaios executados em solos de fundação (ELETRONORTE, 2002).

ITEM	ENSAIO	FUNDAÇÕES	
		CNEC - SP	
		1ª FASE	TOTAIS
01	Densidade de grãos	6	6
02	Limites de liquidez e plasticidade	6	6
03	Análise granulométrica com sedimentação	12	12
04	Umidade natural	25	25
05	Densidade natural	25	25

Referências: Programa Nº IHX-10V-1092-RE  
Relatório Nº IHX-10V-1112-RE

**7.7.10.2 AVALIAÇÃO DOS SÍTIOS**

**7.7.10.2.1 SÍTIO PIMENTAL**

**a) Sufficiência das investigações**

O **QUADRO 7.7.10-1** e a **FIGURA 7.7.10-1** apresentam respectivamente os quantitativos e as plantas de localização das investigações realizadas no Sítio Pimental.

As investigações nas fundações desse sítio foram realizadas através de mapeamento geológico-geotécnico apoiado por poços e sondagens a trado, sondagens a percussão, rotativas e geofísicas.

Foram escavados três poços objetivando basicamente a inspeção. As sondagens a percussão de diâmetro 2<sup>1/2</sup>" foram executadas nas ombreiras e em algumas ilhas, visando a obtenção de valores de SPT e determinação da permeabilidade do solo *in situ*, além de uma primeira avaliação do posicionamento do topo rochoso. As de diâmetro 6" foram executadas na calha do rio, sobre ilhas e sobre flutuante, objetivando determinar a ocorrência de material aluvionar arenoso.

As sondagens rotativas foram executadas no leito do rio, em ilhas e principalmente sobre flutuantes, visando basicamente a determinação do topo rochoso e das condições geológico-geotécnicas da rocha de fundação. Suas profundidades se limitaram, inicialmente a 10 m em

rocha são medianamente alterada e com o decorrer da campanha os furos foram aprofundados, chegando a atingir até 30 m em rocha de boa qualidade.

Foram realizadas sondagens geofísicas pelo método da sísmica de reflexão, com a finalidade de efetuar levantamentos batimétricos e determinação das espessuras das coberturas aluvionares nos trechos submersos do leito do rio Xingu, enquanto aquelas executadas pelo método de sísmica de refração permitiram a investigação das fundações dos barramentos nos trechos secos.

Observa-se que os tipos de investigações efetuados são aqueles normalmente empregados para investigar as condições de fundação e efetuar a caracterização geológico-geotécnica de sítios com natureza geológica similar. Nas próximas etapas de projeto, as investigações deverão ser programadas e dirigidas para o detalhamento das características dos possíveis condicionantes e processos relacionados a risco. Serão necessárias coleta de amostras e execução de ensaios de laboratório para a caracterização de algumas unidades geológico-geotécnicas, tanto de solos como de rochas, para as quais foram adotados os mesmos parâmetros obtidos em outros locais da obra, com base na consideração de origem geológica semelhante.

## **b) Estruturas de Concreto (alternativa Ilha da Serra)**

### **b.1) Aspectos geológico-geotécnicos**

As estruturas de concreto estão localizadas na calha do rio Xingu entre as ilhas da Serra e Marciana e possuem altura máxima de 35 m. Junto à Ilha Marciana, localiza-se a falha da Marciana com direção N-NE, cujo traço não intercepta, a priori, as estruturas de concreto.

O sítio Pimental situa-se em região de rochas migmatíticas da Unidade AxxIII do Complexo Xingu que se encontram aflorantes.

O fundo do rio, no local, apresenta topografia assimétrica, com platôs na superfície do topo rochoso em torno da cota 82 m nas proximidades da Ilha da Serra e da Ilha Marciana e canal profundo com topo rochoso na cota aproximada 67 m, preenchido por aluvião arenoso, com cerca de 10 m de espessura.

Na parte mais profunda do canal, ocorre ainda, um solo de alteração de migmatito com espessura de cerca de 1,5 m e logo em seguida um pacote de cerca de 4 a 7 m de rocha muito alterada, extremamente fraturada com fraturas subhorizontais e subverticais abertas, eventualmente de elevada perda d'água específica. Foi identificada uma massa argilosa de cor esverdeada preenchendo cavidades em porções alteradas do metagranito. Visando a sua caracterização petrográfica, foram executadas análises de difratometria de raios-X e lâminas petrográficas. Em profundidade, o maciço rochoso de fundação apresenta-se normalmente são e pouco a medianamente fraturado, com as fraturas visualmente fechadas.

O migmatito desta região possui foliação com direção principal de N50°W/ 75°SW, sendo o paleossoma formado por um hornblenda-biotita gnaiss de cor cinza escuro, foliado, de granulação fina e o neossoma um metagranito de cor branco-rosado, de granulação média a grossa. Estes litotipos que compõem o migmatito, juntamente com a foliação, não apresentam influência relevante na anisotropia do maciço. Ensaios de compressão simples realizados em

testemunhos de sondagens corroboram que não há influência dessa anisotropia na resistência da rocha.

O fraturamento do maciço apresenta-se, de forma geral, isotrópico. Quando caracterizado nos afloramentos dos “pedrais”, apresenta cinco famílias de juntas subverticais (com mergulho superior à 70°), com predomínio de direções NNE, NNW e ENE. Complementarmente, quando identificado nas sondagens rotativas verticais, é composto por seis famílias de juntas predominantemente subhorizontais a inclinadas com baixo grau (com mergulho até 30°), com direções preferenciais NNE, ENE, NNW e WNW. As juntas observadas nas sondagens apresentam-se, de modo geral, rugosas e levemente onduladas, com paredes em contato rocha/rocha. Eventualmente ocorrem com as paredes oxidadas ou cobertas por película argilosa amarelada/esverdeada e, mais raramente, preenchidas com calcita. De maneira geral, os espaçamentos observados entre as juntas conferem ao maciço rochoso um padrão de fraturamento considerado como pouco a medianamente fraturado (F2/F3), indicando ser adequado como fundação às estruturas de concreto. Ressalta-se, entretanto, que o fraturamento subvertical poderá acarretar instabilizações nos taludes laterais durante as escavações.

A análise das investigações da campanha de sísmica de reflexão identificou que, localizadamente, em subsuperfície, ocorre uma anomalia geológica no leito do rio, nas imediações das estruturas de concreto, formada por um bolsão de material decomposto que se encontra subjacente ao pacote aluvionar. A presença desta anomalia foi confirmada com a execução de sondagens rotativas.

Em termos hidrogeotécnicos, o maciço apresenta-se permeável apenas nos primeiros 10,0 m de profundidade, destacando-se a família de juntas subhorizontais como a principal via de percolação. Na campanha de investigações realizadas foram identificadas, como descritas anteriormente, feições subhorizontais com permeabilidades mais elevadas. Entretanto, há ainda que se definir, em etapas posteriores dos estudos de engenharia, a existência ou não de continuidade lateral dessas feições e/ou a presença disseminada ao longo das estruturas.

Considerando as similaridades relativas às características geológicas e petrográficas existentes entre os maciços rochosos migmatíticos dos Sítios Pimental e Belo Monte, foram adotados os mesmos parâmetros de resistência e deformabilidade para os dois locais, que visaram a formulação do modelo geomecânico do maciço. Desta forma, com os ensaios realizados em testemunhos de sondagens do Sítio Belo Monte, adotando-se a teoria de Hoek (1983), e usando-se a classificação de Bieniavsky (1976), obteve-se a envoltória de  $\tau = 0,37 + \sigma' \text{tg } 54^\circ$ , em MPa. Para deformabilidade, foi adotado o módulo de deformação  $E = 35 \text{ GPa}$  e para coeficiente de Poisson o valor de  $\nu = 0,25$ .

## **b.2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados, aos quais podem estar associados eventuais riscos são:

- Areia aluvionar possivelmente de elevada condutividade hidráulica normalmente preenchendo canais profundos que podem responder por processos de *piping* nas fundações das ensecadeiras caso não removidas. Não está descartada a possibilidade

de blocos de rocha associados a esses aluviões. As dificuldades de tratamento e o grau de risco está relacionado às características desses canais e presença de blocos.

- Irregularidades no topo de rocha e presença de zonas de maior alteração e/ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a estabilidade, percolação e deformabilidade das fundações das estruturas de concreto.
- Presença de descontinuidades subhorizontais relacionadas à alívio de carga, abaixo da superfície de fundação, associadas a fraturamento e/ou alteração, que podem representar condicionantes para a estabilidade, percolação e deformabilidade das fundações das estruturas de concreto.
- Foliação, falhas e fraturas associadas NW, subparalelas ao eixo das estruturas e falhas e fraturas associadas NE perpendiculares ou subperpendiculares ao eixo das estruturas, predominantemente subverticais, que podem responder por tombamentos, deslizamentos planares e em cunha nos taludes de escavação.
- Foliação, falhas e fraturas associadas NW, subparalelas ao eixo das estruturas e falhas e fraturas associadas NE perpendiculares ou subperpendiculares ao eixo das estruturas, predominantemente subverticais, que podem condicionar a presença de zonas alteradas e/ou extremamente fraturadas representar condicionantes para a estabilidade, deformabilidade e percolação das fundações das estruturas de concreto.

### **b.3 ) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

Especificamente para o Vertedouro Principal, o perfil da linha de escavação foi ditado mais pela geometria do perfil vertente e demais elementos de drenagem que pela condições geológico-geotécnicas de fundação. Em apenas alguns pontos localizados foi prevista a execução de concretagens adicionais onde a rocha de qualidade encontra-se pouco mais profunda.

O tratamento da fundação é constituído por cortina de injeção até a cota 43,0 m e por linha de furos de drenagem que atingem a cota 46,0 m, executados a partir da galeria de montante, que tem piso na cota 69,0 m. Na galeria de jusante, com piso na cota 66,5 m, deverá ser executada apenas a linha de drenagem.

As injeções serão executadas em duas linhas, com inclinação de 10° e 30° para montante, com furos espaçados de 3,0 m, devendo ser realizadas, inicialmente, a linha de furos de montante – inclinação de 30° – com o dobro do espaçamento e, somente se necessário, os demais. A linha de jusante – inclinação de 10° – é eventual e somente será executada caso tenha ocorrido elevada absorção na linha de montante.

O sistema de drenagem é constituído por uma única linha de furos verticais com o espaçamento de 3,0 m.

Está prevista a drenagem superficial sob a laje da Bacia de Dissipação, constituída de uma malha de meias-canas interligadas, com saída para a galeria de jusante, na cota 66,6 m. A laje será ancorada através de uma malha de chumbadores espaçados de 3,0 m, nos dois sentidos, tendo cada chumbador um comprimento de 2,0 m a partir do topo rochoso.

O projeto da Tomada d'Água/Casa de Força Complementar prevê uma cortina de injeção executada na extremidade de montante da galeria de montante na cota 64,2 m. As injeções serão executadas em 2 linhas, com inclinação de 10° e 30° para montante, com furos a cada 3,0 m, que deverão atingir a cota 43,0 m. Será executada, inicialmente, a linha de furos de montante – 30° de inclinação – com o dobro do espaçamento, e, somente se necessários, os demais. A linha de jusante, com 10° de inclinação, é eventual e somente será executada caso tenha ocorrido elevada absorção na linha de montante.

A galeria de jusante – elevação 64,0 m – possuirá um sistema de drenagem profunda, constituído por furos espaçados de 3,0 m que atingirão a cota 46,0 m. A água captada nessa galeria será direcionada ao poço de drenagem do Vertedouro Principal – elevação 56,5 m.

Ainda, segundo o projeto, o tratamento das fundações dos muros será um tratamento superficial simples e sem injeções.

### **c) Barragem do Canal Direito**

#### **c.1) Aspectos geológico-geotécnicos**

O Canal Lateral Direito está situado entre a ilha da Serra e a Margem Direita do rio Xingu, e a barragem possui altura máxima de 34 m.

A superfície topográfica do canal do rio possui cota média aproximada 68 m, sendo que o ponto mais profundo do canal encontra-se na cota 64 m. O aluvião, composto por areia fina, média e grossa, ocorre nas proximidades da margem direita com espessura de até 3,15 m, enquanto nos demais trechos encontra-se ausente ou com espessuras insignificantes.

O maciço rochoso apresenta as características semelhantes às encontradas nas estruturas de concreto. As sondagens rotativas executadas na área apresentaram, nas proximidades da cota 61 m, fraturas predominantemente subhorizontais com paredes alteradas e película de argila amarela, associadas quase sempre a altos valores de perda d'água específica.

Nas ombreiras do barramento, tanto na ilha da Serra como na Margem Direita, o aterro será assentado sobre o solo de alteração de migmatito, composto predominantemente por um silte argiloso, marrom amarelado com manchas esbranquiçadas e com valores do índice de resistência à penetração no ensaio SPT da ordem de 10 golpes que vão aumentando em profundidade até atingir o impenetrável.

#### **c.2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados aos quais podem estar associados riscos são:

- Irregularidades no topo de rocha e presença de zonas de maior alteração e ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a percolação e processos de piping nas fundações das enscadeiras e barragem.



- Presença de descontinuidades subhorizontais relacionadas à alívio de carga, abaixo da superfície de fundação que podem representar condicionantes para a percolação e processos de piping das fundações das ensecadeiras e barragem.
- Foliação, falhas e fraturas associadas NW, subparalelas ao eixo da barragem e falhas e fraturas associadas ENE, NE e NNE perpendiculares ao eixo das estruturas, predominantemente subverticais, que podem responder pelo controle de percolação e por processos de piping pela fundação da barragem e ombreiras.

### **c.3) Tratamentos da fundação previstos em projeto**

Com no conhecimento obtido sobre a fundação, está previsto em projeto a remoção de todo material aluvionar na região do canal para que a fundação do núcleo argiloso se faça diretamente sobre a rocha. Também serão necessários o tratamento de fundação com concreto dental onde a rocha apresentar taludes negativos e depressões localizadas, e a execução de uma linha de injeção exploratória, que poderá progredir para uma cortina de injeção, dependendo das absorções observadas.

Para a barragem homogênea, além da execução dos filtros, será realizada a escavação de uma trincheira de vedação – *cut-off* – no trecho de aluvião, para interceptar a camada arenosa de alta permeabilidade na sua base. Nos trechos onde a trincheira de vedação atingir o topo rochoso do migmatito, ou a espessura do solo de alteração for muito reduzida, será dada continuidade à linha de injeção exploratória adotada no canal direito, que poderá eventualmente progredir para cortina de injeção dependendo dos resultados das absorções. Nas ombreiras, a seção homogênea em solo incorpora trincheira exploratória para averiguação das características de permeabilidade e deformabilidade do solo superficial.

#### **d) Barragem de Ligação com a Ilha da Serra**

Apresenta altura máxima de 20 m e será apoiada parcialmente sobre o topo rochoso do fundo do rio e complementada sobre o solo de alteração do migmatito existente na ilha da Serra.

Todas as características geológicas dos maciços de fundação (rochoso/terroso) são semelhantes às descritas para o caso das Estruturas de Concreto e da Barragem do Canal Direito. Assim os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados que podem estar associados a riscos, bem como os tratamentos de fundação previstos em projeto, são similares àqueles da Barragem do Canal Direito.

#### **e) Barragem de Terra Lateral Esquerda**

##### **e.1) Aspectos geológico-geotécnicos**

A Barragem de Terra Lateral Esquerda com altura máxima de 20 m complementa o barramento Ilha da Serra desde a Casa de Força Complementar/Área de Montagem até a ombreira esquerda do rio Xingu.

A maior parte deste barramento intercepta as ilhas Marciana, Pimental e do Forno, que apresentam cobertura aluvionar de cerca de 4 m de espessura, composta por uma camada superficial argilo siltosa, cinza com manchas amareladas, de consistência média a rija, com

espessura média de 2 m e valores de índice de resistência à penetração no ensaio SPT médios superiores a 9 golpes e normalmente com baixos valores de permeabilidade. A presença de canalículos de dimensões milimétricas eventualmente pode provocar valores mais significativos de permeabilidade. Sotoposto a este material argiloso ocorre uma camada de areia com granulometria variada, desde areia fina até grossa.

O maciço rochoso migmatítico normalmente apresenta-se são a medianamente alterado e pouco a medianamente fraturado. A campanha de geofísica identificou uma anomalia geológica na ilha Pimental, com cerca de 350 m de comprimento ao longo do eixo da barragem. Esta região foi investigada também com a execução de sondagem rotativa e a análise dos testemunhos, inclusive com lâmina petrográfica confeccionada a partir de amostra colhida da sondagem, identificou a rocha desta anomalia como sendo um tremolitito (composta apenas por anfibólio tremolita). Portanto, tudo indica que esta anomalia é o resultado da alteração hidrotermal de uma rocha básica intrusiva. Este tremolitito apresenta-se muito fraturado e totalmente alterado até a profundidade de 22 m, na cota 64 m. O solo de alteração deste material apresenta valores de índice de resistência à penetração no ensaio SPT superiores a 12 golpes e com permeabilidade variando entre  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$  cm/s. O maciço rochoso abaixo da cota 64 m apresenta-se são, pouco a medianamente fraturado e com baixos valores de permeabilidade.

## **e.2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados aos quais podem estar associados riscos são:

- Irregularidades no topo de rocha e presença de zonas de maior alteração e ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a percolação e processos de piping para a barragem e para as ensecadeiras.
- Presença de descontinuidades subhorizontais relacionadas à alívio de carga, abaixo da superfície de fundação que podem representar condicionantes para a percolação e processos de piping das fundações das ensecadeiras e barragem.
- Foliação, falhas e fraturas associadas NW, NNE e NE, perpendiculares e subperpendiculares ao eixo da barragem e falhas e fraturas associadas ENE subparalelas ao eixo da barragem, predominantemente subverticais, que podem responder pelo controle de percolação e processos de piping pela fundação da barragem e ombreira esquerda. Especial destaque é relativa aos canais entre as ilhas onde estão detectadas as falhas da Ilha Grande e da Marciana, conforme apresentadas no mapa geológico do sítio.
- Eventual presença de argilas muito moles a moles e/ou de areia fofas nos aluviões, com características de alta deformabilidade e baixa resistência, que podem responder por processos de instabilizações.

### e.3) Tratamentos da fundação previstos em projeto

Na fundação da Barragem de Terra Lateral Esquerda, serão efetuados tratamentos similares aos adotados para a Barragem do Canal Direito. Na região referente as calhas naturais inter-ilhas, será procedida a remoção do aluvião arenoso e blocos de rocha, além dos tratamentos superficiais (tratamentos de fendas, depressões, retaludamentos, etc) e profundos (linha de injeção exploratória que pode progredir para cortina de injeção).

Para os trechos de aluvião que recobre as ilhas (do Meio, da Marciana, Pimental e demais ilhas ao longo do eixo), onde ocorre camada arenosa na base do pacote aluvionar com espessura total de aproximadamente 4,5m, será executada trincheira de vedação até atingir o topo do solo de alteração ou do próprio migmatito, efetuando assim o controle de percolação. O aluvião argiloso observado em superfície teve suas características de resistência e deformabilidade avaliadas em ensaios de laboratório, que permitiram a sua manutenção na fundação. Nos trechos onde a base da trincheira de vedação situar-se diretamente sobre o topo rochoso, ou com espessura de solo de alteração muito reduzida, será implementada uma linha de injeção exploratória/cortina de injeções conforme critérios citados para os demais trechos da barragem.

Na extremidade esquerda da barragem, além da planície aluvionar e em direção à sua ombreira, será implantada trincheira exploratória para verificação das características dos solos coluvionares e de alteração de migmatito em superfície.

#### 7.7.10.2.2 CANAIS DE ADUÇÃO E ÁREAS DE BOTA FORA

##### a) Suficiência das investigações

O **QUADRO 7.7.10-2** e as **FIGURAS 7.7.10-2** e **7.7.10-3** apresentam respectivamente os quantitativos e as plantas de localização das investigações realizadas nos canais de adução.

As investigações desse sítio foram realizadas através de mapeamento geológico-geotécnico, estudo sobre a incidência e dimensões de matacões, sondagens a trado, sondagens a percussão, alguns medidores de nível d'água e extensas campanhas de investigações geofísicas.

As investigações geológico-geotécnicas nos Canais de Derivação Esquerdo e Direito foram executadas através de sísmica de refração, em seções transversais aos canais de drenagem espaçadas a cada 250 m, 20 sondagens a trado de diâmetro 4" (ST-603 a 621) e 27 sondagens a percussão de diâmetro 2 1/2" (SP-601 a SP-627), todas com ensaios de SPT e em algumas com ensaios de permeabilidade (infiltração). O Canal Direito foi parcialmente investigado com sondagens a percussão em um trecho de pequena extensão.

Nos Canais de Adução, situados entre o Trecho da Junção e a Tomada d'Água, as investigações realizadas constaram de algumas seções geofísicas, não tendo sido executadas sondagens mecânicas e manuais.

Nas próximas etapas, investigações diretas, constituídas principalmente por sondagens mecânicas, deverão ser efetuadas obrigatoriamente nos trechos onde essas investigações são inexistentes ou seja, em grande extensão do Canal de Adução Direito e nos Canais de Adução

entre o Trecho da Junção e a Tomada d'Água. Serão necessários coleta de amostras e execução de ensaios de laboratório para a caracterização de algumas unidades geológico-geotécnicas, tanto de solos como de rochas, para as quais foram adotados os mesmos parâmetros obtidos em outros locais da obra, com base na consideração de origem geológica semelhante. As investigações das próximas etapas deverão ser programadas e dirigidas para o detalhamento das características dos possíveis condicionantes e processos relacionados a risco.

#### **b) Aspectos geológico-geotécnicos**

Na região dos Canais, ocorre predominantemente espessa cobertura de material de alteração de rochas migmatíticas do Complexo Xingu, com muitos blocos rochosos (matacões). Estes matacões possuem dimensões variadas, desde centimétricas até métricas, o que sabidamente acarretarão dificuldades especiais na escavação.

Os valores de propagação de ondas sísmicas indicaram velocidades elevadas (superiores a 5000 m/s) no maciço rochoso, sugerindo a presença de rocha de boa qualidade geomecânica.

O solo aluvionar orgânico, encontrado no fundo de alguns vales, observados nas sondagens e no caminhamento de campo para o mapeamento geológico, nunca ultrapassou a espessura de 1 m. Nas encostas ocorre um coluvião areno siltooso, poroso, normalmente com espessura inferior a 2 m. O solo de alteração do migmatito predominante é composto pela fração silto-argilosa, muito embora em profundidade passem a ser mais arenosos. Os valores do índice de resistência à penetração do ensaio SPT geralmente são superiores a 10 golpes e vão aumentando em profundidade até atingir o impenetrável. A permeabilidade constatada nos ensaios de infiltração foi muito baixa ( $10^{-5}$  a  $10^{-8}$  cm/s).

#### **c) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados que podem responder por riscos são:

- Eventual presença de solos não saturados espessos e de baixa resistência suscetíveis a fenômenos de colapso quando saturados.
- Zonas de alta condutividade hidráulica junto ao topo rochoso e ao longo de falhamentos, onde a percolação de água deve se concentrar, eventualmente com efeitos indesejáveis como infiltrações durante as escavações.
- Alterações dos volumes dos das diferentes classes de materiais escavados com conseqüente alteração desses volumes a serem dispostos em bota-fora.
- Bota - foras com alturas entre 10 e 20 m constituído por material silto-argiloso e silto-arenoso podem estar sujeitos a erosões especialmente nos talvegues em contato com o terreno natural, devido à ação das águas superficiais.
- A eventual presença de unidades geológico-geotécnicas de baixa resistência sob os bota-foras, a elevação ou a criação de um nível de água suspenso com a saturação desses bota-foras e/ou de unidades da fundação podem gerar condições para processos de instabilidades potenciais.

#### **d) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

À exceção dos Canais de Derivação, que serão escavados parcialmente em rocha, todos os demais trechos serão escavados exclusivamente em solo, ou com ocorrências muito restritas de rocha.

Segundo o projeto, os canais de derivação serão revestidos em concreto e possuem extensão individual de 12,5 km, com largura de base variando entre 160,0 m até 400,0 m, dependendo de sua localização, e cotas de escavação também variáveis de 77,0 m a 85,0 m. Os volumes totais de escavação atingirão cerca de 130 milhões de metros cúbicos em solo e prevê-se que cerca de 45 milhões de metros cúbicos serão de escavação em material pétreo. Estima-se que para revestimento desses canais serão utilizados cerca de 1.100.000 m<sup>3</sup> de concreto.

Para o trecho da junção, a ser construído sobre o vale do Igarapé Paquiçamba, com uma extensão total de 8,2 km, estima-se um volume total de escavação de 33 milhões de metros cúbicos. É previsto que, na parte inicial deste trecho, com cerca de 5,3 km de extensão, o canal deverá ser revestido em concreto e a parte restante, com aproximadamente 2,9 km de extensão, deverá ser escavado em solo e revestido com material granular (enrocamento fino).

Uma das características principais do trecho revestido é a de que boa parte da fase de escavação, bem como toda a fase de execução do revestimento, serão trabalhadas abaixo do nível freático atual. Assim, além da necessidade de se efetuar a drenagem da água escoada superficialmente, ter-se-á também que drenar a contribuição do lençol freático, esta última ocorrendo de forma contínua ao longo do ano. Para possibilitar a saída constante dessas contribuições por gravidade, foi projetado um aprofundamento central na seção transversal, que terá a função de canal de drenagem. Esta faixa, concebida com 10,0 m de largura, não será revestida e terá declividade longitudinal de 0,03%, o que fará com que sua profundidade varie entre 0,5 m e 4,5 m. Estima-se que mais de 90% da faixa central rebaixada será escavada em rocha.

O revestimento de concreto deverá estar apoiado sobre camada de regularização que também terá função drenante. A camada de regularização, com espessura de 0,15 m na base e 0,2 m nos taludes, será composta de duas subcamadas: a inferior, com 0,12 m na base e 0,15 m nos taludes, será formada por pedra britada 1 e 2; a superior, de areia, permitirá uma melhor definição geométrica da superfície e servirá de suporte para a aplicação do concreto. O projeto destaca ainda que nos locais onde o fundo do canal for escavado em solo, face às condições de saturação deste último, está prevista, abaixo da camada de regularização, uma camada de lastro de enrocamento fino compactado com cerca de 0,15 m de espessura. Tal camada dará condições para o tráfego dos equipamentos que executarão as camadas subseqüentes.

Os canais de adução serão revestidos com enrocamento.

A disposição dos materiais e os acabamentos superficiais dos bota-foras, como previsto em projeto, deverão garantir:

- Taludes estáveis, obtidos pela conjugação adequada de sua inclinação com as características de resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes do bota-fora e da fundação, e com o novo regime hidrogeológico que será estabelecido no local. Para tanto, é prevista o lançamento de materiais em ponta de aterro limitados à altura máxima de 10,0 m, com conformação posterior de taludes externos com inclinação média máxima de

- 1(V):5,0 (H), utilizando-se tratores de esteira e retro-escavadeiras, e a implantação de bermas de forma a permitir a implantação de dispositivos de drenagem superficial e acesso. Observa-se que estes parâmetros vem ao encontro do previsto na Norma da ABNT específica para a disposição de materiais estéreis em bota-fora;
- Superfície do terreno estável, onde os recalques superficiais apresentem tendências estabilizantes, em decorrência de camadas espalhadas em espessuras apropriadas;
  - Solos superficiais que condicionam a estabilidade deverão ser removidos;
  - Núcleos dos bota-foras estáveis, obtidos pelo emprego de critérios de transicionamento granulométrico nas superposições de camadas de granulometria diferenciada, evitando-se processos de erosão interna;
  - Criação de elementos na superfície (bacias de acumulação, canais de retenção e condução do escoamento superficial - “curvas de nível” – calhas protegidas com enrocamento nos pontos de acumulação nos novos talvegues, recorrendo-se a degraus nos locais com maiores declividades, etc.) que permitam a retenção, coleta e condução apropriada da água de escoamento superficial até as drenagens naturais ou o próprio canal de adução;
  - Cobertura vegetal que propicie estabilização superficial ao terreno e maior retenção da água pluvial.

### 7.7.10.2.3 SÍTIO BELO MONTE

#### a) Suficiência das investigações

O **QUADRO 7.7.10-3** apresenta os quantitativos das investigações realizadas e as **FIGURAS 7.7.10-4** e **7.7.10-5** mostram a planta de localização das investigações realizadas no Sítio Belo Monte.

O Sítio Belo Monte situa-se em região de rochas migmatíticas e gnáissicas do Complexo Xingu e sedimentares das Formações Trombetas e Maecuru, que se encontram, em geral, alteradas em solo nas suas porções superficiais. Assinala-se a presença de falhas como a da Catijuba (NW) e do Córrego Santo Antonio (NNE) na Barragem de Santo Antonio, Falha da SR-6 (NNW) e outras falhas, zonas catacladasas e milonitizadas NW na Barragem Lateral Esquerda, falhas E-W na Barragem Lateral Direita e falhas NNW na região das estruturas de concreto.

Os estudos das fundações iniciaram-se através de detalhado mapeamento geológico-geotécnico apoiado por poços, sondagens a trado e algumas sondagens rotativas com objetivo estratigráfico. Nesta etapa foram caracterizadas as litologias presentes no sítio e suas principais feições geológicas e geotécnicas, assim como as características dos solos de cobertura de cada litologia.

Na etapa seguinte, os estudos foram direcionados para as alternativas dos arranjos de eixo da Tomada d'Água e realizados através de investigações com sondagens a percussão, poços para amostragem, sondagens geofísicas e sondagens rotativas.



As sondagens a percussão foram executadas ao longo do eixo e de seções transversais das barragens, visando à obtenção de valores de SPT, determinação da permeabilidade *in situ* e caracterização tátil-visual da granulometria e da natureza dos solos. Suas profundidades se limitaram a 30 m ou ao impenetrável ao ensaio de lavagem por tempo.

Os poços permitiram a observação *in situ* dos aspectos dos solos, principalmente com relação à sua porosidade, compacidade ou consistência e presença de estratos menos resistentes e de estruturas ou camadas permeáveis. A partir dessas observações e dos resultados dos ensaios realizados nas sondagens, foram escolhidos os materiais de interesse para amostragem indeformada. Essas amostras foram extraídas nas dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm e 15 cm x 15 cm x 15 cm, dependendo da coesão dos materiais, para a execução de ensaios de caracterização, triaxiais, de deformabilidade e de permeabilidade.

As sondagens geofísicas foram realizadas ao longo das alternativas dos arranjos com a finalidade de orientar a programação de sondagens rotativas, através da determinação indireta das profundidades do topo rochoso e dos contatos litológicos. Além disso, tiveram grande importância para subsidiar os estudos de alternativas de eixo das estruturas de concreto, possibilitando, após aferições com as sondagens rotativas ali executadas, a confecção do mapa do topo rochoso de toda a área de interesse.

As sondagens rotativas foram realizadas visando, basicamente, à determinação precisa do topo rochoso e dos contatos geológicos e à caracterização geotécnica dos solos e do maciço rochoso de fundação. As sondagens foram executadas, preferencialmente, ao longo dos eixos alternativos, com espaçamento variável entre 200 m e 400 m ao longo das barragens e de aproximadamente 200 m nos eixos da Tomada d'Água e Casa de Força. Excetuando-se algumas sondagens profundas de cunho estratigráfico, de forma geral, as sondagens rotativas alcançaram profundidades de 1/2 H (meia altura da barragem) ao longo das barragens e Tomada d'Água, cerca de 15 m abaixo da fundação da Casa de Força e, no Canal de Fuga, sua cota máxima de escavação prevista.

As caracterizações geotécnica e geomecânica do maciço rochoso foram realizadas não só através dos ensaios geotécnicos efetuados durante a execução dos furos das sondagens e da classificação dos testemunhos de sondagem, como também através da execução de ensaios de laboratório em amostras de rocha. Esses ensaios, além da análise dos diversos tipos litológicos, foram dirigidos principalmente ao conhecimento dos parâmetros de resistência e deformabilidade das rochas cristalinas presentes nas fundações das estruturas de concreto e dos ritmitos e folhelhos das ombreiras.

Observa-se que os tipos de investigações efetuados e os quantitativos estão muito além e acima do que normalmente se efetua em estudos de viabilidade para investigar as condições de fundação e efetuar a caracterização geológico-geotécnica de sítios de natureza geológica similar para a implantação de estruturas de concreto (Tomadas d'Água, Casa de Força) e de barragens. As investigações das próximas etapas deverão ser dirigidas para o detalhamento das características dos possíveis condicionantes e processos relacionados a risco.



## **b) Barragem de Santo Antonio**

### **b1) Aspectos geológico-geotécnicos**

A Barragem de Santo Antonio localiza-se no vale do igarapé Santo Antônio e apresenta comprimento de 1620 m medidos ao longo da crista, na cota 99 m e altura máxima de 90 m.

A Barragem de Santo Antonio tem as suas ombreiras aproximadamente simétricas, com inclinação média de 9°, ambas com ligeiro patamar, que se desenvolve na ombreira direita em torno da cota 50,0 m e na ombreira esquerda em torno da cota 30,0 m. O vale tem extensão de 180 m, situando-se entre as cotas 9,0 e 14,0 m.

As ombreiras são sustentadas, basicamente, por migmatitos, milonitos e cataclasitos nas porções inferiores e por um pacote de rochas sedimentares capeado por sedimentos do Terciário nas cotas superiores. No vale, ocorrem sedimentos aluvionares.

#### **- Rochas cristalinas, solos residuais e coluviões**

Os migmatitos ocorrem, de modo geral, abaixo da cota 40 m na ombreira direita e abaixo da cota 25 m na ombreira esquerda. Apresentam-se capeados por cerca de 15 m de solo de alteração e 0,5 a 2,5 m de coluvião.

Os milonitos e cataclasitos cortam os migmatitos diagonalmente à Barragem, ao longo da porção central do vale e formam uma estrutura aproximadamente tabular, com espessura da ordem de 110 m e mergulho para jusante em torno de 60°. Estas rochas afloram ao longo do igarapé Santo Antônio e, em geral, são capeadas por espessa camada de solo nas ombreiras.

Os coluviões desenvolvidos sobre estas litologias são geralmente constituídos de argila arenosiltosa, porosa, marrom-avermelhada com blocos de arenito e lateritas ferruginosas na base. Ocorre com a maior espessura (2,5 m) no patamar da ombreira esquerda, logo abaixo do contato entre os solos de migmatito e das rochas sedimentares e caracteriza-se nesse local por apresentar feições de intensa laterização associadas com sua elevada porosidade.

Sob a cobertura coluvionar, o solo residual maduro é, em geral, pouco desenvolvido, chegando a alcançar espessura de 2 m nos migmatitos e até 4 m nos milonitos. Nos primeiros, é constituído de argila arenosiltosa e, nos milonitos, de argila silto-arenosa a silte argilo-arenoso. Em ambos, apresentam sinais de laterização caracterizados, além de cor vermelha-escura-amarelada, pela ocorrência de pequenos torrões duros e consistência geral mais rija em relação ao solo de alteração inferior. Nesta camada de solo foram registrados valores de SPT variáveis entre 11 e 23 e permeabilidades de  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/s a  $1,0 \times 10^{-6}$  cm/s. O solo residual maduro passa transicionalmente para o solo de alteração de migmatito ou de milonito.

O solo de alteração de migmatito é constituído de areia silto-argilosa ou silte areno-argiloso vermelho-arroxeadado, amarelo e branco, variegado e, localmente, laterizado nas porções mais superficiais. Apresenta, de modo geral, os menores valores de SPT (5 a 8) nos seus primeiros três a quatro metros e, daí para baixo, SPT superior a 15. Nas porções laterais à faixa de milonitos, verificou-se também a ocorrência de solos mais compactos superficialmente, incluindo zonas de rocha alterada. A permeabilidade desse solo obtida a partir de ensaios de infiltração nas sondagens varia, em média, entre  $4 \times 10^{-4}$  e  $3 \times 10^{-6}$  cm/s, embora tenha sido

registrado na SP-46 valor de  $3,4 \times 10^{-2}$  cm/s a 8,6 m de profundidade, associado a uma granulometria grosseira envolvendo matacões muito alterados.

O solo de alteração de milonitos e/ou cataclasitos apresenta granulometria mais fina, representada por silte argilo-arenoso vermelho, amarelo-esbranquiçado e arroxeadado, variegado com estruturas remanescentes bem nítidas, representadas pela foliação milonítica e planos de juntas. De modo geral, apresenta valores de SPT entre 5 e 11 até 7 a 8 m de profundidade, passando a uma compactidade progressivamente maior para baixo. As permeabilidades desse solo, medidas nas sondagens, variam entre  $3,5 \times 10^{-5}$  e  $3,5 \times 10^{-6}$  cm/s atingindo, em zonas localizadas,  $2,6 \times 10^{-3}$  cm/s.

Ao longo do vale do igarapé Santo Antônio, os migmatitos e milonitos apresentam uma cobertura de solo de alteração de cerca de 7 m sob um aluvião de até 3 m de espessura. Este é constituído de areia silto-argilosa cinza clara, fofa, com uma camada de areia grossa com seixos na base. O solo de alteração inferior apresenta-se, em geral, compacto e com matacões esparsos.

Sob o capeamento de solo do vale do igarapé Santo Antonio, o maciço rochoso representado pelos migmatitos e gnaisses granodioríticos apresenta-se, de modo geral, são e com baixa permeabilidade. Já na faixa de milonitos e cataclasitos, o maciço apresenta-se intensamente e caoticamente fraturado, com intercalações de solo e rocha totalmente alterada (A4) nos primeiros 10 m e elevada permeabilidade (maior que  $7 \times 10^{-4}$  cm/s) até cerca de 25 m de profundidade. Ao longo do leito do igarapé ocorrem afloramentos dessas rochas, que se apresentam sãs e extremamente fraturadas.

#### - **Rochas sedimentares, solos residuais e coluviões**

Acima da cota 40 m na ombreira direita e cota 25 m na ombreira esquerda, ocorrem sobre as rochas cristalinas os folhelhos e ritmitos da Formação Trombetas e os arenitos da Formação Maecuru, que apresentam suave mergulho aparente para a ombreira esquerda. Devido a este mergulho, a Formação Maecuru, superior, comparece apenas nas fundações da ombreira esquerda e acima da cota 85 m.

Essas litologias apresentam cobertura de solo da ordem de 7 a 10 m, chegando a atingir 18 m no alto da ombreira direita, solo este representado por um coluvião superficial com cerca de 0,5 a 2,5 m de espessura, sobre solo residual.

Os coluviões que recobrem os solos de ritmitos e folhelhos são constituídos mais superficialmente por areia argilo-siltosa, marrom-amarelada, com grãos de laterita esparsos, porosa e fofa, que passa, abaixo de 0,7 a 1 m de profundidade, a argila silto-arenosa amarelo-avermelhada, semi-laterizada ou com grandes concentrações de lateritas ferruginosas e, em geral, com nível de blocos de arenito na base. Ensaio realizados em sondagens forneceram, para esta camada inferior, valores de SPT variáveis entre 8 e 13 e coeficientes de permeabilidade da ordem de  $4 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-5}$  cm/s.

O solo residual dos ritmitos e folhelhos é constituído de argila silto-arenosa micromicácea a silte argilo-arenoso cinza, vermelho e arroxeadado, variegado, menos consistente e com pouca laminação preservada na sua porção mais superficial e progressivamente mais compacto/consistente em profundidade. Um perfil de alteração desse solo é, em geral, constituído das seguintes camadas: no topo, cerca de 30 cm de solo residual variegado com

interpenetração de pequenos blocos e lateritas do colúvio superior e de consistência rija; abaixo, camada de 1 a 1,5 m de solo com zonas cinzas sem estratificação e de consistência média até mole com lateritas esparsas, intercaladas com zonas bem estratificadas com mergulhos caóticos da ordem de 5° a 20°, laterizadas, de maior consistência, que tendem a aumentar para a base; abaixo, cerca de 0,5 a 1 m de solo rijo a muito rijo com estratificação bem preservada e laterização mais localizada e controlada pela estratificação gradacional - areia/silte/argila, formando placas de 5 a 30 cm de extensão; daí para baixo, predomina solo muito rijo a duro cinza escuro, com pouca laterização, que progressivamente passa a rocha de baixa coerência (C4). Em geral, a permeabilidade determinada para esses solos nos ensaios *in situ* situa-se entre  $3 \times 10^{-5}$  e  $2 \times 10^{-6}$  cm/s, com alguns resultados da ordem de  $3 \times 10^{-4}$  até  $3 \times 10^{-3}$  cm/s.

Sob essa cobertura de solo, o maciço mostra-se, em geral, com elevada coerência e muito pouco fraturado subverticalmente. Os ensaios de perda d'água revelaram permeabilidade de até  $1 \times 10^{-4}$  cm/s apenas na porção superior do maciço, provavelmente devido a juntas e/ou estratificação abertas por alívio de tensões.

Nas cotas superiores da ombreira esquerda, onde ocorrem os arenitos da Formação Maecuru, o capeamento de solo é da ordem de 7 m e constituído, superficialmente, por cerca de 2 m de colúvio e 5 m de solo residual. O colúvio é caracterizado por areia siltosa marrom-amarelada fofa e colapsível, com permeabilidade *in situ* da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  cm/s. O solo residual é constituído de areia fina amarelo-esbranquiçada, com SPT entre 8 e 9 nos primeiros 3 m e daí para baixo muito compacto e com permeabilidade variável entre  $7 \times 10^{-3}$  e  $3 \times 10^{-4}$  cm/s.

Sob este solo, o arenito Maecuru apresenta-se friável até próximo do contato com os ritmitos inferiores e pouco fraturado segundo planos subverticais. Na sondagem SR-43, executada com inclinação de 45° para o interior da ombreira, verificou-se a ocorrência de juntas abertas, possivelmente subverticais e subparalelas à ombreira, indicadas pela perda total da água de circulação da sondagem. Da mesma forma, a SR-01, vertical, executada no platô existente no alto da ombreira esquerda também mostrou juntas abertas permeáveis nesse arenito.

Acima dos arenitos Maecuru, ocorrem, em ambas as ombreiras, os sedimentos Alter do Chão, constituídos por areias e argilas semiconsolidadas, em geral capeados por solos coluvionares argilo-arenosos. Não interferem com as fundações da barragem, mas têm fundamental importância na sustentação das ombreiras graças à proteção que exercem contra a erodibilidade do arenito Maecuru.

## **b.2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados aos quais podem estar associados riscos são:

- Arenitos friáveis da Formação Maecuru e solos residuais com elevadas permeabilidades e condutividades hidráulicas como observado em ensaios efetuados representam condicionantes para a percolação, processos de piping e eventuais processos de fugas d'água. O conhecimento de que a Formação Maecuru é portadora de cavidades subterrâneas, originadas através de processos de piping, é outro fator para incluir a possibilidade desses processos na região da ombreira esquerda.

- Folhelhos e ritmitos pouco coerentes e incoerentes e solos residuais dessas rochas de consistência média a mole, bem como descontinuidades nos ritmitos e nos folhelhos, associadas ao acamamento e condicionadas às lâminas de folhelho, subhorizontais, com materiais alterados e incoerentes e de características predominantemente argilosas representam condicionantes para a estabilidade da barragem.
- Presença de milonitos e cataclasitos em zonas de falhas (falha da Catijuba-NW, falha do Córrego Santo Antonio-NNE), alterados, fraturados e com elevada condutividade hidráulica que podem representar condicionantes para a percolação e eventuais processos de piping.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.

### **b.3) Tratamentos de fundação previstos em projeto.**

Conforme pode ser depreendido a partir do mapa geológico local e da planta de escavação para a Barragem de Santo Antonio, para a implantação da barragem de enrocamento com núcleo deverão ser escavados integralmente o aluvião e o coluvião. Sob a zona do núcleo será escavada uma trincheira exploratória e de tratamento com 10,0 m de largura e 4,0 m de profundidade, a partir da escavação do coluvião, com taludes 1,5H:1V. As superfícies das escavações sob o enrocamento não sofrerão tratamento superficial, a não ser a disposição de uma camada de transição entre o enrocamento de jusante e a fundação.

Nas regiões onde, em profundidade, se encontra o migmatito cataclasado, estão previstas injeções de cimento na rocha, em uma única linha, com profundidade mínima de 40,0 m, localizada dentro da trincheira. Também nessas regiões serão executados poços de alívio no pé do talude de jusante. Como estes serviços são eventuais, não estão incorporados nas seções-tipo.

Para as duas ombreiras haverá remoção dos coluviões. Escavações obrigatórias serão também necessárias, buscando-se a obtenção de uma superfície horizontalizada para apoio das barragens sempre que o terreno natural apresentar inclinação desfavorável.

Na ombreira direita a seção da barragem é de taludes abatidos e com bermas estabilizantes em função da baixa resistência da fundação., constituída por folhelhos e ritmitos.

Devido à desagregabilidade dos folhelhos e ritmitos quando expostos ao ar, foi prevista a proteção dos taludes imediatamente após a escavação, o que pode ser feito pela construção do próprio aterro ou por uma camada de solo compactado com no mínimo 1,0 m de espessura, evitando efeitos da expansibilidade destes materiais. Esta camada protetora e os solos de alteração remanescentes deverão ser escarificados nas zonas em contato com o solo compactado da barragem. Não são previstos tratamentos profundos.

Na região do arenito existente na ombreira esquerda, acima da cota 85,0 m, a escavação consistirá na remoção de todo solo coluvionar, expondo-se o solo residual que possui resistência elevada. Neste solo residual será executada uma trincheira de tratamento com 3,0 m de profundidade por 10,0 m de largura, ligeiramente a montante do eixo. A partir dessa trincheira será verificada a conveniência ou não de cortinas de injeção até o contato

arenito/folhelho. A jusante da barragem é prevista a instalação de drenos e medidores de nível d'água.

**c) Barragem Lateral Esquerda**

**c1) Aspectos geológico-geotécnicos**

A Barragem Lateral Esquerda localizada à esquerda da Tomada d'Água apresenta comprimento de 1125 m ao longo da crista e altura máxima de 74 m.

Essa Barragem desenvolve-se, a partir do muro de ligação, sobre migmatitos ao longo de uma extensão de aproximadamente 650 m, sendo os primeiros 300 m em topografia plana, com presença de sedimentos aluvionares, e o restante em aclive suave até a cota 45 m. A partir deste ponto inicia-se a seqüência de ritmitos e folhelhos da Formação Trombetas que sustentam topografia gradativamente mais inclinada, atingindo nos seus 200 m finais, até a cota 99 m, inclinação de 10°.

Na área dos migmatitos, a cobertura de solo varia entre 7 e 20 m, ficando as menores espessuras restritas ao trecho plano da baixada aluvionar. Na área dos ritmitos e folhelhos, sua espessura varia entre 4,5 e 7 m. Os coluviões apresentam, em geral, espessuras de 1 a 2,5 m sobre os solos residuais dos ritmitos e folhelhos e 1 a 1,5 m sobre os solos de migmatito. Os aluviões têm espessura média de 2 m.

Os coluviões existentes na porção inferior da ombreira, até próximo da cota 45 m, são constituídos de argila silto-arenosa marrom amarelada, porosa, mole, com lateritas e blocos de arenito ou quartzo na base. Os coluviões desenvolvidos nas cotas mais elevadas, sobre os solos de ritmitos, estão representados mais superficialmente, até 1 a 1,5 m de profundidade, por argila arenosa marrom, porosa, com blocos de arenito, siltito e concreções lateríticas esparsas, passando para baixo a uma argila silto-arenosa amarela-acinzentada a avermelhada, com grande concentração de lateritas ferruginosas, que chegam a alcançar cerca de 60% do material. Na porção superficial, esses coluviões apresentam, em geral, SPT inferior a 12 e, na camada basal, SPT superior a 20. Os valores de permeabilidade variam entre  $1,5 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-6}$  cm/s.

Os aluviões são, em geral, constituídos de uma camada superficial de 1 m de argila arenosa, cinza, plástica, sobre areia pouco argilosa com seixos na base, compacta, mas permeável.

Nas cotas inferiores da ombreira, os coluviões assentam-se diretamente sobre os solos de alteração de migmatito e gnaisses ou sobre uma camada de até 1 m de solo residual maduro. O solo residual é, em geral, constituído de argila silto-arenosa, vermelha-amarelada, com fortes indícios de laterização marcados pela presença de torrões duros, com baixa permeabilidade e valores de SPT superiores a 20.

O solo de alteração de migmatito é constituído por silte areno-argiloso e areia silto-argilosa, variegados, em geral micáceos e com foliação subvertical ou com mergulho de 60° a 70° para NE ou SW preservada. Nos poços, observa-se a alternância lateral dessas granulometrias, decorrente do bandamento dos migmatitos, formando faixas de solo de compacidade diferenciais na mesma profundidade. Outras características observadas nesses solos são feições de milonitização preservadas, que ocorrem, localmente, transversais à barragem, com espessura de alguns metros e mergulhos fortes e podem representar zonas com caminhos de



percolação preferenciais. Nesses locais, o processo de laterização é mais profundo e provoca um substancial aumento na compactidade do solo.

O solo de alteração de migmatito apresenta um perfil de compactidade baixa nos primeiros 7 a 10 m de profundidade com valores de SPT variáveis entre 5 e 11, a partir da qual passa a adquirir maior resistência, com valores de SPT superiores a 18 ou 20. Quando ocorre sob o solo de ritmito, o solo de alteração de migmatito pode apresentar valores de SPT baixos até profundidades da ordem de 13 a 15 m.

As permeabilidades obtidas para o solo de alteração de migmatito, através de ensaios de infiltração efetuados nas sondagens, situam-se na faixa de  $1 \times 10^{-4}$  e  $7 \times 10^{-6}$  cm/s, mostrando um comportamento bastante variável ao longo do profundo perfil.

As sondagens rotativas, efetuadas no trecho inferior da ombreira, revelaram a ocorrência de grande concentração de matacões e/ou rocha alterada na passagem do solo de alteração para o maciço rochoso, constituindo camada com espessura da ordem de 5 m, que prossegue sob os solos de ritmito. Nessa camada foi registrada, sistematicamente, permeabilidade de  $1 \times 10^{-4}$  cm/s.

Os solos residuais dos folhelhos e ritmitos, que ocorrem acima da cota 45 m sob os coluviões, são representados por argila silto-arenosa e silte argilo-arenoso cinza com manchas vermelho-arroxeadas, em geral extremamente laterizados no seu primeiro metro, onde se intercalam solo com pouca estratificação e concreções lateríticas esparsas e argila laminada com lâminas de silte ou areia limonitizadas. Abaixo de 3,5 m de profundidade, o solo residual já apresenta consistência dura, com SPT superior a 30, pouca laterização e intercalações de rocha de baixa coerência (C4). Basicamente, o topo rochoso ocorre a cerca de 4,5 m de profundidade na porção da ombreira, acima da cota 60 m, abaixo da qual o solo se espessa até cerca de 7 m, porém com elevada consistência. Sua permeabilidade medida em ensaios de infiltração oscila entre  $3,5 \times 10^{-4}$  e  $4 \times 10^{-6}$  cm/s, predominando valores em torno de  $2 \times 10^{-5}$  cm/s.

O maciço rochoso migmatítico capeado pelos solos descritos, apresenta-se são e pouco fraturado, com exceção das faixas miloníticas e cataclásticas que o atravessam localmente, onde o fraturamento é mais intenso. Mostrou-se totalmente estanque nos ensaios de perda d'água.

O maciço rochoso dos folhelhos e ritmitos apresenta-se medianamente coerente (C2) e pouco fraturado (F1 a F2) subverticalmente, com permeabilidade da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  cm/s até profundidades de 10 a 15 m, associada a juntas subverticais e impermeável para o interior do maciço. Na SR-18, essas fraturas permeáveis ocorrem parcialmente preenchidas por limonita e sugerem, pela sua ocorrência restrita aos primeiros metros da sondagem, instabilizações superficiais pretéritas na encosta.

## **c2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados aos quais podem estar associados riscos são:

- Descontinuidades nos solos residuais e nos ritimitos e nos folhelhos da Formação Trombetas, associadas ao acamamento, subhorizontais, apresentando materiais

alterados e incoerentes que poderão representar condicionantes para a estabilidade da barragem.

- Presença de milonitos e cataclasitos em zonas de falhas (cataclasitos, milonitos e falhas NW paralelos à falha do Catijuba e falha NNW da SR-6), alterados, fraturados e com elevada condutividade hidráulica que podem representar condicionantes para a percolação e eventuais processos de *piping*.
- Zona de passagem do solo de alteração para o topo rochoso e eventual presença de zonas de maior alteração e ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a percolação, cargas hidráulicas elevadas processos de *piping*.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.

### **c3) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

As escavações para implantação da barragem de enrocamento com núcleo em solo são as mesmas preconizadas para a Barragem Santo Antonio, bem como os tratamentos superficiais, porém sem necessidade de tratamentos profundos já descritos, exceto junto ao Muro de Transição Esquerda. Também para a implantação da barragem homogênea em solo, as escavações e os tratamentos superficiais serão idênticos àqueles nas ombreiras da Barragem de Santo Antonio.

A seção da barragem de terra na ombreira esquerda é de taludes abatidos e com bermas estabilizantes em função da baixa resistência da fundação, constituída por folhelhos e ritmitos.

No trecho em que a Barragem Lateral Esquerda se liga ao Muro de Transição Esquerdo, a escavação consistirá na remoção integral dos solos subjacentes até exposição do topo rochoso natural em migmatito. Na zona de contato do núcleo com a rocha, esta deverá ser limpa, retirando-se materiais soltos e realizando tratamento superficial, como preenchimento de fendas por calda de cimento e regularização de depressões com concreto dental. Nesta região deverá haver uma cortina de injeção que, além de proteger a fundação contra o fluxo d'água, deverá se interligar com a cortina proveniente da Tomada d'Água e Muro de Transição Esquerdo, através de um leque de compatibilização.

### **d) Barragem Lateral Direita**

#### **d1) Aspectos geológico-geotécnicos**

A Barragem Lateral Direita tem comprimento de 800 m e altura máxima de 43 m e posiciona-se no arranjo geral à direita da Tomada d'Água.

A topografia ao longo do eixo apresenta nos seus primeiros 250 m, a partir da extremidade do muro na cota 56 m, inclinação média de 7°, atingindo a cota 88 m e nos seus 550 m restantes, uma suave ondulação acima da cota 80 m.

A Barragem desenvolve-se, em toda sua extensão, sobre os ritmitos e folhelhos da Formação Trombetas, que apresentam ao longo do eixo uma espessura mínima de 10 m junto ao muro e



máxima de 35 m mais para o interior da ombreira, repousando sobre rochas migmatíticas. O contato entre estas litologias mergulha com suave inclinação no sentido do caimento da ombreira, com adernamentos locais causados por falhas normais de pequenos rejeitos. Os ritmitos (RtI – ritmitos inferior) ocorrem na base da formação sedimentar, com espessura em torno de 15 m, sobrepostos pelos folhelhos, que constituem uma camada de 5 a 10 m de espessura (FoI – folhelho inferior); acima destes, estão preservados ainda, nos pontos elevados da ombreira, parte de uma segunda camada de ritmito (RtM – ritmito médio), que alcança, no local, 9 m de espessura.

Os ritmitos e folhelhos das fundações apresentam-se decompostos em solo, superficialmente, até profundidades da ordem de 5 m e capeados por coluviões com espessura de 0,5 a 2,5 m.

Os coluviões são, em geral, constituídos de argila silto-arenosa, marrom, muito porosa nos primeiros 0,7 a 1 m de profundidade, com fragmentos subdecimétricos de lateritas e de arenito ferruginoso concentrados próximo à base. Em geral, apresentam passagem transicional para o solo residual inferior, caracterizada pela ocorrência de uma camada de 0,2 a 0,3 m de argila siltosa micromicácea, cinza-avermelhada e amarelada, pouco estratificada e laterizada, interpenetrada por pequenos blocos de arenito. Foram registrados valores de SPT entre 10 e 14 e coeficientes de permeabilidade de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s para esses coluviões.

O solo residual está representado por argila silto-arenosa micromicácea, cinza e vermelha, variegada, normalmente pouco estratificada nos primeiros 0,50 a 1 m de profundidade, onde pode apresentar camadas ou zonas bastante laterizadas entremeadas com argila de menor consistência, com SPT de 8 a 13. Abaixo, torna-se progressivamente mais estratificado e rijo, com laterização restrita às lâminas contínuas de arenito ou siltito, apresentando a partir de 4 m SPT superior a 30. Sua permeabilidade determinada em ensaios de infiltração varia entre  $4 \times 10^{-5}$  e  $1 \times 10^{-6}$  cm/s.

Sob essa cobertura de solo, os ritmitos e folhelhos apresentam-se com baixa coerência, C4/C3, até profundidades de 10 a 16 m, onde as permeabilidades são também elevadas, da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s. Essa menor coerência é mais freqüente e profunda na camada de folhelho que ocupa a porção mais superficial da ombreira e parece estar associada aos processos de expansão inerentes a essas rochas, ao lado da morfologia da encosta que favorece o alívio de tensões e, conseqüentemente, à atuação do intemperismo.

Sob esta camada de menor resistência, as rochas sedimentares apresentam-se medianamente coerentes (C2), com pequenas intercalações pouco coerentes (C3), pouco fraturadas (F1/F2), impermeáveis e com o contato inferior, com os migmatitos, selado. As intercalações de rocha pouco coerente observadas em sondagens no ritmito apresentam-se, em geral, condicionadas às passagens com predominância de lâminas de folhelho. Embora não se tenha verificado *in situ* a persistência lateral dessa associação, pode-se avaliar, a nível preliminar, com base no ambiente deposicional dessas fácies, que as lâminas de folhelho podem atingir mais de duas dezenas de metros de extensão, constituindo, portanto, a principal condicionante geológico-geotécnica para a estabilidade da barragem.

Os migmatitos mostram-se são e impermeáveis, a não ser no trecho inferior da ombreira, na área do muro, onde se prevê a ocorrência de migmatito alterado superficialmente, sob a pequena capa de ritmito.

## **d2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados aos quais podem estar associados riscos são:

- Folhelhos e ritmitos pouco coerentes e incoerentes e solos residuais dessas rochas, bem como descontinuidades nos ritmitos e nos folhelhos, associadas ao acamamento e condicionadas às lâminas de folhelho, subhorizontais, com materiais alterados e incoerentes e de características predominantemente argilosas representam condicionantes para a estabilidade da barragem.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.

## **d3) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

A escavação para implantação da barragem mista consistirá na remoção parcial da camada coluvionar, deixando-se um mínimo deste material como proteção contra efeitos erosivos dos solos residuais de folhelho e ritmito.

A seção da barragem é de taludes abatidos e com bermas estabilizantes em função da baixa resistência da fundação.

Em dois vales a montante é prevista a remoção localizada dos solos de folhelho e migmatito até o migmatito, para a fundação dos enrocamentos de chavetas resistentes. Junto ao Muro de Transição Direito, para sustentar os taludes íngremes da barragem de enrocamento com núcleo de argila, é necessário fundá-la em migmatito são. As escavações nessas área consistem na remoção total do ritmito e se prolongam, em forma de trincheiras, uma a montante e outra a jusante, para fundação dos espaldares da barragem no trecho de transição.

No trecho do núcleo assente sobre rocha sã, prevê-se tratamento com concreto dental e uma cortina de injeção em continuação à cortina proveniente de Tomada d'Água e Muro de Transição Direito.

## **e) Estruturas de Concreto**

### **e1) Aspectos geológico-geotécnicos**

As estruturas de concreto, constituídas pelo conjunto Tomada d'Água e Muros, Condutos Forçados e Casa de Força, inclusive Área de Montagem, localizam-se entre as duas barragens laterais direita e esquerda e apresentam comprimento de 670 m ao longo da direção aproximada EW e extensão montante-jusante de 155 m.

Na área das estruturas de concreto ocorrem rochas cristalinas do Complexo Xingu, representadas, em geral, por migmatitos, granodioritos gnaissificados e biotita-gnaisses róseos sob uma cobertura superficial, da ordem de 5 a 10 m, de ritmitos da Formação Trombetas ou solos de decomposição dessas rochas. As rochas do Complexo Xingu que aí ocorrem foram diferenciadas nas suas três unidades definidas para o Sítio Belo Monte, AxI, AxrIII e AxrIV.

A Unidade AxI agrupa as rochas mais preservadas da migmatização, representadas por granodioritos e tonalitos gnaissificados, que guardam, parcialmente, a foliação original, de atitude N165° subvertical. A Unidade AxrIII é caracterizada pelas rochas predominantes na área, que são migmatitos dos tipos Nebulítico e *Schlieren*, de composição granítica a granodiorítica, com foliação N130° a N150° e mergulhos desde subvertical até 50° SW ou NE. A Unidade AxrIV, concordante com a foliação dos migmatitos, é constituída por granitos róseos gnaissificados, de granulação grosseira, que representam corpos de neossoma individualizados dentro da Unidade AxrIII. Os contatos entre essas unidades, conforme observado nos testemunhos de sondagens, são gradativos e as formas dos corpos são interpretadas como fusiformes, à semelhança do que se observa em escala regional, já que não há afloramentos nessa área. A foliação, feição mais pronunciada nas rochas das Unidades AxI e AxrIII, não apresenta influência relevante na anisotropia do maciço. Da mesma forma, ensaios de compressão simples realizados em testemunhos de sondagem praticamente não mostram a influência dessa anisotropia na rocha.

Com relação aos aspectos estruturais, as sondagens realizadas nas estruturas de concreto, mostram a ocorrência pouco expressiva de falhas, tanto oriundas da deformação dúctil a que essas rochas foram submetidas, representadas por milonitos, quanto da deformação rúptil, caracterizada pela presença de cataclasitos e brechas e pelo próprio fraturamento do maciço.

Os milonitos, observados nas sondagens SR-12, SR-67 e SR-74, apresentam espessuras da ordem de centímetros a decímetros, extensão de dezenas a centenas de metros e encontram-se recristalizados, são, impermeáveis e com elevada resistência. Orientam-se concordantemente com a foliação regional dos migmatitos.

Os cataclasitos ocorrem relacionados a microfalhas e constituem faixas de espessuras submétricas a métricas, onde é freqüente a presença de clorita. Foram identificados nas sondagens SR-57, SR-60 e nas sondagens SR-63 a SR-67, onde são caracterizados por um intenso fraturamento em parte com preenchimento clorítico, que por vezes extrapola o trecho cataclástico. As brechas que neles ocorrem fornecem as atitudes atribuídas a essas estruturas: NS com mergulho de 60° a 80° E nas SR-57, SR-63 e SR-65 e N125° a N135° com mergulho de 40° a 50° SW nas demais sondagens. Sua continuidade não é observada em campo devido à ausência de afloramentos, entretanto, a análise das medidas estruturais das rochas cataclásticas, em seção, indica sua persistência entre pelo menos duas sondagens afastadas de 100 a 150 m (SR-64 e SR-67; SR-57 e SR-65; e SR-60 e SR-66). Os cataclasitos e brechas apresentam-se, em geral, muito fraturados (F4) e medianamente alterados (A2) devido à maior área específica exposta à percolação da água e, nessas zonas, são observados alguns resultados de ensaios com elevada permeabilidade, como por exemplo, na SR-60, SR-64, SR-65 e na SR-66.

O padrão do fraturamento do maciço na área das estruturas de concreto, igualmente às demais discontinuidades, foi interpretado a partir das medidas realizadas nos testemunhos orientados das sondagens. Para a definição das principais famílias de juntas presentes, foi utilizada projeção estereográfica, considerando a ponderação dos pólos das fraturas em relação ao pólo da sondagem.

A análise desse fraturamento em estereogramas mostra a ocorrência de uma família principal de juntas subhorizontais com mergulho de até 20° em quase todas as sondagens e denominada S1, seguida de outras duas, igualmente e subverticais, de direção NNW e NE, denominadas, respectivamente, S2 e S3, e, de uma quarta família (S4) com direção variável entre NE-EW-

ESE e mergulho de cerca de 40° para Sul. A família denominada S6 representa uma variação da S2, orientada a WNW.

Ocorrem ainda duas famílias presentes apenas na porção direita das estruturas de concreto, uma com mergulho para NNW de 20° a 40° (S1') e outra NS/80° E (S5); e uma terceira família, mais freqüente na zona centro-esquerda das estruturas, de atitude aproximada NS/50° E, denominada S5'.

Os espaçamentos das principais juntas variam de 1,5 a 3 m, compatível com o baixo grau de fraturamento médio do maciço, observado nas sondagens. Localmente, os espaçamentos entre as juntas chegam à ordem de decímetros, gerando graus de fraturamento variáveis entre F3 e F5, como verificado nas SR-63 e SR-64, em profundidade e nas SR-60, SR-66 e SR-25, nas porções superiores do maciço.

As juntas apresentam-se, de modo geral, oxidadas ou com as paredes cobertas por película argilosa esverdeada e, mais raramente, preenchidas com calcita. As fraturas subverticais, que apresentam maior trecho exposto nos testemunhos, mostram-se rugosas e ligeiramente onduladas, com coeficiente de rugosidade JRC predominando entre 10 e 14 e parecem ter persistência de vários metros. As juntas subhorizontais e as de mergulho baixo apresentam JRC em torno de 8 a 10 e são as que, praticamente, controlam a permeabilidade do maciço, associadas às principais famílias subverticais. As juntas S1 e S1' estão quase sempre presentes nos trechos mais permeáveis das sondagens, e o efeito do alívio de tensões que favorece a abertura dessas juntas reduz-se rapidamente abaixo de 30 m de profundidade, embora se observe, em trechos localizados, principalmente na SR-65, permeabilidade superior a  $1 \times 10^{-4}$  cm/s ( $PE > 1$  l/min/m/kg/cm<sup>2</sup>) até a profundidade de 90 m (cota - 41 m), associada às famílias S4 e S5', que caracterizam as duas atitudes de faixas cataclásadas observadas. Por outro lado, ensaios de bombeamento realizados na área das estruturas de concreto registraram permeabilidade média de  $1 \times 10^{-3}$  cm/s para o maciço, principalmente junto ao Muro de Transição Esquerdo (MTE), com direção de maior transmissividade NNE e de  $1 \times 10^{-4}$  cm/s para o restante do maciço, na direção NNW e WNW.

Consideradas todas as discontinuidades presentes e suas principais características geotécnicas observadas e ensaiadas ou interpretadas em estereogramas, pode-se atribuir ao maciço de fundação das estruturas uma relativa isotropia quanto ao fraturamento, o que se traduz numa homogeneidade em relação aos espaçamentos e persistências das várias famílias de juntas. Dessa forma, as juntas subhorizontais não devem ter persistências tão diferenciadas em relação às subverticais ou inclinadas, pela própria limitação imposta por estas fraturas por ocasião do efeito de alívio de tensões.

As juntas S1' com mergulho de 20° a 40° para norte, que predominam na porção direita de jusante das estruturas, são as mais desfavoráveis a estabilidade da Tomada d'Água e, por isso, foram consideradas como principal fator no zoneamento do maciço de fundação. Por outro lado, o desconhecimento da persistência dessas juntas levou à adoção de comprimentos de 5 a 15 m para as mesmas nos cálculos dos parâmetros de resistência ao deslizamento.

#### - **Tomada d'Água e Muros de Transição Direito e Esquerdo**

O maciço rochoso da fundação da Tomada d'Água é constituído, predominantemente, por migmatitos da Unidade AxrIII na porção direita e por rochas graníticas da Unidade AxrIV na sua porção esquerda, as quais apresentam boas características para fundação da estrutura.

O maciço rochoso pouco fraturado (F1/F2) e são (A1) ocorre abaixo da cota 42 m junto ao Muro de Transição Direito, com mergulho suave para o lado esquerdo até atingir a cota 28,5 m, junto ao Muro de Transição Esquerdo.

O maciço apresenta, em geral, baixa permeabilidade, com alguns valores superiores a  $1 \times 10^{-3}$  cm/s (P.E.  $> 10$  l/min/m/kg/cm<sup>2</sup>), que independentemente do grau de fraturamento, ocorrem acima da cota 7 m. Por outro lado, observa-se que os valores de permeabilidade média a alta (P.E.  $> 1,0$  l/min/m/kg/cm<sup>2</sup>) representam uma pequena porcentagem dos ensaios realizados, mesmo nas cotas superiores, onde era de se esperar um maciço mais permeável, o que permite inferir que as feições permeáveis têm ocorrência bem localizada.

As estruturas geológicas indicadas na seção, representadas por cataclasitos ou milonitos, mergulham para montante ou para a ombreira direita e não comprometem a estabilidade da Tomada d'Água, embora possam representar zonas de maior permeabilidade do maciço.

No local do Muro de Transição Esquerdo, as rochas granito-gnáissicas que lhe servem de fundação, abaixo da cota 23 m, apresentam-se sãs, pouco fraturadas e impermeáveis.

Já no local do Muro de Transição Direito, o maciço migmatítico com boas características geomecânicas para assentamento da estrutura de gravidade ocorre a partir da cota 42 m, sob o pacote de ritmitos aí existente, subindo gradativamente até a cota 47 m na extremidade do muro. As características geológico-geotécnicas dos ritmitos que ocorrem no trecho do abraço da Barragem são as mesmas descritas para a Barragem Lateral Direita.

Conforme pode ser depreendido a partir do mapa geológico, o local é constituído, predominantemente, por rochas migmatíticas com boas características para fundação de estrutura de concreto. As cotas de escavação foram estabelecidas buscando-se fundar os blocos de concreto em maciço são (A1) com baixo grau de fraturamento (F1/F2), de forma que a fundação seja constituída por maciço de resistência elevada e módulo de deformabilidade compatível com a estrutura. Foi também levada em conta a permeabilidade do maciço para definição do critério de tratamento profundo da fundação.

Respeitando os aspectos geomecânicos e para facilidade de construção, modulou-se a escavação por blocos com fundação variável desde a cota 41,0 m, no extremo direito, até 28,5 m junto ao Muro de Transição Esquerdo, na linha de montante e, igualmente, na linha de jusante, desde a cota 38,5 m até 28,5 m.

Os parâmetros de resistência para qualquer superfície de análise foram calculados segundo o modelo de Hoek (1983), o que resultou na expressão  $\tau = 0,5 + \sigma \text{ tg } 53^\circ$  (MPa). O maciço da fundação apresenta, ainda, zonas catacladas localizadas, de espessuras métricas e submétricas, com maior grau de fraturamento (F4), mas com atitudes que não desfavorecem a estabilidade dos blocos da Tomada d'Água. Para a deformabilidade do maciço foi adotado o módulo  $E = 35$  GPa, com base na velocidade média de propagação de onda compressiva,  $V_p = 6.000$  m/s, obtida para o maciço através de sísmica de refração. Para o coeficiente de Poisson foi adotado o valor de  $\nu = 0,25$ . Estes valores são considerados válidos para toda a fundação da Tomada d'Água, embora a compartimentação do maciço mostre uma incidência de juntas subhorizontais a inclinadas para jusante nos primeiros oito blocos junto ao Muro de Transição Direito.



Conforme indicado no mapa geológico local, o Muro de Transição Esquerdo apresenta nas suas fundações rocha com características geomecânicas similares às da Tomada d'Água Principal. No local do Muro de Transição Direito ocorrem ritmitos acima da cota 46,0 m, razão pela qual o projeto prevê a remoção integral do ritmito pouco coerente (C3) a medianamente coerente (C2), até atingir o maciço migmatítico com grau de alteração A1/A2. Com isto ficam reduzidas as deformações de fundação, cujos parâmetros de deformabilidade são os mesmos da Tomada d'Água.

#### - Casa de Força

A Casa de Força será implantada na cota - 32 m, em rochas migmatíticas (Unidade AxI) e granodioríticas (Unidade AxrIII).

As cinco sondagens realizadas próximo ao eixo da Casa de Força, que atingiram cerca de 8 a 10 m abaixo da cota - 32 m, revelaram um maciço pouco fraturado (F1/F2) e são (A1), portanto, com excelentes características geomecânicas para fundação da estrutura. Nos ensaios de perda d'água sob pressão, o maciço da fundação apresentou-se com baixa permeabilidade a impermeável, o que é compatível com a profundidade em que foram realizados os ensaios, em torno de 70 m.

Verificou-se apenas um único registro de perda d'água específica igual a 1 l/min/m/kg/cm<sup>2</sup> abaixo da cota de fundação, portanto, com baixa representatividade em relação aos dezesseis ensaios realizados nesse trecho do maciço. Esses números reforçam a interpretação da ocorrência de zonas permeáveis localizadas, associadas, principalmente, às faixas cataclásticas.

Com relação às discontinuidades presentes no maciço da fundação, somente zonas cataclásticas interceptadas pelas sondagens, como na SR-65, podem representar maiores preocupações com relação a tratamentos. Entretanto, as várias faixas cataclásticas atravessadas em cotas superiores apresentam-se bastante estreitas e com forte mergulho para montante ou para leste, devendo interferir com a fundação apenas ao longo de delgadas faixas.

Deve-se destacar também o elevado grau de fraturamento verificado em vários trechos das sondagens SR-63 e SR-64 no lado direito da estrutura e nas sondagens SR-25 e SR-66 no lado esquerdo, mas acima da cota da fundação. Nas sondagens SR-63 e SR-64, tal feição sugere a presença de falha normal passando próximo ao extremo direito da estrutura e acompanhando, possivelmente, a direção NNW. Nas sondagens SR-25 e SR-66, o fraturamento parece estar associado à presença de rochas cataclásticas e milonitos que ocorrem nos trechos fraturados dessas sondagens. Estas feições devem ser objeto de tratamentos localizados.

Por outro lado, o fraturamento apresentado pelas sondagens realizadas na extremidade da Casa de Força, em particular o representado pelas famílias S5, S5', S2 e S3, sugere a formação potencial de cunhas, durante a escavação desta estrutura. Tais feições devem ser consideradas no estudo de estabilidade dessa escavação.

Conforme pode ser observado no mapa geológico, no local da Casa de Força Principal o maciço rochoso, abaixo da cota -32,0 m, apresenta boas características geomecânicas para suporte da estrutura, sendo representado por rocha migmatítica pouco fraturada (F1/F2) e são (A1), que foi investigada por sondagens até a cota -40,0 m. Foram considerados os mesmos

parâmetros geomecânicos adotados para o maciço de fundação da estrutura da Tomada d'Água Principal.

#### - **Canal de Fuga**

O Canal de Fuga apresenta comprimento de 1350 m, largura inicial de 670 m e desenvolve uma suave curva para a esquerda a partir dos seus primeiros 400 m, onde sua largura se reduz gradativamente, até atingir 400 m em seu trecho final.

Na área do Canal de Fuga, os ritmitos e os solos residuais ocupam os altos topográficos, recobrimo migmatitos e seus solos de alteração. Superficialmente, ocorrem coluviões e sedimentos de terraço aluvionar e, na baixada, próximo ao rio Xingu, ocorre um capeamento superficial de aluvião com espessura média de 3 m.

Observa-se que os ritmitos de cobertura praticamente se restringem aos 200 m iniciais do Canal e à porção de jusante junto ao talude esquerdo, alcançando as maiores espessuras no trecho inicial junto ao talude esquerdo. Neste local, o ritmo apresenta-se medianamente coerente (C2) a pouco coerente (C3) entre as cotas 25 e 35 m e capeado por cerca de 10 m de solo residual. Sob o ritmo, abaixo da cota 25 m, ocorre rocha migmatítica pouco fraturada e são.

No local junto ao talude esquerdo, a jusante, conforme representado na seção longitudinal, o ritmo ocorre sob a forma de solo residual e capeado por 1 a 6 m de sedimentos argilosos e arenosos do terraço aluvionar. Sob o solo residual ocorre, ainda, uma camada de 2 a 3 m de solo de alteração ou de migmatito alterado, até o topo rochoso, que acompanha a topografia do terreno com profundidade média de 12 m.

Excluindo-se as áreas com cobertura sedimentar, os trechos em migmatito apresentam espessura de solo de alteração da ordem de 10 m, sendo de 15 a 20 m no trecho inicial do Canal de Fuga. Aí, as sondagens realizadas indicam a ocorrência de grandes concentrações de matações imersos no solo de alteração. O lençol freático nesse solo acompanha, em geral, a topografia, a cerca de 10 m de profundidade.

Junto à margem do rio e na ilha em frente ao Canal de Fuga, os sedimentos aluvionares ocorrem com espessuras que vão desde 3 até 15 m (SR-31), sobre rocha migmatítica, cujo topo rochoso se apresenta em torno da cota - 7 m.

As características geológico-geotécnicas dos solos residuais dos ritmitos e dos solos de alteração de migmatito são similares àquelas apresentadas para a Barragem Lateral Direita e para a Barragem Lateral Esquerda.

Particularmente, deve-se destacar aqui as características de expansão e desagregação das rochas sedimentares e de expansão dos seus solos, quando expostos, que exigirão tratamentos específicos para atenuar seu comportamento deletério.

#### **e2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados que podem responder por riscos são:



- Irregularidades no topo de rocha e presença de zonas de maior alteração e/ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a estabilidade, percolação e deformabilidade das fundações das estruturas de concreto.
- Presença de descontinuidades subhorizontais relacionadas à alívio de carga, abaixo da superfície de fundação, associadas a fraturamento e/ou alteração, que podem representar condicionantes para a estabilidade, deformabilidade, percolação e subpressões das fundações das estruturas de concreto.
- Foliação, falhas e fraturas associadas predominantemente subverticais e inclinadas, que podem responder por tombamentos, deslizamentos planares e em cunha nos taludes de escavação.
- Foliação, falhas e fraturas associadas, predominantemente subverticais e inclinadas, que podem condicionar a presença de zonas alteradas e/ou extremamente fraturadas e representar condicionantes para a estabilidade, deformabilidade, percolação e subpressões das fundações das estruturas de concreto.
- Comportamento heterogêneo, anisotrópico e descontínuo quanto ao fraturamento e descontinuidades do maciço rochoso, bem como quanto às características de distribuição espacial, espaçamento e persistências das várias famílias de descontinuidades, que podem caracterizar possibilidades de instabilizações e efeitos indesejáveis de percolação e subpressão.
- Características de expansão e contração das rochas sedimentares e dos seus solos, quando expostos, que acarretarão desagregação/erosão das superfícies expostas no talude esquerdo de escavação do Canal de Fuga.

### **e3) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

Está prevista uma cortina de injeções a partir da galeria da Tomada d'Água, constituída de duas linhas inclinadas para montante de 19° e 23° até a cota -10,0 m. As injeções terão espaçamento de 3,0 m e inclinação lateral de 20° para o lado da ombreira esquerda da estrutura, de modo a interceptar as famílias de juntas de direção N-S, que mergulham para o Muro de Transição Direito. A linha de furos de jusante deve ser executada inicialmente com o dobro do espaçamento fixado, sendo os furos intermediários executados quando necessário. A linha de montante é eventual e somente será executada quando for constatada elevada absorção nos furos adjacentes da linha de jusante. A cortina prossegue sob os muros direito e esquerdo, indo até os núcleos das barragens de ligação, onde serão executados os leques de compatibilização.

A drenagem profunda compõe-se de um sistema de duas linhas de furos verticais. A linha superior interliga a galeria existente na estrutura com a abóbada do túnel escavado na rocha de fundação que corre paralelamente à galeria, aproximadamente na cota 16,0 m. A linha dos furos inferiores liga o piso do túnel à cota 0,0 m. Todos esses furos são espaçados de 3,0 m. O túnel foi introduzido no projeto por ser um elemento drenante contínuo, de grande capacidade de vazão por gravidade, eliminando a situação de bombeamento inoperante na condição de carregamento limite. Os furos superiores que o comunicam à galeria interceptam todas as fraturas subhorizontais acima do seu teto e o próprio túnel intercepta as fraturas subverticais.

A drenagem nestes furos, por ser descendente, gera uma auto-limpeza, eliminando em grande parte a necessidade de limpeza de manutenção.

Para os furos abertos a partir do piso do túnel, a pressão máxima nos drenos é definida pela cota 16,0 m. O túnel possui caimentos longitudinais para encaminhamento por gravidade das águas por ele coletadas, que escoam para céu aberto por meio de três galerias situadas em cada extremo e no meio da estrutura da Tomada d'Água.

Em função do sistema de fraturamento observado nas sondagens, foi também definido um sistema de drenagem superficial, constituído por linhas de meias-canas, implantado sobre o concreto de regularização e interligado à rocha por meio de furos verticais. As meias-canas estão distribuídas perpendicularmente ao eixo longitudinal e interligadas à galeria, com espaçamento de 6,6 m.

O projeto prevê uma linha de injeções executada na extremidade de jusante da laje de concreto do tubo de sucção, visando minimizar o afluxo de água aos dois sistemas de drenagem previstos: o superficial e o profundo.

O sistema de drenagem superficial é constituído por linhas de meias-canas dispostas perpendicularmente ao eixo longitudinal, implantadas sobre o concreto de regularização da fundação e interligadas à rocha por furos verticais de 3,0 m de profundidade, espaçados de 3,0 m. As meias-canas possuem espaçamento de 5,5 m e escoam para a galeria situada no pé de montante da Casa de Força Principal. Esta galeria possui um sistema de drenagem profundo, constituído por furos espaçados de 3,0 m que atingem a cota 45,0 m. A água de drenagem captada nessa galeria é recolhida através de poços e bombeada para o Canal de Fuga, com saída prevista na cota 13,7 m.

Estando os muros fundados em condições semelhantes às da Tomada d'Água Principal, os projetos dos sistemas de injeção e de drenagem superficial e profunda tiveram a mesma concepção adotada para aquela estrutura.

Para se evitar a ocorrência de processos de desagregação/erosão nos taludes de escavação do Canal de Fuga, serão empreendidos tratamentos superficiais, tais como proteção com enrocamento. Os eventuais taludes definitivos escavados em rochas brandas poderão ser protegidos com concreto projetado, sendo esse um tratamento simples e efetivo.

#### **7.7.10.2.4 SÍTIO BELA VISTA**

##### **a) Suficiência das investigações**

O **QUADRO 7.7.10-4** e a **FIGURA 7.7.10-6** apresentam respectivamente os quantitativos e a planta de localização das investigações realizadas no Sítio Bela Vista.

As investigações constaram de mapeamento geológico-geotécnico através de caminhamento. Os locais das alternativas Ticaruca e Bela Vista foram investigados com sísmica de refração, através de caminhamento ao longo dos eixos e regiões adjacentes e com sondagens rotativas e a percussão. Nas sondagens rotativas, nos trechos em solo, não foram programados ensaios de SPT e de permeabilidade.

As sondagens geofísicas realizadas em seções transversais ao longo dos possíveis eixos de barramento tiveram por finalidade determinar a espessura do manto de intemperismo, a cota provável do topo rochoso, auxiliar o mapeamento geológico em áreas aluvionares e comprovar feições estruturais.

As investigações das próximas etapas deverão ser dirigidas para o detalhamento das características dos possíveis condicionantes e processos relacionados a risco. Serão necessárias coleta de amostras e execução de ensaios de laboratório para a caracterização de algumas unidades geológico-geotécnicas, tanto de solos como de rochas, para as quais foram adotados os mesmos parâmetros obtidos em outros locais da obra, com base na consideração de origem geológica semelhante.

#### **b) Aspectos geológico-geotécnicos**

O Sítio Bela Vista, onde situa-se o Vertedouro Complementar, é composto por rochas migmatíticas da Unidade AxrIII do Complexo Xingu, com predomínio do neossoma granítico róseo em relação ao paleossoma gnáissico cinza. Neste local, o maciço rochoso apresenta-se predominantemente são (A1) e pouco fraturado (F2), com valores de permeabilidade via de regra baixos, recoberto por manto de intemperismo bastante acentuado, notando-se ainda a ocorrência de matações em superfície e subsuperfície, conforme constatado nas sondagens executadas. Na análise das sondagens rotativas não foram identificadas feições subhorizontais que revelassem comportamento contínuo.

Foram investigadas duas alternativas para implantação deste vertedouro, denominadas Ticaruca e Bela Vista.

A alternativa Ticaruca, com altura máxima de 42 m e comprimento total de 1250 m, dos quais 170 m correspondem ao vertedouro e seus muros e o restante à barragem de terra está posicionada no leito do igarapé Ticaruca.

Neste local ocorre, na várzea do igarapé, sedimentos aluvionares predominantemente argilo siltosos, com espessura média de 3 m. As sondagens geofísicas executadas neste local, indicaram um espessamento do horizonte de alteração do maciço migmatítico na calha do igarapé, muito possivelmente associada à falha Ticaruca. A análise das sondagens indicou presença do topo rochoso em cotas mais elevadas na margem direita do igarapé, o que condicionou o posicionamento das estruturas de concreto.

A alternativa Bela Vista, situada em um alto topográfico, possui altura máxima de 41 m e comprimento total de 460 m, dos quais 119 m correspondem ao vertedouro e seus muros e o restante às barragens de terra.

O resultado das sondagens revelou a existência de matações e grandes espessuras de solo migmatítico, chegando a atingir valores de até 50 m (SR-658). As estruturas de concreto foram posicionadas em local onde as sondagens mostraram a existência do topo rochoso em cotas mais elevadas.

O local é constituído, predominantemente, por rochas com boas características para fundação de estrutura de concreto. Assim, as fundações tiveram as cotas finais baseadas em critérios de concepção da estrutura e não nas suas características geológico-geotécnicas. Dessa maneira,

as escavações de projeto são as mínimas obrigatórias para atender às necessidades das estruturas, não tendo sido levadas em conta particularidades localizadas.

A envoltória resistente determinada para a fundação e considerada no cálculo de estabilidade tem a seguinte expressão:  $\tau = 0,37 + \sigma_n \cdot \text{tg} 54^\circ$  (MPa). Devido ao fato de as sondagens neste sítio não terem atingido grandes profundidades abaixo das cotas mínimas de fundação do Vertedouro Complementar, foi suposta a existência eventual de juntas de alívio logo abaixo destas cotas mínimas de fundação, com a seguinte envoltória resistente:  $\tau = 0,075 + \sigma_n \cdot \text{tg} 41^\circ$  (MPa). Tais parâmetros foram definidos para juntas de alívio com presença de material alterado identificadas no Sítio Bela Vista na 1ª Etapa de Estudos de Viabilidade de Engenharia, e sua presença na região do Vertedouro Complementar corresponde à hipótese bastante conservadora.

Para a deformabilidade do maciço, foram adotados os valores de  $E = 16 \text{ Gpa}$  e  $\nu = 0,25$ . Esses valores foram obtidos a partir da concepção do modelo geomecânico do maciço rochoso, sendo compatíveis com dados constantes na bibliografia especializada para materiais semelhantes.

#### **c) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Os principais condicionantes e processos geológico-geotécnicos visualizados que podem responder por riscos são:

- Foliação, falhas e fraturas associadas predominantemente subverticais, que podem responder por tombamentos, deslizamentos planares e em cunha nos taludes de escavação em solos de alteração de grande altura.
- Irregularidades no topo rochoso e presença de zonas de maior alteração e/ou fraturamento concentradas junto ao topo rochoso que podem representar condicionantes para a estabilidade, percolação e deformabilidade das fundações do vertedouro.
- Presença de descontinuidades subhorizontais relacionadas à alívio de carga, abaixo da superfície de fundação, associadas a fraturamento e/ou alteração, que podem representar condicionantes para a estabilidade, deformabilidade, percolação e subpressões das fundações do vertedouro.
- Foliação, falhas e fraturas associadas, predominantemente subverticais e inclinadas, que podem condicionar a presença de zonas alteradas e/ou extremamente fraturadas e representar condicionantes para a estabilidade, deformabilidade, percolação e subpressões das fundações das estruturas de concreto e das barragens.

#### **d) Tratamentos de fundação previstos em projeto**

O tratamento da fundação do Vertedouro Complementar é constituído por cortina de injeção até a cota 30,0 m e linha de drenagem até a cota 33,0 m, executadas a partir da galeria na cota 66,0 m a montante da estrutura. As injeções serão executadas em duas linhas com inclinação de  $10^\circ$  e  $30^\circ$  para montante, com furos espaçados de 3,0 m, devendo ser executada inicialmente a linha de furos de montante com o dobro do espaçamento e, somente se

necessário, os demais. A linha de jusante é eventual e somente será executada caso tenha ocorrido elevada absorção na linha de montante. O sistema de drenagem é constituído por uma única linha de furos com o espaçamento de 3,0 m.

O sistema de fundação dos muros será sem injeções e constituído por um tratamento superficial simples.

A fundação da Barragem de Ligação Esquerda do Vertedouro Complementar no trecho em seção mista (primeiros 50,0 m ao longo da crista) deverá ser tratada com concreto dental e injeções de feições permeáveis. Nas ombreiras, devido à grande escavação realizada, a execução seguirá sem tratamento especial de fundação a não ser para tratamento de eventuais feições permeáveis detectadas.

O tratamento da fundação da Barragem de Ligação Direita do Vertedouro Complementar será semelhante ao adotado para a Barragem Lateral Esquerda, sendo necessária, no trecho em que a barragem se assentar fora dos limites da escavação, a limpeza do terreno com remoção de 0,5 m de solo coluvionar e/ou residual com a cobertura vegetal, sem tratamento complementar

#### **7.7.10.2.5 DIQUES**

##### **a) Suficiência das investigações**

As localizações e quantitativos das investigações dos diques do Sítio Belo Monte estão apresentadas respectivamente nas **FIGURAS 7.7.10-7 a 7.7.10-11** e no **QUADRO 7.7.10-5**.

O **QUADRO 7.7.10-4** e a **FIGURA 7.7.10-11** apresentam respectivamente os quantitativos e a planta de localização das investigações realizadas nos diques do sítio Belo Vista. As investigações dos diques do sítio Bela Vista são apresentadas conjuntamente com aquelas do sítio Bela Vista.

As investigações realizadas constaram basicamente de mapeamento de superfície, execução de poços e trados, auxiliada em alguns locais por sondagens sísmicas e elétricas e um pequeno número de sondagens mecânicas. Em apenas alguns dos diques foram efetuadas investigações diretas mecânicas.

No desenvolvimento do projeto básico as áreas de implantação de muitos dos diques deverão ser objeto de programas de investigação que contemplem sondagens mecânicas, com execução de ensaios *in situ* e coleta de amostras para ensaios de laboratório, de forma que se possa elaborar os modelos geológicos e caracterizar as suas diversas unidades e estruturas geológico-geotécnicas de maneira mais detalhada, compatível com esta fase do projeto.

Devido às condições topográficas e de relevo, com cotas muito próximas àquelas do nível d' água do reservatório e intensa rede de drenagem apresentando alinhamentos em diferentes direções, é importante efetuar levantamentos topográficos de detalhe, principalmente na região da margem esquerda dos canais, entre a barragem Santo Antonio e região dos diques (DIK 1, 2, 3, e 4). Esse trecho deve também ser objeto de mapeamentos geológicos e investigações *in situ* geológico-geotécnicas, estruturais e hidrogeológicas de detalhe, especialmente naqueles setores de ocorrência da Formação Maecuru na borda do reservatório e/ou nas suas proximidades.

**b) Diques do Sítio Belo Monte – margem esquerda do Reservatório dos Canais**

**b1) Aspectos geológico-geotécnicos**

**- Dique 1 (DIK-1)**

O DIK 1 possui extensão de 60 m e altura máxima de 6 m, sendo as ombreiras pouco abruptas. Nas ombreiras e no trecho central, desenvolve-se o colúvio com espessura de 0,5 m, sendo constituído por areia silto-argilosa, com grânulos de quartzo e laterita subarredondados e esparsos, pouco compacta e porosa. Abaixo segue o solo residual, com espessura de 1 m, constituído por um silte areno-argiloso, medianamente compacto, gradando verticalmente para solo de alteração de migmatito. O solo de alteração é constituído por uma areia silto-argilosa, pouco compacta. O nível d'água estava próximo à cota 85 m, em maio de 1986.

**- Dique 2 (DIK-2)**

Com 75 m de extensão e 4 m de altura máxima, o DIK-2 possui ombreiras suaves. Nas ombreiras e no trecho central desenvolve-se o colúvio com 1 m de espessura, constituído por uma areia silto-argilosa, porosa e pouco compacta. Abaixo, o solo residual possui 3 m de espessura, composto por silte areno-argiloso, incipientemente laterizado e compacto. Segue-se abaixo o solo de alteração de migmatito, de compacidade média. O nível d'água estava próximo à cota 88 m, em maio de 1986.

**- Dique 3 (DIK-3)**

O DIK-3 apresenta-se com 180 m de extensão e 12 m de altura máxima. Suas ombreiras são abruptas e ocorrem esparsos blocos rolados, centimétricos, de arenito limonitizado.

A ombreira direita apresenta em superfície um colúvio com 2 m de espessura, constituído por um silte argiloso, pouco arenoso, pouco compacto e poroso. O colúvio recobre diretamente o solo residual de folhelho, constituído por uma argila siltosa, de consistência dura, com poucos canálculos de origem radicular, desenvolvendo-se por 4 m de espessura até atingir o topo rochoso.

O trecho central apresenta um colúvio de 1 m de espessura, constituído por uma areia silto-argilosa, pouco compacta e porosa, desenvolvendo-se logo acima do solo residual de folhelho. Este é constituído por uma argila siltosa, de consistência dura, pouco porosa, com 5 m de espessura, atingindo, então, o topo rochoso. O nível d'água foi detectado próximo à cota 87 m, em maio de 1986.

Na ombreira esquerda o colúvio apresenta-se com 1 m de espessura e é constituído por um silte argiloso pouco arenoso, com fragmentos esparsos de laterita. É pouco poroso e pouco compacto. Abaixo, ocorre o solo residual de folhelho, composto por argila siltosa, de consistência dura, com 5 m de espessura, atingindo o topo rochoso, o qual encontra-se a uma profundidade média de 6 m ao longo de todo o trecho previsto para a estrutura.



- **Dique 4 (DIK-4)**

O DIK-4 apresenta um comprimento de 210 m e altura máxima de 4 m, com ombreiras íngremes.

As ombreiras e o trecho central apresentam-se semelhantes quanto às características de fundação. Superficialmente ocorre um colúvio de 1 m de espessura, constituído por um silte argilo-arenoso, com esparsos blocos centimétricos de arenito limonitizado, sendo pouco compacto e poroso. Recobre o solo residual de folhelho constituído por uma argila siltosa, de consistência dura, pouco porosa, impermeável.

Em maio do ano de 1986, foi detectado, no trecho central, o nível d'água próximo à cota 87 m.

- **Dique 5 (DIK-5)**

O DIK-5 foi abordado com a denominação de Barragem de Santo Antônio.

**b2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

A partir do conhecimento das condições geológicas regionais, para o trecho a partir da ombreira da barragem Santo Antonio até a montante da caverna Kararaô, na região dos arenitos Maecuru, recomendam-se cuidados especiais devido aos possíveis riscos de fuga de água, representados pela presença de cavidades subterrâneas (Caverna Kararaô, Kararaô Abrigo Novo, Caverna Kararaô Novo e Abrigo do China), as duas últimas identificados em levantamentos recentes. Após levantamentos topográficos de detalhe, deve-se efetuar mapeamento geológico geotécnico de detalhe e programar as investigações *in-situ* com enfoque de caráter geológico-geotécnico, estrutural e hidrogeológico.

Devido à pequena altura dos diques 1 a 4, sendo o mais alto, o dique 3, com 12 m, os possíveis riscos referentes às condições de fundação desses diques apresentam-se pouco relevantes. Correlacionando-se as características geológicas dos locais dos diques 1, 2, 3 e 4 com aquelas de outros locais de obras de características geológicas similares e onde as investigações foram feitas em maior quantidade, é possível uma visualização dos condicionantes e processos geológico-geotécnicos:

- Folhelhos e ritmitos da Formação Trombetas pouco coerentes e incoerentes e solos residuais dessas rochas, bem como descontinuidades nos ritmitos e nos folhelhos, associadas ao acamamento e condicionadas às lâminas de folhelho, subhorizontais, com materiais alterados e incoerentes e de características predominantemente argilosas representam condicionantes para a estabilidade principalmente do dique 3.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.



c) **Diques do sítio Belo Monte – margem direita do Reservatório dos Canais**

c1) **Aspectos geológico-geotécnicos**

- **Dique 6A (DIK-6A)**

O DIK-6A apresenta comprimento de 796 m, altura máxima de 26 m e ombreiras íngremes. As ombreiras apresentam-se semelhantes quanto às características de fundação. Superficialmente ocorre um colúvio com cerca de 2 m de espessura, constituído por um silte argiloso, pouco arenoso, pouco compacto a poroso. Recobre diretamente o pacote pouco espesso de solo residual de ritmito, com cerca de até 8 m de espessura, constituído por uma argila siltosa, de consistência dura. No trecho central e nas ombreiras, sotoposto a estes materiais de origem sedimentar, aparece o solo de alteração de migmatito. O maciço rochoso migmatítico, encontrado a partir da cota 47 m na SR-14, encontra-se intensamente cataclásado, evidenciando uma possível falha no sentido montante/jusante deste dique. O nível d'água foi detectado próximo à cota 40 m, em fevereiro de 1983.

- **Dique 6B (DIK-6B)**

Com 255 m de comprimento e 9 m de altura máxima, o DIK-6B possui as ombreiras suaves. Superficialmente ocorre um colúvio com espessura máxima de 1,7 m, composto predominantemente por um silte areno-argiloso. A ombreira esquerda apresenta solo residual de ritmito, com espessura máxima de cerca de 8 m. Sotoposto a este material sedimentar na ombreira esquerda e ao colúvio no restante da fundação do dique, ocorre o solo de alteração do migmatito até a cota aproximada 50 m, composto por um silte areno-argiloso com algumas intercalações de blocos rochosos. O nível d'água estava próximo à cota 53 m, em maio de 1982.

- **Dique 6C (DIK-6C)**

O DIK-6C possui comprimento de 1134 m, altura máxima de 59 m e ombreiras íngremes.

O colúvio apresenta-se uniformemente nas ombreiras com espessura máxima de 3 m, sendo constituído predominantemente por uma areia silto-argilosa. Na porção central ocorre um horizonte aluvionar com espessura de cerca de 1,5 m, composto por uma areia pouco argilosa, cinza escura.

Na ombreira direita ocorre uma falha geológica, com direção WNW, delimitando o contato entre os arenitos da Formação Trombetas e o migmatito do Complexo Xingu. A caixa de falha composta por material milonitizado prolonga-se ao longo do eixo por cerca de 390 m de largura em direção ao trecho central do DIK-6C.

O topo rochoso na ombreira direita está representado pelo arenito da Formação Trombetas com profundidade de cerca de 10 m. Na porção central e na ombreira esquerda ocorre o migmatito, a profundidades, respectivamente, de 27 e 10 m.

Na porção central onde ocorre o aluvião, o nível d'água afluía na superfície próximo da cota 41 m, em junho de 1988.

- **Dique 7A (DIK-7A)**

O DIK-7A apresenta 1085 m de comprimento e 50 m de altura máxima. Suas ombreiras são íngremes e apresenta uma área elevada (cota  $\cong$ 96 m), localizada entre a sua porção central e a ombreira direita.

O colúvio, tanto nas ombreiras como no trecho central, ocorre uniformemente com espessura de cerca de 3 m. É constituído, de maneira geral por uma areia silto-argilosa a argilo-siltosa, marrom.

Na ombreira esquerda ocorre uma falha geológica, com direção NS, delimitando o contato entre os arenitos da Formação Trombetas e o migmatito do Complexo Xingu. Neste local, abaixo do solo de alteração de arenito, com cerca de 20 m de espessura, ocorre o arenito Manacapuru da Formação Trombetas.

Na porção central e na ombreira direita, imediatamente abaixo do colúvio ocorre o solo residual de migmatito e logo abaixo o solo de alteração de migmatito, composto predominantemente de um material areno-silto-argiloso, perfazendo um pacote de cerca de 22 m. O topo rochoso nesta região está na cota aproximada 35 m.

O nível d'água ocorria próximo à cota 54 m, em julho de 1988.

- **Dique 7B (DIK-7B)**

O DIK-7B possui comprimento de 1215 m e altura máxima de 52 m. Suas ombreiras são íngremes e apresenta uma área elevada (cota  $\cong$ 96 m), localizada entre a sua porção central e a ombreira direita.

O colúvio apresenta-se uniformemente nas ombreiras com espessura máxima de 2,5 m, sendo constituído predominantemente por uma areia silto-argilosa. Na porção central ocorre um pacote de aluvião arenoso com cerca de 4 m de espessura, em local com lâmina d'água de 0,39 m em julho de 1988. Abaixo o solo de alteração de migmatito, com espessura média de 12 m, é constituído predominantemente por uma argila areno-siltosa.

A profundidade do topo rochoso nas ombreiras é de cerca de 25 m, enquanto que na região central varia de 12 a 15 m.

- **Dique 7C (DIK-7C)**

O DIK-7C possui comprimento de 219 m, altura máxima de 9,50 m e ombreiras suaves. O colúvio distribui-se uniformemente ao longo da extensão do dique com espessura máxima de cerca de 2,5 m, sendo constituído predominantemente por um silte argilo-arenoso. Abaixo o solo residual/de alteração de migmatito é composto por uma argila silto-arenosa.

- **Dique 7D (DIK-7D)**

Com 130 m de comprimento e 8 m de altura máxima, o DIK-7D possui as ombreiras suaves. Superficialmente ocorre um colúvio de espessura máxima de 2,50 m composto predominantemente por uma argila silto-arenosa, com muitos grânulos de quartzo. Sotoposto a este material transportado aparece, com espessura de cerca de 3,50 m o solo residual do

migmatito, formado por uma argila silto-arenosa, com fragmentos de quartzo e feldspato. A seguir, com espessura máxima de 7,50 m, ocorre o solo de alteração de migmatito, composto predominantemente por um silte argilo-arenoso, com alguns matacões de migmatito A2/A3 muito fraturados, distribuídos ao longo deste horizonte. O topo rochoso (migmatito) ocorre na elevação 78 m. O nível d'água estava próximo à cota 78 m, em setembro de 1982.

#### - **Dique 10A (DIK-10A)**

Com 355 m de comprimento e 21 m de altura, o DIK-10A apresenta a ombreira direita pouco íngreme e a esquerda íngreme, com blocos esparsos de 1 m de diâmetro no trecho central.

Na ombreira direita o colúvio é inexpressivo, ocorrendo numa fina camada acima da cota 90 m. O solo residual ocorre com uma espessura de 2 m, sendo constituído por um silte areno-argiloso, pouco laterizado e compacto. Abaixo, desenvolve-se por 13 m, até atingir o topo rochoso, o solo de alteração de migmatito, constituído por uma argila silto-arenosa, pouco laterizada, de consistência rija.

No trecho central ocorre um aluvião com 30 m de extensão e até 1 m de espessura, sendo constituído por uma areia argilosa, fofa a pouco compacta e muito porosa. O nível d'água se encontrava próximo à cota 77 m, em março de 1987, impedindo a investigação dos solos abaixo deste.

Na ombreira esquerda o colúvio apresenta-se com 2 m de espessura e é constituído por uma argila siltosa, pouco arenosa, de baixa consistência, ocorrendo esparsos fragmentos de até 10 cm de quartzo e laterita, sendo que, abaixo de 1,5 m, a proporção deste aumenta, caracterizando uma linha de seixos. Abaixo ocorre o solo residual, com 1 m de espessura, constituído por um silte arenoso, pouco laterizado, pouco a medianamente compacto, gradando para um solo de alteração de migmatito, constituído por um silte arenoso, pouco compacto, desenvolvendo-se numa espessura de 5 m na baixada e de até 20 m nas cotas mais elevadas.

O topo rochoso está numa profundidade de 15 m na ombreira direita, 7 a 14 m na baixada e 8 a 23 m na ombreira esquerda.

#### - **Dique 11 (DIK-11)**

O DIK-11 possui extensão de 560 m e altura máxima de 9 m, apresentando as ombreiras com declividade baixa.

Na ombreira direita ocorre superficialmente o colúvio, com 2 m de espessura, sendo constituído por uma argila silto-arenosa, com grânulos de quartzo e laterita esparsos, de baixa consistência e porosa. Na base, apresenta uma camada com 20 cm de espessura, constituída por seixos de quartzo e laterita de até 5 cm de diâmetro, numa matriz areno-argilosa. Abaixo, desenvolve-se o solo residual, constituído por um silte argilo-arenoso, laterizado e pouco poroso, com 3,5 m de espessura. Segue-se o solo de alteração de migmatito, constituído por um silte argiloso pouco arenoso, compacto a medianamente compacto, com espessura superior a 19 m.

No trecho central o colúvio se apresenta com 1,5 m de espessura, constituído por uma argila areno-siltosa, com ocorrência de uma linha de seixos de até 0,5 m de espessura em sua base,

sendo o material de consistência média, poroso, com canalículos termíticos submilimétricos e de origem radicular de até 5 cm de diâmetro. Abaixo o solo residual é silte areno-argiloso, laterizado, compacto a muito compacto, desenvolvendo-se numa espessura de 3,5 m até atingir o solo de alteração de migmatito. Este é constituído por areia argilo-siltosa, muito pouco laterizada, medianamente compacta e com canalículos submilimétricos devidos à lixiviação, com espessura variando de 7 a 15 m.

Na ombreira esquerda o colúvio está com 2 m de espessura, sendo constituído por uma argila siltosa, pouco arenosa, de baixa consistência e porosa. Abaixo, o solo residual com 2,5 m de espessura, é constituído por um silte argilo-arenoso, com intercalações esparsas de níveis centimétricos de material mais arenoso, compacto a medianamente compacto. Segue-se o solo de alteração de migmatito, com espessura de 20 m, constituído por silte argilo-arenoso, compacidade média e pouco poroso.

O topo rochoso encontra-se numa profundidade maior que 25 m, na ombreira direita, de 12 a 20 m, no trecho central e de 25 m, na ombreira esquerda.

- **Dique 12 (DIK-12)**

O DIK-12 possui 65 m de comprimento e 3 m de altura máxima, apresentando ombreiras pouco suaves.

O colúvio apresenta-se, nas duas ombreiras e no trecho central, com espessura de 1 m, constituído por uma argila silto-arenosa de consistência média. Abaixo ocorre o solo residual, constituído por um silte areno-argiloso compacto, com espessura de 1 m. Segue-se o solo de alteração de migmatito, constituído por um silte argilo-arenoso de compacidade média.

- **Dique 13 (DIK-13)**

O DIK-13 apresenta-se com 1945 m de comprimento e 51 m de altura máxima. Sua ombreira direita é abrupta e com blocos de 1 m de diâmetro, enquanto a esquerda é suave e com o trecho central cortado por um aluvião.

A ombreira direita possui um colúvio de 0,5 m de espessura, caracterizado por uma argila siltosa, pouco arenosa, de baixa consistência e porosa, com muita raiz. Abaixo, o solo residual é caracterizado por silte areno-argiloso, laterizado, compacto e com espessura de 2 m. Segue-se o solo de alteração de migmatito, constituído por uma areia silto-argilosa, pouco compacta e pouco porosa, com espessura de 10 m.

No trecho central ocorre um aluvião com 165 m de largura e até 1,5 m de espessura, sendo constituído por uma argila arenosa, de baixa consistência e saturada, sobreposta ao solo de alteração de migmatito. Este é constituído por uma areia silto-argilosa, compacta e saturada. O nível d'água estava próximo à cota 44 m, em fevereiro de 1987.

Na ombreira esquerda ocorre um colúvio, com uma espessura média de 2 m, constituído por uma argila silto-arenosa, de baixa consistência e porosa, com canalículos de até 10 cm de diâmetro, de possível origem radicular. Abaixo o solo residual tem uma espessura que varia entre 1,5 m a 4 m e é constituído por uma areia silto-argilosa, laterizada, compacta, com freqüentes canalículos termíticos de 1 mm de diâmetro. O solo de alteração de granito é

constituído por uma areia silto-argilosa, pouco laterizada, pouco a medianamente compacta e porosa, com zonas mais porosas que o solo residual. Sua espessura varia de 1 a 20 m.

O topo rochoso encontra-se a profundidades de 12 a 20 m na ombreira direita, de 8 m no trecho central e de 5 a 25 m na ombreira esquerda.

#### - **Dique 14A (DIK-14A)**

Com um comprimento de 735 m e altura máxima de 19 m, o DIK-14A possui a ombreira direita pouco suave e a esquerda abrupta.

A ombreira direita apresenta-se com um colúvio de 1,5 m de espessura, constituído por uma

argila silto-arenosa, com grânulos esparsos de quartzo e laterita, de baixa a média consistência e com freqüentes poros de até 3 mm de diâmetro. Abaixo, o solo residual está com 3 m de espessura, sendo constituído por um silte areno-argiloso, laterizado, compacto a muito compacto, e com freqüentes canalículos termíticos submilimétricos. Segue-se o solo de alteração de granito, constituído por uma areia silto-argilosa, pouco a medianamente compacta, pouco porosa e com uma espessura variável de 15 a 25 m.

No trecho central, o colúvio, com 1 m de espessura, é caracterizado por uma areia argilo-siltosa, fofa e porosa, com canalículos de até 25 cm de diâmetro provavelmente devido à deterioração de raízes. Abaixo, com uma espessura de 3,5 m, o solo residual apresenta-se como uma areia argilo-siltosa, pouco laterizada, compacta com zonas de até 5 cm de diâmetro com raízes deterioradas. Segue-se o solo de alteração de granito, constituído por areia silto-argilosa, pouco compacta, úmida e muito porosa, desenvolvendo-se numa espessura entre 8 e 20 m.

A ombreira esquerda apresenta-se com as mesmas características da ombreira direita.

O topo rochoso encontra-se com profundidades de 20 m na ombreira direita, entre 25 e 30 m no trecho central e de 25 m na ombreira esquerda.

#### - **Dique 14B (DIK-14B)**

O DIK-14B possui comprimento de 200 m e altura máxima de 9 m. Suas ombreiras são suaves, ocorrendo nestas e no trecho central, blocos de até 2 m de diâmetro.

O colúvio apresenta-se nas ombreiras e no trecho central, com 1 m de espessura, sendo constituído de uma argila silto-arenosa, com raros grânulos de laterita e quartzo, de baixa consistência e porosa. Abaixo, segue-se numa espessura de 3 m, o solo residual, que é caracterizado nas ombreiras e no trecho central, como um silte argilo-arenoso, laterizado, compacto e pouco poroso. O solo de alteração de granito, imediatamente abaixo, apresenta-se na ombreira direita com 16 m de espessura, constituído por uma areia siltosa, pouco a medianamente compacta, com poros submilimétricos de lixiviação. No trecho central é constituído por um silte argilo-arenoso, medianamente compacto e com uma espessura superior a 26 m. Na ombreira esquerda o solo de alteração é silte areno- argiloso, medianamente compacto e com espessura de 21 m.

O topo rochoso encontra-se numa profundidade de 20 m na ombreira direita, de 25 a 30 m no trecho central e de 25 m na ombreira esquerda.

- **Dique 14C (DIK-14C)**

O DIK-14C possui 790 m de comprimento e 53 m de altura máxima. Suas ombreiras são íngremes e ocorrem blocos de 1 m de diâmetro na ombreira direita e parte do trecho central, que é cortado por um aluvião.

Na ombreira direita ocorre um colúvio com 1,5 m de espessura, constituído por uma argila silto-arenosa, com raros seixos e grânulos de quartzo e laterita, de baixa consistência, muito porosa e com muitas raízes e radículas. Abaixo se desenvolve numa espessura de 3 m, o solo residual, constituído por um silte areno-argiloso, laterizado, muito compacto e com poucos poros submilimétricos. Segue-se o solo de alteração de granito, caracterizado por uma areia silto-argilosa, pouco laterizada, compacta e pouco porosa, com espessura variável de 6 a 29 m.

Na baixada ocorre um aluvião com 100 m de comprimento e até 2,5 m de espessura, constituído por uma argila arenosa, de baixa consistência, muito porosa e saturada, com nível d'água próximo à cota 26 m, em janeiro de 1987. Segue-se abaixo o solo de alteração de cataclasito, constituído por uma areia siltosa, pouco micácea, compacta a muito compacta, saturada, com uma espessura de 3,5 m.

Na ombreira esquerda ocorre o colúvio, com 1,5 m de espessura, sendo constituído por uma argila areno-siltosa, fofa, muito porosa e com muitas raízes. Abaixo o solo residual varia de 1,5 a 2,5 m de espessura e é composto de um silte areno-argiloso, pouco laterizado, compacto, com poucos canalículos submilimétricos e com blocos esparsos de até 0,5 m de diâmetro. Segue-se o solo de alteração de migmatito, constituído por uma areia argilo-siltosa, com blocos esparsos de até 0,5 m de diâmetro, pouco a medianamente compacta, porosa, e com espessura muito variável, desde 7 até 40 m.

O topo rochoso encontra-se numa profundidade de 10 a 35 m na ombreira direita, de 6 m no trecho central e de 10 a 45 m na ombreira esquerda.

- **Dique 14D (DIK-14D)**

O DIK-14D possui 525 m de comprimento e 39 m de altura máxima. Apresenta as ombreiras abruptas, sendo que na esquerda, ocorrem poucos blocos de até 1 m de diâmetro.

Na ombreira direita ocorre superficialmente um colúvio, com 1 m de espessura, constituído por uma areia silto-argilosa, pouco compacta e porosa. Abaixo com 2 m de espessura, ocorre o solo residual, caracterizado por um silte argilo-arenoso, pouco a medianamente compacto. Segue-se o solo de alteração de migmatito, constituído por um silte areno-argiloso, micáceo, pouco compacto e com espessura em torno de 15 m.

No trecho central o colúvio apresenta-se com 0,5 m de espessura e é caracterizado por uma areia silto-argilosa, fofa a pouco compacta, porosa e com muitas raízes. Abaixo o solo residual possui 1 m de espessura, sendo constituído por um silte argilo-arenoso, medianamente compacto. Segue-se o solo de alteração de migmatito, com espessura de 13 a 18 m, constituído por uma areia silto-argilosa, porosa e pouco compacta.

Na ombreira esquerda o colúvio está com 1 m de espessura e é constituído por silte areno-argiloso, fofo. Abaixo o solo residual possui 2 m de espessura, sendo constituído por um silte



argilo-arenoso, pouco a medianamente compacto. O solo de alteração de migmatito possui espessura de 23 m e é caracterizado por um silte arenoso, variegado, micáceo, pouco compacto.

O topo rochoso está a uma profundidade de 15 a 20 m na ombreira direita, de 25 m na ombreira esquerda e de 8 a 15 m no trecho central.

- **Dique 14E (DIK-14E)**

Com 650 m de comprimento e 19 m de altura máxima, o DIK-14E apresenta-se com ombreiras abruptas, com poucos blocos na ombreira esquerda e trecho central, cortando a cabeceira de um pequeno aluvião.

Na ombreira direita o colúvio com 1 m de espessura, é caracterizado por uma areia argilo-siltosa, com grânulos esparsos de quartzo e laterita, fofo e poroso, com canalículos de até 2 mm de diâmetro, de possível origem termítica. Abaixo o solo residual possui de 1,5 a 3 m de espessura, sendo constituído por uma areia silto-argilosa, pouco laterizada, pouco compacta e pouco porosa. O solo de alteração de migmatito é constituído por areia silto-argilosa, pouco laterizada, medianamente compacta e pouco porosa, desenvolvendo-se numa espessura maior que 15 m.

No trecho central ocorre um aluvião com 25 m de largura e com espessura menor que 1 m, caracterizado por uma areia argilosa, pouco compacta, muito porosa e saturada. O nível d'água encontrava-se próximo à cota 75 m, em janeiro de 1987.

A ombreira esquerda apresenta-se com um colúvio, com 1 m de espessura, caracterizado como uma argila silto-arenosa, com grânulos esparsos de quartzo e laterita, de baixa consistência e porosa. Abaixo o solo residual tem 1,5 m de espessura e é constituído por um silte argilo-arenoso, compacto, gradando, verticalmente abaixo, para o solo de alteração de migmatito. Este possui uma espessura maior que 18 m e é composto por um silte arenoso, medianamente compacto.

O topo rochoso encontra-se a uma profundidade maior que 20 m na ombreira direita, de 5 a 8 m no trecho central e de 20 a 25 m na ombreira esquerda.

- **Dique 18 (DIK-18)**

O DIK-18 apresenta-se com 175 m de comprimento e 19 m de altura máxima. Possui as ombreiras abruptas e ocorrem blocos esparsos menores que 1 m de diâmetro por todo o eixo. As ombreiras esquerda e direita apresentam-se com um colúvio de 1 m de espessura, constituído por uma argila silto-arenosa, de baixa consistência e porosa. Abaixo ocorre o solo de alteração, com 2 m de profundidade em média, constituído por um silte argilo-arenoso, medianamente compacto. Segue-se um solo de alteração de migmatito, com espessura maior que 25 m na ombreira direita e de 17 m na esquerda, sendo constituído por um silte arenoso, pouco argiloso, por vezes micáceo e pouco compacto.

No trecho central o colúvio está com 0,5 m de espessura e é caracterizado por uma areia silto-argilosa, pouco compacta, muito porosa e com muitas raízes. Abaixo o solo residual possui 1 m de espessura e é composto por uma areia silto-argilosa, medianamente compacta e pouco

porosa. Segue-se o solo de alteração de migmatito, com uma espessura maior que 23 m, sendo constituído por uma areia siltosa, medianamente compacta e pouco porosa.

O topo rochoso está a uma profundidade de 30 m na ombreira direita, de 25 m no trecho central e de 20 m na ombreira esquerda.

- **Dique 19 (DIK-19)**

O DIK-19 possui 1395 m de comprimento e 41 m de altura máxima. Apresenta-se com ombreiras pouco íngremes e cortado por um grande aluvião, com ocorrências de locais alagados em seu trecho central.

Na ombreira direita ocorre um colúvio com 1,5 m de espessura, caracterizado por uma areia argilo-siltosa, fofa, muito porosa e com muitas raízes. Abaixo se desenvolve o solo residual, com 2 m de espessura, constituído por uma areia silto-argilosa, pouco laterizada, compacta e com poucos poros submilimétricos. Segue-se o solo de alteração de migmatito, composto por uma areia silto-argilosa, compacta a medianamente compacta, com poucos poros de origem termítica e com raros blocos centimétricos esparsos, possuindo uma espessura que varia de 6 a 25 m.

No trecho central ocorre um aluvião com 600 m de largura e até 3 m de espessura, onde interdigitam-se bancos de areia pouco argilosa, fofa e muito porosa, com bancos de argila arenosa, de baixa consistência. Abaixo ocorre o solo de alteração de cataclasito, constituído por um silte areno-argiloso, compacto e saturado, com 3 m de espessura. O nível d'água estava próximo a cota 64 m, em dezembro de 1986.

Na ombreira esquerda o colúvio é argilo-siltoso, pouco arenoso, fofo e poroso. Imediatamente abaixo o solo residual apresenta-se com espessura variável de 2 a 4 m, sendo constituído por um silte argilo-arenoso, pouco laterizado e compacto. Segue-se o solo de alteração de migmatito, com uma espessura variando de 15 a 35 m, composto por um silte areno-argiloso, micáceo, medianamente compacto.

O topo rochoso ocorre numa profundidade de 10 a 30 m na ombreira direita, de 6 m no trecho central e de 25 a 35 m na ombreira esquerda.

- **Dique 20 (DIK-20)**

O DIK-20 possui 120 m de comprimento e 10 m de altura máxima, sendo suas ombreiras, íngremes. Ocorrem muito blocos em sua ombreira esquerda, com até 4 m de diâmetro.

Na ombreira direita o colúvio, com 1,5 m de espessura, é constituído por uma argila siltosa, pouco arenosa, de baixa consistência, muito porosa e com muitas raízes. Abaixo, o solo residual, com 2 m de espessura, é caracterizado por uma argila pouco silto-arenosa, de baixa consistência e porosa, com freqüentes canálculos de até 1 cm de diâmetro, de possível origem termítica. Segue-se o solo de alteração de migmatito constituído por uma argila siltosa, pouco arenosa, com veios milimétricos de quartzo, de consistência baixa a média, pouco porosa.

No trecho central e ombreira esquerda o colúvio apresenta-se com 1 m de espessura e é constituído por uma argila silto-arenosa, de baixa consistência, porosa e com muitas raízes. Segue-se abaixo o solo residual, com 2 m de espessura, caracterizado por um silte argilo-

arenoso, medianamente compacto. Abaixo, o solo de alteração de migmatito é um silte arenoso-argiloso, pouco compacto.

## **c2) Possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Avalia-se que os riscos de maior magnitude devam estar associados aos diques maiores e mais altos e também de ombreiras íngremes. De um total de 19 diques, sete deles apresentam alturas entre 39 e 59 m (diques 6C, 7A, 7B, 13, 14C, 14D e 19), cinco apresentam alturas entre 19 e 26 m (diques 6A, 10A, 14A, 14E, 18), seis apresentam alturas entre 8 e 10 m e um alturas de 3,0 m.

A falta de investigações sondagens mecânicas em determinados diques, impede a visualização completa dos possíveis condicionantes e processos geológico-geotécnicos que podem responder por riscos em muitos dos diques de Belo Monte da margem direita do reservatório dos Canais. Entretanto, a partir do conhecimento das condições geológicas regionais, assinala-se que os trechos de ocorrência das formações Trombetas e Maecuru na borda do reservatório e/ou nas suas proximidades devem ser objeto de levantamentos topográficos, mapeamentos geológicos e investigações *in situ* geológico-geotécnicas, estruturais e hidrogeológicas de detalhe.

Correlacionando-se as características geológicas dos locais dos diques de Belo Monte da margem direita do Reservatório dos Canais com aquelas de outros locais de obras de características geológicas similares e onde as investigações foram feitas em maior quantidade, é possível uma visualização parcial dos condicionantes e processos geológico-geotécnicos que podem responder por riscos nesses diques. São destacados:

- Ritmitos da Formação Trombetas pouco coerentes e incoerentes e solos residuais dessas rochas, bem como discontinuidades nos ritmitos, associadas ao acamamento, subhorizontais, com materiais alterados e incoerentes e de características predominantemente argilosas representam condicionantes para a estabilidade principalmente nos diques 6A (ombreiras direita e esquerda) e 6B (ombreira esquerda).
- Arenitos nas ombreiras dos diques 6C e 7A que podem condicionar as percolações e eventualmente representar riscos de *piping*
- Espessos solos de alteração de migmatito, localizados predominantemente nas ombreiras e em alguns casos na porção central do dique, muitas vezes associados a blocos de rocha de grande diâmetro. A essa condição, poderão estar associadas percolações preferenciais e concentrações de fluxo condicionantes de *piping*.
- Presença de maciço rochoso na fundação de alguns diques, especialmente no fundo dos no fundo dos vales, que pode apresentar feições e estruturas geológicas (zonas de passagem do solo de alteração para o topo rochoso e zona imediatamente abaixo do topo rochoso, além milonitos, cataclasitos e zonas de falhas em geral) que constituem condicionantes para a percolação, cargas hidráulicas elevadas e processos de *piping*. Nesses locais frequentemente são observados milonitos e cataclasitos e zonas de falhas em geral.

- Presença de canalículos de origem radicular, termítica e devido à lixiviação, no colúvio, solos residuais e de alteração que podem caracterizar condicionantes para a percolação e representar riscos de piping.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.

**d) Diques do Sítio Bela Vista**

**d1) Aspectos geológico-geotécnicos**

**- Dique 19A (DIK-19A)**

O DIK-19A só seria executado com a implantação da alternativa Ticaruca. Apresenta comprimento de cerca de 300 m, altura máxima de 41 m e ombreiras íngremes em vale simétrico. Ao longo de todo trecho ocorrem matacões com diâmetro de até 5 m.

O coluvião distribui-se uniformemente nas ombreiras com espessura de até 0,80 m, sendo constituído por um silte areno-argiloso, pouco compacto e com muitos fragmentos de quartzo e laterita. Na porção central ocorre um aluvião com espessura de 1,3 m, formado por areia fina, média e grossa, pouco siltosa.

Abaixo destes sedimentos recentes aparece o solo residual do migmatito, formado por um silte argilo-arenoso, com espessura de 0,60 m. A seguir, ocorre o solo de alteração de migmatito, composto por um silte arenoso, com muitos fragmentos de quartzo e rocha, com alta compactidade. Devido o método de investigação utilizado (sondagem a trado), não foi possível determinar a profundidade do topo rochoso. Na porção central, ao longo do trecho aluvionar, ocorre pequeno fluxo de água, com profundidade de cerca de 0,30 m em agosto/2001.

Pesquisas topográficas complementares realizadas posteriormente aos estudos de alternativas de locação do Vertedouro Complementar, identificaram condições topográficas aparentemente mais favoráveis a jusante da posição da implantação atual, o que poderá ser melhor explorado em eventuais reavaliações futuras.

**- Dique 23 (DIK-23)**

Com comprimento de 816 m e altura máxima de 35 m, o DIK-23 possui ombreiras íngremes.

As ombreiras esquerda e direita apresentam-se com um colúvio de 2,50 m de espessura máxima, constituído predominantemente por um silte argilo-arenoso, de baixa consistência e poroso. No trecho central aparece o aluvião com 0,5 m de espessura máxima, caracterizado por uma argila orgânica preta, com restos vegetais. O nível d'água encontrava-se próximo à cota 65 m, em novembro de 2000.

Abaixo destes solos transportados ocorre o solo de alteração migmatito, com 25 m de profundidade média nas ombreiras e 10 m no trecho central, constituído predominantemente por um silte arenoso, medianamente compacto, com valores de SPT médios a altos desde os primeiros metros até atingir o impenetrável em profundidade e permeabilidade variando de  $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  cm/s.

O topo rochoso ocorre, em média, nas elevações 52 m no trecho central, 73 m na ombreira direita e 79 m na ombreira esquerda com baixos valores de permeabilidade obtidos nos ensaios de perda d'água.

Na análise dos testemunhos das sondagens rotativas observou-se que o maciço rochoso apresenta-se de maneira geral são a medianamente alterado (A1/A2) e pouco a medianamente fraturado (F2/F3). Entretanto, na SR-656 identificou-se a presença de um trecho de rocha alterada, com pequenas cavidades preenchidas por um argilomineral. Este material foi coletado para análises de raios X, na profundidade de 37,90 m com granulometria na fração argila, de cor verde claro e na profundidade de 40,80 m com característica fibrosa (parecendo amianto), cor cinza levemente azulada.

O resultado da análise do difratograma referente à primeira amostra identificou quatro possíveis minerais presentes no material argiloso, são eles: ribeckita (que é um tipo de anfibólio), saponita (que corresponde a um argilomineral do grupo das esmectitas), plagioclásio (feldspato sódico) e ortoclásio (feldspato potássico).

Foi feito um segundo difratograma da mesma amostra (SR 656-37,90m), para verificar se o argilomineral presente era mesmo do grupo das esmectitas, pois estas são argilas expansivas, e uma das maneiras de verificar se o argilomineral presente expandia, era fazer uma outra análise do mesmo material uma hora depois. Este procedimento foi realizado e o segundo difratograma, mostrou um deslocamento somente no pico do argilomineral, com isto verificou-se que se trata de uma argila expansiva, que foi identificada como saponita, cuja fórmula química é  $\text{CaO} \cdot 2\text{Mg}_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

O resultado dos raios-X na primeira amostra identificou um mineral do grupo dos anfibólios (ribeckita), no entanto, foi feita uma lâmina (SR 656-30,30m) desta rocha, e o anfibólio encontrado corresponde a hornblenda, não havendo sinal de ribeckita na lâmina. Portanto o anfibólio diagnosticado pelo resultado de raios-X como ribeckita, na verdade trata-se de uma hornblenda. Com relação aos feldspatos encontrados, o feldspato potássico não é ortoclásio e sim microclínio, enquanto que o feldspato sódico é coerente com a petrografia.

O difratograma da amostra SR 656-40,80m (segunda amostra), identificou dois tipos de anfibólios, que são ribeckita e crossita. No entanto a petrografia mostra que o anfibólio presente é a hornblenda. O resultado obtido com este difratograma ainda mostra a presença da saponita, que é o argilomineral expansivo e por último identifica leucita, que é um feldspatóide. A presença deste último mineral é coerente com a petrografia da amostra alterada da mesma rocha (lâmina SR 656-41,84m), onde a quantidade de quartzo é muito pequena, apesar de não ter sido encontrada leucita na lâmina.

#### - **Dique 23A (DIK-23A)**

O DIK-23A só seria executado com a implantação da alternativa Ticaruca. Apresenta comprimento de 452 m, altura máxima de 29 m e ombreiras íngremes. Ao longo de toda extensão aflora o solo de alteração de migmatito, que é constituído por um silte argilo-arenoso a silte areno-argiloso de compactidade média. O topo rochoso encontra-se na cota 60 m. O nível d'água estava próximo à cota 71 m em fevereiro de 2001.

- **Dique 24 (DIK-24)**

O DIK-24 possui comprimento de 200 m, altura máxima de 31 m e ombreiras muito íngremes. Nestas ombreiras é comum a presença de blocos rochosos em superfície.

O colúvio apresenta-se uniformemente nas ombreiras com espessura de cerca de 2 m, sendo constituído predominantemente por uma areia silto-argilosa. Na porção central ocorre um horizonte aluvionar com espessura de 2,5 m, composto por um material areno siltoso marrom em superfície e silte argiloso cinza em profundidade.

Sotoposto a estes sedimentos recentes ocorre o solo de alteração de migmatito com granulometria silto-arenosa, róseo esbranquiçado com manchas amareladas. O topo rochoso, na porção central, situa-se na cota 57 m. Na sondagem SP-659, executada ao lado do Igarapé, o nível d'água ocorria na cota 68 m em dezembro de 2000. Nesta mesma sondagem, ao atingir a profundidade de 7 m, ocorreu artesianismo de 0,20 m.

- **Dique 24A (DIK-24A)**

O DIK-24A só seria executado com a implantação da alternativa Ticaruca. Apresenta comprimento de 100 m, altura máxima de 18 m e ombreiras íngremes.

O colúvio apresenta-se uniformemente nas ombreiras com espessura de cerca de 1,4 m, sendo constituído predominantemente por uma areia siltosa, com muitos fragmentos de quartzo e compactidade média. Na porção central ocorre um horizonte aluvionar com espessura de até 1,5 m, composto por uma argila silto-arenosa, com muitas raízes e lâmina d'água de 0,20 m em agosto/2001.

Sotoposto a estes materiais recentes ocorre o solo de alteração de migmatito, de composição areno-siltoso a silte arenoso e compactidade média a alta. Com o método de investigação utilizado (sondagens a trado), não foi possível identificar a profundidade do topo rochoso.

- **Dique 25 (DIK-25)**

O DIK-25 possui comprimento de 35 m, altura máxima de 4 m e ombreiras suaves. O colúvio distribui-se uniformemente com espessura de até 0,80 m, sendo constituído por um silte areno-argiloso, pouco compacto.

- **Dique 26 (DIK-26)**

O DIK-26 possui comprimento de 330 m e altura máxima de 10 m. Suas ombreiras são suaves, ocorrendo nestas e no trecho central blocos rochosos de até 4 m de diâmetro.

O colúvio apresenta-se nas ombreiras e no trecho central, com até 3,6 m de espessura, sendo constituído de um silte areno-argiloso a areno siltoso, com raros grânulos de laterita e quartzo, de baixa consistência e porosa. Abaixo, segue-se numa espessura de até 1 m, o solo residual, que é caracterizado nas ombreiras e no trecho central, por material areno-siltoso, com muitos fragmentos de quartzo e laterita, compacto e poroso. O solo de alteração de migmatito, imediatamente abaixo, é constituído predominantemente por material areno siltoso, muito compacto. Com o método de investigação utilizado (sondagens a trado), não foi possível identificar a profundidade do topo rochoso e do nível d'água (em agosto/2001).



- **Dique 27 (DIK-27)**

O DIK-27 apresenta comprimento de 310 m, altura máxima de 12 m e será implantado em vale assimétrico. A ombreira direita é íngreme e a esquerda suave.

Na ombreira esquerda estão distribuídos em superfície grande quantidade de blocos rochosos de até 1 m de diâmetro, inclusive impedindo o prosseguimento da sondagem a percussão programada para este local além da profundidade de 1,75 m. Ao longo de toda extensão ocorre o solo de alteração de migmatito, constituído por um silte arenoso. O nível d'água estava na cota 85 m em novembro de 2000.

- **Dique 28 (DIK-28)**

O DIK-28 possui comprimento de 1100 m, altura máxima de 28 m e será implantado em vale assimétrico. A ombreira esquerda é íngreme e possui grande quantidade de blocos rochosos de até 3 m de diâmetro. A ombreira direita é suave e não apresenta blocos rochosos em superfície.

O colúvio apresenta-se uniformemente nas ombreiras com espessura máxima de 2 m, sendo constituído por um silte argilo-arenoso a argila silto-arenosa. Na porção central ocorre um horizonte aluvionar com espessura de cerca de 1,5 m, composto superficialmente por uma areia fina, pouco argilosa, cinza escura e em profundidade por areia fina, média e grossa.

O solo de alteração de migmatito, que ocorre sotoposto aos materiais transportados, é composto predominantemente por um silte argilo-arenoso. Os ensaios de SPT revelaram Índice de Resistência à Penetração do ensaio SPT de forma geral altos até atingir o lençol freático, onde sistematicamente ocorre uma queda de valores, recuperando-se gradativamente em profundidade até atingir o impenetrável. Quanto a permeabilidade, os ensaios de infiltração revelaram o predomínio de valores entre  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  cm/s. O valor de  $1,21 \times 10^{-3}$  cm/s medido no ensaio da profundidade de 5,0 a 7,0 m da SP-653 está relacionada com a perda parcial d'água de circulação do processo de avanço por lavagem.

O topo rochoso encontra-se na cota 68 m na ombreira esquerda, na cota aproximada 67 m no trecho central e na cota 50 m na ombreira direita. O nível d'água estava na cota 71 m em novembro de 2000.

- **Dique 29 (DIK-29)**

O DIK-29 apresenta comprimento de 480 m e altura máxima de 16 m e será implantado em vale assimétrico. A ombreira esquerda é íngreme e não apresenta blocos rochosos em superfície. A ombreira direita é suave e apresenta muitos blocos de rocha com dimensões de até 2 m de diâmetro.

A exceção da porção mais elevada da ombreira direita, o coluvião apresenta-se distribuído de maneira uniforme, com espessura máxima de até 2,30 m e é constituído predominantemente por um silte arenoso com baixa compacidade. Na ombreira direita e sotoposto ao coluvião, ocorre o solo residual, com espessura de cerca de 0,50 m, constituído por material areno-siltoso, de compacidade média a alta. Abaixo deste material ocorre o solo de alteração de migmatito, constituído por um silte areno-argiloso de compacidade alta.

As sondagens a trado executadas não permitiram a identificação do topo rochoso. Uma sondagem a percussão executada nas imediações do DIK-29 indica que o provável topo rochoso encontra-se na cota aproximada 65 m. O nível d'água desta sondagem estava na cota 76 m em novembro de 2000.

## **d2) Condicionantes e processos geológico-geotécnicos relacionados a risco**

Avalia-se que os riscos de maior magnitude devam estar associados aos diques maiores e mais altos e também de ombreiras íngremes. De um total de sete diques, três deles apresentam alturas entre 28 e 35 m (diques 23, 24 e 28), um apresenta altura de 16 m (dique 29), dois apresentam alturas entre 10 e 12 m e um altura de 4m.

Correlacionando-se as características geológicas dos locais dos diques de Belo Monte da margem direita do Reservatório dos Canais com aquelas de outros locais de obras de características geológicas similares e onde as investigações foram feitas em maior quantidade, é possível uma visualização parcial dos condicionantes e processos geológico-geotécnicos que podem responder por riscos nesses diques. São destacados:

- Espessos solos de alteração de migmatito, localizados predominantemente nas ombreiras e em alguns casos na porção central do dique, muitas vezes associados a blocos de rocha de grande diâmetro. A essa condição, poderão estar associadas percolações preferenciais e concentrações de fluxo condicionantes da ocorrência de piping.
- Presença de maciço rochoso na fundação do dique 27, especialmente no fundo dos vales, que pode apresentar feições e estruturas geológicas (zonas de passagem do solo de alteração para o topo rochoso e zona imediatamente abaixo do topo rochoso, além milonitos, cataclasitos e zonas de falhas em geral) que constituem condicionantes para a percolação, cargas hidráulicas elevadas e processos de piping.
- Possibilidade da presença de canalículos de origem radicular, termítica e devido à lixiviação, no colúvio, solos residuais e de alteração, que podem caracterizar condicionantes para a percolação e representar riscos de piping.
- Eventual presença de coluviões espessos, fofos, insaturados e colapsíveis, sujeitos a colapso em contato com água.

## **e) Diques do Sítio Pimental**

Foram identificados, por meio de mapas de restituição aerofotogramétrica e confirmados posteriormente com levantamento topográfico preliminar, seis prováveis pontos de fugas no Sítio Pimental. Desses um está localizado na margem esquerda do rio Xingu e os restantes na margem direita.

Tratam-se de locais onde provavelmente serão implantados diques com altura máxima de 7 m e comprimentos variáveis. Considerando-se a pequena altura desses barramentos, estes locais foram estudados de forma simplificada durante os Estudos de Viabilidade, apenas com a execução de algumas sondagens a trado. Para tanto, é fundamental uma investigação detalhada desses pontos na fase do Projeto Básico, principalmente em termos de levantamentos topográficos

#### f) **Tratamentos de fundação previstos em projeto**

A escolha de seções típicas foi orientada no sentido de se definirem inclinações variáveis, começando por taludes mais íngremes para pequenas alturas, chegando a taludes mais abatidos para as maiores. Definiu-se, assim, um "dique padrão", de tal forma que as seções nas ombreiras representam seções parciais daquela de maior altura. Associando-se este conceito às condições típicas de fundação dos diversos diques e considerando-se análises de estabilidade, obteve-se as seções típicas.

O talude de montante dos diques apoiados na fundação em migmatito inicia na crista com inclinação 2H:1V, passando para 2,5H:1V abaixo da cota 79,0 m, e terminando, quando for o caso, com 3H:1V abaixo da cota 29,0 m. O talude de jusante inicia na crista com inclinação 1,5H:1V e desce, progressivamente abatido a cada 10,0 m, até atingir a inclinação 4,5H:1V, abaixo da cota 49,0 m. Nas cotas de variação de talude, a jusante, existem bermas de 4,0 m de largura.

No caso dos DIK-03 e DIK-04, que têm fundação em folhelho, o talude de montante e de jusante é de 2,5H:1V, desde a crista até a cota 93,0 m, onde passa a ter uma bermas de 9,0 m de largura, com inclinação de 10H:1V até a cota 92,0 m, e uma inclinação de 3H:1V até cotas mais baixas.

Basicamente, todos os diques possuem sistemas de drenagem cujas características são variáveis em função da altura do dique.

Considerando-se os resultados dos mapeamentos de subsuperfície e das investigações geológico-geotécnicas disponíveis para os Estudos de Viabilidade de Engenharia (ELETRONORTE, 2002), as prováveis linhas de escavação para implantação dos diques ficam contidas no solo aluvionar ou coluvionar, ou coincidem com o topo do solo residual ou solo de alteração. A determinação desses níveis foi condicionada pelos aspectos de estabilidade, estanqueidade e deformabilidade dos materiais.

Linhas de escavação contidas em materiais aluvionares não são freqüentes, restringindo-se a alguns poucos diques que fecharão regiões com presença de pequenas grotas e igarapés. Nestes casos, a escavação foi limitada, segundo o projeto, à remoção do metro superior do aluvião, seja argiloso ou arenoso. A remoção de maiores espessuras depende das condições locais de ocorrência dos aluviões, em termos de condições de suporte e resistência preconizadas.

As incertezas quanto a caminhos preferenciais de percolação no material aluvionar definiram a execução de uma trincheira – o denominado *cut-off* –, com remoção completa do aluvião, penetrando pelo menos 0,5 m no solo de alteração. A trincheira tem profundidade mínima de 3,0 m e taludes 1,5H:1,0V. A largura da base varia com a altura do dique em acordo com as especificações constantes do **QUADRO 7.7.10-11**.

### QUADRO 7.7.10-11

Larguras das Trincheiras de Vedação nos Diques. ELETRONORTE (2002)

Altura do Dique (m)	Largura da Base da Trincheira de Vedação (m)
< 13,0	5,0
13,0 < altura < 25,0	5,0 < largura < 10,0
> 25,0	10,0

Para os casos de linhas de escavação contidas em materiais coluvionares (solos areno-argilosos e areno-silto-argilosos, em geral porosos), as profundidades de escavação, segundo o projeto, são variáveis. Assim, remoções de pequenas espessuras são necessárias para aterros de baixa altura, prevendo-se remoções de maiores espessuras, ou mesmo remoção total, para aqueles de maior altura. As espessuras de remoção variam de 0,5 m a 3,0 m, que é a espessura máxima esperada para o material coluvionar.

Preocupações em relação à permeabilidade das fundações, pela presença de canálculos e/ou linha de seixos na base do coluvião, levaram à inclusão de uma trincheira vedante – *cut-off* –, com 3,0 m de profundidade, a partir da linha de escavação. A base desta trincheira atinge sempre o solo residual, sendo sua largura função da altura do dique, variando entre o mínimo de 5,0 m e o máximo de 10,0 m. O talude de escavação para a implantação da trincheira é de 1,5H:1V.

Devido à presença de matacões associados ao solo coluvionar, foi prevista a necessidade de um tratamento superficial deste solo, consistindo na remoção total de blocos soltos. Blocos parcialmente expostos, quando esparsos, não irão requerer remoção. No caso de constatação de concentração de blocos parcialmente expostos, tratamentos específicos são recomendados, desde sua remoção total, em profundidade, ou, caso seja mais conveniente, a injeção de tais zonas, desde que constatada sua viabilidade e economia. A escolha de uma ou outra solução para o problema de concentração de blocos deverá ser feita após a inspeção da trincheira de vedação, sempre presente nestas regiões.