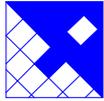




**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL
SECRETARIA DE INFRA-ESTRUTURA HÍDRICA**



INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



FUNCATE - Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais



**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE
ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA
O NORDESTE SETENTRIONAL
PROJETO BÁSICO**

**TRECHO II – EIXO NORTE
R8 – GEOLOGIA E GEOTECNIA**



FUNCATE - Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais

TRECHO II – EIXO NORTE R8 – GEOLOGIA E GEOTECNIA

PROJETO TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL

Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica

Ministro de Estado da Integração Nacional: Fernando Luiz Gonçalves Bezerra

Secretário de Infra-Estrutura Hídrica: Rômulo de Macedo Vieira

Coordenador Geral: João Urbano Cagnin

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Diretor Interino: Volker W. J. H. Kirchhoff

FUNCATE – Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais

Gerente: José Armando Varão Monteiro

Coordenador Técnico: Antônio Carlos de Almeida Vidon

Coordenador Técnico Adjunto: Ricardo Antônio Abrahão

Brasília, abril de 2001

Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE

Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional; Trecho II – Eixo Norte – R8 – Geologia e Geotecnia. – São José dos Campos: Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais – FUNCATE, 2001. 58 p

1. Transposição de Águas; Geologia; Geotecnia
- I. Trecho II – Eixo Norte – R8– Geologia e Geotecnia

CDU 556.5:551

FUNCATE:

Av. Dr. João Guilhermino, 429, 11º Andar – Centro

São José dos Campos – SP

CEP: 12210-131

Telefone: (0XX 12) 325 1399 Fax: (0XX 12) 341 2829



FUNCATE

**Fundação de Ciência,
Aplicações e Tecnologia
Espaciais**

Projeto						Data	
Verificação						Data	
Aprovação						Data	
Aprovação						Data	
Código FUNCATE						Data	
EN.B/II.RF.GL.0001							
Rev.	Data	Folha	Descrição	Aprovação		FUNCATE	
						Data	Aprovação

**PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS
DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O
NORDESTE SETENTRIONAL
*PROJETO BÁSICO***

**TRECHO II - EIXO NORTE
R8 - GEOLOGIA E GEOTECNIA**

PROJETO TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL

Equipe

José Armando Varão Monteiro: Gerente

Antônio Carlos de Almeida Vidon: Coordenador Técnico

Ricardo Antônio Abrahão: Coordenador Técnico Adjunto

Akira Ussami: Chefe da Equipe de Geotecnia:

Geverson Luiz Machado – Engenheiro Civil

Gislaine Terezinha de Matos – Engenheira Civil

Newton Bitencourt Santos – Engenheiro Civil

Nobutugu Kaji: Chefe da Equipe de Geologia

Aloysio Accioly de Senna Filho – Geólogo

Fábio Canzian – Geólogo

José Frederico Büll – Geólogo

Wilson Roberto Mori – Geólogo

Fernando Bispo de Jesus – Técnico de Campo

José Antonio Santos Subrinho – Técnico de Campo

Anibal Young Eléspuru: Chefe da Equipe de Hidráulica e Hidrologia

Giovanni Magnus Dantas Amaro – Engenheiro Civil

Rafael Guedes Valença – Engenheiro Civil

Sérgio Bianconcini – Engenheiro Civil

José Carlos Degaspere: Chefe da Equipe de Estrutura

José Ricardo Junqueira do Val: Chefe da Equipe de Orçamento e Planejamento

Roberto Lira de Paula – Engenheiro Civil

Ricardo Carone: Chefe da Equipe de Engenharia Mecânica

Sidnei Collange: Chefe da Equipe de Engenharia Elétrica

Sandra Schaaf Benfica: Chefe da Equipe de Produção

Aleksander Szulc – Projetista

Antonio Muniz Neto – Projetista

Carla Costa R. Pizzo Atvars – Projetista

Florencio Ortiz Martinez – Projetista

João Luiz Bosso – Projetista

Leandro Eboli – Projetista

Rubens Crepaldi – Projetista

Ricardo Sanches - Desenhista

Mônica de Lourdes Sampaio – Auxiliar Técnica

Infra Estrutura e Apoio

Ana Julia Cristofani Belli – Secretária

Maria Luiza Chiarello Miragaia – Secretária

Célia Regina Pandolphi Pereira – Assistente Adm. Especializada

Carlos Roberto Leite Marques – Assistente Administrativo

Juliana Cristina Ribeiro da Silva – Técnica de Informática

Jacqueline Oliveira de Souza – Auxiliar Administrativo

Marcelo Pereira Almeida – Auxiliar Administrativo

Priscila Pastore M. dos Santos – Auxiliar Administrativo

Juliano Augusto do Rosário – Mensageiro

Maria Aparecida de Souza – Servente

Consultores

Francisco Gladston Holanda

Luiz Antonio Villaça de Garcia

Luiz Ferreira Vaz

Nick Barton



Transposição de Águas do Rio São Francisco - Projeto Básico

APRESENTAÇÃO

O presente documento se constitui no Relatório R8 – GEOLOGIA E GEOTECNIA, parte integrante do **Projeto Básico do Trecho II – Eixo Norte**, referente ao PROJETO DE TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O NORDESTE SETENTRIONAL, elaborado pela FUNCATE através do contrato INPE/FUNCATE nº 01.06.094.0/99.

O Projeto de Transposição está sendo desenvolvido com base no Convênio nº 06/97-MPO/SEPPE – celebrado entre o MINISTÉRIO DE INTEGRAÇÃO NACIONAL-MI e o MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-MCT e seu INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE.

O **Projeto Básico do Trecho II – Eixo Norte** compõe-se dos seguintes relatórios:

- R1 Descrição do Projeto
- R2 Critérios de Projeto
- R3 Sistemas de Adução e Geração nos Reservatórios Jati e Atalho
- R4 Sistema Adutor – Canais, Aquedutos, Tomadas de Usos Difusos, Túneis e Estruturas de Controle
- R5 Barragens e Vertedouros
- R6 Bases Cartográficas
- R7 Sistema de Drenagem
- R8 Geologia e Geotecnia
- R9 Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos
- R10 Sistemas de Supervisão, Controle e Telecomunicações
- R11 Modelo Hidrodinâmico e Esquema Operacional
- R12 Sistema Elétrico
- R13 Canteiros e Sistema Viário
- R14 Cronograma e Orçamentos
- R15 Dossiê de Licitação
- R16 Memoriais de Cálculo
- R17 Caderno de Desenhos



ÍNDICE	PG
1 . OBJETO E OBJETIVO	1
2 . ESTUDOS ANTERIORES	1
3 . SERVIÇOS REALIZADOS	1
3.1 Generalidades	1
3.2 Coleta e Análise de Dados Existentes	1
3.3 Interpretação de Imagens de Satélite e Radar e de Fotografias Aéreas	1
3.4 Mapeamento Geológico	2
3.5 Investigações de Subsuperfície	2
3.6 Ensaio de Laboratório	3
4 . INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS	4
4.1 Classificação Geral dos Solos e Rochas	4
4.2 Classificação dos Solos	4
4.3 Classificação das Rochas	5
4.4 Classificação dos Maciços Rochosos	5
5 . ASPECTOS GEOLÓGICOS	7
5.1 Características Regionais	7
5.2 Geologia Local	8
5.2.1 Embasamento	8
5.2.2 Bacia do Araripe	16
5.2.3 Depósitos Aluvionares	19
5.3 Aspectos Estruturais	20
6 . CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DAS OBRAS	27
6.1 Generalidades	27
6.2 Canais	27
6.2.1 EST. 0+000 (Reservatório Jati) ao Reservatório dos Porcos	27
6.2.2 Reservatório dos Porcos a Barragem do Boi II	27
6.2.3 Barragem do Boi II ao Túnel Cuncas (emboque)	27
6.2.4 Túnel Cuncas (desemboque) ao Reservatório Cuncas	29
6.2.5 Resumo das Espessuras de Escavação	30
6.3 Barragens	30
6.3.1 Barragem dos Porcos	30
6.3.2 Barragem Cana Brava	32
6.3.3 Barragem do Cipó	33
6.3.4 Barragem do Boi - I	34
6.3.5 Barragem do Boi - II	34
6.3.6 Barragem de Morros	35
6.3.7 Barragem Cuncas	35
6.3.8 Dique dos Pereiros	36
6.4 Aquedutos	36
6.4.1 Aqueduto do Boi	36
6.4.2 Aqueduto Pinga	37
6.4.3 Aqueduto Catingueira	37
6.4.4 Galeria Sobradinho	38



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

6.5 Túneis	38
6.5.1 Túnel Cuncas.....	38
6.5.2 Túnel Jati	39
6.5.3 Túnel Atalho	40
7 . MATERIAIS NATURAIS DE CONSTRUÇÃO.....	41
7.1 Generalidades	41
7.2 Áreas de Empréstimo	41
7.3 Depósitos de Areia e Cascalho	42
7.4 Materiais Pétreos	42
8 . CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	43



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

APÊNDICE - RELATÓRIO DO CONSULTOR NICK BARTON "SUGESTÕES PARA A INVESTIGAÇÃO DE CAMPO, PROJETO E ESPECIFICAÇÕES CONSTRUTIVAS DE TÚNEL

ANEXO I - PERFIS E FOTOS DAS SONDAgens ROTATIVAS

ANEXO II - PERFIS DAS SONDAgens À PERCUSSÃO

ANEXO III - INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

ANEXO IV - ENSAIOS DE LABORATÓRIO

ANEXO V - DESCRIÇÃO DOS PONTOS VISITADOS



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

1 . OBJETO E OBJETIVO

Este relatório tem por objeto o Projeto Básico do Trecho II - Eixo Norte do Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco.

Seu objetivo é o de apresentar os resultados dos estudos geológicos e geotécnicos obtidos nas investigações geológico-geotécnicas realizadas ao longo das obras previstas para o Trecho II - Eixo Norte.

2 . ESTUDOS ANTERIORES

Os estudos geológico-geotécnicos para a elaboração do Projeto Básico do Eixo Norte basearam-se no Estudo de Viabilidade, quando foram definidos os aspectos gerais da geologia e geotecnia, sejam em termos regionais ou dirigidos aos estudos das alternativas de traçado.

As informações do Estudo de Viabilidade encontram-se consubstanciadas nos seguintes relatórios:

- R5 Mapeamento Geológico Regional
- R6 Programação Geral dos Trabalhos de Campo
- R7 Mapeamento Geológico-Geotécnico das Faixas de Obras
- R13 Pré- Dimensionamento Geotécnico das Obras
- R20 Investigações Geológico-Geotécnicas Complementares
- R21 Estudos de Túneis

3 . SERVIÇOS REALIZADOS

3.1 Generalidades

Os estudos geológicos e geotécnicos do Projeto Básico foram desenvolvidos segundo metodologias básicas que incluíram a coleta e análise dos dados existentes, a interpretação geológica de imagens de radar, de satélite e de fotografias aéreas, trabalhos de mapeamento de campo e a execução de investigações geológico-geotécnicas, a saber:

3.2 Coleta e Análise de Dados Existentes

A elaboração dos estudos geológicos e geotécnicos teve por base os dados apresentados nos relatórios do Estudo de Viabilidade, listados no item 2 – Estudos Anteriores e nos Desenhos de Projeto apresentados no Caderno de Desenhos – Eixo Norte – Tomo 1.

Os dados apresentados no Estudo de Viabilidade foram devidamente analisados e serviram para orientar a programação e execução dos trabalhos desenvolvidos no Projeto Básico.

A base cartográfica foi obtida das cartas topográficas do IBGE, escala 1:100.000, folhas Jardim, São José do Belmonte e Milagres, e nas cartas topográficas do DNOCS, escala 1:25.000, folhas SB-24-Z-C-IV-1-NO, SC-24-Z-C-IV-1-SO, SC 24-Z-C-IV-1-NE, SC-24-Z-C-IV-1-SO, SC 24-Z-C-I-3-SE, SC-24-Z-C-I-4-NO, SC-24-Z-C-I-4-SO E SC-24-Z-C-I-3-NE, do levantamento radarmétrico, escalas 1:5.000 e 1:25.000, elaborado especificamente para o Projeto de Transposição de Águas do Rio São Francisco, outubro de 1.998 e da restituição aerofotogramétrica da faixa da obra em escala 1:10.000.

3.3 Interpretação de Imagens de Satélite e Radar e de Fotografias Aéreas

A disponibilidade, na FUNCATE, de imagens de radar, nas escalas 1: 25.000 e 1:5.000, bem como de imagens do satélite LANDSAT T-5, escala 1:100.000, permitiu a interpretação



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

desses produtos para subsidiar a elaboração dos mapas geológicos preliminares, na escala 1:25.000 para a faixa do traçado do canal e na escala 1:5.000 para as obras especiais (barragens, aquedutos e túneis). As imagens de satélite foram obtidas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM), utilizando-se na interpretação composições com as bandas 3-4-5 e 4-5-7. Foram utilizadas ainda, no detalhamento dos locais das obras especiais, fotografias aéreas na escala 1:8.000.

3.4 Mapeamento Geológico

Os trabalhos de campo, relativos ao mapeamento geológico, foram desenvolvidos em duas etapas, sendo a primeira de caráter regional, com a descrição de pontos ao longo de todo o traçado e a segunda voltada aos locais das obras especiais.

Os pontos descritos são representados nos mapas em escala de 1:25.000 (desenhos de nºs EN.B/II.DS.GL.0032 a EN.B/II.DS.GL.0035) e apresentados no relatório do Anexo V – Descrição dos Pontos Visitados, onde estão indicados dados referentes à localização, litologia, feições estruturais e aos aspectos geotécnicos.

O mapeamento teve também uma abordagem geotécnica, enfatizando a identificação dos tipos de solo, dos tipos litológicos e dos elementos estruturais. Foram levantadas medidas das atitudes dos elementos estruturais (foliação e fraturas) que foram utilizados no projeto dos taludes rochosos. Esses mapeamentos foram complementados pelas informações obtidas nas investigações de subsuperfície através das sondagens mecânicas, poços e trados.

3.5 Investigações de Subsuperfície

As investigações de subsuperfície foram programadas com base no traçado do Estudo de Viabilidade e na otimização do traçado feito no decorrer do Projeto Básico, obedecendo-se os seguintes critérios básicos:

- Execução de um mínimo de 3 (três) sondagens rotativas em cada obra especial.
- Investigação nos emboques de túneis.
- Investigação dos cortes com mais de 10 m de altura.
- Utilização de sondagens a percussão no estudo de fundação dos aterros.
- Levantamento sísmico ao longo dos túneis e em cortes representativos.
- Levantamento sísmico ao longo de fundações em aluvião espesso.
- Utilização do GPR e sondagem sísmica nos cortes menores que 10 m.
- Utilização de poços e trados nos estudos de áreas de empréstimo.

As investigações de subsuperfície foram executadas segundo especificações da ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente, sendo as sondagens rotativas executadas nos diâmetros HX, NX e BX e as sondagens à percussão com amostrador SPT padrão. A passagem de percussão para rotativa foi especificada para o impenetrável ao amostrador SPT, no caso de rochas sedimentares, e impenetrável à lavagem no caso de rochas cristalinas. Os ensaios de perda d'água ficaram restritos às sondagens realizadas para o estudo das barragens e dos túneis.

No levantamento sísmico foi especificado o uso de marreta em placa de aço como fonte de onda, exceto no espesso aluvião observado na fundação da Barragem dos Porcos, quando foi necessário utilizar explosivo. No levantamento pelo método GPR – *Ground Penetrating*



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Radar foram utilizadas antenas de 100 e 200 Mhz. Os resultados destas investigações são apresentados no Anexo III – Investigações Geofísicas.

As investigações realizadas e suas quantidades são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Resumo das Investigações Realizadas.

Tipo de Investigação	Quantidade	Total (m)
Sondagem Rotativa	94	1.403,10
Sondagem a Percussão	52	239,85
Sondagem a Trado	208	545,58
Poços de Inspeção	6	7,70
Sondagem Sísmica	-	15.150
GPR	-	11.050

Os resultados destas investigações estão apresentados nos desenhos de geologia sob a forma de seções geológico-geotécnicas, sendo os perfis individuais de sondagem apresentados no Anexo I – Perfis e Fotos das Sondagens Rotativas e no Anexo II – Perfis das Sondagens a Percussão e Descrição de Trados e Poços.

Os materiais obtidos nas sondagens foram descritos dentro dos padrões usuais, obtendo-se para as rochas, o grau de alteração, de fraturamento, de coerência e de permeabilidade e para os solos, a granulometria, compacidade, consistência e origem geológica.

3.6 Ensaios de Laboratório

Por fim, foram realizados ensaios de laboratório sobre materiais naturais de construção e de fundação para a caracterização geológica da rocha e geotécnica dos solos e dos materiais granulares. Os ensaios realizados e suas quantidades são apresentados no Quadro 3.2, sendo os resultados apresentados no Anexo IV – Ensaios de Laboratório e os seus comentários desenvolvidos no Item 9 – Análise dos Ensaios Geotécnicos de Laboratório.

Quadro 3.2 – Resumo dos Ensaios Laboratoriais Realizados.

ENSAIO	Quantidade
Limites de Atterberg (LL+LP)	39
Granulometria por Peneiramento	18
Granulometria por Peneiramento+Sedimentação	42
Umidade Natural	84
Densidade Max. E Min. - Areias	18
Compactação – Proctor Normal	36
Permeabilidade com Carga Constante	18
Permeabilidade com Carga Variável-Amostra talhada	11
Permeabilidade com Carga Variável-Amostra moldada	2
Triaxial CU Saturado	14
Triaxial CU Saturado – Amostrada moldada	6
Adensamento – Amostra talhada	14
Pressão de Expansão – Amostra moldada (3 cp)	3
Massa Específica dos Grãos	33



4 . INTERPRETAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

Os dados obtidos nas investigações foram interpretados segundo critérios utilizados em projetos similares, adotando-se parâmetros de rocha e solo já consagrados na Engenharia Nacional, que serviram para a classificação dos maciços rochosos. No desenho EN.B/G.DS.GL.0001 estão apresentadas as legendas e convenções geológicas e geotécnicas adotadas no projeto.

4.1 Classificação Geral dos Solos e Rochas

Os solos e as rochas foram classificados com base nos critérios de Vaz, L.F., publicados no artigo “Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração” na Revista Solos e Rochas de agosto de 1996. Uma representação esquemática dessa classificação pode ser observada na Figura 4.1, extraída do próprio artigo.

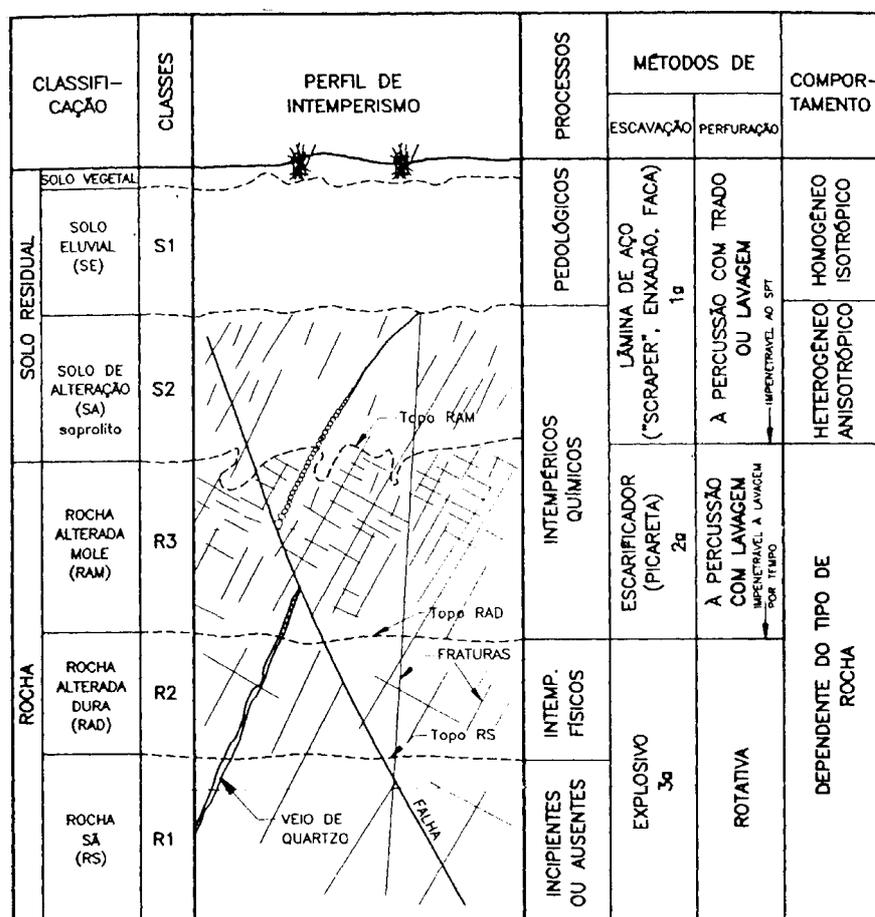


Figura 4.1 – Classificação de Solo e Rocha, segundo Vaz, 1996.

Esta classificação aplica-se perfeitamente à geologia e às obras do Eixo Norte, principalmente na definição da categoria dos materiais de escavação, com ressalvas para as rochas sedimentares.

4.2 Classificação dos Solos

Os solos foram classificados, inicialmente, quanto à origem geológica, se solos residuais ou transportados, estes incluindo os solos de origem aluvionar e de origem coluvionar. Os solos



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

residuais foram distinguidos em dois grupos, um relativo aos solos homogêneos e mais superficiais, denominados de solos eluviais e, outro, envolvendo os solos heterogêneos com cores variegadas e estruturas reliquias, denominado de solo de alteração. A descrição tátil-visual dos solos nos perfis de sondagem incluiu a granulometria, definindo a natureza arenosa, argilosa e/ou siltosa das amostras obtidas, cor, compactidade e/ou consistência, esta com base nos ensaios de penetração. As denominações e representações utilizadas para os solos estão indicadas no desenho EN.B/G.DS.GL.0001 acima referido.

A caracterização geotécnica dos solos foi realizada com base nos ensaios de laboratório que incluíram a determinação da granulometria, dos limites de plasticidade e das características de compactação. Para a determinação das características de resistência foram realizados ensaios triaxiais sob diferentes condições de sollicitação.

4.3 Classificação das Rochas

Inicialmente, as rochas foram classificadas quanto ao tipo litológico e enquadradas no perfil de intemperismo adotado, indicando tratar-se de rocha alterada mole ou dura e rocha sã. A classificação litológica foi detalhada na análise petrográfica. As descrições dos testemunhos de rocha das sondagens rotativas incluíram, além das características litológicas, as feições geológicas e os graus de alteração e de fraturamento, cujas denominações e representações estão indicadas no desenho EN.B/G.DS.GL.0001.

A caracterização geomecânica das rochas foi tátil-visual, sendo utilizados os recursos de ensaios de laboratório apenas no caso de determinação da resistência à compressão do arenito Mauriti.

4.4 Classificação dos Maciços Rochosos

Os maciços rochosos foram classificados segundo Bieniawsky, no caso de tratamentos de taludes e segundo Barton, no caso de definição das classes de suporte dos túneis. Essas classificações são apresentadas no Quadro 4.1 e na Figura 4.2.

Quadro 4.1 – Classificação de Maciços Rochosos, segundo Bieniawsky, 1989.

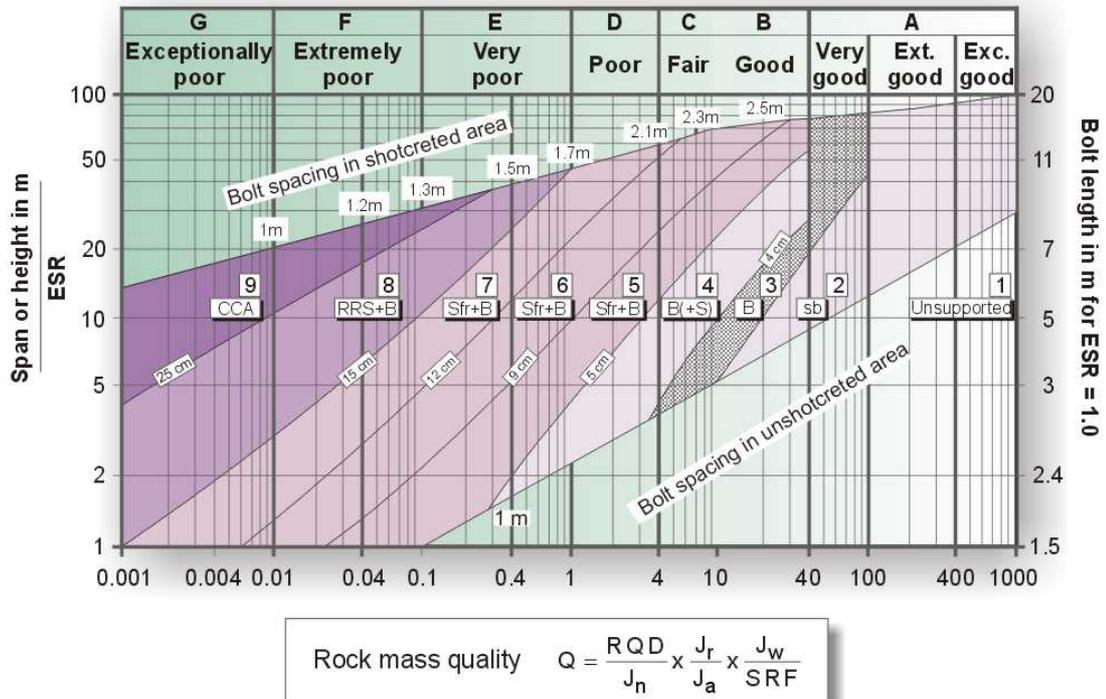
CLASSE	GRAU DE FRATURAMENTO (fraturas/m)		GRAU DE ALTERAÇÃO
I	F1	<1	Rocha Sã (A1)
II	F2	1 a 5	Rocha Sã (A1) e Rocha Medianamente Alterada (A2)
	F3	6 a 10	
III	F4	11 a 20	Rocha Muito Alterada (A3)
IV	F5	>20	
V	Fraturamento Obliterado		Rocha Extremamente Alterada (A4)



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

$$\text{RMR} \approx 9 \ln Q + 44 \text{ (Bieniawski, 1989)} \quad Q \approx e^{\frac{(\text{RMR}-44)}{9}} \quad [1]$$

$$\text{RMR} \approx 15 \log Q + 50 \text{ (Barton, 1995)} \quad Q \approx 10^{\frac{(\text{RMR}-50)}{15}} \quad [2]$$



REINFORCEMENT CATEGORIES

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting, sb 3) Systematic bolting, B 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10cm), B(+S) | <ul style="list-style-type: none"> 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9cm, SFr + B 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12cm, SFr + B 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15cm, SFr + B 8) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 15-20cm, SFr + B 9) Cast concrete lining, CCA |
|---|---|

Figura 4.2 – Classificação de Maciços e Classes de Suporte de Túneis, segundo Barton, 1995.

Ainda para o dimensionamento da drenagem interna dos maciços rochosos nas regiões de corte foi estabelecida uma classificação do maciço rochoso quanto à permeabilidade, apresentada no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Equivalência de Permeabilidade

MACIÇO ROCHOSO	Rocha	Rocha	Rocha	Rocha
	A1/A2-F1	A1/A2-F2/F3	A1/A2-F4/F5	A3/A4-F4/F5
Granitos, migmatitos	1×10^{-5} cm/s	1×10^{-4} cm/s	1×10^{-3} cm/s	1×10^{-5} cm/s
Biotita gnaisses	1×10^{-6} cm/s	1×10^{-4} cm/s	1×10^{-3} cm/s	1×10^{-6} cm/s
Xistos, filitos	1×10^{-7} cm/s	1×10^{-5} cm/s	1×10^{-4} cm/s	1×10^{-6} cm/s
Arenitos	1×10^{-5} cm/s	1×10^{-4} cm/s	1×10^{-3} cm/s	1×10^{-5} cm/s
Siltitos	1×10^{-6} cm/s	1×10^{-4} cm/s	1×10^{-3} cm/s	1×10^{-6} cm/s
Argilitos, folhelhos	1×10^{-7} cm/s	1×10^{-5} cm/s	1×10^{-5} cm/s	1×10^{-6} cm/s

5 . ASPECTOS GEOLÓGICOS

5.1 Características Regionais

O Trecho II encontra-se inserido na *Província Borborema* na denominada *Região de Dobramentos do Nordeste*, entidade tectônica na qual dominam terrenos pré-cambrianos, constituídos por rochas metamórficas de baixo e alto grau e rochas ígneas, ocorrendo também coberturas sedimentares fanerozóicas.

A configuração geológica desta província é o resultado de eventos tectono-magmáticos ocorridos durante o ciclo Brasileiro, de idade Proterozóica, bem como do tectonismo ocorrido no paleozóico e no mesozóico, que geraram um arcabouço estrutural caracterizado por extensos falhamentos com orientação E-W e NE-SW, delimitando um mosaico de terrenos com características geológicas distintas, conforme apresentado na Figura 5.1.

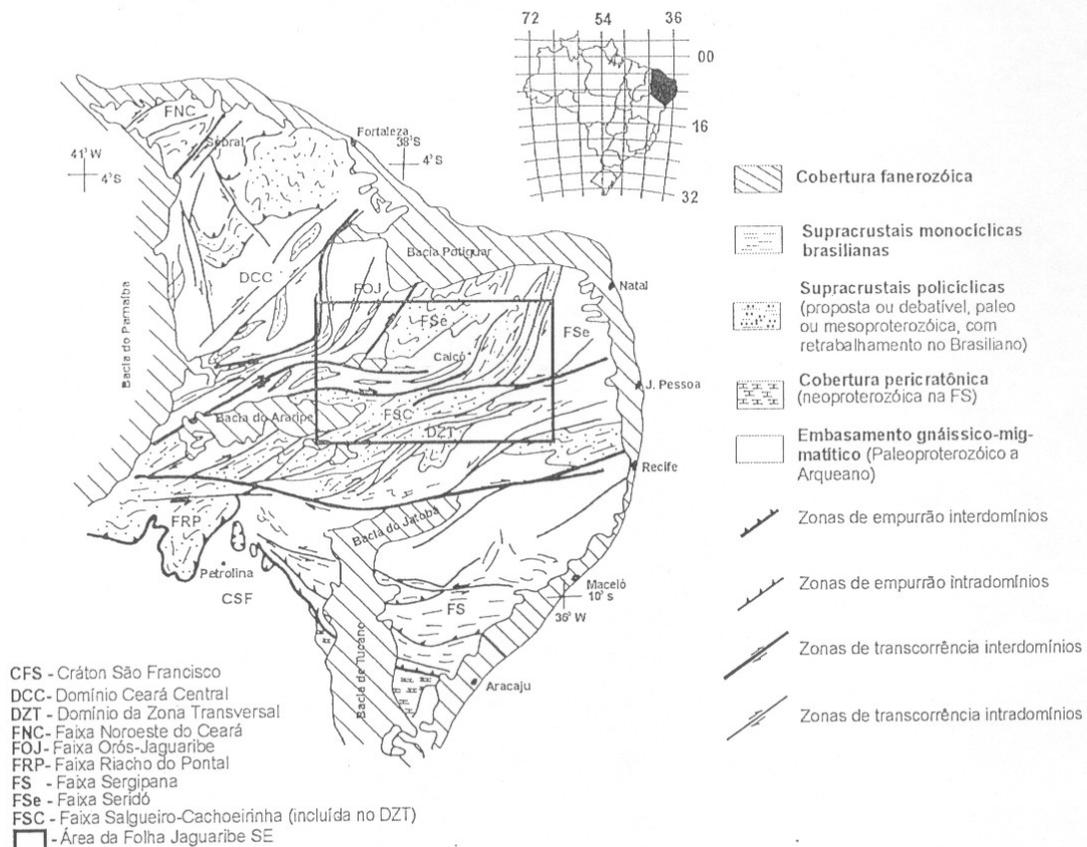


Figura 5.1 – Divisão tectônica da Província Borborema em domínios estruturais e faixas supracrustais, com localização da Folha Jaguaribe.

Os esforços tectônicos a que foi submetida a região atravessada pelo Trecho II, imprimiram às rochas deformações dúcteis e rúpteis, caracterizadas por falhamentos normais e de rejeito direcionais, dobramentos, foliações miloníticas e fraturamentos de origem extensional e de cisalhamento. Essas deformações foram mais intensas no âmbito do embasamento, onde se mostram mais evidentes.

Geograficamente, o traçado do Trecho II atravessa a região sudeste do estado do Ceará e parte do extremo sudoeste do estado da Paraíba.



5.2 Geologia Local

O contexto geológico da região atravessada pelo Trecho II está bem definido na Folha Jaguaribe (CPRM, 2000) e compreende um embasamento cristalino, de idade proterozóica, correspondente à Faixa Piancó-Alto Brígida e uma cobertura sedimentar fanerozóica pertencente à Bacia do Araripe. O embasamento é constituído por rochas metamórficas representadas por gnaisses, xistos/filitos, rochas metassedimentares, metavulcânicas e rochas ígneas graníticas, as quais tem suas áreas de ocorrência no segmento inicial do traçado e na sua porção extrema norte. A seqüência de rochas sedimentares está representada por arenitos, siltitos e folhelhos, que formam a maior parte do substrato rochoso ao longo do traçado, conforme pode ser observado no desenho de nº EN.B/II.DS.GL.0001.

5.2.1 Embasamento

Para efeitos de caracterização geológica, o embasamento foi dividido em quatro unidades litoestratigráficas, definidas no âmbito da Folha Jaguaribe pelo Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB (CPRM, 2000).

5.2.1.1 Unidade 1 – p E₁

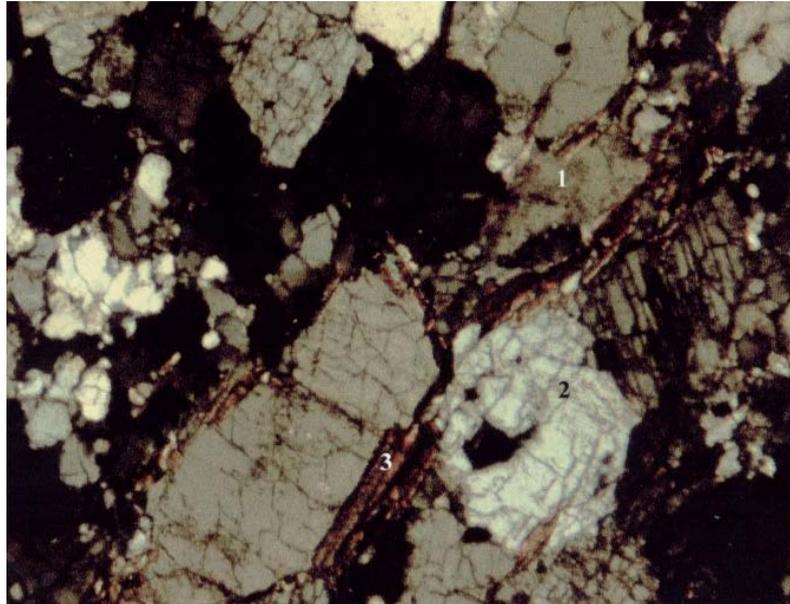
Esta unidade é constituída por biotita gnaisse, cinza claro, de granulação fina a média, com composição granodiorítica-granítica (feldspato 70-75%, quartzo 20-25%, biotita 5%, acessórios < 5%), bem orientado, bandado, localmente exibindo foliação milonítica. As fraturas encontram-se freqüentemente seladas, com contato rocha x rocha ou preenchidas por material quartzo-feldspático. Sua área de afloramento está restrita a área da Barragem Cuncas, cujo eixo estará fundado nesta litologia. Na Foto 5.1, é apresentado aspecto do biotita gnaisse, cuja composição mineralógica é detalhada na Microfoto 5.2.



Foto 5.1 – Afloramento de biotita gnaisse bandado no eixo da Barragem Cuncas.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico



Microfoto 5.2 – Microfoto do biotita gnaisse no microscópio com luz polarizada.

5.2.1.2 Unidade 2 - p E₂

Corresponde ao Complexo Piancó, estando representado na área por biotita-hornblenda gnaisse, de coloração cinza claro a médio, granulação fina a média, por vezes migmatizados, com estrutura dobrada, localmente com intercalações anfíbolíticas, pouco a medianamente fraturados. As fraturas encontram-se freqüentemente seladas, com contato rocha x rocha ou preenchidas por material quartzo-feldspático. Esta litologia tem pouca expressão ao longo do traçado, estando presente somente na área do emboque sul do Túnel Cuncas, onde se apresenta intensamente fraturada e a leste da porção central do seu eixo, onde são observadas as melhores exposições dessa rocha. Na Foto 5.3 é apresentado um afloramento do biotita-hornblenda gnaisse na região do emboque sul do túnel Cuncas.



Foto 5.3 – Biotita-hornblenda gnaisse presente na área de emboque do túnel Cuncas.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

5.2.1.3 Unidade 3 - $p \in_3$

Corresponde ao Grupo Cachoeirinha que é constituído por uma associação de rochas metassedimentares e metavulcânicas, representada por quartzo-muscovita xistos/filitos, metassiltitos, metaritimitos, metagrauvacas e/ou metarenitos líticos e rochas metavulcânicas piroclásticas. Esta unidade aflora no início do trecho, na região entre os açudes Atalho e Quixabinha e a jusante do desemboque do túnel Cuncas, na região do reservatório homônimo.

No trecho inicial predominam os xistos/filitos, com rochas metassedimentares e metavulcânicas subordinadas sendo marcante a presença de diques graníticos relacionados a corpos intrusivos. Esses diques, com espessuras decimétricas a métricas, cortam os xistos e metassedimentos e tem presença marcante nas áreas do eixo do Açude Atalho e no seu vertedouro, conforme pode ser observado nas Fotos 5.4 e 5.5, respectivamente.

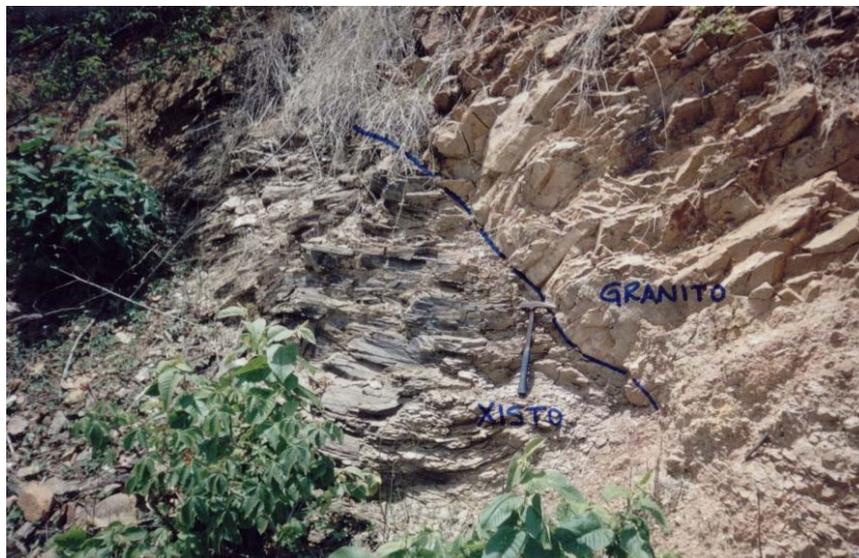


Foto 5.4 – Dique de rocha granítica no quartzo-muscovita xisto, nas proximidades da barragem Atalho.

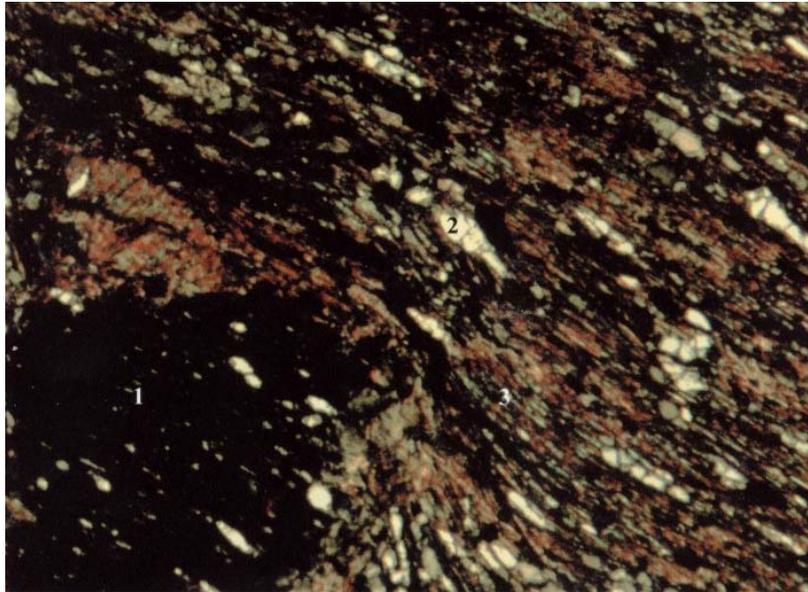


Foto 5.5 – Vista da ombreira direita do vertedouro da barragem Atalho mostrando o intenso fraturamento e com alguns corpos graníticos associados.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

A análise petrográfica, ilustrada na Microfoto 5.6, de uma amostra de quartzo-mica xisto/filito, revelou uma rocha constituída por muscovita+biotita (55%), quartzo (30%) e granada + apatita + opacos (5-10%), a qual foi classificada como um filonito, resultante da intensa deformação (cisalhamento) de rochas de natureza pelítico-argilosa.



Microfoto 5.6 – Microfoto do quartzo-mica xisto no microscópio com luz polarizada

Na área da barragem Jati, foi identificada a presença de subgrauvaca. Trata-se de uma rocha com aspecto quartzítico, de granulação fina, dura, levemente orientada, constituída por quartzo (65-70%), clorita/sericita (20-25%), biotita (<5%) e titanita + carbonato + turmalina + opacos (<5%), conforme ilustrado na Microfoto 5.7. Nas proximidades do vertedouro estão suas melhores exposições, onde se encontra uma pedreira desativada desta rocha.



Microfoto 5.7 – Microfoto da subgrauvaca no microscópio com luz polarizada



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

As rochas neste segmento apresentam-se bastante deformadas, exibindo um intenso fraturamento. Localmente tem-se a presença de dobras apertadas a abertas (Fotos 5.8 e 5.9). O solo em geral é pouco espesso, variando de 1 a 2 m, às vezes constituídos por delgados depósitos de tálus, em decorrência do relevo mais acidentado.



Foto 5.8 – Quartzo-muscovita xisto dobrado na área do vertedouro da barragem Atalho.



Foto 5.9 – Idem a foto anterior mostrando dobras ao longo dos planos de xistosidade.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Na região a jusante do túnel Cuncas, predomina metavulcânicas e metassiltitos, localmente com intercalações de xistos. A análise petrográfica revelou a presença de rocha metavulcânica piroclástica constituída basicamente por uma massa de granulação muito fina formada por quartzo + feldspato + mica, cujas características indicam tratar-se de um metatufo de cristal. Na Foto 5.10 é apresentado o aspecto de afloramento dessa rocha, sendo sua composição mineralógica detalhada na Microfoto 5.11.



Foto 5.10 – Exposição de rocha metavulcânica piroclástica (meta-tufo de cristal), nas proximidades da área prevista para o dique dos Pereiros.

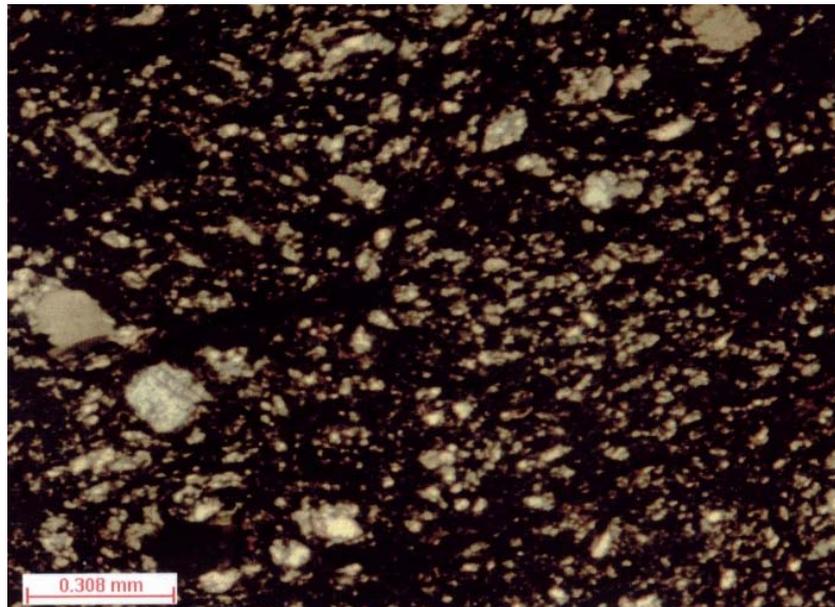


Foto 5.11 – Microfoto do metatufo de cristal no microscópio com luz polarizada mostrando massa de granulação fina com micro-fenocristais de feldspato e quartzo, com raras turmalinas.

A foliação regional nesta área mostra-se orientada predominantemente na direção E-W, exibindo um intenso fraturamento. As fraturas são seladas, com contato rocha x rocha. O solo de alteração é pouco espesso, da ordem de 2 m.

5.2.1.4 Unidade 4 - $p \in_4$

As rochas graníticas têm sua principal área de ocorrência na área denominada serra do Braga, na porção norte do traçado, a qual será atravessada pelo túnel Cuncas no seu segmento extremo norte. O tipo litológico que constitui a serra é um biotita granito, cinza claro a médio, de granulação média a grosseira, apresentando-se localmente orientado e milonitizado nas zonas de falha que o corta, conforme pode ser observado nas Fotos 5.12 e 5.13.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

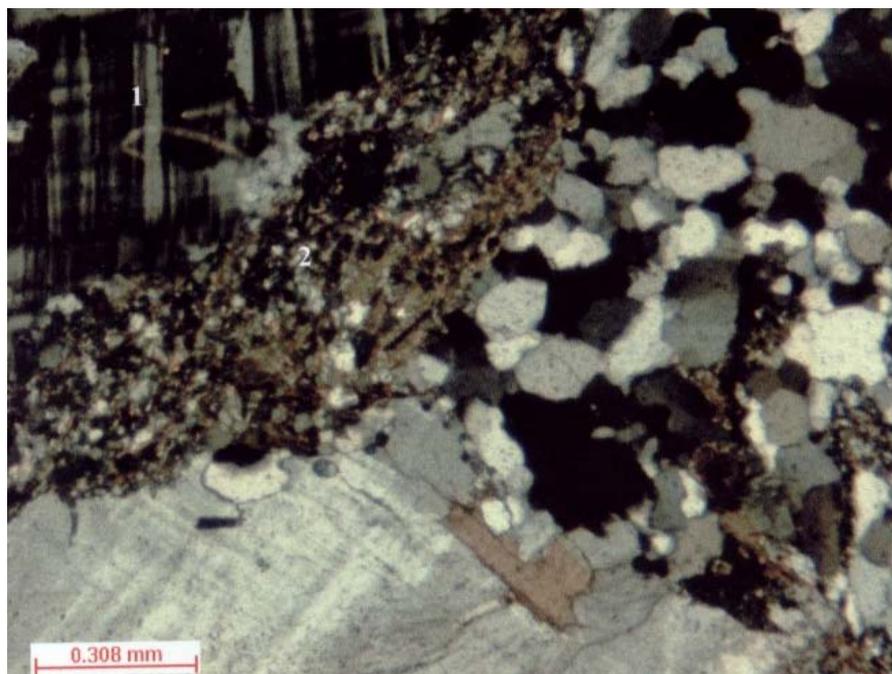


Foto 5.12 – Biotita granito aflorante na porção central do traçado do túnel Cuncas, observar o aspecto isotrópico da rocha.



Foto 5.13 – Biotita granito já com alguma milonitização. Topo da serra do Braga, ao sul do desemboque do túnel Cuncas.

A análise petrográfica, ilustrada na Microfoto 5.14, revelou uma rocha constituída por feldspato (65-70%), quartzo (20-25%), biotita/clorita (<5%) e epidoto + zircão + titanita + muscovita + opacos (<5%). Em termos gerais, essa rocha mostra-se pouco fraturada.



Microfoto 5.14 – Granito cataclástico. Grandes cristais de K-feldspato (superior esquerdo) com porção intersticial de granulação fina resultante de fragmentação.

5.2.2 Bacia do Araripe

O traçado do Trecho II atravessa a porção extremo leste da Bacia do Araripe, onde afloram seqüências de rochas sedimentares de idade siluro-devoniana e jurássica, representadas pelas formações Mauriti, Brejo Santo e Missão Velha.

5.2.2.1 Formação Mauriti

Esta unidade, que tem sua área de ocorrência ao longo da borda da bacia, é constituída por arenitos de origem fluvial, com coloração amarelada a esbranquiçada, grosseiros a conglomeráticos, argilosos, feldspáticos, algo friáveis, exibindo estratificação cruzada e por vezes, com aspecto maciço, conforme pode ser observado nas Fotos 5.15 e 5.16, respectivamente.



Foto 5.15 – Arenito conglomerático da formação Mauriti na área da barragem dos Porcos.



Foto 5.16 – Arenito da formação Mauriti com aspecto maciço.

Localmente tem-se a presença de intercalações decimétricas a métricas de siltitos e folhelhos. A análise petrográfica, ilustrada na Microfoto 5.17, revelou uma rocha constituída por quartzo (75-80%), feldspato (10-15%), argila (5-10%) e opacos (3-5%).

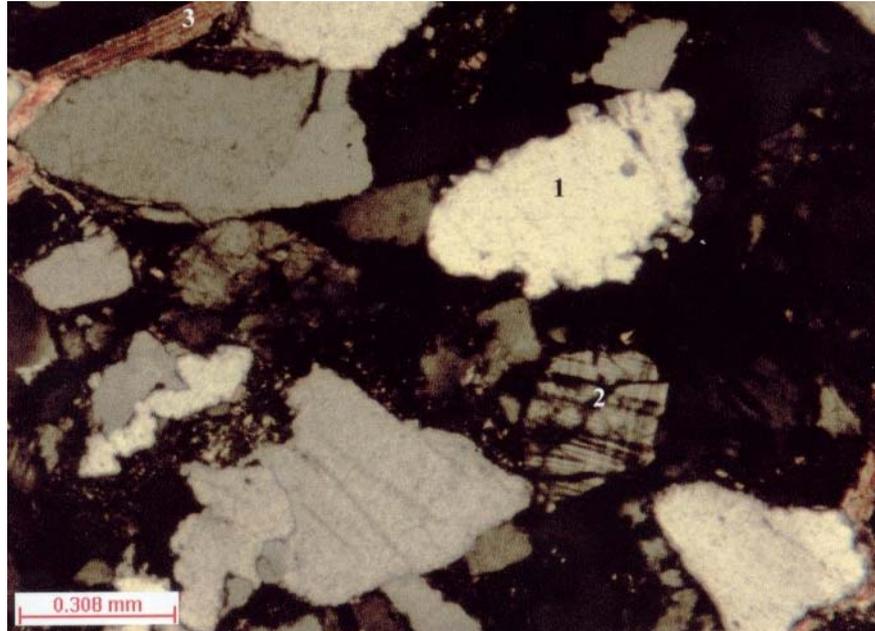


Foto 5.17 – Arenito feldspático mostrando grãos irregulares, angulosos a subarredondados de quartzo (1), K-feldspato (microclina) e muscovita.

Estes arenitos formam um pacote rochoso cujo mergulho é, no geral, de baixo ângulo (<20°) para noroeste. Em geral, apresentam-se pouco a medianamente fraturados. Esta unidade será interceptada no segmento compreendido entre o dique dos Porcos e o aqueduto Catingueira, ocorrendo também na porção sul do traçado do túnel Cuncas, recobrindo rochas graníticas.

5.2.2.2 Formação Brejo Santo

A formação Brejo Santo é constituída basicamente por siltitos de coloração avermelhada, com intercalações centimétricas a decimétricas de folhelho cinza esverdeado e vermelho e, localmente, de calcário, conforme ilustrado na Foto 5.18. Seus afloramentos são raros, recobertos por espessas coberturas de solo. O relevo na área de ocorrência desta unidade é plano, contrastando com o da formação Mauriti e do embasamento, mais acidentados.



Foto 5.18 – Exposição do siltito Brejo Santo à sudeste do emboque do Túnel Cuncas.

No âmbito desta unidade, tem-se a ocorrência de extensas planícies aluvionares que serão interceptadas pelo traçado do canal, notadamente nas áreas dos diques dos Porcos e Cana Brava e a montante do emboque sul do túnel Cuncas.

Ao longo do traçado poderão ser atravessadas pequenas áreas de afloramento da formação Missão Velha, que ocorre sobrejacente à formação Brejo Santo e que localmente não possuem representatividade na escala do mapeamento.

5.2.2.3 Formação Missão Velha

Esta unidade está representada por arenitos finos a médios, maciços e com estratificação plano-paralela e cruzada, apresentando-se localmente, grosseiros, conglomeráticos e com intercalações de siltitos e folhelhos. Os fácies grosseiros e conglomeráticos são iguais aos da formação Mauriti, tendo-se como característica distintiva a presença de troncos silicificados nos fácies conglomeráticos da formação Missão Velha. Os arenitos desta unidade apresentam-se pouco a medianamente fraturados.

5.2.3 Depósitos Aluvionares

Estes depósitos formam extensas planícies alongadas, tendo suas principais ocorrências nas áreas dos reservatórios dos Porcos e Cana Brava, chegando atingir uma largura de aproximadamente 4 km e a montante do emboque do túnel Cuncas onde apresenta uma



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

largura de 2 km. São depósitos inconsolidados, constituídos por sedimentos arenosos finos a grossos com pedregulhos, localmente com intercalações silto-argilosas, depositados por um sistema de rios anastomosados e meandantes. Apresentam espessuras maiores que 18m nas porções centrais e nível d'água raso.

5.3 Aspectos Estruturais

As feições estruturais mais características e marcantes, sob o ponto vista regional são as zonas lineares de mobilidade crustal, orientadas nas direções E-W e NE-SW, usualmente denominadas de lineamentos, resultantes do tectonismo correspondente ao Ciclo Brasileiro. Estas feições correspondem a extensas zonas de cisalhamento onde predominam falhas transcorrentes, conforme indicado na Figura 5.1.

Na região atravessada pelo Trecho II predominam falhas de gravidade no âmbito da Bacia do Araripe e falhas transcorrentes ou de rejeito direcional no domínio do embasamento, destacando-se o Lineamento de Patos, na área do reservatório Cuncas e a Zona de Cisalhamento de Boqueirão dos Coxos na área do reservatório da barragem Atalho.

No segmento inicial do traçado, xistos/filitos e metassedimentos, mostram-se intensamente deformadas, em decorrência da existência de uma zona de cisalhamento (Boqueirão dos Coxos) e pela presença de corpos graníticos intrusivos. Além de um intenso fraturamento (Foto 5.19), sem direção preferencial, destacando-se as orientações variando entre N10°-35°E e N50°-85°W com mergulhos sub-verticais e de alto ângulo (Figura 5.2). É freqüente a presença de dobras apertadas e abertas. Embora as atitudes de foliação variem bastante, pode-se notar uma tendência em N10°-30°E horizontais a, no máximo, 35° de mergulho para NW° (Figura 5.3)



Foto 5.19 – Intenso fraturamento apresentado no quartzo-muscovita xisto em contato com um dique granítico.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

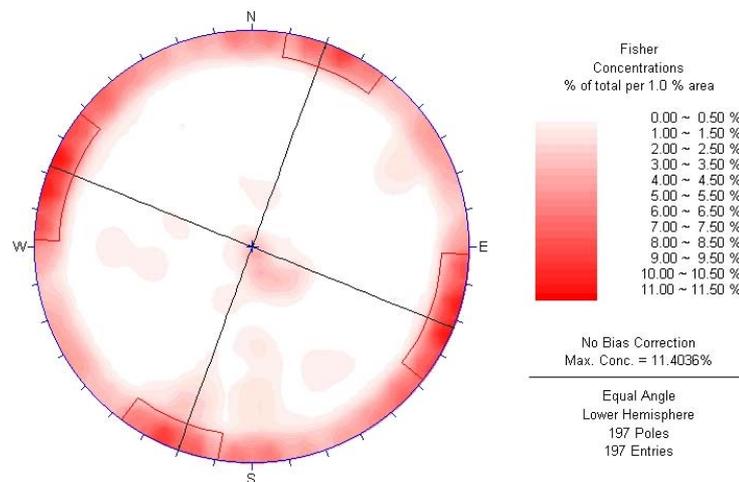


Figura 5.2 – Padrão de distribuição do fraturamento nos xistos da Unidade 3, com destaque às duas orientações mais freqüentes.

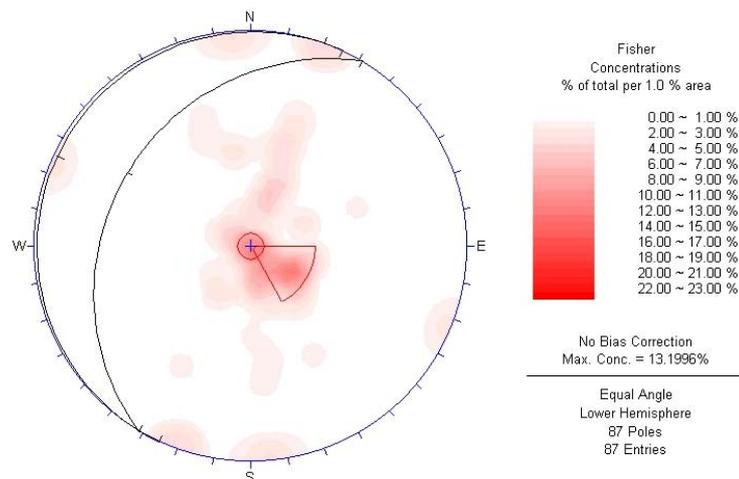


Figura 5.3 – Distribuição das foliações dos xistos da Unidade 3 mostrando uma maior concentração de mergulhos de baixo ângulo.

No âmbito da Bacia do Araripe a estruturação da seqüência sedimentar possui relação com as estruturas mais antigas do embasamento, as quais foram reativadas durante os eventos tectônicos, de caráter extensional, ocorridos no paleozóico e mesozóico. Os principais falhamentos encontram-se orientados na direção NE-SW, tais como aqueles da borda leste da bacia e outros interiores à mesma, a exemplo daqueles responsáveis pelos contatos entre as formações Mauriti (siluro-devoniano) e Brejo Santo (jurássico).

Os arenitos dessas formações apresentam-se pouco a medianamente fraturados. A formação Mauriti, apresenta fraturamento com distribuição bastante variada e preferencialmente verticalizado, com uma leve concentração entre N30°-60°E (Figura 5.4).



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

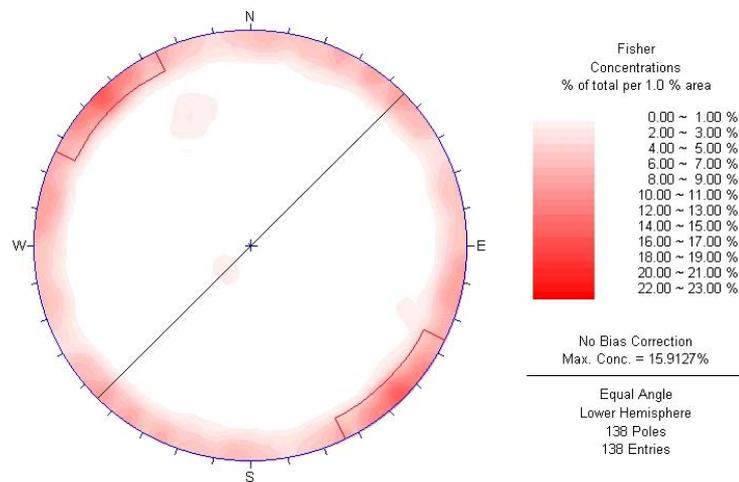


Figura 5.4 – Fraturamento dispersivo e verticalizado dos arenitos da formação Mauriti, com uma leve tendência entre N30° e 60°E.

Na formação Missão Velha, apesar da variação na orientação de fraturamento, pode-se observar uma concentração entre N50°-60°W (Figura 5.5).

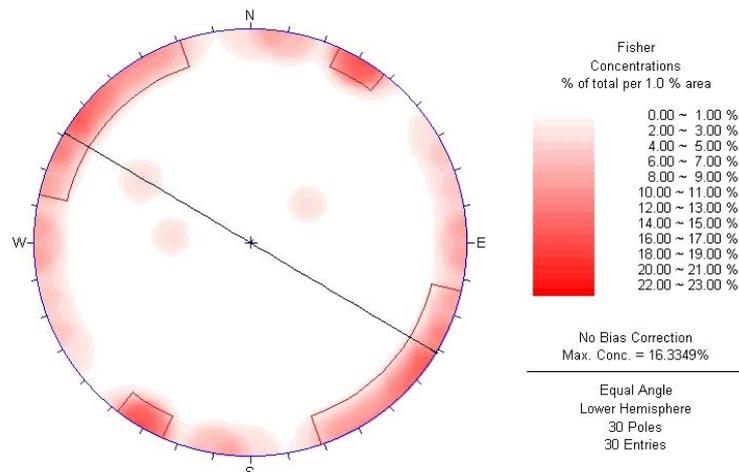


Figura 5.5 – Distribuição do fraturamento dos arenitos da formação Missão Velha.

Os aspectos estruturais da formação Brejo Santo não puderam ser apreciados tendo em vista a escassez de afloramentos.

Na área do emboque do túnel Cuncas, mais especificamente na zona de falha, as rochas gnáissicas apresentam um intenso fraturamento, conforme pode ser observado na Foto 5.3.

As rochas graníticas em geral mostram-se pouco fraturadas. Apenas localmente tem-se um grau de fraturamento mais intenso, relacionado à presença de falhamento, conforme observado ao longo do eixo do túnel Cuncas, na serra do Braga, onde a rocha também apresenta-se milonitizada. Quando fraturadas apresentam orientações bastante variadas, conforme ilustrado na Foto 5.20, havendo uma pequena concentração entre N40°-70°W.



Foto 5.20 – Fraturamento extensional do biotita granito na porção central do traçado do Túnel Cuncas

Na porção final do traçado, à jusante do desemboque do túnel Cuncas, as rochas mostraram-se deformadas em decorrência da zona de cisalhamento representada pelo Lineamento de Patos, que apresenta uma orientação regional aproximadamente E-W. Nesta área, as rochas metavulcânicas e metasedimentares apresentam-se preferencialmente orientadas perpendicularmente à orientação regional, refletindo os esforços a que foram submetidas, com predominância de mergulhos sub-verticais (Figura 5.6), subordinadamente, mergulhos pouco mais suaves.

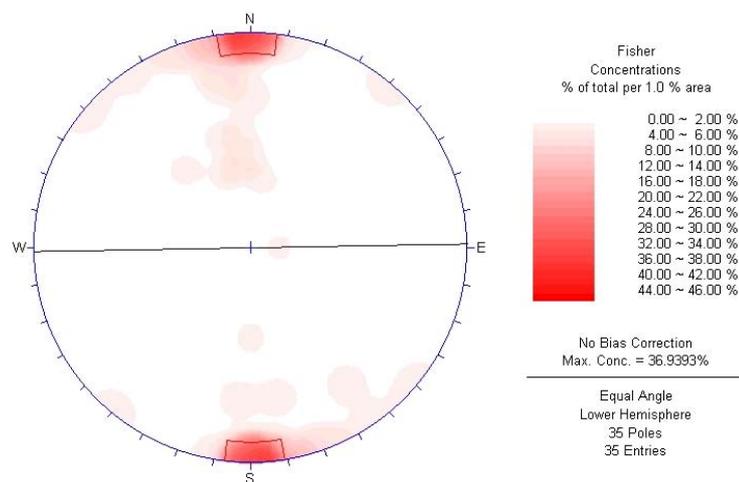


Figura 5.6 – Pouca dispersão nas direções/mergulho das foliações nos metassedimentos.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

O fraturamento é intenso variando entre N10°E e N30°W, mais concentrado em NS, predominando mergulhos sub-verticais, conforme pode ser observado na Foto 5.21 e na Figura 5.7.



Foto 5.21 – Fraturamento verticalizado nos metassedimentos a jusante do túnel Cuncas.

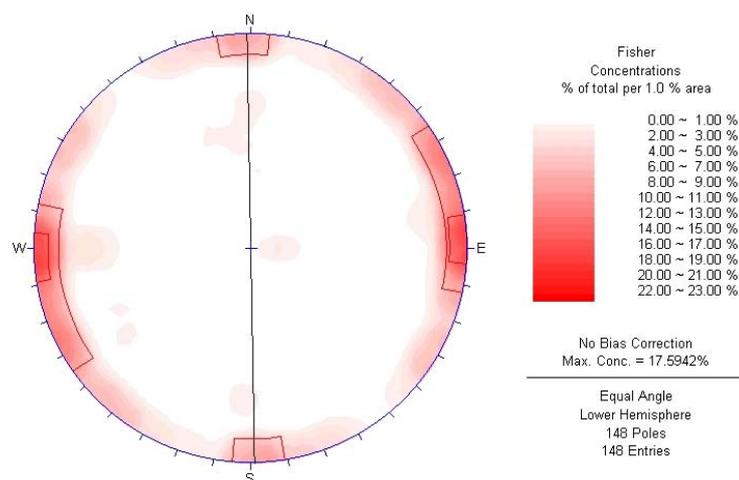


Figura 5.7 – Distribuição das foliações nos metassedimentos da porção norte do Trecho.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Os gnaisses, na área do reservatório Cuncas, apresentam atitude de foliação predominante EW/sub-vertical (Figura 5.8), localmente com aspecto milonítico característico, conforme ilustrado na Foto 5.22. O maciço rochoso apresenta-se pouco a medianamente fraturado, com grande diversidade de direções, com uma leve concentração variando de N-S a N20°W com mergulhos sub-verticais (Figura 5.9).



Foto 5.22 – Detalhe da foliação milonítica do biotita gnaisse na área do eixo da barragem Cuncas.

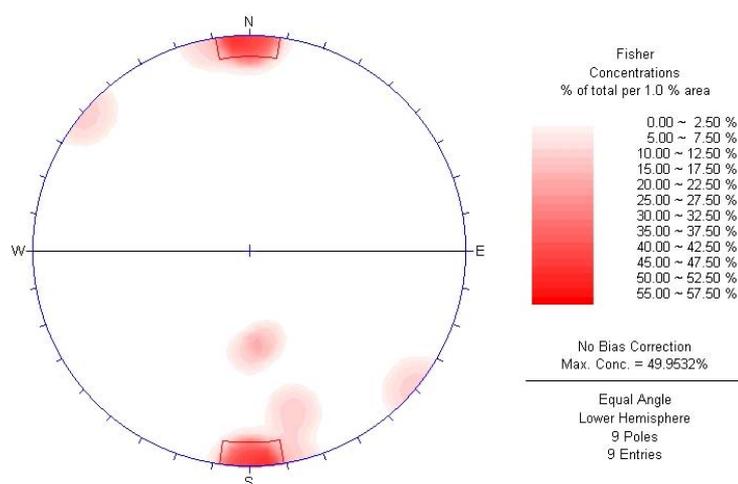


Figura 5.8 – Distribuição das foliações nos metassedimentos da porção norte do Trecho II.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

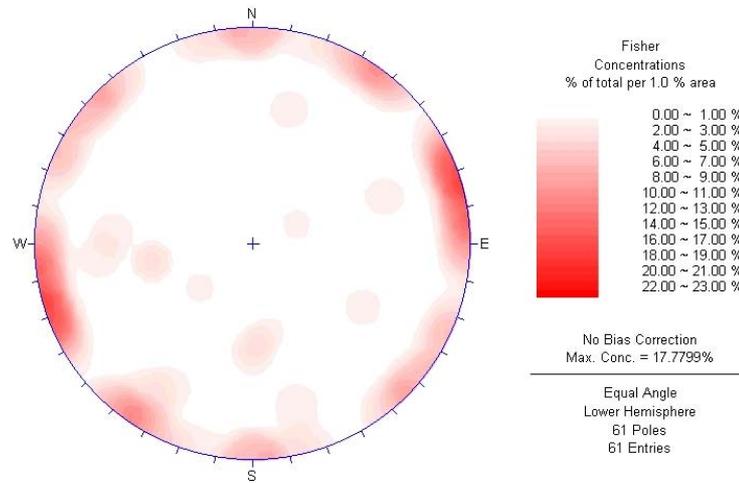


Figura 5.9 – Diversidade nas direções do fraturamento do gnaisses com ligeira concentração entre N5°-25°W/sub-verticais.



6 . CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DAS OBRAS

6.1 Generalidades

Conforme descrito no Item 5 – Aspectos Geológicos do Eixo Norte, o seu traçado abrange basicamente 2 (dois) domínios geológicos, representados no trecho por rochas sedimentares da Bacia do Araripe, por cerca de 53 km e rochas do embasamento cristalino no restante do trecho, por cerca de 48 km.

6.2 Canais

Os canais são descritos, pelas suas particularidades, em trechos delimitados pelas principais obras distribuídas ao longo do traçado.

6.2.1 EST. 0+000 (Reservatório Jati) ao Reservatório dos Porcos

O canal do Trecho II - Eixo Norte tem seu início no canal de fuga do Aproveitamento Hidrelétrico Jati, mais especificamente a partir das válvulas dispersoras, conforme indicado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0002. Segue-se um trecho de canal, desde a estaca 0+342 até atingir o reservatório de Atalho, por volta da estaca 2+800, onde está previsto um aprofundamento do leito do rio. No local, foram executadas as sondagens SP-818, SP-819 e SP-820 que indicaram, ao longo do vale do rio, a presença de um aluvião arenoso, com espessura variando de 8,00 a 18,45 m capeando rochas do embasamento cristalino do Grupo Cachoeirinha. A sondagem SP-817, executada no pé da ombreira, atravessou tão somente solo de alteração de xisto, constituído por silte areno-argiloso, até a profundidade de 5,30 m. O aluvião é constituído principalmente por sedimentos arenosos, recobertos por silte argiloso na sua superfície. Os índices SPT obtidos são demasiadamente elevados para a natureza dos materiais, variando de 6 a 20 golpes nas partes superficiais e maiores que 20 nos trechos mais profundos, o que deve ser considerado com reservas. O nível d'água foi detectado a 4,20 m de profundidade.

O traçado segue então até a barragem Atalho, na estaca 17+598, onde a vazão do canal dar-se-á pelo túnel de adução, a ser implantado na sua ombreira esquerda e cujas condições geológicas estão descritas no item 6.5.3.

A partir da estaca 17+989, a jusante do aproveitamento Atalho, inicia-se o remanso do reservatório dos Porcos, sobre os xistos do Grupo Cachoeirinha, onde não há previsão de obra, até o eixo da barragem.

6.2.2 Reservatório dos Porcos à Barragem do Boi II

Este trecho está compreendido entre as estacas 27+933 e 37+053 e, engloba as barragens dos Porcos, Cana Brava, do Cipó, do Boi I e do Boi II e canais de ligação entre eles, conforme indicado nos desenhos de n.ºs EN.B/II.DS.GL.0003 e EN.B/II.DS.GL.0004. Os seus aspectos geológicos e geotécnicos estão descritos no item 6.3.

6.2.3 Barragem do Boi II ao Túnel Cuncas (emboque)

Este trecho está compreendido entre as estacas 37+053 e 78+440 e inclui os aquedutos do Boi, Pinga e Catingueira, além da galeria Sobradinho, conforme indicado nos desenhos de n.ºs EN.B/II.DS.GL.0004, EN.B/II.DS.GL.0005 e EN.B/II.DS.GL.0006. O mapeamento geológico indicou a presença de rochas sedimentares das formações Mauriti, Missão Velha e Brejo Santo, interceptadas por uma série de falhas e coberturas aluvionares.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

6.2.3.1 Estaca 37+053 à Estaca 58+400

Da estaca 37+053 até a estaca 58+400, o canal deverá ser implantado em arenito Mauriti, exceto entre as estacas 47+700 e 49+400, local do aqueduto do Boi, onde ocorrem metasedimentos do Grupo Cachoeirinha. O seu greide varia entre as cotas 395 e 392 e inclui cortes de altura média, da ordem de 10 m. Neste subtrecho foram executadas 5 (cinco) sondagens rotativas, denominadas de SR-238, SR-239, SR-240, SR-245 e SR-246 para o estudo dos cortes e 20 (vinte) sondagens à percussão, identificadas como SP-281 a SP-300, para o estudo das fundações dos aterros. Foram realizadas ainda, seções geofísicas com GPR e sondagem sísmica para complementação do estudo dos cortes menores.

A sondagem SR-238, estaca 38+040, foi executada diretamente em afloramento de arenito, situação bastante comum na Formação Mauriti, onde a espessura de solo é pequena, às vezes de natureza coluvionar. O arenito apresenta-se pouco coerente (RAM) e medianamente fraturado até a profundidade de 2,0 m e medianamente coerente (RAD) e pouco fraturado em profundidades maiores. A sondagem SR-239, executada 300 m adiante, intercepta uma superfície com cerca de 2,60 m de solo de alteração e rocha alterada mole, passando em profundidade a um arenito fino a médio e médio a grosseiro, RAD, com intercalações centimétricas de siltito. O levantamento geofísico indicou velocidades sísmicas de 2.800 a 3.350 m/s para esse arenito mostrando não ser escarificável. No levantamento com GPR – *Ground Penetrating Radar* observaram-se espessuras reduzidas para a camada de solo superficial, da ordem de 1,0 m e de mais 1,0 m para provável arenito pouco coerente (RAM) a incoerente (RAM), mostrando uma boa correlação com os dados obtidos nas sondagens mecânicas. Outras seções geofísicas, S-05, S-06 e S-07, correlacionadas respectivamente às sondagens SR-244, SR-245 e SR-246, indicaram valores bastante próximos àqueles obtidos nas sondagens mecânicas. Essas condições geológicas são representativas da região, estimando-se para o trecho, uma média de 2 m de escavação de material de 1ª e de 1 m para o material de 2ª categoria. O material de 3ª categoria, representado por arenito pouco resistente, poderá ser escavado mediante "fogacho", numa técnica de afofamento do maciço arenítico. A permeabilidade prevista para o maciço arenítico é da ordem de $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s, valor médio obtido nos ensaios de perda d'água realizados no estudo das fundações das barragens.

6.2.3.2 Estaca 58+400 à Estaca 74+300

Da estaca 58+400 até a estaca 74+300, o canal será implantado, principalmente, em terrenos sedimentares da Formação Brejo Santo e em sedimentos aluvionares que apresentam grandes espessuras de solo. Entre as estacas 63+200 e 64+800, o canal atravessará arenito da formação Missão Velha. Nesse trecho, além das investigações da galeria Sobradinho, foram executadas as sondagens rotativas SR-250, SR-251, SR-252, SR-256, SR-257, SR-258 e SR-259 para o estudo dos cortes e as sondagens à percussão SP-296 a SP-300 para o estudo das fundações dos aterros. Levantamentos geofísicos através de sísmica e GPR complementam as investigações neste subtrecho.

Um única sondagem, SR-250, realizada na estaca 64+570, interceptou o arenito Missão Velha. Este arenito apresenta um comportamento geomecânico bastante similar ao arenito Mauriti, refletindo na superfície, pequena espessura de solo e de rocha alterada mole, limitada a 2,5 m.

As sondagens SR-251 e SR-252, executadas respectivamente nas estacas 67+460 e 67+770 interceptaram sedimentos silto-argilosos da Formação Brejo Santo, indicando na superfície, espessuras de solo argilo-siltoso de 5,27 e 7,15m, produto da alteração do siltito/argilito subjacente. Mais em profundidade, comparece o arenito com intercalações de siltito e argilito, pouco coerente a incoerente, conferindo-lhe um intenso fraturamento, o que propiciará



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

escavá-lo com escarificador. Os cortes nessa formação geológica são relativamente baixos e as escavações deverão interceptar cerca de 5m de material de 1.^a categoria e 10m de material de 2.^a. A permeabilidade é baixa, estimada em $1,0 \times 10^{-6}$ cm/s.

Da estaca 74+300 a 77+900, as sondagens SR-256 e SR-257, executadas respectivamente nas estacas 76+320 e 76+570, acusaram espesso depósito aluvionar constituído essencialmente por areia fina siltosa e argilosa, fofa a compacta, com índices SPT variando entre 5 e 15 golpes. Este trecho em canal deverá ser escavado exclusivamente em material de 1.^a categoria com nível d'água raso, observado a 1,05 m de profundidade. Os ensaios de infiltração indicaram permeabilidades médias da ordem de $1,0 \times 10^{-4}$ cm/s.

Da estaca 77+900 a estaca 78+400, o canal deverá interceptar novamente a formação Brejo Santo, onde a sondagem SR-258, estaca 78+310, programada para o estudo do emboque do túnel Cuncas, indicou a presença de blocos de rocha na superfície, caracterizando um corpo de tálus com espessura da ordem de 5,0 m que capeia solo de alteração e rocha alterada mole de argilito e siltito até a profundidade final do furo, de 27,0 m. Uma segunda sondagem, SR-259, realizada na estaca 78+380, confirma este mesmo quadro, porém interceptando um enorme bloco de rocha gnáissica entre 15,30 e 24,20 m de profundidade.

6.2.4 Túnel Cuncas (desemboque) ao Reservatório Cuncas

Trata-se do segmento final do Trecho II, compreendido entre as estacas 93+651 e 101+382, que inclui, como obras singulares, os reservatórios de Morros e Cuncas e o dique dos Pereiros, cujos aspectos geológicos e geotécnicos estão descritos nos itens 6.3. Os resultados do mapeamento geológico e as sondagens realizadas neste trecho estão indicados no desenho EN.B/V.DS.GL.0008.

A geologia deste trecho é constituída essencialmente por rochas cristalinas, incluindo xistos e rochas metasedimentares do Grupo Cachoeirinha que aparecem em contato com o granito intrusivo no seu trecho inicial e com o biotita gnaisse no seu trecho final.

Logo após o desemboque do túnel Cuncas desenvolve-se um trecho em canal, desde a estaca 93+651 até o remanso do reservatório da barragem de Morros, na estaca 95+764, totalizando 2.113 m de extensão. As sondagens SR-265, SR-266 e SR-267, executadas, respectivamente, nas estacas 93+780, 94+270 e 94+760 indicaram a presença de solo de alteração de biotita gnaisse com espessura variando de 1,0 a 1,5 m, e que passa, em profundidade, à rocha alterada mole até profundidades de 2,5 m. Segue-se abaixo rocha alterada dura, muito fraturada até 5,0 m de profundidade e, a partir daí, rocha sã, pouco a ocasionalmente fraturada, esta ao nível da seção molhada do canal onde o greide está previsto por volta da cota 384,65. A sondagem SR-266, executada na estaca 93+750, interceptou 9,39 m de solo aluvionar na superfície, recobrimdo rocha alterada dura, muito fraturada que deverá ser escavada ao nível da seção molhada, prevista por volta das cotas 384,55 e 389,55. Os levantamentos sísmicos indicaram, confirmando as espessuras encontradas nas sondagens mecânicas, cerca de 3,00m de material de 1.^a categoria e 3,00m de material de 2.^a categoria. A permeabilidade estimada para o trecho é de $1,0 \times 10^{-6}$ cm/s.

Nesse trecho o traçado desenvolve-se, até a barragem de Morros, em um talvegue entalhado ao longo de um falhamento que coloca em contato as metaígneas (pE4) com os metassedimentos do Grupo Cachoeirinha. Esse falhamento é o responsável pelo intenso fraturamento observado nas sondagens executadas nesse trecho.

A partir da estaca 97+106, na saída da barragem dos Morros, tem reinício o canal que se estende até o final do canal, onde ocorre uma série de cortes de 10 m de altura e aterros de até 20 m de altura. Neste trecho foram executadas as sondagens numeradas de SR-268 a SR-272 para o estudo dos cortes e as sondagens SP-303 e SP-304 para o estudo de



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

fundação dos aterros, observando-se a presença de metassedimentos e xistos. Na superfície ocorre, em geral, pequena espessura de solo de alteração, também da ordem de 1,0 m, exceto no local da sondagem SR 268, estaca 97+200, onde foi constatada uma espessura de 10 m de solo, provavelmente associada à zona de falha. Em profundidade, o solo de alteração passa a uma rocha alterada dura, muito fraturada até a profundidade de 5 a 6 m, e daí para baixo, a uma rocha sã, muito fraturada. Estima-se para este trecho uma espessura de escavação de material de 1ª categoria da ordem de 1,0 m e de 2,0 m para o material de 2ª categoria. A permeabilidade do maciço rochoso é equivalente a $1,5 \times 10^{-5}$ cm/s. O levantamento geofísico indicou espessuras compatíveis às observadas nas sondagens rotativas, identificando na sísmica duas camadas superficiais com velocidades de 700 e 2.600 m/s, correspondentes às camadas de solo e de rocha alterada dura.

6.2.5 Resumo das Espessuras de Escavação

Com base nos dados obtidos nas sondagens rotativas e no mapeamento geológico foram estabelecidas as espessuras médias de escavação dos materiais de 1ª e de 2ª categoria, relacionadas a seguir no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Espessuras médias dos materiais de escavação.

ESTACAS		Espessuras (m)		REFERÊNCIA
DE	ATÉ	1ª Cat.	2ª Cat.	
0+000	2+800	3	5	ALUVIÃO / XISTO
2+800	17+990	-	-	RESERVATÓRIO ATALHO
17+990	27+100	-	-	RESERVATÓRIO DOS PORCOS
27+100	37+020	-	-	BARRAGENS
37+020	47+700	2	1	ARENITO MAURITÍ
47+700	48+435	1	2	METASSEDIMENTOS
48+435	48+614	-	-	AQUEDUTO DO BOI
48+614	49+414	2	1	ARENITO MAURITÍ
49+414	49+565	-	-	AQUEDUTO PINGA
49+565	57+390	2	1	ARENITO MAURITÍ
57+390	57+567	-	-	AQUEDUTO CATINGUEIRA
57+567	58+400	2	1	ARENITO MAURITÍ
58+400	63+200	5	10	SILTITO/FOLHELHO
63+200	64+800	2	1	ARENITO MISSÃO VELHA
64+800	74+300	5	10	SILTITO/FOLHELHO
74+300	77+900	15	-	ALUVIÃO
77+900	78+400	5	10	ALUVIÃO / SILTITO
78+394	93+616	-	-	TÚNEL CUNCAS
93+616	95+200	3	3	BIOTITA GNAISSE/METASSEDIMENTOS
95+200	97+105	-	-	RESERVATÓRIO DE MORROS
97+105	101+382	1	2	METASSEDIMENTOS

6.3 Barragens

6.3.1 Barragem dos Porcos

A barragem dos Porcos inclui 4 (quatro) segmentos de barramento, inclusive o vertedouro e o dique, o primeiro entre as estacas 27+286 e 27+487, ou correspondente ao dique dos



Porcos; o segundo, ao barramento principal, entre as estacas 27+932 e 28+679, o terceiro, correspondente à estrutura vertente, posicionada entre as estacas 28+679 e 29+013, e o quarto, também barramento da margem direita, entre as estacas 29+023 à 29+317. O mapeamento geológico indicou a presença de rochas areníticas da formação Mauriti nas ombreiras, e extenso aluvião no vale, conforme pode ser observado nos desenhos de nº EN.B/II.DS.GL.0013 e EN.B/II.DS.GL.0014.

6.3.1.1 Dique dos Porcos

No local do dique dos Porcos foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-801, SR-802 e SR-803 e 2 (duas) sondagens à percussão, SP-801 e SP-802.

De uma maneira geral, as sondagens indicaram pequena espessura de solo no local, já detectada no mapeamento geológico, onde observou-se a presença de extensos afloramentos do arenito Mauriti. No trecho central, a sondagem SR-802 interceptou 2,10 m de espessura de solo arenoso, compacto, que passa gradativamente, em profundidade, ao arenito medianamente coerente (RAD) nos seus 4 m superiores e coerente (RS), pouco fraturado, nos trechos mais profundos. A permeabilidade obtida nos ensaios de perda d'água é da ordem de $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s, ocorrendo alguns trechos mais permeáveis, equivalentes a $2,0 \times 10^{-4}$ cm/s.

6.3.1.2 Barragem Principal

No local da barragem principal foram executadas 4 (quatro) sondagens rotativas ao longo do eixo, denominadas SR-213, SR-804, SR-805 e SR-806 e 8 (oito) sondagens à percussão, denominadas de SP-246, SP-247, SP-248, SP-804, SP-805 e SP-806. Complementa o estudo do local, a sondagem SR-214 executada cerca de 50 m a jusante da sondagem SP-248.

A sondagem SR-806, executada na ombreira direita, mostrou a presença de solo de alteração de arenito na superfície com espessura da ordem de 0,50 m que passa, em profundidade, a uma rocha medianamente coerente (RAD) e de baixa recuperação até a profundidade de 5,0 m. Daí, até a profundidade final de 15,00 m, a rocha apresenta-se coerente (RS) e pouco a ocasionalmente fraturada. Ensaios de perda d'água mostraram que o maciço rochoso apresenta baixa permeabilidade, ocorrendo condutividades hidráulicas equivalentes a $8,7 \times 10^{-6}$ cm/s.

No leito do riacho, as sondagens indicaram a presença de extenso depósito aluvionar com espessura variando de 10 a 18 m, constituído por silte arenoso, argila arenosa e areia fina a média siltosa, com índices de resistência à penetração inferior a 10 golpes e permeabilidades baixas da ordem de $1,0 \times 10^{-5}$ cm/s. Na sondagem SR-804 ocorre, abaixo do aluvião, um arenito de granulação média a grossa, medianamente coerente (RAD) e pouco fraturado, que passa, em profundidade, à uma rocha coerente (RS), pouco a ocasionalmente fraturada e com permeabilidade baixa, equivalente a $3,5 \times 10^{-5}$ cm/s. Uma segunda sondagem no leito do riacho, SR-214, executada cerca de 100m a jusante do eixo da barragem, interceptou solo aluvionar com 18,12 m de espessura, indicando uma descida do topo rochoso no sentido de jusante. O levantamento sísmico confirma essa conformação, assim como a espessura de 10m ao longo do eixo do barramento.

Na ombreira esquerda, a sondagem SR-213 interceptou solo de alteração na superfície constituído por areia fina a média, siltosa, fofa, até 1,30 m de profundidade, capeando arenito da formação Mauriti. De 1,30 a 4,62 m, o arenito apresenta-se medianamente coerente (RAD), pouco fraturado e com permeabilidade equivalente à $6,5 \times 10^{-4}$ cm/s. Daí, até 15,0 m, profundidade final da sondagem, o arenito médio a grosseiro apresenta-se coerente (RS), pouco fraturado e com baixa permeabilidade, equivalente à $7,0 \times 10^{-6}$ cm/s.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

6.3.1.3 Estrutura Vertente

Ao longo do vertedouro foram executadas as sondagens SP-823 e SP-824, que indicaram a presença de aluvião, respectivamente, até a profundidade de 4,20 e 4,15 m de profundidade, depositados por sobre solo de alteração do arenito subjacente. O topo rochoso, definido pelo impenetrável, foi determinado por volta de 5,40 m de profundidade. O nível d'água está posicionado bem próximo da superfície, a 0,5 m de profundidade na sondagem SP-824.

6.3.1.4 Barragem Margem Direita

A ombreira direita, após o vertedouro, está fundada diretamente sobre o arenito, com pequena espessura, cerca de 0,5 m, de solo de alteração composto de areia fina e média, siltosa com pedregulhos.

A rocha subjacente, estima-se, é medianamente fraturado com permeabilidades muito baixas a nulas, menos que $8,0 \times 10^{-5}$ m/s, conforme pode ser observado nas sondagens SR-806 e SR-807, executadas nas proximidades.

6.3.2 Barragem Cana Brava

A barragem Cana Brava está situada entre as estacas 29+597 e 31+757, totalizando 2.160 m de comprimento e com altura máxima de 26,50 m. Uma elevação topográfica entre as estacas 30+100 e 30+300 divide a barragem em 2 (dois) segmentos distintos.

O local de implantação deste conjunto de obras é constituído essencialmente pelo arenito da formação Mauriti, recoberto por aluvião nos seus trechos topograficamente mais baixos, conforme indicado nos desenhos de n.º EN.B/II.DS.GL.0015 e EN.B/II.DS.GL.0016.

No primeiro segmento de barragem, entre as estacas 29+597 e 30+100, foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-807, SR-808 e SR-809, e 4 (quatro) sondagens à percussão, denominadas de SP-807, SP-808, SP-809 e SP-810.

A sondagem SR-808, executada na ombreira esquerda, indicou a presença de solo de alteração com espessura de 1,30 m, constituído por areia média a grossa, fofa, com pedregulhos. De 1,30 a 11,30 m está presente o arenito médio a grosseiro com intercalações de silito da formação Mauriti que se apresenta medianamente coerente a coerente (RAD), pouco a medianamente fraturado e permeabilidade equivalente à $2,2 \times 10^{-5}$ cm/s. A partir de 11,30 m ocorre o xisto do Grupo Cachoeirinha, micáceo, alterado e medianamente fraturado (RAD) e impermeável. Os ensaios de perda d'água indicaram absorções baixas, variando de 1,0 a $8,0 \times 10^{-6}$ cm/s para o maciço são.

No trecho central, as sondagens SP-807, SP-808 e SR-809 indicaram aluvião na superfície com espessura máxima de 2,83 m, capeando diretamente arenito da formação Mauriti. A 9,90 m de profundidade ocorre o contato com o xisto do Grupo Cachoeirinha. O aluvião é constituído por argila arenosa, mole, pouco siltosa, cinza escuro e apresenta uma permeabilidade de $3,8 \times 10^{-5}$ cm/s. O arenito apresenta-se coerente (RS) e pouco fraturado, exceto no seu trecho inferior, próximo ao contato com o xisto, de 9,90 a 11,16 m, onde se apresenta como solo. No seu trecho superior, o ensaio de perda d'água indicou um equivalente de permeabilidade de $2,15 \times 10^{-3}$ cm/s. O xisto apresenta-se alterado (RAM) até a profundidade final do furo, de 20,50 m e com a permeabilidade variando entre $2,8 \times 10^{-5}$ a $3,8 \times 10^{-6}$ cm/s.

Na ombreira direita, comum a ombreira esquerda do segundo segmento de barramento, as sondagens SP-809, SP-810 e SR-810 indicaram solo de alteração com espessura variando de 1,60 a 3,03 m, constituído por areia fina a média, siltosa, com compacidade média e permeabilidade de $1,9 \times 10^{-6}$ cm/s. Na sondagem SR-810, subjacente ao aluvião, de 1,85 a 5,35-m ocorre o arenito Mauriti, coerente (RS), pouco fraturado e com permeabilidade



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

equivalente a $3,8 \times 10^{-5}$ cm/s. De 5,35 a 20,00 m, profundidade final da sondagem, comparece o xisto do Grupo Cachoeirinha, alterado (RAD), pouco permeável, com passagens alteradas em solo.

No trecho central do segundo segmento, foi executada uma seção transversal com as sondagens SP-812, SR-811 e SP-813, posicionadas de montante para jusante, respectivamente. A sondagem SR-811, no eixo do barramento, interceptou 7,0 m de aluvião por sobre solo de alteração de argilito/siltito da formação Mauriti. De 15,0 a 25,0 m, profundidade final da sondagem, ocorre o arenito. O aluvião, confirmado com a mesma espessura na SP-813, é constituído principalmente por areia fina a média, siltosa, fofa e com permeabilidade da ordem de $4,5 \times 10^{-5}$ cm/s. Alguns índices SPT elevados estão associados a presença de seixos de quartzo. O solo de alteração é constituído por silte argilo-arenoso, de compacidade média (10 a 15 golpes) e permeabilidade baixa, de $1,8 \times 10^{-6}$ cm/s. O arenito apresenta-se coerente (RS), pouco fraturado e com permeabilidade equivalente a $1,7 \times 10^{-6}$ cm/s.

Na ombreira direita, a sondagem SR-812 interceptou 2,30 m de solo de alteração de arenito, constituído por areia fina a média, siltosa compacta que passa gradativamente ao arenito Mauriti, de granulação média a grosseira, coerente (RS) e pouco fraturada e com permeabilidade de $6,9 \times 10^{-5}$ cm/s.

6.3.3 Barragem do Cipó

A barragem do Cipó está situada entre as estacas 32+089 e 32+705, totalizando 616 m de comprimento. A crista da barragem está projetada para a cota 402,35, o que determina uma altura máxima de 25,65 m. O mapeamento geológico indicou a presença do arenito Mauriti em toda a área do aproveitamento.

No local do eixo da barragem foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-224, SR-225 e SR-226, e 4 (quatro) sondagens à percussão, SP-262, SP-263, SP-264 e SP-265, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0017.

Na ombreira esquerda, a sondagem SR-224 indicou a presença de 2,10 m de solo de alteração do arenito Mauriti subjacente. O solo é constituído por areia fina e média, pouco siltosa, de compacidade média e permeabilidade da ordem de $4,5 \times 10^{-5}$ cm/s. O arenito de granulação grossa apresenta-se medianamente coerente (RAD) e medianamente fraturado no seu metro superior com permeabilidade da ordem de $1,2 \times 10^{-4}$ cm/s. De 3,0 a 15,0 m, profundidade final da sondagem, o arenito é coerente (RS), pouco fraturado e com permeabilidade equivalente a $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s.

No trecho central, a sondagem SR-225 indicou 2,80 m de solo de alteração do arenito subjacente. As sondagens à percussão SP-263 e SP-264, respectivamente, a montante e jusante do eixo, indicaram espessuras de 3,55 e 2,70 m. De 2,80 a 12,50 m, profundidade final da sondagem, ocorre o arenito médio a grosseiro com níveis conglomeráticos, coerente (RS), pouco a ocasionalmente fraturado e permeabilidade equivalente a $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s.

A sondagem SR-226, executada na ombreira direita, mostrou a presença de 1,00 m de solo de alteração na superfície capeando diretamente o arenito Mauriti. O solo é constituído por areia fina e média, pouco siltosa, fofa. O arenito apresenta-se medianamente coerente (RAD) no seu metro superior, passando em profundidade ao arenito conglomerático com finos níveis de siltito, coerente (RS) pouco a medianamente fraturado até a profundidade final da sondagem, de 10,0m. A permeabilidade obtida nos ensaios de perda d'água é da ordem de 5×10^{-5} cm/s. Estas condições de fundação deverão se estender ao local de implantação do vertedouro.



6.3.4 Barragem do Boi - I

A barragem do Boi - I está situada entre as estacas 34+152 e 35+577, totalizando cerca de 1.425 m. A crista da barragem está projetada para a cota 402,35 conferindo-lhe uma altura máxima de 26,15 m. O mapeamento geológico indicou a presença do arenito Mauriti em toda área de implantação da barragem, recoberto por espesso depósito aluvionar no seu trecho central.

No local do eixo da barragem foram executadas 6 (seis) sondagens rotativas, denominadas SR-229, SR-230, SR-231, SR-232, SR-233 e SR-234, e 9 (nove) sondagens à percussão, denominadas SP-266 a SP-274, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0018.

As sondagens SR-229, SR-230 e SR-231 foram executadas na ombreira esquerda, onde o arenito é aflorante, exceto no trecho topograficamente mais baixo, em que a sondagem SR-230 interceptou 4,50 m de solo de alteração, constituído por areia fina a média, pouco siltosa e pouco argilosa, compacta e permeabilidade da ordem de $5,0 \times 10^{-6}$ cm/s. O arenito, de granulação média a grossa, apresenta-se coerente (RS) e pouco a ocasionalmente fraturado. Os ensaios de perda d'água indicaram, no geral, permeabilidades baixas, equivalente a $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s, exceto no local da sondagem SR-229, onde os trechos superiores apresentaram vazões totais, definindo zonas permeáveis.

No trecho central, as sondagens SR-233, SP-272 e SP-273 interceptaram espesso depósito aluvionar de até 15,77m, constituído por argila silto-arenosa, mole e de baixa permeabilidade da ordem de $1,4 \times 10^{-6}$ cm/s, nos seus 5 metros mais superficiais. De 5,00 a 8,30m, o aluvião é constituído por areia fina a média, siltosa, com índices SPT elevados. A sondagem SR-233 indicou um aluvião com espessura de 8,02 m, capeando o solo de alteração. Este solo ocorre até a profundidade de 12,40 m e é constituído por areia fina a média, compacta a muito compacta e passa, em profundidade, ao arenito médio a grosseiro, pouco coerente (RAM). De 15,50 a 19,70 m o arenito apresenta-se medianamente coerente (RAD), pouco fraturado, com permeabilidade equivalente a $1,17 \times 10^{-5}$ cm/s. Abaixo de 19,70 até 23,00 m, profundidade final da sondagem, o arenito é coerente (RS), pouco a ocasionalmente fraturado e com permeabilidade equivalente a $3,6 \times 10^{-5}$ cm/s. Os ensaios de infiltração confirmam a baixa permeabilidade do solo aluvionar, indicando valores de até $7,7 \times 10^{-6}$ cm/s. Os ensaios de perda d'água indicaram valores de permeabilidade baixa para o maciço rochoso, variando entre 1,0 e $7,2 \times 10^{-5}$ cm/s.

Na ombreira direita, a sondagem SR-234 indicou pequena cobertura de solo coluvionar arenoso, da ordem de 0,50 m, recobrando o arenito Mauriti que se apresenta medianamente coerente (RAD) até 3,0 m de profundidade. De 3,0 a 10,0 m, profundidade final da sondagem, o arenito apresenta-se coerente (RS) e pouco a ocasionalmente fraturado e permeabilidade equivalente a $1,2 \times 10^{-5}$ cm/s.

6.3.5 Barragem do Boi - II

A barragem do Boi - II está situada entre as estacas 35+692 e 37+053, totalizando cerca de 1.361m. A sua altura máxima é de 28,35 m. O mapeamento geológico mostrou a presença do arenito Mauriti em toda área de implantação da barragem, recoberto por depósito aluvionar no seu trecho central.

No local do eixo da barragem foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas SR-235, SR-236 e SR-237, e 6 (seis) sondagens à percussão, denominadas SP-275 a SP-280, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0019.

A sondagem SR-235 foi executada na ombreira esquerda, indicou a presença de solo de alteração com 2,27 m de espessura, recobrando siltito pouco coerente (RAM) da formação



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Maurití até 3,62m de profundidade. De 3,62 a 13,00 m, profundidade final da sondagem, ocorre um arenito de granulometria média, medianamente coerente (RAD), pouco a ocasionalmente fraturado e permeabilidade equivalente a $5,0 \times 10^{-6}$ cm/s.

No trecho central, as sondagens SR-236, SP-277 e SP-278 interceptaram solo aluvionar, cuja espessura cresce de 2,33 até 9,51 m, no sentido de montante para jusante. O aluvião é constituído por silte argiloso e/ou argila siltosa, mole, no seu trecho superior e areia fina siltosa, fofa e/ou de compactidade média no seu trecho inferior. A permeabilidade desses materiais é baixa, obtendo-se nos ensaios de infiltração valores de 7,9 e $9,6 \times 10^{-5}$ cm/s. Na sondagem SR-236, abaixo do aluvião, de 4,10 a 5,50 m ocorre solo do arenito subjacente, constituída por argila siltosa, micácea, dura e permeabilidade de $9,8 \times 10^{-6}$ cm/s. De 5,50 a 25,00 m, profundidade final da sondagem, ocorre arenito Mauriti, de granulação média a grosseira, coerente (RS), pouco fraturada, com níveis conglomeráticos e de siltito. A permeabilidade do arenito é equivalente à $2,9 \times 10^{-6}$ cm/s, tendo ocorrido porém ensaio de perda d'água com vazão total da bomba, o que deve ser melhor investigado..

Na ombreira direita, a sondagem SR-237 indicou pequena cobertura de solo coluvionar arenoso, da ordem de 0,50 m, recobrando o arenito Mauriti que se apresenta medianamente coerente (RAD) até 3,0 m de profundidade. De 3,0 a 10,0 m, profundidade final da sondagem, o arenito apresenta-se coerente (RS) e pouco a ocasionalmente fraturado, com permeabilidade equivalente a $1,2 \times 10^{-5}$ cm/s.

6.3.6 Barragem de Morros

A barragem de Morros tem cerca de 525 m de comprimento e altura máxima de 15 m. O reservatório está compreendido entre as estacas 95+764 e 97+106. O local de implantação da barragem é constituído essencialmente por xistos e metassedimentos do Grupo Cachoeirinha onde foram realizadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-813, SR-814 e SR-815 e 4 (quatro) sondagens à percussão SP-301, SP-302, SP-821 e SP-822, cujas localizações estão indicadas no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL 0024.

As sondagens SP-301 e SR-813, executadas na ombreira direita, mostraram 1,0 e 6,50 m de solo de alteração do xisto subjacente, respectivamente. O solo de alteração é constituído por silte argiloso micáceo, rijo a duro, com permeabilidade obtida no ensaio de infiltração de $1,6 \times 10^{-5}$ cm/s. O xisto apresenta-se ligeiramente alterado (RAD) e muito fraturado, com permeabilidade equivalente à $3,1 \times 10^{-6}$ cm/s.

Na parte central, as sondagens SR-814, SP-821 e SP-822, indicaram a presença de solo aluvionar areno-argiloso na superfície com espessura de até 3,00m capeando rocha alterada dura de xisto até a profundidade final da sondagem rotativa, de 15,00 m. Os ensaios de perda d'água indicaram trechos com absorções totais, mostrando a alta permeabilidade da fundação.

Na ombreira esquerda, a sondagem SR-815 revelou condições de alteração menos intensa do que na ombreira direita, ocorrendo o solo de alteração de xisto até a profundidade de 1,70 m. Daí até a profundidade final da sondagem, de 10,0 m, tem-se rocha alterada mole e dura de xisto, com permeabilidade equivalente a $3,0 \times 10^{-5}$ cm/s.

6.3.7 Barragem Cuncas

O reservatório da barragem Cuncas constitui-se na última obra do Trecho II, onde o mapeamento geológico indicou a presença de rochas gnáissicas, recobertas por aluvião em todo o vale do rio Cuncas, conforme pode ser observado nos desenhos de n.ºs EN.B/II.DS.GL.0025 e EN.B/II.DS.GL.0026.



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

No local da barragem foram executadas 5 (cinco) sondagens rotativas, denominadas de SR-276, SR-277, SR-278, SR-279 e SR-280 e 8 (oito) sondagens à percussão, numeradas de SP-305 a SP-312.

As sondagens SR-276, SR-277, SR-278, SP-307 e SP-308, executadas na ombreira direita, indicaram a presença de solo de alteração de biotita gnaisse na superfície com espessura variando de 1,81 a 2,50 m, onde os ensaios de infiltração resultaram permeabilidades da ordem de $1,0 \times 10^{-4}$ cm/s. Abaixo do solo, ocorre o biotita gnaisse, ligeiramente alterado (RAD) e medianamente a muito fraturado, que passa em profundidade a uma rocha sã, pouco a ocasionalmente fraturada e de baixa permeabilidade

No trecho central, a sondagem SR-279 indica a presença de aluvião arenoso com 1,29 m de espessura sobre solo de alteração de gnaisse, este até 3,20 m de profundidade. De 3,20 a 5,75 m o gnaisse apresenta-se ligeiramente alterado (RAD) e medianamente fraturado com permeabilidade equivalente a $1,0 \times 10^{-4}$ cm/s. De 5,75 a 30,00 m, profundidade final da sondagem, o gnaisse apresenta-se sã, pouco a ocasionalmente fraturado.

Na ombreira esquerda, a sondagem SR-280 indicou uma pequena cobertura de solo na superfície, recobrimo o gnaisse pouco alterado (RAD) e medianamente fraturado até a profundidade de 6,50 m. De 6,50 a 15,00 m, profundidade final da sondagem, o gnaisse apresenta-se sã, pouco fraturado e com permeabilidade média.

6.3.8 Dique dos Pereiros

O Dique dos Pereiros, parte integrante do reservatório Cuncas, apresenta uma extensão de 227 m, crista na cota 390,95 e altura máxima de 7,10 m. Complementa essa obra, a implantação de vertedouro em ambas às ombreiras. O mapeamento geológico indica a presença de xistos do Grupo Cachoeirinha no local da obra, próximo ao contato com o biotita gnaisse, descrito na área de implantação da barragem Cuncas.

No local foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas SR-273, SR-274 e SR-275, conforme indicado no desenho de nº EN.B/II.DS.GL.0025.

As sondagens revelaram condições geológicas bastante similares para toda a área de implantação do dique, representadas por pequenas coberturas de solo de alteração, apresentando de 1,0 a 1,5 m nas ombreiras e de 2,40 m no trecho central, constituído por silte argiloso, micáceo, rija, que aparecem recobrimo os xistos. Estes, por sua vez, apresentam-se pouco alterados (RAD) e sãos (RS), muito fraturados e com veios de quartzo associados. A permeabilidade obtida nos ensaios de perda d'água é baixa, equivalente a $2,0 \times 10^{-5}$ cm/s. Estas condições geológicas devem persistir nos locais de implantação dos vertedouros.

6.4 Aquedutos

6.4.1 Aqueduto do Boi

O Aqueduto do Boi está situado entre as estacas 48+435 a 48+615, totalizando 180 m de extensão, onde a geologia é constituída essencialmente por metasiltitos do Grupo Cachoeirinha, conforme pode ser observado no desenho de nº EN.B/V.DS.GL.020. No leito do rio ocorrem sedimentos aluvionares.

No local foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-241, SR-242 e SR-243, localizadas na ombreira de montante, no leito do rio e na ombreira de jusante, respectivamente.

Em ambas as ombreiras o mapeamento geológico mostrou a presença de afloramentos rochosos, em parte recobertos por coluviões arenosos. A sondagem SR-241, executada na



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

ombreira de montante, indicou cerca de 1,0 m de coluvião por sobre rocha alterada mole, esta até a profundidade de 3,50 m, passando daí para baixo a rocha alterada dura até a profundidade final do furo, de 6,40 m. O nível d'água não foi detectado até a profundidade estudada.

No leito do rio, a sondagem SR-242 indicou a presença de aluvião bastante espesso, com espessura da ordem de 6,0 m, onde o trecho superior é constituído por silte argiloso e o trecho médio inferior por areia pouco siltosa com pedregulhos, de graduação variando de média a grossa,. O aluvião encontra-se diretamente por sobre solo de alteração e rocha alterada mole de metasiltito até a profundidade de 8,30 m, seguindo-se rocha alterada dura, medianamente fraturada, até a profundidade final do furo de 13,05 m. O nível d'água está posicionado no aluvião à 2,77 m de profundidade.

Na ombreira de jusante, a sondagem SR-243 interceptou 2,38 m de coluvião, recobrimdo rocha alterada mole de metasiltito até 7,0 m de profundidade. Segue-se abaixo, rocha alterada dura, muito fraturada até a profundidade final do furo, a 10,0 m. O nível d'água foi atingido a 6,0 m de profundidade.

6.4.2 Aqueduto Pinga

O Aqueduto Pinga está situado entre as estacas 49+414 e 49+564, totalizando uma extensão de 150 m. Nesse local, o arenito Mauriti constitui a ombreira de jusante e o metarenito do Grupo Cachoeirinha, a ombreira de montante, separados por um depósito aluvionar, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0021.

No local foram executadas 2 (duas) sondagens rotativas, denominadas de SR-244 e SR-816, localizadas, a primeira na ombreira de montante e a segunda, no leito do rio. Complementam a investigação 2 (duas) sondagens à percussão, SP-284 na ombreira de montante e SP-285, na ombreira de jusante.

Em ambas às ombreiras, independente da formação geológica, a espessura de solo é pequena, da ordem de 1,50 m e muitas vezes, a rocha é aflorante. Na ombreira de montante, a sondagem SR-244 indicou a presença de metarenito pouco coerente, porém compacto, até a profundidade de 2,50 m, passando em profundidade à rocha medianamente coerente e medianamente fraturada até a profundidade de 6,50 m e, daí, para uma rocha coerente, pouco fraturada. O nível d'água não foi interceptado até a profundidade final do furo, de 10,0 m.

No leito do rio, a sondagem SR-816 indicou a presença de aluvião, com 10,80 m de espessura, constituído essencialmente por areia pouco siltosa, fofa e pouco compacta, variando de média a grossa, sobreposto a solo de alteração de metasedimento que ocorre até 11,33 m de profundidade e passa a rocha alterada mole. De 12,10 até 16,33 m, profundidade final do furo, o metasedimento apresenta-se como rocha alterada dura, medianamente fraturada. O nível d'água foi interceptado a 6,00 m de profundidade.

6.4.3 Aqueduto Catingueira

O Aqueduto Catingueira está situado entre as estacas 57+387 a 57+567, totalizando 180 m de extensão, onde a geologia é constituída essencialmente pelo arenito da formação Mauriti, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0022.

No local foram executadas 3 (três) sondagens rotativas, denominadas de SR-247, SR-248 e SR-249, localizadas, a primeira na ombreira de montante, a segunda, no leito do rio e a terceira na ombreira de jusante.

O mapeamento geológico mostrou a presença de afloramentos rochosos em toda a área de implantação do aqueduto, em parte recobertos por pequenas espessuras de coluviões



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

arenosos. A sondagem SR-247, executada na ombreira de montante, indicou 0,33 m de coluvião por sobre arenito pouco a medianamente coerente, pouco fraturado, situação esta observada no leito do rio e na ombreira de jusante, respectivamente nas sondagens SR-248 e SR-249, indicando as condições favoráveis de implantação das fundações dos pilares do aqueduto. O nível d'água oscila por volta da cota 385, posicionado entre 2 e 8 m de profundidade.

6.4.4 Galeria Sobradinho

A galeria Sobradinho está situada entre as estacas 76+347 e 76+547, totalizando uma extensão de 200 m. A geologia é constituída exclusivamente por aluviões arenosos, conforme pode ser observado no desenho de n.º EN.B/II.DS.GL.0023.

No local foram programadas 2 (duas) sondagens rotativas, denominadas de SR-256 e SR-257, que, entretanto, ficaram limitadas à investigação do solo aluvionar com a execução de ensaios de resistência à penetração.

As sondagens mostraram condições geológicas e geotécnicas bastante similares no local, observando-se a presença de camadas arenosas intercaladas por camadas argilo-siltosas, com índices SPT variando entre 3 e 10 golpes até a profundidade de 10 m. Na superfície, com espessura de até 2,90 m, o solo é constituído por silte argiloso e/ou argila siltosa, cinza escuro, mole. O nível d'água apresenta-se raso, tendo sido interceptado a 1,0 m de profundidade na sondagem SR-257, o que deverá ser considerado na implantação da obra. Por outro lado, ensaios de infiltração mostraram valores baixos de permeabilidade, variando entre 4,7 e $7,5 \times 10^{-5}$ cm/s, o que deverá ser melhor avaliado.

6.5 Túneis

Ao longo do traçado do Trecho II está prevista a execução de 3 (três) túneis, sendo dois associados a aproveitamentos hidrelétricos, o de Jati e o de Atalho e o terceiro, túnel Cuncas, integrado ao traçado do canal.

6.5.1 Túnel Cuncas

O túnel Cuncas tem 15.211m de extensão, limitado entre as estacas 78+440 e 93+651, com uma seção arco retângulo de 9,30 m de largura e altura no trecho não revestido. O piso é totalmente regularizado com concreto magro, estando o seu *grade* na cota 388,80 no emboque e na cota 382,72 no desemboque, conferindo uma inclinação de 0,04% (40 cm/1.000m).

Conforme indicado nos desenhos de n.ºs EN.B/V.DS.GL.0007 e EN.B/V.DS.GL.0008, o túnel está localizado no domínio das rochas cristalinas, devendo interceptar biotita gnaisse no seu trecho inicial; granito, xistos e rochas metassedimentares no seu trecho central e granito no seu trecho final. Ainda no trecho inicial, recobrimo o biotita gnaisse, ocorre, na superfície, o arenito Mauriti que não será interceptado pela escavação do túnel.

O emboque do túnel foi estabelecido na estaca 78+440, onde uma falha põe em contato a formação Brejo Santo com o biotita gnaisse do Complexo Piancó, por volta da estaca 78+400, conforme observado nas sondagens rotativas SR 259 e SR 263, respectivamente executadas nas estacas 78+350 e 78+440. A sondagem SR 263 foi interrompida com 23 m de profundidade, cerca de 20 m acima da abóbada do túnel, não tendo atingido o contato com o biotita gnaisse, que, entretanto, tem sua presença evidenciada pelo levantamento sísmico que revelou velocidades sísmicas variando de 3.400 a 4.100 m/s, próprias de rochas cristalinas. Dessa forma, o túnel será implantado em biotita gnaisse, classe D, segundo classificação de *Barton*. Após cerca de 400 m do emboque um outro falhamento coloca o



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

biotita gnaisse em contato com um granito que, segundo a geofísica, apresenta características geomecânicas muito semelhante às do biotita gnaisse encontrado emboque.

Para a determinação das classes do maciço rochoso com base no levantamento sísmico efetuado, foi utilizado o critério de Barton para essa associação, em que:

$$V_p = \log Q_c - 3.500(m/s) \text{ , onde:}$$

V_p = velocidade de propagação de ondas p;

Q_c = índice de qualidade ($Q_c = Q/100 \times \sigma_c$).

No desemboque, igualmente havia sido detectada a presença de um plano de falha colocando em contato o granito e o biotita gnaisse, que entretanto, não foi possível investigá-lo. A presença de grandes blocos na superfície, associada à topografia íngreme, impediram o acesso das sondas rotativas ao local de investigações do desemboque. A fixação do desemboque foi feita com base na sondagem SM-214, executada no Estudo de Viabilidade, por volta da estaca 93+685, que indicou 6,88 m de solo de alteração por sobre rocha sã, pouco a ocasionalmente fraturada, o que permitiu estabelecer o desemboque na estaca 93+651. Igualmente por questões de acesso, não foram efetuados os levantamentos sísmicos.

Ao longo do túnel, onde a cobertura rochosa é superior à 150m, as investigações se restringiram à interpretação de fotografias aéreas e levantamento de campo que permitiram definir e caracterizar as unidades geológicas. Por volta da estaca 90+100 é acusada a presença de um falhamento, ressaltado por um vale retilíneo muito encaixado, já investigado nos estudos de Viabilidade, no qual a sondagem SM-213 acusou rocha sã, já a uma profundidade de 11 m, portanto, muito aquém dos 300 m de cobertura de rocha existente nesse local do túnel, o que leva a admitir que esta estrutura não tenha maiores implicações na escavação do túnel.

6.5.2 Túnel Jati

Este túnel faz parte do sistema de adução da UHE Jati, projetada para uma descarga de 89 m³/s, prevendo-se inicialmente atender as necessidades do canal através de duas válvulas dispersoras. A geração de energia deverá fazer parte de um programa futuro.

O túnel adutor de Jati inicia-se na tomada d'água, situada no corpo da barragem, na estaca 0+023, através de um poço vertical, desenvolvido entre as cotas 470 e 418, e a partir daí, num trecho subhorizontal até a casa de força, totalizando 278 m de comprimento. A seção de escavação é arco retângulo com 6,20 m de altura e de largura, totalmente revestido com concreto estrutural em seção circular de 5,40 m de diâmetro e blindado nos seus 25 m finais, conforme indicado no desenho de nº EN.B/II.DS.ET.0009.

Geologicamente, conforme apresentado no desenho de nº EN.B/II.DS.GL.0011, o túnel Jati está situado no domínio dos xistos e metavulcânicas do Grupo Cachoeirinha, onde foram executadas as sondagens SR-194, SR-195 e SR-196, respectivamente, no local da tomada d'água, no trecho central do túnel e no desemboque.

A sondagem SR-194, na cota 481, indicou a presença de solo de alteração até a profundidade de 0,50 m, passando imediatamente à rocha alterada dura, porém muito fraturada até 10,60m. Daí até 25,0 m, profundidade final do furo, a rocha apresenta-se sã e pouco a medianamente fraturada, onde se dará a fundação da tomada d'água e a escavação do poço vertical.

Ao longo do túnel, mais especificamente no seu trecho médio, a sondagem SR-195, na cota 464, revelou a presença de 1,35 m de solo na superfície do terreno, passando a rocha



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

alterada mole até a profundidade de 2,00 m. Segue-se rocha alterada dura de metassedimento até 11,0 m e daí, até a profundidade final do furo a 35,0 m, uma rocha sã, pouco fraturada que deverá ser interceptada pelo túnel.

No desemboque, a sondagem SR-196 indicou igualmente, pequena espessura de solo, passando a partir de 1,0 m a rocha alterada dura, pouco fraturada até a profundidade de 10,20m. Daí até 20,0 m, profundidade final do furo, a rocha apresenta-se sã, pouco a ocasionalmente fraturada.

6.5.3 Túnel Atalho

O túnel Atalho constitui-se na obra de adução da UHE Atalho que, a exemplo do Jati, está projetada nessa fase para alimentar o canal através de duas válvulas dispersoras, ficando a geração de energia para um estudo posterior

Esse túnel, tem início na tomada d'água situada na ombreira esquerda da barragem de Atalho, na estaca 17+612, desenvolvido com uma inclinação de 5,47% entre as cotas 404,0 e 390,30, totalizando 250,32 m de comprimento. A seção de escavação do túnel é arco retângulo com 6,20 m de largura e altura, revestida com concreto estrutural em seção circular de 5,40 m de diâmetro útil e blindado nos seus 25 m finais, conforme pode ser observado no desenho de nº EN.B/II.DS.GL.0010.

Geologicamente, conforme apresentado no desenho de nº EN.B/II.DS.GL.0012, o túnel está situado no domínio dos xistos do Grupo Cachoeirinha, onde foram executadas, ao longo do seu traçado, as sondagens SR-201, SR-202 e SR-203. A sondagem SR-201, executada na área do emboque a partir da cota 422, indicou a presença de solo de alteração até a profundidade de 1,00m, espessura da mesma ordem de grandeza observada na sondagem à percussão SP-231, distante 50 m à montante. Daí para baixo, predomina o granito, aparecendo subordinadamente o xisto. O granito, na cota de implantação do túnel, apresenta-se sã, pouco a medianamente fraturado. A sondagem SR-202, executada na parte central do túnel e onde se estabelece uma ravina, apresentou na superfície, por volta da cota 429, cerca de 2,70 m de aterro e 0,20 m de solo de alteração de xisto que passa, em profundidade, até 12,0 m, à xisto alterado (RAD), medianamente fraturado e, daí para baixo, a um xisto sã (RS), pouco a medianamente fraturado, até a profundidade final do furo, de 30,0m, prevendo-se que o túnel deva ser implantado em maciço classe C. A sondagem SR-203, executada no desemboque a partir da 419,5, interceptou 1,0 m de colúvio na superfície que recobre cerca de 1,5 m de solo de alteração. De 2,5 m a 12,0 m, a sondagem atravessa um xisto alterado (RAD), medianamente fraturado, com intercalação de granito. Em profundidade de 12,0 a 20,0m, a rocha é sã, medianamente fraturada. A permeabilidade do maciço rochoso é baixa.

O levantamento geofísico executado ao longo do túnel revela a presença de 3 níveis sísmicos bem distintos, o mais superficial com velocidades sísmicas de até 700 m/s, correspondente ao solo de alteração, com uma espessura média de 2 m; o segundo com velocidades oscilando entre 1.500 e 3.200 m/s, correspondente ao xisto RAD e que atinge, em média, 15 m de profundidade e, por fim, o nível inferior com velocidades de 3.500 a 4.500 m/s, correspondente ao maciço rochoso sã, pouco a medianamente fraturado. Esse levantamento não constatou nenhuma anomalia ao longo do seu caminhamento, levando a considerar a ausência de descontinuidades, pelo menos as significativas e que possam exigir tratamentos mais específicos.



7 . MATERIAIS NATURAIS DE CONSTRUÇÃO

7.1 Generalidades

As condições geológicas da região, aliadas às características lineares da obra, impuseram uma sistemática bastante particular à pesquisa de materiais naturais de construção ao longo do traçado do Trecho II - Eixo Norte.

O balanceamento de materiais ao longo do canal direcionou a pesquisa de materiais aos locais de barramento, ficando as demais obras supridas pela compensação dos materiais ao longo do canal. Por outro lado, a pequena espessura de solos em áreas de cristalino, o caráter arenoso e a granulometria fina dos solos condicionaram o estabelecimento de áreas de empréstimo. Existem restrições com relação às jazidas de areia e a obtenção de solos argilosos em algumas áreas.

7.2 Áreas de Empréstimo

A pesquisa de áreas de empréstimo ficou restrita aos locais próximos aos barramentos e dentro dos futuros reservatórios, sendo os aterros atendidos pela compensação de materiais de escavação obrigatória de cortes vizinhos. Eventualmente, a necessidade de pequenos volumes de solo nos aterros, a serem utilizados na construção dos taludes finais do canal, será suprida localmente, com as investigações de áreas próximas ao canal.

Em cada local de barramento foram estudadas áreas de empréstimo, sempre que possível, dentro do perímetro do reservatório, buscando assim, causar o menor impacto ambiental possível. As áreas de empréstimo foram investigadas através de sondagens à trado em malhas com espaçamento de 400 m e poços de inspeção, sendo as suas profundidades limitadas pelo impenetrável. A cada metro foram coletadas amostras que, posteriormente, foram selecionadas e enviadas para a execução dos ensaios geotécnicos. Em geral observou-se que os solos apresentam-se ressecados, dificultando a penetração do trado.

No Quadro 7.1 são apresentados os volumes disponíveis de solos para empréstimo em cada barramento. Os resultados dos ensaios geotécnicos de laboratório são apresentados no Anexo IV – Ensaio de Laboratório.

Quadro 7.1 – Volumes de Solos Disponíveis para Empréstimo

LOCAL (Reservatórios)	ÁREA PESQUISADA (m ²)	ESPESSURA MÉDIA (m)	VOLÚME DISPONÍVEL (m ³)	TIPO DE SOLO
Porcos	600.000	1,50	900.000	aluvião / solo de alteração
Cana Brava	850.000	1,70	1.420.000	aluvião / solo de alteração
Cipó	20.000	1,80	30.000	aluvião / solo de alteração
Boi I	700.000	1,70	1.200.000	aluvião / solo de alteração
Boi II	700.000	1,70	1.200.000	aluvião / solo de alteração
Morros	Material de escavação obrigatória			
Cuncas	1.000.000	2,70	2.700.000	coluvião / solo de alteração



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

Para a pesquisa se solos argilosos para a construção do maciço compactado das barragens foram realizados ensaios de caracterização (granulometria com sedimentação, densidade dos grãos e limites de Atterberg) e compactação Proctor Normal nas amostras coletadas nos poços de inspeção e sondagens a trado.

Foram determinadas também as umidades naturais dos solos de empréstimo para permitir o confronto com as umidades ótimas obtidas nos ensaios de compactação, para avaliar a necessidade de secagem ou adição de água previamente à compactação.

Para obtenção dos parâmetros de resistência do maciço compactado das barragens foram realizados ensaios triaxiais adensados rápidos, saturados, com medida de pressão neutra em corpos de prova moldados nas condições de densidade e umidade previstas para o maciço compactado. Analogamente, a deformabilidade do maciço compactado foi obtida através de ensaio de adensamento, e a permeabilidade obtida através de ensaio de permeabilidade por meio de ensaios com carga variável em corpos de prova moldados.

7.3 Depósitos de Areia e Cascalho

A presença de extensos depósitos aluvionares na região de implantação do Trecho II – Eixo Norte faz com que as possibilidades de exploração de depósitos de areia e cascalho sejam consideradas com atenção na próxima etapa de projeto.

A considerar pelas investigações realizadas nesses depósitos aluvionares para estudo das fundações das obras especiais (aquedutos e barragens), onde foram detectados níveis de areia de granulometria adequada, é provável que existam ocorrências com condições de exploração, a exemplo da área utilizada na construção da barragem Atalho. Os cascalhos são mais concentrados nas partes mais profundas dos depósitos e de maneira bastante esparsa, o que faz acreditar na dificuldade de exploração desse material.

Uma investigação mais detalhada na foz do riacho Verde, à montante da barragem dos Porcos, indicou a presença de areia média com características adequadas à utilização nas obras de barramento como material para filtros. Outras áreas deverão ser investigadas.

As amostras coletadas nas jazidas de areia foram submetidas a ensaios de granulometria por peneiramento, sendo também determinadas suas densidades máxima e mínima.

A permeabilidade das areias previstas para serem utilizadas nos filtros das barragens foi determinada em corpos de prova moldados com densidade relativa de 50%, em ensaios de carga constante.

Os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados no Anexo IV – Ensaios de Laboratório.

7.4 Materiais Pétreos

A ocorrência de rochas graníticas, de boas características geomecânicas, nas proximidades do traçado do Eixo Norte, mais especificamente do local das barragens dos Porcos, Cana Brava, do Cipó e do Boi e, de gnaisses, granitos e xistos nos demais trechos faz antever que não existam restrições quanto a disponibilidade e qualidade dos materiais pétreos para atender as necessidades das obras para a obtenção de agregados e finos para concreto e transições e de blocos para enrocamentos.

A pequena espessura de solo e a presença de extensos afloramentos rochosos e as boas condições topográficas colaboram para explorações bastante econômicas dos materiais pétreos, dispensando a execução de sondagens rotativas para a pesquisa desses materiais, bem como a execução de ensaios geomecânicos na determinação de suas propriedades para utilização nas transições, enrocamentos e concreto. Análises em lâminas petrográficas



Transposição de Águas do Rio São Francisco – Projeto Básico

foram elaboradas no sentido de uniformizar a classificação litológica e verificar a presença de quartzo deletério através da presença de extinção ondulante, sendo suas descrições e microfotografias apresentadas no Anexo IV – Ensaio de Laboratório.

8 . CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos geológicos e geotécnicos realizados permitiram investigar com bom grau de detalhamento as condições de fundação e de escavação das obras do Trecho II - Eixo Norte e a disponibilidade e características dos materiais naturais de construção.

No caso das escavações dos canais ao longo do traçado do Eixo Norte, foi determinada a espessura média dos materiais de escavação para os tipos principais de rocha, tendo sido observadas espessuras maiores de material de 1ª e de 2ª categoria nas rochas sedimentares da Formação Brejo Santo e nos xistos do Grupo Cachoeirinha, sendo estes na região de Atalho e Jati. O arenito Mauriti apresenta pequena espessura de material de 1ª e de 2ª, devendo, entretanto, a escavação convencional a fogo do seu material de 3ª ser substituída pela escavação com fogacho.

Com relação aos canais em aterros, as fundações foram investigadas por sondagens a percussão, observando-se, como regra geral, pequenas espessuras de solo na região de arenitos e de xistos, de natureza coluvionar, arenoso e fofo, recoberto de alteração compacto e ou rochas alteradas, indicando não haver maiores problemas para a construção dessas obras. Nos trechos de aluvião e de folhelhos/siltitos, as espessuras de solo são maiores.

No estudo das barragens, as condições de fundação observadas, aliadas à disponibilidade de materiais naturais de construção permitiram definir as seções de barragem, carecendo, entretanto, de um maior detalhamento para o projeto de tratamento de fundações, o que deverá ser executado por ocasião do Projeto Executivo.

Com relação aos aquedutos, as investigações permitiram definir as condições gerais de fundação e, conseqüentemente, os tipos de fundação, devendo, no Projeto Executivo, serem executadas sondagens nos locais exatos das fundações dos pilares para a determinação correta das profundidades de escavação.

O Túnel Cuncas apresenta espessa cobertura rochosa, superior a 210m, prevendo-se que na cota de implantação do túnel o maciço rochoso apresente, no geral, boas características geomecânicas, a considerar pelas sondagens rasas executadas nos emboques. O levantamento sísmico confirma essa previsão, indicando velocidades sísmicas superiores a 4.500 m/s já a 20m de profundidade, caracterizando um maciço rochoso são e pouco fraturado, classes A e B. Mesmo os trechos de possíveis lineamentos e/ou falhamentos não devem apresentar problemas de estabilização para o túnel. Os túneis Atalho e Jati, a serem implantados nos xistos, exigirão tratamentos para a estabilização dos maciços rochosos, principalmente nos trechos de pequena cobertura, onde as condições geomecânicas são inferiores.

As investigações realizadas para a pesquisa de materiais naturais de construção mostraram restrições com relação à obtenção de areias naturais e com relação à disponibilidade e características dos materiais de empréstimo para atender as obras do Trecho II - Eixo Norte e, mais especificamente, para a construção das barragens, o que deverá ser devidamente investigado no detalhamento desses estudos.



Projeto da Transposição de Águas do Rio São Francisco

*Sugestões para a Investigação de Campo, Projeto e
Especificações Construtivas de Túnel*

por Dr Nick Barton

Cliente: Funcate, *Atenção de Ricardo Abrahão*
Data: 1 Julho 2000



ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	2
2	INVESTIGAÇÕES DE SUPERFÍCIE E SUBTERRÂNEAS.....	2
2.1	O sistema Q nos afloramentos e testemunhos	3
2.2	Extrapolção da estimativa do valor Q usando a refração sísmica.....	3
2.3	Medidas de tensão para reduzir surpresas na construção de túneis	4
2.4	Medidas de permeabilidade em furos inclinados.....	5
2.5	Ensaio de Laboratório	6
3	CRITÉRIO DE PROJETO DOS TÚNEIS	7
3.1	Classes de rocha fornecerão as classes de suporte dos túneis	7
3.2	Métodos Construtivos e suas Especificações	9
3.3	TBM ou DB	10
4	REFERÊNCIAS	11
5	LISTA DE FIGURAS.....	11



1 INTRODUÇÃO

Foi realizada uma reunião no escritório da Funcate em São José dos Campos, em 21 de junho de 2000, visando avaliar o projeto dos túneis. Um trabalho prévio do autor sobre o Túnel Cuncas, com 16 km de extensão, para o consórcio Engecorps – Harza em dezembro de 1999, serviu de base para a avaliação.

Este relatório tem por finalidade desenvolver aspectos gerais sobre investigações, classificação de maciço rochoso, projeto, especificações e métodos construtivos relativos aos túneis mais importantes.

Tabela 1. Alguns dados importantes dos túneis mais longos

Túnel	Trecho	Faixa de profundidade (m)	largura (m)	comprimento (m)	Rocha
Parnamirim	VI	≈ 40	5.3	1800	Xisto
Monteiro	V	≈ 40–100	4.1	4900	Gnaisse mig.
Major Sales	IV	≈ 50–100	6.8	4500	gnaisse
Cuncas II	III	≈ 150–250	6.7	4100	gnaisse
Cuncas I *	II	≈ 200–400	9.2	16000	mig. gnaisse, filito xisto, granito

* (ou, alternativamente, traçado mais a oeste com túneis de 7500 e 6000 m, e maior extensão de canais)

Nas investigações realizadas até agora (Estudos de Viabilidade) pelo Consórcio Engecorps/Harza, foram feitas sondagens nas áreas dos portais de cada túnel como listado a seguir. Essas sondagens serão complementadas por investigações mais detalhadas já nos próximos meses. A maioria das sondagens realizadas nas áreas dos portais tiveram profundidades variando de 15 a 20, 25, 35, ou mesmo até 50 m.

Tabela 2. Identificação das sondagens feitas durante a Viabilidade

Tunel	Sondagens na Viabilidade
Parnamirim	SM 615 618
Monteiro	SM 561 562
Major Sales	SM 407 408* 409 410
Cuncas II	SM 305 307
Cuncas I	SM 210H 211

* furados em zona de falha

H somente 3m de testemunho

2 INVESTIGAÇÕES DE SUPERFÍCIE E SUBTERRÂNEAS

O período significativamente curto para a realização das investigações do Projeto Básico, projetadas para complementar as da fase de Estudos de Viabilidade significa que todos meios de simplificação e extrapolação devem ser usados para ampliar as informações do local a um custo mínimo.



Enquanto o GPR e o VLF são técnicas úteis para auxiliar os geólogos a definir contatos, lençol freático, falhas, etc. elas não fornecem “números” para o projeto dos túneis e estimativas de custo. Elas são importantes indicadores das condições de contorno da geologia e da geologia estrutural, dentro do qual se deve desenvolver a classificação do maciço rochoso; os “números” necessários para a estimativa do método de escavação, custos e planejamento.

2.1 O sistema Q nos afloramentos e testemunhos

A estrutura básica que liga a investigação de campo aos aspectos contratuais do projeto do túnel é o sistema Q.

Na Figura 1 encontra-se uma adequada folha de registros para ser utilizada nos mapeamentos, tanto dos afloramentos como nos testemunhos. (Ela foi utilizada pelo autor no Túnel Cuncas I, na fase dos estudos de viabilidade na comparação entre TBM e DB).

A configuração da distribuição estatística da qualidade da rocha auxilia o desenvolvimento dos gráficos longitudinais de qualidade de rocha x comprimento; em outras palavras, velocidade e custo da construção do túnel. A correlação com os detalhes de suporte do túnel, mostrados na figura 2, serão discutidos adiante.

A idéia é obter-se, para cada túnel, a seguinte indicação aproximada:

Túnel X	Q =	40–100	10–40	4–10	1–4
		1500 m	2300 m	3700 m	1100 m

A escala de Q provavelmente estender-se-á até a classe mais baixa ($Q = 0.001–0.01$) com a esperança de ocorrer tal rocha ruim somente em algumas dezenas de metros.

2.2 Extrapolação da estimativa do valor Q usando a refração sísmica

Quando a perfilagem de Q é dificultada por falta de afloramentos nas proximidades do túnel e quando as sondagens são muito espaçadas, a incerteza e o risco de surpresas na construção podem ser consideravelmente reduzidas usando-se a refração sísmica. O modelo morfológico atual: solo, rocha alterada, rocha mais sã, nos primeiros 5 a 25 m de profundidade, é bem ajustado à interpretação da velocidade sísmica com as correlações entre as ondas P (V_p) e o valor de Q. Entretanto, camadas com menores velocidades tendem a ser perdidas, por exemplo em séries sedimentares.

A figura 3 mostra a configuração que foi desenvolvida por tentativa e erro, por vários anos, comparando-se a qualidade de testemunhos obtidos em profundidades de 10 a 50 m com as velocidades sísmicas. A correlação básica $V_p–Q$ para rocha dura está mostrada pela linha escura na figura 3, e.g.:

**Tabela 3. Correlação aproximada entre VP x Q para rocha dura**

Q =	0.1	1	10	100	
V _p ≈	2.5	3.5	4.5	5.5	km/s

A equação correspondente é a seguinte:

$$V_p \approx \log Q + 3.5 \quad (\text{km/s}) \quad (1)$$

Uma correlação aperfeiçoada é obtida normalizando-se o valor de Q pela resistência à compressão simples diferente de um valor típico de 100 MPa. ($Q_c = Q \times \sigma_c / 100$). Podem também ser feitas correções para a porosidade da matriz rochosa usando-se as curvas da Figura 3.

Em princípio, a distribuição estatística das velocidades, quando corretamente interpretada, pode ser convertida em uma distribuição estatística dos valores de Q e, como consequência, das quantidades de suporte, e das estimativas de prazo e custos. Em outras palavras, como a velocidade sísmica se relaciona com o custo, a estimativa de custo do túnel pode ser melhorada com uma boa campanha de sísmica.

A palavra “extrapolação” foi usada no título desta subseção. No momento, consideramos a extrapolação lateral (ou melhor longitudinal), tanto da perfilagem de testemunhos, como dos afloramentos para outras localidades ao longo do traçado do túnel onde informações “consistentes” serão obtidas. Um problema potencialmente mais difícil é a extrapolação em profundidade.

Desde que a qualidade da rocha **geralmente** tende a aumentar com a profundidade, o uso da velocidade sísmica de 25 m de profundidade (e sua conversão para o valor Q) **geralmente** estará do lado conservador. É claro que podem existir exceções se camadas subjacentes forem de pior qualidade (i.e. arenito com baixo grau de fraturamento sobre filitos com alto grau de fraturamento). Também existirão problemas de qualidade de tensão/deformação nos túneis. Se a profundidade (i.e. tensão) se torna desfavoravelmente alta em relação à σ_c (resistência à compressão) as relações σ_v / σ_c ou σ_1 / σ_c sugerirão um valor de SRF que reduzirá o valor de Q. Esse valor reduzido de Q não seria previsível a partir da sísmica feita na superfície, mas sim pela perfilagem na zona de menor qualidade ao redor do próprio túnel. Portanto, a interpretação das medidas de V_p baseadas em mecânica das rochas é importante.

2.3 Medidas de tensão para reduzir surpresas na construção de túneis

Falhamentos transcorrentes seguidos de rotação de tensões e “rifts” relacionados a falhamentos normais indicam a possibilidade de estruturas geológicas importantes e provavelmente fraturamento dominante com baixos níveis de tensão normal.



Num projeto de transposição em região árida, a perda d'água devido à locação de túneis acima do lençol freático é uma possibilidade, principalmente se tensões são baixas e as permeabilidades altas. As tensões representam uma condição de contorno importante e fundamental na interpretação da geologia estrutural dos revestimento dos túneis (ou do não revestimento).

Em relação ao potencial de vazamento e às altas permeabilidades na direção das juntas – provavelmente ao longo de estruturas sub-verticais não amostradas pelos furos verticais – é importante medir-se a tensão principal menor usando o ensaio minifrac (fraturamento hidráulico), utilizando-se o cálculo da densidade da cobertura para a tensão vertical e a teoria da elasticidade para estimar a tensão principal maior (pelo menos em rocha dura competente).

A *direção* de σ_H e a *magnitude* de σ_h são fundamentais na interpretação dos parâmetros de projeto de túneis, tal como a anisotropia de propagação da velocidade sísmica e dificuldades preliminares na interpretação da qualidade da rocha.

É altamente recomendável que os ensaios minifrac sejam feitos nas sondagens mais profundas, perfuradas nos locais dos maiores túneis como no caso do túnel Cuncas I. Sugere-se medidas em mais de uma das principais unidades geológicas existentes.

2.4 Medidas de permeabilidade em furos inclinados

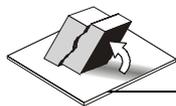
A transposição de águas por mais de 31 km em túneis longos, com a cota do túnel acima do nível da água geralmente, antevê o risco de perda de água, apesar da transposição não ser pressurizada. É importante medir a permeabilidade ao redor dos emboques e perto de falhas, e se ter alguns furos representativos no maciço com maior grau de fraturamento.

Já que muitas das juntas têm mergulhos íngremes ou até sub-verticais, deve-se ter este fato em mente quando se efetuar os furos, tanto para determinação da qualidade das rochas (i.e. valor de Q), como da permeabilidade. Furos verticais podem influenciar os resultados.

Ensaio alternados de injeção e de bombeamento deveriam ser realizados para a obtenção de valores de permeabilidade confiáveis representativos (mais ou menos) e valores Lugeon pouco menos representativos, com cada tipo de teste sendo convertido em permeabilidades expressas em m/s.

O excesso de pressão de injeção no ensaio Lugeon, expresso em l/min/m/l MPa é algo deformante, e foi correlacionado em termos aproximados, com o valor Q. O limite inferior do valor Lugeon ($1L \approx 10^{-7}$ m/s) é aproximadamente igual ao inverso do valor Q (normalizado para $\sigma_c/100$ como anteriormente).

$$L \approx 1/Qc$$



Em outras palavras para rochas duras com resistência a compressão nominal da ordem de 100 MPa, podemos esperar os seguintes valores muito aproximados de correlações entre Q, Vp e L.

Tabela 4 - Relações aproximadas para rochas duras que podem ser úteis na extrapolação de informações escassas

valor Q	0.01	0.1	1	10	100
≈ Vp (km/s)	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
≈ L	100	10	1	0.1	0.01
≈ K (m/s)	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}

Estas relações podem ser úteis onde o tempo é limitado e as construções largamente espaçadas (i.e. túneis longos), recebendo, inevitavelmente investigações insuficientes. Como pode ser observado acima, o intervalo total de valores Q (0,001 a 1000) teoricamente poderia implicar num intervalo de permeabilidades potenciais de 10^{-4} m/s (1000 Lugeon) a 10^{-10} m/s (0.001 Lugeon). O fato de que valores muito baixos de Q podem freqüentemente estar associados com a presença de argila, o que freqüentemente tende a baixar a permeabilidade, causará obviamente exceções à super-simplificada relação observada acima onde os valores Q são muito baixos.

2.5 Ensaios de Laboratório

O empreiteiro que construirá os túneis deverá levar seriamente em consideração o processo de perfuração com TBM para os túneis mais longos, preferencialmente ao processo de perfuração e escavação com explosivos (DB). Qualquer que seja a alternativa escolhida há uma necessidade séria de dados de ensaios padrão de laboratório para se determinar as características de resistência e abrasão da rocha. Os milhares de quilômetros percorridos pelos cortadores do TBM (com cargas de corte abaixo de, digamos, 15 a 30 tnf) ou os milhares de quilômetros de perfuração a percussão para a seção plena com DB significa que as estimativas de custo e programação são afetadas pelos resultados.

No mínimo, os seguintes testes de laboratório são sugeridos para serem conduzidos em amostras intactas e totalmente representativas dos principais tipos de rocha, i. e. xisto, filito, gnaiss, gnaiss migmatítico, granito, etc.

- resistência a compressão simples (σ_c)
- velocidade sônica (Vp)
- point load (I_{50})
- porosidade (n%)
- conteúdo de quartzo (2%)



Devido ao limitado tempo disponível, sugere-se um mínimo de 10 amostras para cada tipo de rocha principal, selecionadas a partir de testemunhos recentes. Seria lógico selecionar estas amostras a partir de testemunhos selecionados que já tenham sido classificados pelo sistema Q, e o processo supervisionado por um geólogo experiente.

Para a escavação pelo processo TBM a adição do teste CLI (Cutter Life Index) da NTH (Universidade de Trondheim) seria uma sábia precaução e um dado a mais para a elaboração do projeto básico. Detalhes podem ser encontrados em Barton-2000. Amostras de aproximadamente 20-30kg são suficientes e poderiam ser remetidas à Universidade de Trondheim para os ensaios padrão TBM de rocha dura.

3 CRITÉRIO DE PROJETO DOS TÚNEIS

O objetivo principal das discussões anteriores sobre a necessidade de investigações de campo é o de assegurar a qualidade do projeto básico dos túneis além de simplificá-lo. Quanto mais baixo o nível de informações, devido ao curto período de investigação, maior será o custo do projeto final, sem mencionar os impactos adversos no cronograma de construção devido ao aparecimento de surpresas não detectadas e investigadas. A declaração de que o proprietário da obra sempre arca com os custos da obra com investigações de campo oportunas e efetivas ou inoportunas e sem verba, parece ser verdade para esta grande transposição.

3.1 Classes de rocha fornecerão as classes de suporte dos túneis

A divisão de cada túnel (tabela 1) em trechos, estimados através de determinadas classes de qualidade do maciço rochoso, como discutido na Seção 2.1, será um dos objetivos preliminares das investigações de campo. Conforme já apresentado, essa divisão levará em conta a forma de interpretação dos testemunhos de sondagem, do mapeamento de superfície e das extrapolações na qualidade dos maciços, também utilizando extensos perfis de sísmica de refração.

Os cinco principais túneis apresentados na Tabela 1 têm diâmetros de 4,1, 5,3, 6,7, 6.8 e 9.2 metros. A Figura 2 apresenta os sistemas de suporte para túneis recomendados segundo o Sistema Q. Existe, portanto, uma importante decisão a ser tomada: a escolha do ESR (eixo y do lado esquerdo do gráfico). O diâmetro (SPAN) dividido pelo ESR indica o nível apropriado de suporte permanente (e reforço do maciço rochoso).

No Sistema Q original, de 1974, um valor de ESR igual a 1,5 foi recomendado para túneis de passagem d'água, incluindo adução e túneis pressurizados não revestidos. Pequenos blocos podem escapar do revestimento de concreto projetado (S, Smr ou Sfr) e cair a muitos quilômetros da casa de força sem afetar a produção de energia,



fazendo assim com que o proprietário tenha uma economia considerável, no caso de túneis longos, devido à redução do concreto projetado empregado no revestimento.

Na atualização sistema Q para recomendação do S(fr) de 1993, (Grimstad & Barton, 1993), foram convencidos pelo Norwegian State Power Board (Statkraft) a aumentar um pouco o valor de ESR para 2.0, no caso de túneis hidráulicos.

Tirando as zonas de emboque e as zonas com alteração intensa, onde um valor mais conservativo de ESR deve ser usado (ESR = 1.6), é mais seguro usar um valor de ESR igual a 2.0.

Com cinco diâmetros diferentes e variando de 4.1 a 9.2 metros, e um valor comum de ESR = 2.0 estaremos encontrando classes de suporte com valores de SPAN/ESR variando entre 2.0 a 4.6 metros (SPAN / 2.0).

Esse quadro, quando transferido para a Figura 2, mostra que os menores túneis necessitarão de suporte somente no intervalo de Q entre 0.001 e 1.0, enquanto que o maior túnel (Cuncas I) deverá receber suporte num intervalo maior, com valores de Q entre 0.001 a 6.

Decisões sobre a qualidade do maciço serão cruciais em maciços das classes D e C, já que esses maciços estão no limite da utilização ou não de suportes.

Classe D Q = 1 a 4
Classe C Q = 4 a 10

Quando o maciço for classificado como B ou A ($Q > 10$), não será necessário o uso de suportes, salvo os maciços onde houver evidência (através da investigação) que ocorrerá fuga d'água quando o túnel estiver em operação. Neste caso, o invert do túnel deverá receber um revestimento de 5 cm de concreto projetado com fibras. A utilização de fibra é sugerida por razões de durabilidade do revestimento.

É recomendável que as classes dos maciços apresentada na Figura 2 sejam utilizadas como base nas caracterizações de campo, ou seja, nas classificações dos maciços. O número de metros ou quilômetros de cada classe em cada túnel será um dado imprescindível para as estimativas de custos e cronogramas executivos.

Tabela 5. Definições recomendadas para classes de rocha e suportes de túneis

Classes	Valores de Q
A	> 40
B	10–40
C	4–10
D	1–4
E	0.1–1
F	0.01–0.1
G	0.001–0.01



3.2 Métodos Construtivos e suas Especificações

As definições dos valores de qualidade dos maciços e das classes de suporte apresentadas na Tabela 5 irão formar as bases iniciais das especificações dos sistemas de suporte e reforço do maciço. Túneis com tamanhos diferentes precisam de diferentes tipos de suporte, mesmo estando na mesma classe. Tomando os extremos do SPAN/ESR= 2.0 a 4.6 m, pode-se propor:

Tabela 6. Os prováveis extremos dos suportes necessários

Classes	Valores de Q	Diâmetro = 4.1 m	Diâmetro = 9.2 m
A, B	> 10	nenhum	nenhum
C	4–10	nenhum	B 2.1–2.4 m, S 4 cm
D	1–4	nenhum	B 1.7–2.1 m, S 5 cm
E	0.1–1	B 1.3–1.7 m, S(fr) 9–5 cm	B 1.3–1.7 m, S 12–5 cm
F	0.01–0.1	B 1.0–1.3 m, S(fr) 14–9 cm	B 1.0–1.3, S 20–12 cm
G	0.001–0.01	B 1.0 m, S(fr) 20–14 cm + RRS	B 1.0 m, S 25–20 cm + RRS

Nas áreas de emboque de túneis com grandes diâmetros, onde aplica-se $J_n=2x(J_n \text{ observado})$, para ser mais conservador, e $SFR=2.5$ (reflexo da baixa tensão, e da proximidade da superfície), é provável a necessidade da utilização de concreto moldado como suporte para os túneis maiores (largura 9,2 m). Já para túneis com menores seções, S(fr) – concreto projetado com fibras - deverá ser suficiente, com um reforço por chumbador como acima mostrado.

Devido à utilização de concreto projetado com reforço de cambotas metálicas, necessário nas piores classes (emboques, zonas de falhas, etc.), que possui uma rugosidade não desejada (ondulações de 20 a 40cm de altura a cada 2 a 3 metros), este suporte com aspecto “corrugado” deverá ser substituído (ou suplementado) por arcos de concreto, que são ainda mais caros. Sobre-escavações em rochas mais brandas irão usualmente deixar o espaço necessário para que o concreto moldado não interfira na seção de projeto. Essa avaliação será parte da discussão sobre o coeficiente de Manning, mais adiante.

Escavação em plena seção é considerada perfeitamente viável para todos os tamanhos de túneis. **Sub-escavações** com, talvez, mais de 10cm, e **somente em áreas isoladas** podem ser estipuladas como o limite de pagamento. Sobre-escavações podem ser limitadas por cláusulas que estipulem avanços aceitáveis. Danos excessivos se efetivarão nas piores classes de rocha, o que irá requerer um maior volume de concreto, o que não será interessante para a empreiteira com contrato de preço fechado. A empreiteira, portanto, deverá ser persuadida a seguir um esquema de compromisso com uma velocidade de avanço razoável, ou seja, um avanço que não cause danos excessivos no maciço causando um grande aumento nos sistemas de suporte.

**Tabela 7 - Tamanho do avanço em relação à classe de rocha.**

Classes	Valores de Q	Avanços
A, B	> 10	4 m
C	4–10	4 m
D	1–4	3 m
E	0.1–1	2 m
F	0.01–0.1	1.5 m
G	0.001–0.01	1.0 m

Pré-splitting é um item muito caro para um túnel hidráulico e deve ser, se possível, evitado. A rugosidade das paredes pode ser reduzida pela utilização de concreto projetado simples, no caso de se estar muito próximo do coeficiente de Manning assumido, devido à um padrão de overbreak que ocorre em xistos (túneis Parnamirim e Cuncas I) ou filitos (Cuncas I). (O autor irá obter informações junto à Universidade de Trondheim a respeito de coeficientes de Manning típicos de túneis de adução não revestidos e túneis sobre pressão. Essas informações serão posteriormente enviadas para a Funcate).

3.3 TBM ou DB

Num recente discussão com o Consórcio Engecorps/Harza a respeito da viabilidade do túnel Cuncas I, o autor confrontou o uso do TBM e do DB para os quatro tipos principais de rochas que haviam sido assumidas para aquele túnel (até aquele momento), a saber: arenito, filito, xisto e granito, com variações no grau de fraturamento. Sabe-se, agora, que o arenito está somente sotoposto às rochas metamórficas.

Para o Projeto Básico é importante descrever as condições esperadas para o método TBM em todos os túneis longos do Projeto, isso se faz particularmente importante no caso de pressões políticas para um cronograma apertado onde poderão ser melhor escolhidos os TBM a serem utilizados, ou mesmo um modelo híbrido de TBM/DB para conseguir uma maior rapidez na execução. Uma escolha acertada da empreiteira junto ao dono do TBM disponível para o caso pode ajuda-la a cumprir cronogramas “impossíveis”.

Dessa forma, a investigação de campo torna-se extremamente importante. Muitos quilômetros de rochas com altas velocidades sísmicas ($V_p \geq 5.0$ km/s) podem comprometer a velocidade de avanço do TBM, assim como zonas de velocidade sísmica muito baixa ($V_p \leq 2.5$ km/s), como zonas de falha, também podem comprometer seu desempenho. As velocidades sísmicas ideais para o TBM devem estar entre $3.0 < V_p < 4.5$ km/s, considerando o pequeno diâmetro dos túneis envolvidos.

Esses valores deverão ser convertidos, juntamente com outros dados de investigação num valor estimado de Q_{TBM} , de modo que a taxa de penetração PR (Penetration Rate) e a taxa de avanço AR (Advance Rate), ambas em m/hr, possam ser estimadas



para a distribuição dos valores de Q e de Q_{TBM} ao longo de cada túnel. (A carga nos cortadores do TBM, ou seja, em última análise o projeto da máquina, também entra no cálculo do Q_{TBM}). Dessa forma poderão ser feitas comparações com cronogramas feitos para o método DB que são muito correlacionáveis com a distribuição de valores de Q .

Como uma estimativa preliminar, que deverá ser ajustada pela experiência das empreiteiras brasileiras (ou estrangeiras), pode-se esperar as seguintes taxas de avanço para um túnel de 6 metros de diâmetro, executado pelo método DB.

Tabela 8 – Taxa de avanço semanal aproximada

Valores Q	m/semana
0.001 – 0.01	5
0.01 – 0.1	10
0.1 – 1	25
1 – 10	50
10 – 100	70
100 – 1000	90

4 REFERÊNCIAS

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. 1974. Engineering classification of rockmasses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. 6: 4: 189-236.

Barton, N. 2000. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. 173 p. Rotterdam: Balkema.

Grimstad, E. & Barton, N. 1993. Updating of the Q-System for NMT. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, 1993. (Eds Kompen, Opsahl and Berg). Norwegian Concrete Association, Oslo.

5 LISTA DE FIGURAS

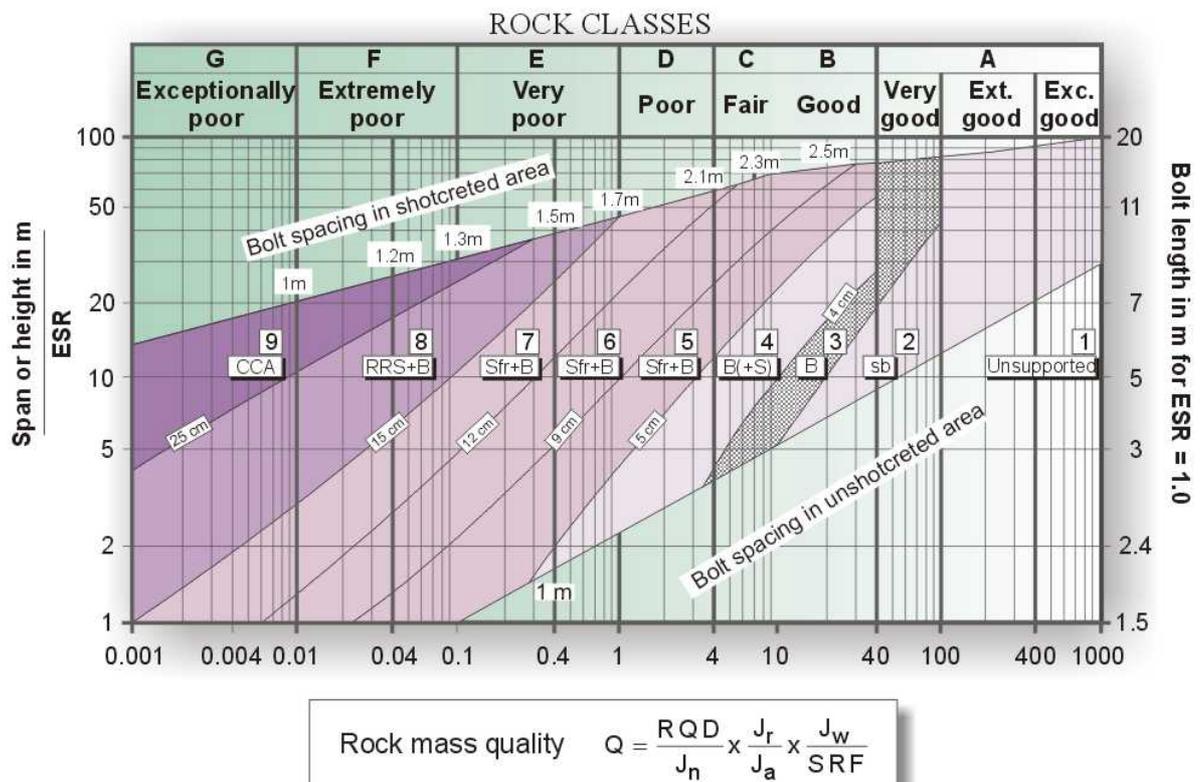
Figura 1: Planilha do sistema Q - “método do histograma” para a caracterização da qualidade do maciço em afloramentos e testemunhos

Figura 2: Associação entre as classes de rocha e as classes de suporte de túneis

Figura 3: Relação entre velocidade sísmica (V_p) e a qualidade do maciço rochoso



ROCK MASS CLASSIFICATION



REINFORCEMENT CATEGORIES

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1) Unsupported 2) Spot bolting, sb 3) Systematic bolting, B 4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10cm), B(+S) | <ul style="list-style-type: none"> 5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9cm, SFr + B 6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12cm, SFr + B 7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15cm, SFr + B 8) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9cm, SFr + B 9) Cast concrete lining, CCA |
|---|---|

Figura 2 Associação entre as classes de rocha e as classes de suporte de túneis

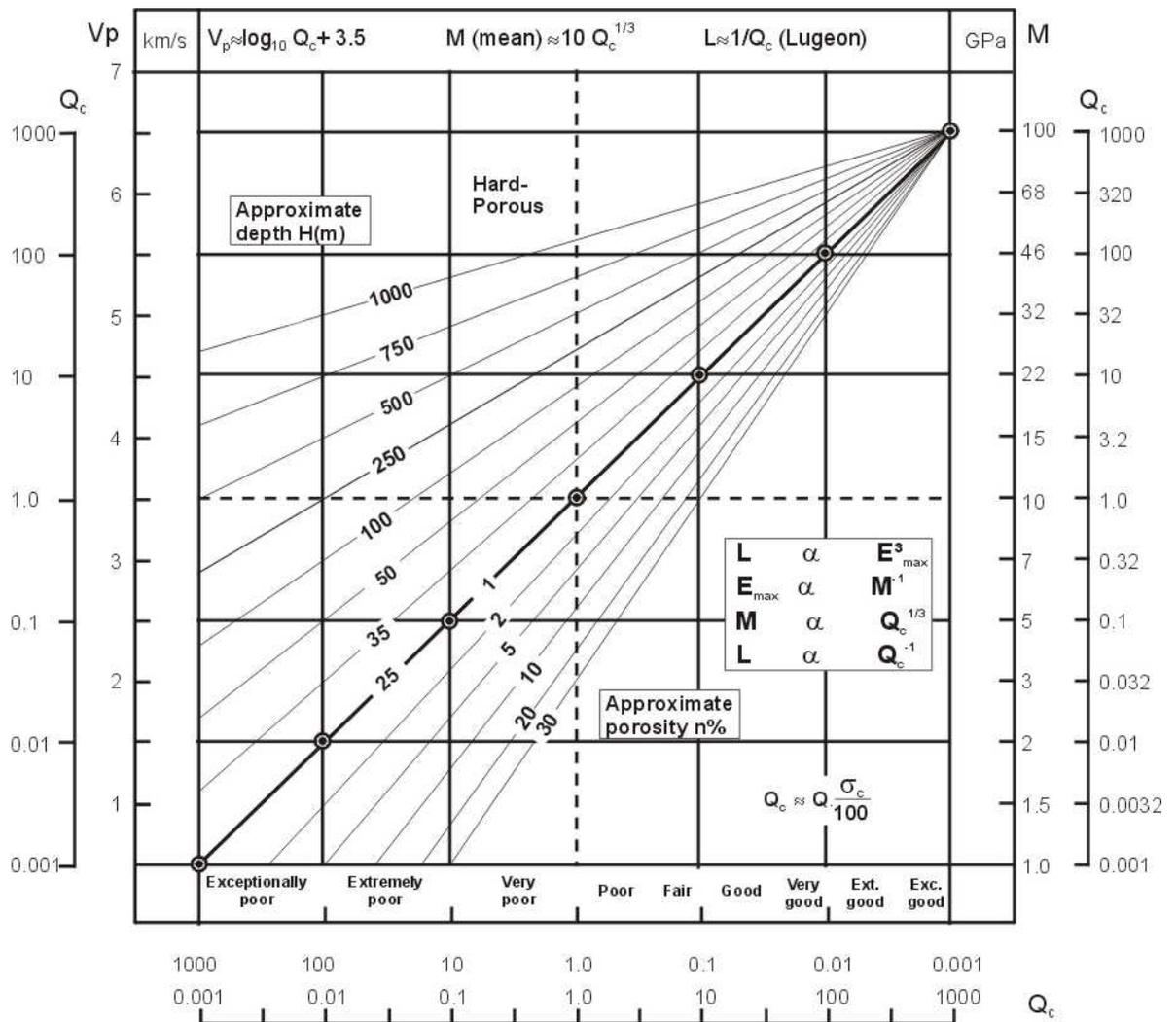


Figura 3 Relação entre velocidade sísmica (V_p) e a qualidade do maciço rochoso