



**Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares**

**Métodos Geofísicos em Obras Lineares**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Sergio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro, março de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares**

## **Métodos Geofísicos em Obras Lineares**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Sergio Augusto Barreto da Fontoura**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Franklin Antunes**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**José Araruna Tavares Jr.**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de março de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares**

Formada em engenharia civil, ênfase em geotecnia, pela PUC-Rio em 2005. Durante o curso foi bolsista do PRH-07 da ANP, quando tomou contato pela primeira vez com métodos sísmicos. Engenheira civil da Petrobras desde 2006, trabalha desenvolvendo projetos de faixas de dutos.

#### Ficha Catalográfica

|   |
|---|
| <p>Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto</p> <p>Métodos geofísicos em obras lineares / Ana Cecília Campello Pereira Porto Soares ; orientador: Sérgio A. B. da Fontoura. – 2009.</p> <p>127 f. : il.(color.) ; 30 cm</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>1. Engenharia civil – Teses. 2. Geotecnia. 3. Geofísica rasa. 4. Investigação de campo. 5. Perfuração direcional horizontal. 6. Túneis. I. Fontoura, Sérgio A. B. da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.</p> |
|---|

CDD: 624

A todos que de alguma forma me ajudaram ao longo  
de todos estes anos de estudo.

## Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por terem me mostrado que o conhecimento é o que existe de mais precioso, e por terem se esforçado para me dar o que havia de melhor. Conto com vocês na próxima fase. Aos meus irmãos, por aguentarem a sobrecarga nesses últimos 2 anos - agora acabou a desculpa!

Edu, você sabe que teve um papel importante nesse trabalho, não apenas com as revisões, mas também aguentando meus medos e insegurança. Obrigada por todo o apoio e carinho.

Professor Sérgio, obrigada pela confiança e pela paciência com minhas 'idas e vindas'. Sua orientação desde os tempos de graduação me trouxe até aqui.

Aos amigos, que nem sempre se pode ter tão perto quanto se gostaria, agradeço pela amizade. As conversas e os risos – pessoal ou virtualmente – sempre me recuperaram nas horas mais difíceis.

Agradeço à minha avó por todo o carinho e doces maravilhosos para repor as energias.

À minha madrinha, umas das pessoas que mais me fez a clássica pergunta 'E a dissertação?', me lembrando da importância de me esforçar sempre mais, muito obrigada.

A todos os familiares, vocês sabem que para agradecer a cada um individualmente seria necessário escrever quase uma nova dissertação, mas isso não diminui em nada a importância de cada um de vocês. Obrigada por todo o apoio.

Ao pessoal do GTEP, de hoje e de ontem, de quem aprendi tanto. Mércia, Leiderman, Freddy, Shelly, Suzana, Evânia, Olga(s), Nelly, Nelson, Flávia, Bruninha, cada um de vocês teve que me aturar e me ajudou - cada qual à sua maneira - a completar esse trabalho.

À equipe do EDUT, que me ensina uma nova lição a cada dia de nossa divertida convivência – Ralfo, Slow, Tales, Graciela, Dora, Lindemberg, obrigada por me aguentar falando desta dissertação diariamente.

Agradeço em especial à Michelle e ao Jakson, pois foi trabalhando com vocês que entendi melhor o tema que deveria abordar. Essa dissertação também é de vocês.

À Petrobras, por permitir a publicação deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro no início deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, obrigada pela ajuda a cada vez que eu passava como um furacão pela secretaria.

Em um trabalho de 3 anos, certamente há mais pessoas a quem se deve agradecimentos do que é possível guardar na memória. A todos os que me ajudaram, e por ventura eu tenha esquecido, meu muito obrigada.

## Resumo

Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da. **Métodos Geofísicos em Obras Lineares**. Rio de Janeiro, 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O uso de métodos geofísicos nas engenharias civil, de minas e ambiental cresceu significativamente nas últimas décadas, e continua se expandindo na medida em que há uma queda em seus custos, decorrente do maior domínio da metodologia por parte de especialistas, bem como um maior conhecimento das técnicas existentes por parte dos engenheiros, que geralmente são os responsáveis por especificar as técnicas de investigação em um empreendimento. Este trabalho apresenta alguns dos métodos de investigação rasa mais utilizados, analisando-os do ponto de vista de sua aplicação em obras lineares. São analisados ainda alguns casos de estudos realizados, apresentando-se por fim uma sugestão de fluxograma de trabalho a partir das lições aprendidas nestes casos.

## Palavras-chave

Geotecnia, Geofísica Rasa, Investigação de Campo, Perfuração Direcional Horizontal, Túneis



## Abstract

Soares, Ana Cecília Campello Pereira Porto; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da (Advisor). **Geophysical Methods applied to Linear Constructions**. Rio de Janeiro, 2009. 127p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The use of geophysical methods in Civil, Environmental and Mining Engineering has significantly grown over the past years, and continues to grow due to lower costs, which is a consequence of the greater knowledge by specialists, as well as more access to information on its benefits by engineers, usually the ones to define the survey methods. This piece presents some of the most used methods of shallow investigation, analyzing them based on their applicability on linear structures. Some real cases are presented and studied, and a suggestion of workflow is made based on the lessons learnt on those cases.

## Keywords

Geotechnics, Shallow Geophysics, Field Investigation, Horizontal Directional Drilling, Tunnelling

## Sumário

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 1      | Introdução                                     | 16  |
| 1.1.   | Generalidades                                  | 16  |
| 1.2.   | Obras lineares e transporte                    | 16  |
| 1.3.   | Projeto de obras lineares                      | 18  |
| 1.4.   | Levantamentos de Campo                         | 20  |
| 1.5.   | Objetivo                                       | 23  |
| 1.6.   | Escopo   | 23  |
| 2      | Métodos indiretos para investigação geotécnica | 24  |
| 2.1.   | Introdução                                     | 24  |
| 2.1.1. | Potenciais versus Ativos                       | 25  |
| 2.1.2. | Superfície versus Downhole                     | 25  |
| 2.1.3. | Planejando uma Aquisição                       | 26  |
| 2.2.   | Métodos sísmicos                               | 27  |
| 2.2.1. | Sísmica rasa de reflexão                       | 32  |
| 2.2.2. | Sísmica de refração                            | 36  |
| 2.2.3. | Sub-bottom profiler                            | 41  |
| 2.3.   | Métodos elétricos e eletromagnéticos           | 43  |
| 2.3.1. | Caminhamento elétrico                          | 45  |
| 2.3.2. | Ground penetrating radar                       | 51  |
| 3      | Casos e exemplos                               | 56  |
| 3.1.   | O projeto de túneis                            | 56  |
| 3.1.1. | Apresentação de um caso                        | 60  |
| 3.2.   | Perfuração Direcional Horizontal               | 74  |
| 3.2.1. | Caso 1: Rio Paraíba do Sul                     | 78  |
| 3.2.2. | Caso 2: substituição de trecho                 | 92  |
| 4      | Conclusões                                     | 102 |
| 4.1.   | Casos Estudados                                | 102 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 4.2. Fluxograma de Investigação | 104 |
| 4.3. Classificação de maciço    | 106 |
| 5 Referências bibliográficas    | 107 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Diversas opções de traçado são estudadas antes da definição final  | 19 |
| Figura 2: Possibilidade de arranjos em métodos tipo 'downhole'   | 26 |
| Figura 3: Propagação da onda sísmica (a) Compressional (b) Cisalhante [8]  | 27 |
| Figura 4: Freqüência amostral de Velocidades de Onda P para diferentes litologias (adaptado de [9])                            | 29 |
| Figura 5: Exemplos de Wavelets (a) Morlet (b) Chapéu Mexicano  | 30 |
| Figura 6: O fenômeno de Faseamento   | 31 |
| Figura 7: Geometrias de aquisição sísmica 2D   | 34 |
| Figura 8: Empilhamento em método CMP   | 34 |
| Figura 9: Esquema de comparação entre onda direta e onda refratada   | 38 |
| Figura 10: Geometria de aquisição sísmica pelo método de refração  | 38 |
| Figura 11: Exemplo de software de processamento (a) First Break Picking (b) Tempo versus afastamento para diversas fontes [19] | 40 |
| Figura 12: Conceito do método GRM  | 40 |
| Figura 13: Equipamento SBP da marca Edge Tech [20]   | 41 |
| Figura 14: Conteúdo de água versus constante dielétrica [21]   | 45 |
| Figura 15: Equipamento ER 300 de Caminhamento elétrico, com detalhe de instalação do eletrodo no solo                          | 46 |
| Figura 16: Esquema dos pares de eletrodos de corrente (AB) e potencial (MN)  | 46 |
| Figura 17: Campo elétrico de um ponto de profundidade 'h'  | 48 |
| Figura 18: Arranjos de eletrodos mais usados   | 49 |
| Figura 19: GPR modelo Ramac I  | 52 |
| Figura 20: Uma escavação com TBM (a) Canteiro com anéis pré-moldados (b) Cabeça de corte                                       | 57 |
| Figura 21: (a) Escavação mecanizada  |    |

|  |    |
|--|----|
| (b) Perfuração para instalação de explosivos [26]  | 58 |
| Figura 22: Esquema da utilização de enfilagens,<br>com sobreposição para proteger a frente de escavação.   | 58 |
| Figura 23: Tabela de classificação pelo método Q   | 60 |
| Figura 24: Diretriz primária para o túnel (em azul) sobre modelo<br>digital de terreno. Em vermelho, lineamento significativo<br>interpretado como dique de diabásio [29]              | 61 |
| Figura 25: Esquema do projeto, com túnel associado a poço [29]   | 61 |
| Figura 26: Densidade de lineamentos foto-interpretados<br>na região do túnel [29]  | 62 |
| Figura 27: Sondagens diretas e indiretas realizadas no emboque [29]  | 63 |
| Figura 28: Perfil geológico do túnel, fruto do<br>mapeamento realizado [29]  | 64 |
| Figura 29: Sobreposição do perfil geológico com o<br>levantamento elétrico; destaque para as zonas milonitizadas<br>e com diques de diabásio [29]                                      | 65 |
| Figura 30: Seções sísmicas realizadas no emboque,<br>que identificaram 3 zonas distintas [29]  | 67 |
| Figura 31: Sobreposição de seção de resistividades<br>com camadas sísmicas [29]  | 68 |
| Figura 32: Sela topográfica à frente do emboque<br>previsto. (adaptado de [29])  | 69 |
| Figura 33: Zona de baixa resistividade, que parece estar<br>relacionada à sela topográfica [29]  | 69 |
| Figura 34: Equipamento realizando sondagem SM 05   | 70 |
| Figura 35: Sobreposição de dados de caminhamento elétrico<br>com sondagens realizadas (adaptado [29])  | 71 |
| Figura 36: Exemplos de brocas utilizadas para materiais<br>inconsolidados (Mill Tooth, ou dentes fresados) e materiais de<br>maior resistência (TCI, com insertos de Tungstênio). [31] | 74 |
| Figura 37: Fases da Perfuração Direcional (A) Furo Piloto<br>(B) Alargamentos (C) Puxamento da coluna  | 75 |
| Figura 38: Esquema do canteiro no lado da sonda (Rig Side)   | 77 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 39: Esquema do canteiro no lado da coluna de tubos (Pipe Side)   | 77  |
| Figura 40: Travessia do rio Paraíba do Sul  | 78  |
| Figura 41: Mapa geológico da região, com a travessia em destaque [32]   | 79  |
| Figura 42: Sondagens diretas e indiretas realizadas [29]  | 81  |
| Figura 43: Resultado da análise petrográfica por lâmina delgada [29]  | 82  |
| Figura 44: Corpos de prova retirados de testemunhos da SM 07 [29]   | 85  |
| Figura 45: Ponteira de metal utilizada no ensaio CERCHAR [29]   | 86  |
| Figura 46: Perfil de GPR interpretado [29]  | 87  |
| Figura 47: Linha transversal interpretada, especial interesse nos sinais hiperbólicos identificados [29]  | 87  |
| Figura 48: Perfil de Caminhamento Elétrico interpretado, com algumas fraturas inferidas na base do talude [29]  | 88  |
| Figura 49: Seção de sub-bottom profiler interpretada (adaptada de [29])   | 89  |
| Figura 50: Mapa de isopacas da travessia do Paraíba do Sul [29]   | 90  |
| Figura 51: Comparação entre o mergulho do topo rochoso nas margens direita (acima) e esquerda (abaixo). O ângulo de ataque é mais vantajoso na margem direita. [29] | 91  |
| Figura 52: Inclinação transversal do topo rochoso [29]  | 91  |
| Figura 53: Mapa geológico da região das duas travessias [39]  | 93  |
| Figura 54: Planilha de campo do Rio Mossoró [29]  | 94  |
| Figura 55: Planilha de campo do Rio Carmo [29]  | 95  |
| Figura 56: Estudos realizados no Rio Mossoró [29]   | 97  |
| Figura 57: Resultados de GPR e SBP do Rio Mossoró [29]  | 97  |
| Figura 58: Estudos realizados no rio Carmo [29]   | 98  |
| Figura 59: Resultados de GPR e SBP no rio Carmo [29]  | 98  |
| Figura 60: Perfil geológico-geotécnico do rio Mossoró [29]  | 100 |
| Figura 61: Perfil geológico-geotécnico do rio Carmo [29]  | 100 |
| Figura 62: Fluxograma sugerido para investigações geotécnicas   | 105 |

## Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Modais de transporte em relação às principais variáveis logísticas [4]  | 18 |
| Tabela 2: Técnicas de investigação versus fase de projeto [5]   | 21 |
| Tabela 3: Correlação entre velocidade sísmica e escavabilidade [12]   | 29 |
| Tabela 4: Propriedades elétricas dos materiais (adaptada de [21,22])  | 45 |
| Tabela 5: Estimativa de coeficiente de reflexão (adaptado de [21])  | 53 |
| Tabela 6: Correlação aproximada entre frequência, penetração do radar e resolução vertical (adaptado de [21,22]). Variabilidade está ligada à velocidade de propagação da onda no material. | 54 |
| Tabela 7: Material utilizado na primeira fase de investigação geológico-geotécnica [29]   | 62 |
| Tabela 8: Correlação entre classe de maciço e os índices RMR e Q [29]   | 66 |
| Tabela 9: Comprimento inferido para as classes rochosas ao longo do túnel [29]  | 68 |
| Tabela 10: Classificação geomecânica da sondagem SM 05  | 73 |
| Tabela 11: Identificação das amostras ensaiadas [29]  | 83 |
| Tabela 12: Resultados dos diversos ensaios realizados [29]  | 84 |
| Tabela 13: Resultados dos ensaios CERCHAR [29]  | 86 |

- *A Geofísica.*
- *Que é isso?*
- *A Geofísica é a ciência de ver, apalpar, medir as rochas que estão lá no fundo.*
- *Ver, como, se estão lá no fundo?*
- *Ver é modo de dizer. A Geofísica consiste na aplicação de uns tantos princípios da Física, por meio das quais os sábios adivinham o que não podem ver, nem apalpar. Espécie de Raios X do fundo da Terra.*

Monteiro Lobato, em 'O Poço do Visconde'.



# 1 Introdução

## 1.1. Generalidades

O uso de métodos geofísicos nas engenharias civil, de minas e ambiental cresceu significativamente nas últimas décadas, e continua se expandindo na medida em que há uma queda em seus custos, decorrente do maior domínio da metodologia por parte de especialistas, bem como do barateamento do equipamento necessário. O maior conhecimento das técnicas existentes por parte dos engenheiros, que geralmente são os responsáveis por especificar as técnicas de investigação em um empreendimento, também colabora para tornar os métodos geofísicos ferramentas cada vez mais comuns para a geotecnia.

Desde 1975, a International Society of Rock Mechanics – ISRM vem publicando periodicamente documentação técnica para orientação quanto ao uso destes métodos. As mais recentes dentre estas publicações datam desta década e apresentam os métodos sugeridos pela instituição para aquisições de superfície [1] e em escavações ou poços [2].

## 1.2. Obras lineares e transporte

São denominadas obras lineares aquelas que têm uma de suas três dimensões com extensão muito maior do que as outras duas. Este tipo de obra, que está mais comumente relacionado à infra-estrutura de transportes, costuma ser um empreendimento de porte considerável e, no Brasil, geralmente envolve investimento governamental.

Dentre os tipos mais comuns de obras cuja característica é linear, pode-se citar:

Rodovias: O meio de transporte mais largamente adotado no Brasil, por determinação estratégica em meados do século XX. São projetadas tendo-se em mente o tipo de tráfego que se espera para aquele trecho, pois este é o principal

determinante tanto do nível de esforço sobre a pavimentação quanto de geometria (ângulo para curvas, rampas, largura de pista) e obras especiais. Além deste, outros condicionantes são o relevo, a natureza dos terrenos atravessados (sua interação com a obra e necessidade de soluções especiais) e a existência de materiais naturais de construção (de grande importância para logística e custos).

Ferrovias: As chamadas estradas de ferro são ditas mais adequadas ao transporte terrestre de grandes volumes de produtos sólidos. Em termos de projeto, não diferem muito de rodovias, exceto pelo fato de que são as obras lineares com maior limitação. Essa limitação não se refere apenas à geometria da via, mas também a recalque admissível, possibilidade de alagamentos e outras características do terreno atravessado, uma vez que a interação entre a composição, sua infra-estrutura e o maciço onde ela está instalada é maior. É comum a necessidade de grandes movimentações de terra, túneis e grandes pontes para vencer obstáculos devido a estas limitações.

Dutovia: Dutos podem ser aéreos, submarinos ou enterrados. No Brasil, assim como em grande parte do mundo, os dutos enterrados são os mais comuns porque, ao enterrá-los, diminuem-se os riscos de acidentes, uma vez que eles ficam menos acessíveis à população em geral. O enterramento tem também a vantagem de reduzir a poluição visual e a interferência no uso da terra ou, no caso de dutos marítimos, menor influência de ondas e marés. Por outro lado, este método requer um nível de conhecimento do subsolo acima da média da construção civil, pois obras como estas envolvem escavação em solo e, muitas vezes, também em rocha. As limitações em termos de curvas e rampas, geralmente menos restritivas que para rodovias, dependem diretamente do diâmetro do duto e de sua pressão de funcionamento, mas também estão relacionados com as dificuldades da etapa construtiva.

Canais: São condutos, naturais ou artificiais, destinados a escoar águas com uma superfície livre [3]. Podem ser construídos a partir de cursos d'água existentes ou mesmo ser escavados em terra, de acordo com a necessidade. Constituem intervenções significativas e sua interação com o meio físico e biótico é bastante complexa; podem, portanto, causar profundas modificações no meio ambiente. Os canais podem ser divididos em três grupos, de acordo com a finalidade do uso da água conduzida por ele: canais de navegação, de retificação (cuja principal finalidade é o controle de cheias e processos erosivos-

deposicionais, em especial em áreas urbanas) ou de irrigação (para adução de água). Dependem desta finalidade diversos critérios de projeto, como geometria do canal, parâmetros de manutenção e admissão ou não de perdas d'água ao longo do canal, que influencia necessidade ou não de revestimento.

**Linhas de Transmissão:** Geralmente não são tratadas como meio de transporte, já que sua característica exclusiva impede sua conjugação com outros modais. No entanto, são obras lineares com características bastante interessantes, já que as investigações de solo tendem a ser em sua maioria pontuais (na localização esperada para os postes ou torres). Por outro lado, as cargas envolvidas (dinâmicas, no caso de torres, tanto pelo efeito do vento como em caso de falha do cabo) requerem conhecimento significativo das propriedades destes pontos. Os limitantes de curvas e rampas neste tipo de obra estão mais relacionados com o acesso para a manutenção do que com requisitos de funcionamento da linha em si.

Ao mesmo tempo condicionante e condicionado pela economia, um sistema de transporte deve ser analisado levando-se em conta 4 variáveis: disponibilidade, acessibilidade, economicidade e qualidade [4]. A opção por um meio de transporte em detrimento a outros, quando disponíveis, deve ser feito analisando-se estas 4 componentes (Tabela 1), e é indicado que também os projetos levem estes parâmetros em conta.

Tabela 1: Modais de transporte em relação às principais variáveis logísticas [4]

|                 | Ferrovia | Rodovia | Hidrovia    | Aerovia     | Dutovia |
|-----------------|----------|---------|-------------|-------------|---------|
| Disponibilidade | Linear   | Linear  | Superficial | Superficial | Linear  |
| Acessibilidade  | Pontual  | Linear  | Pontual     | Pontual     | Linear  |
| Economicidade   | Boa      | Regular | Ótima       | Baixa       | Boa     |
| Qualidade       | Regular  | Boa     | Baixa       | Ótima       | Ótima   |

### 1.3.

#### Projeto de obras lineares

Dutos, ferrovias, rodovias e linhas de transmissão têm como característica comum a linearidade, ou seja, têm uma dimensão significativamente maior do que as outras duas. Em termos práticos, isso quer dizer que se trata de obra de grande extensão, com especificidades tanto na fase de projeto quando na execução. Ela impõe, por exemplo, a necessidade de logística eficiente por conta das distâncias envolvidas; por outro lado, dependendo das condições, permite trabalhar em um maior número de frentes independentes, o que pode minimizar prazos.

Quando se fala em projeto, a fase primordial para uma obra linear é a definição do traçado, ou seja, o caminho pelo qual ela passará (Figura 1). O traçado de uma via é determinado inicialmente pelas necessidades econômicas, pois o transporte é um serviço indispensável uma vez que significa o alcance do mercado consumidor pela produção. Os pontos inicial e final, bem como diversos pontos intermediários que precisam ser atendidos por ela, são determinados por motivos econômicos ou estratégicos. Dados como capacidade, durabilidade e, freqüentemente, prazo para realização da obra também são definidos nesta fase por parâmetros equivalentes.

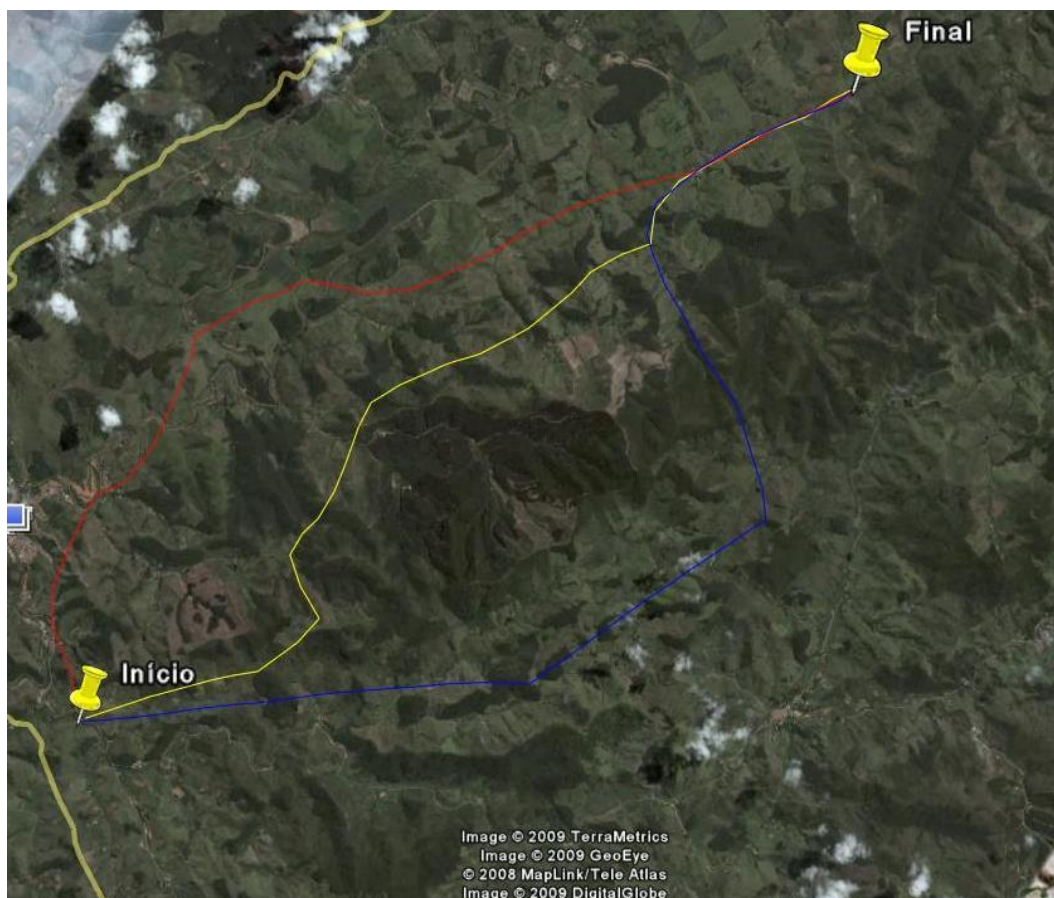


Figura 1: Diversas opções de traçado são estudadas antes da definição final (fonte: Google Earth)

Em seguida, o traçado pode sofrer modificações de acordo com dificuldades técnicas que possam ser encontradas pelo caminho, como cadeias montanhosas, grandes áreas alagadas etc., contanto que as condições anteriores se mantenham atendidas. A intenção destas modificações deve ser sempre a de baixar custos de implantação e/ou de operação da via, melhorando seu desempenho econômico. Dentre os parâmetros que podem influenciar o traçado estão as características geotécnicas das áreas a serem atravessadas. De acordo com dificuldades

construtivas e/ou custos de manutenção envolvidos, é possível modificar um traçado para otimizar o projeto.

Quando esta mudança não é possível, ainda assim a obtenção de informação sobre a geotecnia do traçado é importante, pois podem estar envolvidos nos projetos a escavação de valas e túneis, aterros e reaterros, taludes de corte, contenções, fundações e blocos de ancoragem – enfim, toda a gama de obras geotécnicas. Para a definição de métodos construtivos em situações especiais, bem como obtenção de parâmetros comuns de projeto como capacidade de suporte e inclinação máxima para taludes, projetistas necessitam de dados geológico-geotécnicos, para os quais são necessários estudos de campo.

#### **1.4. Levantamentos de Campo**

Um projeto linear acarreta áreas de investigação bastante extensas e, frequentemente, significativa variação nas características geotécnicas encontradas ao longo do traçado, o que por si só já representa um desafio em termos de levantamentos de campo. A determinação do nível de investigação em cada trecho de uma obra linear deve levar em conta diversos critérios, como “complexidade geológica da região, fase de estudo ou projeto, e até mesmo normas e diretrizes executivas estabelecidas por órgãos estatais, baseadas em obras realizadas e estatísticas”. [5]

Cada um dos critérios citados se refere a diferentes condicionantes, internos ou externos ao projeto. A fase de estudo ou projeto é o principal condicionante interno. Conforme se avança no desenvolvimento de um projeto, seu nível de detalhamento é crescente; conseqüentemente, aumenta a necessidade de informação e a qualidade que se espera dela. Da análise de viabilidade à manutenção das vias, passando por todas as fases de projeto e implantação, um grande número de métodos pode ser utilizado para a obtenção das informações geotécnicas necessárias. A Tabela 2 apresenta alguns dos mais utilizados, de acordo com sua aplicabilidade em cada um dos estágios citados.

Outros condicionantes internos para os levantamentos de campo são os custos envolvidos e prazos para sua realização. Infelizmente, é comum que estes condicionantes suplantem outros mais técnicos em diversos projetos, sendo

necessário que o responsável técnico exerça um papel de convencimento sobre o cliente para que os trabalhos necessários sejam realizados.

Tabela 2: Técnicas de investigação versus fase de projeto [5] Em preto, técnicas usuais e em cinza técnicas de uso eventual.

|               | <b>FASES</b>                                 | <b>Escolha do Traçado</b> | <b>Viabilidade Técnico – Econômica</b> | <b>Projeto</b> | <b>Construção</b> | <b>Conservação</b> |
|---------------|--|---------------------------|--|----------------|-------------------|--------------------|
|               | Análise dos dados disponíveis                | ■                         | ■                                      | ■              | ■                 | ■                  |
|               | Fotointerpretação geológica                  | ■                         | ■                                      |                |                   |                    |
|               | Reconhecimento geológico-geotécnico de campo | ■                         | ■                                      |                |                   |                    |
| Geofísica     | Sísmica de Refração                          | ■                         | ■                                      | ■              |                   |                    |
|               | Resistividade Elétrica                       |                           | ■                                      |                |                   |                    |
| Trado e poços | Para Cortes e Aterros                        | ■                         | ■                                      | ■              | ■                 | ■                  |
|               | Para Identificação de Jazidas                | ■                         | ■                                      | ■              | ■                 | ■                  |
|               | Análises Químicas                            |                           | ■                                      | ■              | ■                 | ■                  |
|               | Sondagens a percussão e ensaios 'in situ'    |                           | ■                                      | ■              | ■                 | ■                  |
| Laboratório   | Ensaio de Caracterização                     |                           | ■                                      | ■              | ■                 |                    |
|               | Ensaio Especial                              |                           |  | ■              | ■                 | ■                  |
|               | Acompanhamento técnico das obras             |                           |  |                | ■                 | ■                  |
|               | Monitorização                                |                           |  | ■              | ■                 | ■                  |

Os órgãos estatais são um componente cada vez mais relevante em todas as fases de um projeto, sendo os mais atuantes os órgãos ambientais. Dependendo da região a ser afetada, os requisitos de investigação impostos pelo IBAMA ou órgãos estaduais podem ter grande peso, especialmente no cronograma do projeto. Não é incomum no Brasil de hoje que um projeto tenha que ser profundamente reformulado ou mesmo que se torne inviável por questões ambientais.

Outros órgãos relevantes e que devem ser contatados em qualquer obra de grande extensão são CPRM e DNIT, dentre outros. Em casos específicos, onde haja interferência com áreas de interesse arqueológico, entram em ação também órgãos como o IPHAN, cujas atividades podem até mesmo parar uma obra já em execução. Convém, portanto, uma investigação da área a ser estudada também por este prisma.

A complexidade geológica da região é um critério primordialmente técnico. Refere-se à variabilidade de ambientes geológico-geotécnicos a serem atravessados pela obra, e, conseqüentemente, está diretamente relacionada ao volume de investigações necessário para caracterizar adequadamente estas unidades. Não apenas é condicionante primordial em qualquer fase de projeto, como costuma estar diretamente relacionada aos requisitos ambientais. Pode ser quantificada ainda nos primeiros momentos do projeto, com a utilização de mapeamentos geológicos existentes e, quando disponíveis, interpretação de fotos aéreas.

Por conta da continuidade inerente a este tipo de obra, em determinadas situações é necessário também obter informações contínuas, ao longo do traçado e em profundidade, para subsidiar tanto o projeto propriamente dito, quanto requisitos legais, ao contrário de obras com outras características, para as quais informações pontuais podem ser suficientes. Isto ocorre em áreas onde o comportamento do solo ou da rocha precisa ser conhecido com maior confiança para um bom detalhamento do projeto, garantindo maior segurança e melhor estimativa de custos.

É o caso de travessias de rios, especialmente aqueles com grande potencial de transporte de sedimentos; regiões de túneis, sejam em maciços terrosos ou rochosos; áreas de baixada, com materiais moles cujos recalques precisem ser estimados; dentre outros. Nestas situações, para uma melhor compreensão do subsolo, é comum a combinação de métodos diretos e indiretos de sondagem,

combinação essa que se corretamente utilizada permite a obtenção de um bom modelo da subsuperfície rasa.

### **1.5. Objetivo**

O objetivo deste trabalho é apresentar os métodos geofísicos aplicáveis ao caso de obras lineares, que envolvem mecânica de rochas e de solos, bem como condicionantes externas e, frequentemente, necessitam de dados contínuos. Pretende-se identificar as condições de aplicabilidade destes métodos, os requisitos para bons resultados e possibilidade de combinação de diferentes metodologias, de modo que o engenheiro interessado em utilizar estas técnicas possa definir um programa de investigação que atenda corretamente às necessidades de seu projeto.

### **1.6. Escopo**

Inicialmente, será apresentada revisão bibliográfica sobre os métodos que se entende mais utilizados e/ou promissores para levantamentos com vistas em engenharia geotécnica. Em seguida, serão apresentados alguns casos históricos, em que estes métodos foram utilizados de forma integrada ou individual, com diferentes fins investigativos. Conclui-se fazendo algumas observações e propondo um fluxograma básico para uma investigação de superfície utilizando-se métodos indiretos.



## 2

## Métodos indiretos para investigação geotécnica

### 2.1.

#### Introdução

Na fase de investigação que antecede um projeto de engenharia, o mais comum é utilizar métodos diretos como sondagens à percussão, trado e rotativas, abertura de poços e até mesmo trincheiras para obter informações sobre o subsolo. O espaçamento entre estas investigações, no entanto, pode chegar facilmente a centenas de metros, por questão de custos, ou até milhares de metros, em casos de áreas com investigação restrita por questões ambientais ou dificuldade de acesso dos equipamentos de sondagem. Existem, contudo, situações de obra e pontos de maior sensibilidade para os quais este padrão de investigação não é suficiente.

Nestes casos, é necessário recorrer a técnicas indiretas de sondagem, que permitam obter maiores informações sobre o subsolo. A geofísica é uma ciência que desenvolve técnicas de investigação indireta utilizando conceitos físicos, com aplicação em geologia e geotecnia.

Os métodos geofísicos são aplicados à geotecnia baseados no conceito de que, se duas camadas geotécnicas são distintas, então suas propriedades físicas também o são. Ocorre que essa premissa nem sempre é válida, e este é um dos motivos pelos quais qualquer método indireto precisa ser coordenado com métodos diretos para correta interpretação. No entanto, mesmo quando muito pouca informação direta é possível, a coordenação de mais de um método indireto pode dar bons resultados.

Isso porque, ainda que seja possível que duas camadas distintas tenham uma propriedade em comum, dificilmente isso ocorrerá com todas as propriedades físicas, e por isso a combinação das informações de diferentes métodos gera um quadro mais realista do subsolo. É o caso, por exemplo, da exploração geofísica de hidrocarbonetos em áreas marítimas, que se utiliza basicamente de métodos gravimétricos, magnetométricos e sísmicos para a detecção de possíveis campos

produtores, já que a perfuração de poços para a obtenção de dados diretos tem custos impeditivos.

### **2.1.1.**

#### **Potenciais versus Ativos**

Os métodos geofísicos podem ser separados de forma simples entre métodos potenciais e métodos ativos. Os métodos potenciais são aqueles que medem uma propriedade sem precisar emitir qualquer sinal, enquanto os ativos são baseados na emissão de alguma forma de energia e na leitura de sua modificação pela interação com o subsolo. Essa energia pode ser mecânica, elétrica, etc.

A margem de erro em medidas com métodos potenciais pode ser grande, chegando em alguns casos à ordem de metros, o que numa obra linear significa que a propriedade medida tem grandes chances de não representar a área de interesse do levantamento. Além disto, quando aplicados em superfície, não fornecem informações em profundidade, portanto sua utilidade é mais restrita.

No caso dos métodos ativos, a margem de erro está intimamente ligada à fonte utilizada – fontes com maior energia tendem a cometer erros menores, pois estão menos sujeitas a interferências externas. Existem diversos métodos que fornecem informações que variam com a profundidade e vêm sendo aplicados comumente com fins de engenharia geotécnica.

### **2.1.2.**

#### **Superfície versus Downhole**

Os métodos geofísicos podem tanto ser aplicados em superfície quanto em aberturas em subsuperfície, como furos de sondagem e túneis, caso em que são nomeados tipo ‘downhole’. Alguns dos métodos downhole mais conhecidos são sísmica entre-poços, tomografia elétrica entre-poços, VSP (perfilagem sísmica vertical, da sigla em inglês) e ‘logging’ de propriedades como resistividade, radioatividade e velocidade ao longo das paredes do furo (Figura 2). A ISRM inclui ainda neste grupo as metodologias de investigação à frente de escavação de túneis [2].

No início, os métodos downhole eram maioria nas aplicações de geofísica rasa; mais recentemente, no entanto, a geofísica de superfície vem se firmando,

com diversos métodos recomendados para este tipo de investigação. Neste trabalho, serão analisados apenas métodos de superfície.

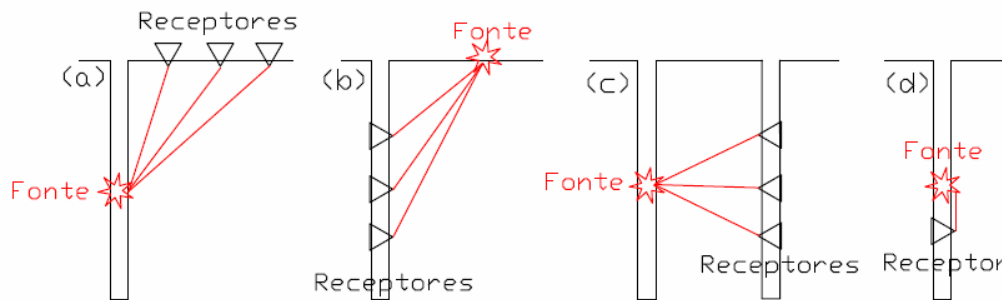


Figura 2: Possibilidade de arranjos em métodos tipo 'downhole'

### 2.1.3. Planejando uma Aquisição

Em suas recomendações [1,6], a ISRM lista os principais tópicos com que devemos nos preocupar ao planejar e realizar uma aquisição geofísica com fins em engenharia geotécnica. São eles: Aplicabilidade; Planejamento; Aquisição; Processamento; Interpretação; e Resultados.

Ao se planejar uma aquisição geofísica com fins geotécnicos, deve-se ter em mente que os diferentes métodos existentes são aplicáveis em casos distintos, e não darão bons resultados em todas as situações. É imprescindível, portanto, que este planejamento seja antecedido por um levantamento preliminar de dados geológicos sobre a região em estudo, de modo a permitir a correta escolha dos métodos geofísicos mais adequados.

A aquisição, assim como o processamento, deve ser feita com equipamento e cuidados adequados ao caso. É característico dos métodos geofísicos que eles descrevam o subsolo através de modelos, que, por definição, não são imagens perfeitas. A experiência do intérprete responsável pelo processamento e análise dos dados obtidos é quase tão importante quanto a correta escolha do método e aquisição destes dados.

Pode-se obter de métodos geofísicos informações tanto qualitativas como quantitativas, dependendo das características do local em estudo bem como do método utilizado. Alguns parâmetros geomecânicos de obtenção possível são grau de fraturamento de um maciço rochoso e resistência de um solo, dentre outros, dependendo do método utilizado e das características locais.

## 2.2. Métodos sísmicos

Os métodos sísmicos são métodos ativos que se utilizam de ondas sísmicas. Uma onda sísmica é uma perturbação mecânica do meio “que se propaga sem deslocamento de material, apenas energia” [7]. Como qualquer onda, suas principais características são frequência, comprimento de onda e amplitude, sendo que as duas primeiras são inversamente relacionadas para um determinado meio de propagação.

Existem vários tipos de ondas sísmicas, mas aquelas mais comumente utilizadas para estudos geotécnicos são as ondas compressoriais e as ondas cisalhantes. Elas diferem entre si pelo tipo de perturbação que geram em um meio: enquanto nas compressoriais a perturbação é paralela à direção de propagação da onda, nas cisalhantes ela é perpendicular. (Figura 3) Essa diferença acarreta também propriedades específicas que são aproveitadas pelos métodos sísmicos. Os métodos convencionais de sísmica utilizam apenas ondas compressoriais, pois sua aquisição é mais simples e barata, mas existem métodos aplicáveis a situações específicas que também utilizam as ondas cisalhantes, devido a propriedades que veremos a seguir.

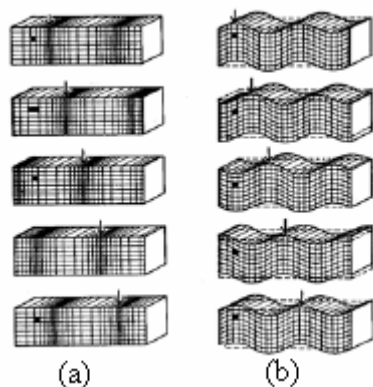


Figura 3: Propagação da onda sísmica (a) Compressional (b) Cisalhante [8]

Quando uma onda sísmica se propaga em subsuperfície, ela gera deslocamentos nas partículas constituintes deste meio, que, por sua vez, geram tensões sobre o meio. A relação entre tensão e deformação, em um meio elástico, é dada pela Lei de Hooke generalizada, que para um corpo isotrópico toma a seguinte forma:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \mu \gamma_{ij} \quad (2)$$

As constantes  $\lambda$  e  $\mu$  são chamadas Constantes de Lamé e representam o meio isotrópico.  $\mu$  é também chamada módulo de rigidez. No estudo sísmico, mais comum do que utilizar  $\lambda$  é utilizar  $K$ , o chamado ‘módulo bulk’ ou incompressibilidade do material, que é definido como:

$$K = \frac{\Delta \tau}{(\Delta V / V)} = \lambda + \frac{2}{3} \mu \quad (3)$$

Ao analisarmos a Lei de Hooke em conjunto com a Segunda Lei de Newton e o Teorema da Divergência de Gauss [9], obtemos as relações entre as propriedades elásticas do meio e a velocidade de propagação das ondas compressoriais e cisalhantes. Se escritas em função dos módulos bulk e de rigidez, estas relações tomam a seguinte forma:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (5)$$

Nestas equações,  $\rho$  representa a densidade do meio, enquanto  $V_p$  e  $V_s$  são, respectivamente, as velocidades de propagação da onda compressional e da onda cisalhante. São também chamadas ondas primárias e secundárias, respectivamente, por conta de sua ordem de chegada (da comparação entre as equações,  $V_p > V_s$ ). As impedâncias compressional e cisalhante de um meio são definidas como

$$Z_p = V_p \cdot \rho \quad (6)$$

$$Z_s = V_s \cdot \rho \quad (7)$$

A variação de impedância (que depende de  $K$ ,  $\mu$  e  $\rho$ ) rege o fenômeno de reflexão e transmissão da onda elástica na interface entre dois meios. Esta é a propriedade que o método sísmico pretende identificar para individualizar as diferentes camadas que constituem o subsolo, que é tomado como um meio elástico.

$K$ ,  $\mu$  e  $\rho$  são influenciados por:

- minerais componentes do subsolo;
- níveis de compactação e consolidação da camada;
- fluido que preenche os poros;

- estrutura da rocha;

dentre outros parâmetros. No caso de materiais inconsolidados, o fluido intersticial tem um impacto muito maior na propagação de ondas acústicas no material. [10]

Embora as variações das propriedades mecânicas possam ser usadas para identificar a mudança entre camadas, seus valores absolutos não têm tanto significado para caracterização geológica. Isto porque, os intervalos de velocidades esperadas para cada tipo litológico são grandes e há grande sobreposição de valores, como se pode ver na Figura 4.

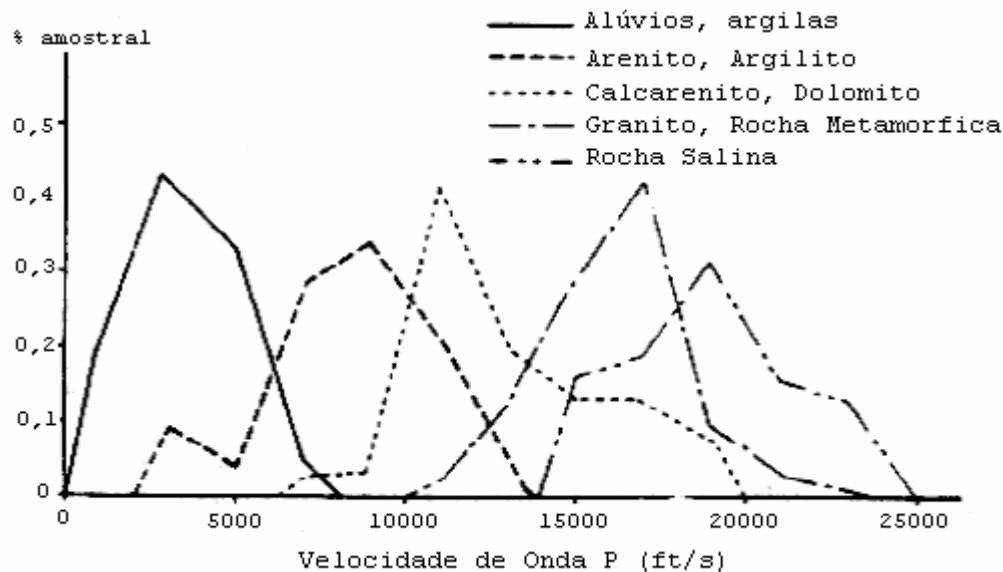


Figura 4: Freqüência amostral de Velocidades de Onda P para diferentes litologias (adaptado de [9])

Além de servir como indicador qualitativo, a velocidade de onda P obtida em levantamentos sísmicos pode ser utilizada para estimar, a categoria de escavabilidade de um material de acordo com REDAELLI e CERELLO [12], conforme pode ser visto na

Tabela 3. No caso de solos, em aquisição multicomponente, estudos indicam que a velocidade de onda S pode ser correlacionada com a resistência ao cisalhamento do solo. [11]

Tabela 3: Correlação entre velocidade sísmica e escavabilidade [12]

| Velocidade de Ondas Sônicas (m/s) | Característica do Material     | Categoria do Material |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 300 a 800                         | Escavável (equipamento normal) | 1 <sup>a</sup>        |
| 800 a 2200                        | Escarificável (trator D-9)     | 1 <sup>a</sup>        |
| 2200 a 2600                       | Transição                      | 2 <sup>a</sup>        |
| >2600                             | Escavação por explosivo        | 3 <sup>a</sup>        |

Os métodos sísmicos têm sua resolução e penetração diretamente influenciadas pela frequência da onda utilizada. As frequências mais altas, que correspondem a comprimentos de onda menores, permitem identificação de camadas menos espessas, mas sofrem maior efeito de atenuação pelos meios geológicos e por isso não alcançam grandes profundidades [13].

No caso de investigações rasas, essa característica tem grande implicação. As camadas mais superficiais, se comparadas com as mais profundas, costumam ser menos espessas, e para identificá-las é necessário utilizar comprimentos de onda menores (que correspondem a frequências mais altas). Ao mesmo tempo, as camadas menos consolidadas tendem a gerar maior atenuação de altas frequências (por oferecerem maior resistência à passagem da onda), dificultando a penetração da onda.

Um sistema de aquisição sísmica é constituído, basicamente, de quatro partes: fontes, receptores, equipamentos de controle e de gravação de dados. A fonte é o dispositivo responsável por gerar a perturbação que dá origem à onda sísmica. A fonte que consegue liberar toda a sua energia em um único instante, chamada 'spike', é considerada a fonte sísmica ideal, pois o processamento necessário neste caso é bem menos custoso e a interpretação, mais simples. No entanto, ela é irrealizável, e na prática são utilizados diferentes tipos de fontes. A forma básica de seu sinal é chamada wavelet, que é aproximada por uma função matemática, um dos parâmetros para o processamento dos sismogramas (Figura 5).

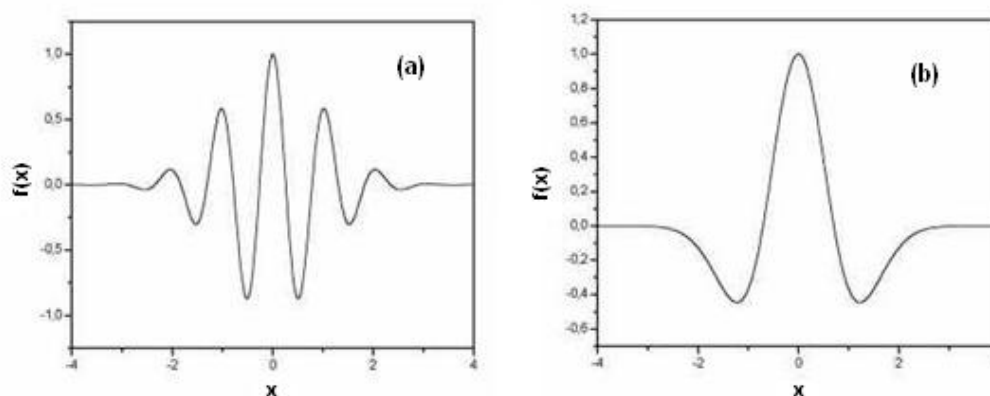


Figura 5: Exemplos de Wavelets (a) Morlet (b) Chapéu Mexicano

O receptor é o sensor que identifica as deformações sofridas pelo meio na passagem da onda mecânica. Existem sensores que funcionam acoplados ao solo (geofones) e aqueles desenvolvidos especialmente para operar sobre lâmina

d'água (hidrofonos). São propriedades importantes de um receptor sua sensibilidade (qual o deslocamento mínimo perceptível para o aparelho) e sua interação com o solo (eles devem ser solidários para correta captação da perturbação). A garantia da boa instalação do geofone é uma das características que causa uma demora maior nas aquisições terrestres, não sendo, no entanto, impactante em água. Mais recentemente, o uso (ainda restrito) de acelerômetros como sensores tem melhorado os resultados do método sísmico por representar melhor condição de ambas as propriedades. O resultado obtido por cada sensor, em uma aquisição, é chamado traço.

O traço é um conjunto de dados discretos adquiridos a intervalos de tempo regulares. A propagação da onda em subsuperfície, no entanto, é um fenômeno contínuo. O teorema da amostragem de Nyquist estabelece que, para que uma função contínua possa ser reconstruída a partir de dados não contínuos, é necessário que se obtenha pelo menos duas amostras por período desta função. Portanto, o intervalo entre as leituras do receptor (amostragem,  $\Delta t$ ) pode ser relacionado à maior frequência que se pretender adquirir (frequência de Nyquist,  $f_N$ ) por

$$\Delta t = \frac{1}{2f_N} \quad (8)$$

Quando a amostragem é inferior ao determinado pela equação 8, ocorre o efeito de faseamento (aliasing), que gera uma distorção do dado adquirido (Figura 6). Se a amostragem utilizada é muito maior, gera-se um excesso de dados a serem processados, aumentando com isto o custo, sem um correspondente aumento de qualidade. Efeito semelhante, chamado faseamento espacial, pode ocorrer se o espaçamento entre receptores for muito grande, mas sua antecipação é mais difícil por depender de características do subsolo que normalmente não se conhece antes da aquisição.

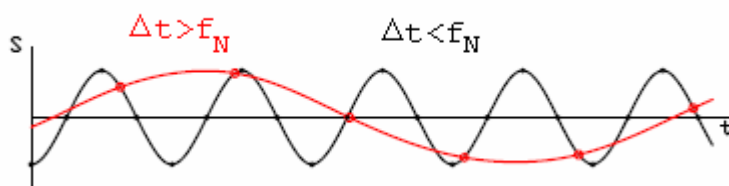


Figura 6: O fenômeno de Faseamento



A correta gravação dos dados é imprescindível para o sucesso do método sísmico. O equipamento deve ser confiável, ter grande capacidade (memória) e velocidade de acesso, já que o volume de dados de um sismograma pode ser significativo. O equipamento de controle, chamado sismógrafo, é utilizado para controlar os parâmetros da aquisição, como o intervalo de amostragem e seu tempo total. Ele conversa com os outros componentes, fazendo a interface do sistema com o usuário.

### **2.2.1. Sísmica rasa de reflexão**

A Sísmica Rasa de Reflexão (SSR – Shallow Seismic Reflection) nada mais é do que o método sísmico convencional aplicado a pequenas profundidades. Sua utilização em escala comercial se tornou possível a partir do barateamento da aquisição sísmica, e conseqüente aumento de equipamentos disponíveis, na década de 1970.

Normalmente, utiliza-se como receptores geofones verticais (que registram apenas o deslocamento vertical da superfície), e como fonte uma marreta sobre placa metálica – que gera apenas ondas compressionais. Outras opções de fontes incluem explosivos, caminhões vibratórios (para ondas S) e, em lâmina d'água, canhões de ar, que em caso de necessidade de repetibilidade nos resultados podem ser usados também em terra, instalados em buracos preenchidos com água.

#### **2.2.1.1. Fundamentos teóricos e aquisição**

Quando uma onda sísmica, propagando-se em um meio, encontra uma mudança brusca de impedância, ela sofre o fenômeno de reflexão, repartindo-se em três: uma parte é transmitida ao meio seguinte, uma parte é refletida de volta ao meio incidente, e uma terceira passa a se propagar paralelamente à superfície de contato entre os dois meios. Eventualmente há também o fenômeno de conversão, com a formação de ondas S a partir de ondas P e vice-versa. A partição da energia da onda nestas novas componentes depende do contraste entre as propriedades de ambos os meios e do ângulo de incidência da onda.

A sismica de reflexão pretende modelar o subsolo utilizando-se do segundo grupo, as ondas refletidas, que retornam à superfície e alcançam os receptores lá implantados. Ao passar, a onda gera um deslocamento no terreno, que é identificado pelo sensor – a amplitude de determinado ponto de um traço representa o deslocamento medido no momento correspondente.

Na sismica rasa, por definição, as profundidades de investigação são baixas se comparadas com as aquisições convencionais. No caso da sismica de reflexão, uma consequência disto é o espaçamento entre fonte e receptor ser limitado pelo ângulo de incidência crítico – a partir do qual, pela lei de Snell-Descartes (equação 9), não há onda refletida, apenas refratada e transmitida.

$$\frac{\sin i}{V_i} = \frac{\sin t}{V_t} \quad (9)$$

O ângulo de incidência crítico é definido como aquele para o qual a ângulo de transmissão é reto. Considerando uma superfície de reflexão plana, da geometria do problema temos que

$$\frac{\sin i}{V_i} = \frac{1}{V_t} \Rightarrow \frac{V_t}{V_i} = \frac{4h^2 + x^2}{2x} \quad (10)$$

Deste modo, a distância máxima ‘x’ entre fonte e receptor para a qual a onda refletida será captada é função do contraste de velocidades entre camadas e da profundidade de interesse da investigação. Este valor precisa ser estimado para a correta programação da aquisição, caso contrário é possível que haja desperdício de esforços, com a instalação de geofones que, por estarem muito distantes da fonte, não serão capazes de obter qualquer informação útil para este método.

Em caso de investigações de trechos de maior comprimento pode-se utilizar a concatenação de várias linhas sísmicas. Para que esta concatenação possa ser feita sem a perda de informações, é necessário que as linhas se sobreponham em determinados trechos, o que aumenta os custos bem como o tempo necessário para a aquisição.

A geometria da aquisição pode variar, dependendo da posição relativa entre fonte e receptores. A Figura 7 apresenta as mais comuns na aquisição 2D, que são a ‘central-shot’ (em que a fonte fica no centro da linha de receptores) e a ‘end-shot’ (com a fonte em um dos extremos da linha).

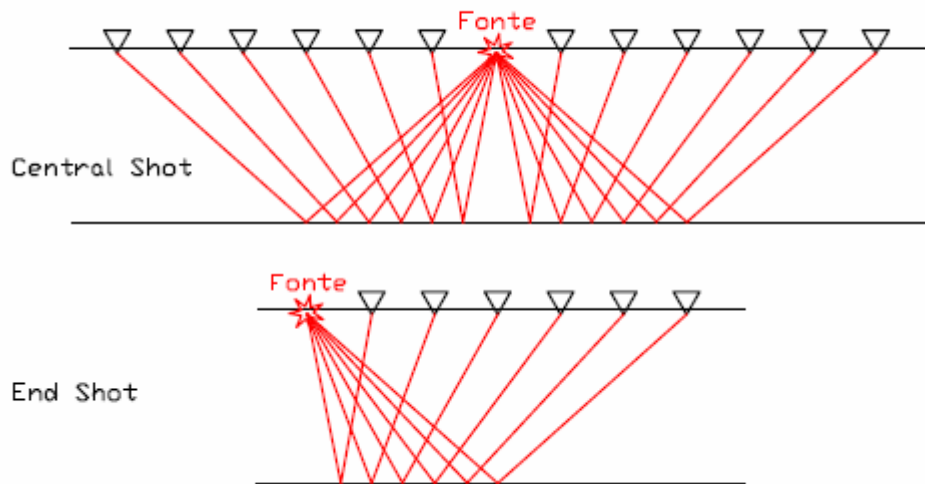


Figura 7: Geometrias de aquisição sísmica 2D

O uso da sísmica rasa é também limitado pelo problema de ruídos, que em determinadas situações podem superar em energia a própria fonte utilizada pelo método, comprometendo significativamente a qualidade dos dados. Filtros podem ser utilizados no processamento para a retirada de ruídos aleatórios, mas quando um ruído coerente (não-aleatório) está presente isto pode não ser suficiente. Um dos métodos utilizados para reduzir este efeito é o chamado CMP (Common Mid-Point) ou CDP (Common Depth Point). Trata-se de agrupar, em um mesmo traço, diversos outros que correspondam a um mesmo ponto de reflexão em subsuperfície. Quando esta soma é realizada, o efeito do ruído, coerente ou não, é significativamente reduzido, sendo acentuado o dado de interesse (Figura 8). Esta técnica é amplamente utilizada; no entanto, tem impacto negativo sobre o tempo para aquisição dos dados, já que é necessária redundância (chamada cobertura). O processo de empilhamento CMP pode ser realizado com ambas as geometrias de aquisição, apenas diferindo o número de linhas a serem utilizadas para uma mesma cobertura.

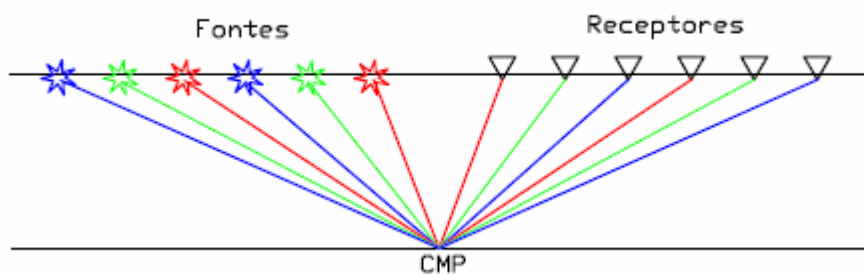


Figura 8: Empilhamento em método CMP

### 2.2.1.2.

#### **Processamento e análise de dados**

Os dados resultantes de uma aquisição sísmica são chamados sismogramas. O processamento de um sismograma envolve a utilização de variado leque de ferramentas para seu melhoramento, com o objetivo de transformá-lo em uma imagem realista da subsuperfície.

Não existe uma receita que seja a melhor opção para todos os casos, e por isso o processamento pode se tornar bastante complexo. É comum, quando se estuda uma área, escolher uma seção e com ela fazer testes com vários esquemas de processamento. Aquele que apresentar melhor resultado será utilizado para o resto das seções, podendo haver pequenas variações para eliminação de dados indesejáveis pontualmente. Em casos mais complexos, pode ser necessário um processamento específico e, por vezes, para visualizar bem determinada área da seção é preciso sacrificar a qualidade do resto da mesma.

O passo inicial do processamento sísmico convencional é aplicar alguma ferramenta de ganho - para compensar a perda de energia, que é progressiva com a profundidade alcançada pela onda (teorema de Huygens). Em seguida vem o chamado “empilhamento”. Trata-se de somar (ou “empilhar”) diferentes traços sísmicos que tenham pontos de reflexão em comum (CMP), buscando aumentar a razão sinal/ruído [14]. O passo seguinte, chamado “deconvolução”, é a aplicação de uma função matemática para retirada do efeito da fonte. Por fim, a migração é um processo que visa transformar as seções, colocando as camadas em suas posições reais. Este último passo é o mais demorado e também o que mais demanda esforço computacional.

Os filtros estão entre as ferramentas mais importantes no processamento. São operadores que modificam o sinal lido, com um objetivo específico. Podem ser citados os filtros de forma – que modifica a wavelet para uma forma desejada; filtros passa-banda – elimina frequências indesejadas, limitando o sinal à frequência que se quer estudar; filtros de predição – úteis em casos com reverberação. Existem vários programas de processamento de sinais disponíveis no mercado que incluem toda essa gama de ferramentas.

A determinação da velocidade de propagação da onda em cada camada é imprescindível para o processo de migração, bem como para a extração de propriedades do subsolo. A fase do processamento responsável por esta determinação é chamada Análise de Velocidades [15], e consiste basicamente em determinar qual valor de velocidade é capaz de horizontalizar determinado evento quando este é corrigido pela equação

$$t^2 = t_0^2 + \left(\frac{x}{V}\right)^2 \quad (11)$$

Esta expressão, que pode ser deduzida a partir do Teorema de Pitágoras, relaciona o tempo de trânsito  $t$ , velocidade  $V$  e distância fonte-receptor (offset,  $x$ ). Partindo-se do pressuposto de que as camadas em subsuperfície são horizontais, o valor de velocidade que permitir uma correção melhor deve ser a velocidade média quadrática (de todas as camadas acima) para aquela profundidade. A partir deste valor, é possível calcular a velocidade intervalar (individual da camada), que se pode tentar correlacionar com suas propriedades geomecânicas.

Uma das dificuldades encontradas no processamento é a separação entre a onda refletida e a refratada. Na sísmica profunda, a onda refratada raramente tem influência nos resultados; mas na sísmica rasa ela pode se sobrepor à onda refletida que se pretende interpretar, e precisa ser retirada durante o processamento. Por ser um 'ruído' coerente, no entanto, essa retirada pode ser bastante difícil. A mesma dificuldade é encontrada para retirar o sinal das ondas que são geradas pela fonte e se propagam pelo ar. [16]

Na interpretação do sismograma migrado, podem ser identificadas diversas estruturas geológicas, sendo o contraste de nível de compactação/coerência entre as camadas o mais relevante para registro neste método. Alguns exemplos são camadas de solo, especialmente o contato solo transportado - solo residual, topo rochoso, zonas de falha ou de muitas fraturas, blocos etc. dependendo das características locais e da qualidade da informação obtida.

### **2.2.2. Sísmica de refração**

O Método Sísmico de Refração foi, na verdade, o primeiro método de superfície a ser utilizado com bons resultados para análise de interfaces pouco

profundas, na investigação de maciços rochosos [9]. Consiste na instalação de receptores mais afastados da fonte, com vista em captar a onda sísmica refratada – que, conforme explicado (item 2.2.1), é a onda que se propaga na interface entre dois meios.

A sísmica de refração costuma ser usada para estudos extremos da subsuperfície: muito profundos (para estudos dos limites da crosta terrestre) ou bastante rasos, até 30 m de profundidade. O equipamento utilizado é basicamente o mesmo do método de reflexão, estando a diferença nos parâmetros de aquisição e no processamento dos dados.

### 2.2.2.1. Fundamentos Teóricos e Aquisição

A onda sísmica refratada é aquela que se propaga paralelamente à superfície de contato entre duas camadas com propriedades distintas, quando a velocidade de propagação da onda na camada de onde vem a onda (meio 1) é inferior à daquela que se segue (meio 2). Nestas situações, a teoria de Snell-Descartes nos indica a existência do chamado ‘ângulo crítico’, a partir do qual existe a tripartição da onda, e que pode ser calculado por

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin r}{V_2}; \sin r = 1 \rightarrow i_{\text{critico}} = \arcsin\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (\text{equação 12})$$

Quanto maior a distância entre fonte e receptor, maior o ângulo de incidência do raio. Por conta disto, a sísmica de refração é indicada para investigações rasas de maior extensão, pois os receptores devem ser instalados a distâncias maiores da fonte para que se colete preferencialmente a onda refratada.

A propagação da onda refratada é regida pelas propriedades do meio 2, ou seja, ela se propaga mais rapidamente que a onda direta e, a partir de determinado afastamento, é a primeira onda a chegar (Figura 9).

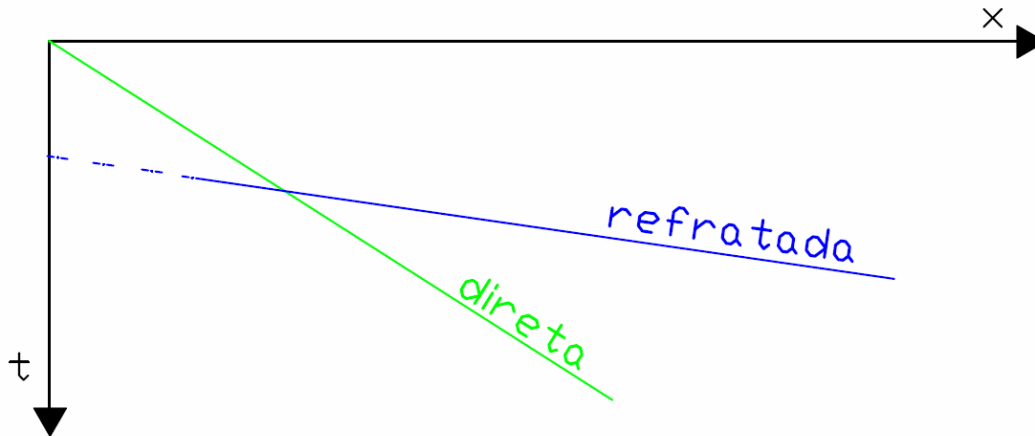


Figura 9: Esquema de comparação entre onda direta e onda refratada

A velocidade de cada camada é obtida diretamente a partir da inclinação do gráfico tempo de trânsito versus afastamento. Para que se possa fazer a correta interpretação das velocidades e espessuras das camadas, no caso de algumas das superfícies não serem horizontais, é necessário fazer mais de uma aquisição, mas com os receptores na mesma posição, mudando-se apenas a localização da fonte. São feitas aquisições em sentidos opostos (adiante e à ré), sendo normalmente realizada também uma aquisição com a fonte no meio da linha (Figura 10).

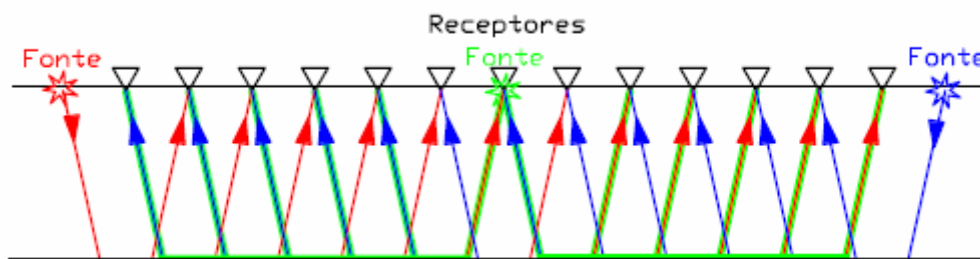


Figura 10: Geometria de aquisição sísmica pelo método de refração

Na sísmica de refração, o problema do ruído costuma ser solucionado com a realização de várias aquisições com a fonte e receptores no mesmo ponto, para aumentar a razão sinal/ruído. Como em geral o processo mais demorado é a instalação dos receptores, essa redundância não tem grande impacto sobre o tempo de realização da aquisição.

Barton [17] indica que o uso deste método no início das investigações para uma obra subterrânea em maciços rochosos rasos fornece “um perfil de  $V_p$  em função da profundidade que tem valor inestimável para uma melhor programação das investigações de sub-superfície, especialmente para a locação das sondagens para retirada de amostras e ensaios de permeabilidade”.

Isto porque, com pouca cobertura, o maciço costuma ter suas fraturas mais abertas, o que acentua a diferença de propriedades elásticas entre áreas de maior e menor fraturamento. O método de refração é especialmente indicado para identificar estas mudanças porque o percurso do raio refratado é paralelo às camadas, permitindo percorrer maior extensão no mesmo material.

A análise da redução da velocidade de propagação da onda em relação à da rocha matriz pode fornecer dados quantitativos sobre a densidade de fraturas do maciço, permitindo uma classificação geomecânica do mesmo. As condições das fraturas, como existência de preenchimento e rugosidade, no entanto, não impõe mudanças significativas à velocidade de propagação da onda e, portanto, não podem ser inferidas [18].

Uma das principais limitações do método é que, para que a onda refratada seja gerada, é necessário que a velocidade das camadas seja crescente com a profundidade (eq. 12). Quando uma camada tem velocidade menor do que a que se encontra acima, ela não será identificada pela sísmica de refração. Isto é comum em solos transportados, como colúvios e aluviões, e por isso quando o método é aplicado em tais condições geológicas deve-se atentar para esta possibilidade.

De forma geral, pode-se dizer que o método de refração é indicado principalmente para observar mudanças laterais na subsuperfície; já o método de reflexão obtém melhores resultados quando o interesse é verificar principalmente mudanças verticais nas propriedades, uma vez que não possui a limitação referenciada no parágrafo anterior.

#### **2.2.2.2.**

#### **Processamento e análise de dados**

O processamento de dados de sísmica de refração é mais simples do que aquele aplicado à reflexão. Após uma filtragem simples para retirada de ruídos grosseiros, passa-se à primeira etapa, que consiste na identificação das refrações – chamada “first break picking”, ou “escolha da primeira chegada”. Com os pontos escolhidos pelo operador, é possível criar um gráfico simplificado de tempo de trânsito versus afastamento (Figura 11).



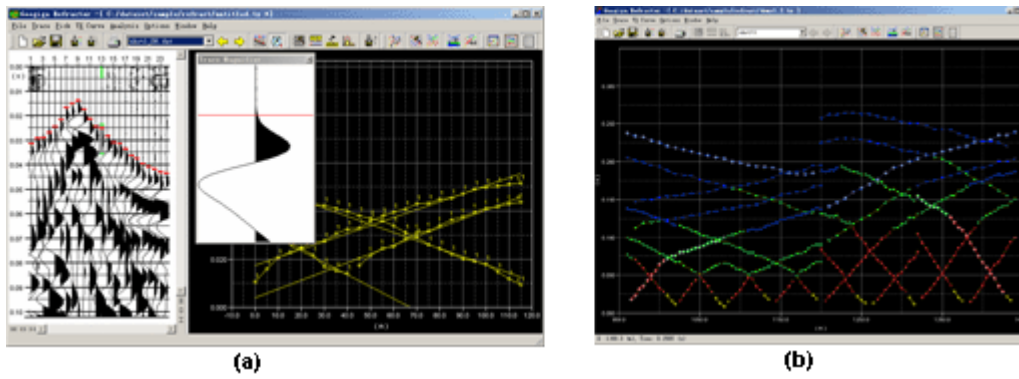


Figura 11: Exemplo de software de processamento (a) First Break Picking (b) Tempo versus afastamento para diversas fontes [19]

A velocidade das camadas pode ser calculada diretamente deste gráfico. A velocidade de propagação da onda na primeira camada é o inverso da inclinação da primeira reta, que representa a onda direta. As velocidades e espessuras das camadas subsequentes são calculadas a partir das inclinações e tempos de chegada de cada uma das outras retas.

Quando as camadas não forem horizontais, os gráficos de aquisição adiante e à ré apresentarão inclinações diferentes; nestes casos, é possível calcular a velocidade de propagação da onda e espessura de cada camada utilizando dados de ambos os gráficos. Existem vários métodos para esta determinação, sendo o mais utilizado o GRM (Método Recíproco Generalizado, na sigla em inglês), que consiste em algumas aproximações associadas a uma manipulação algébrica bastante simples (Figura 12). O tiro com a fonte no meio da linha, quando realizado, serve para controle de qualidade, permitindo a identificação de dados incongruentes.

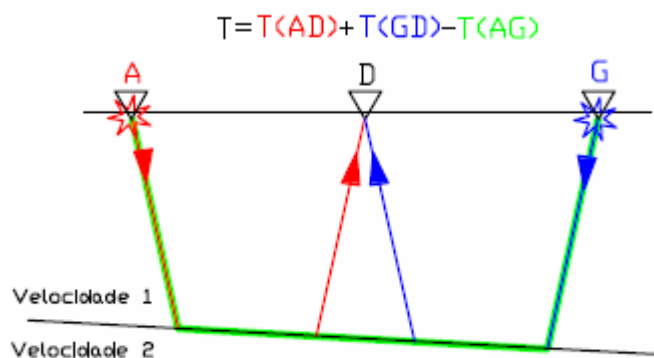


Figura 12: Conceito do método GRM

Quando uma mesma camada tem propriedades variando no eixo x, o sismograma apresenta vários trechos retos, que podem ser tratados individualmente para identificação de propriedades de cada um. Por exemplo, no caso de haver uma zona de falha em um maciço rochoso, a velocidade de propagação seria diminuída em certo intervalo, mudando a inclinação da reta, mas ainda poderia ser calculada.

### 2.2.3. Sub-bottom profiler

O uso do método sísmico em áreas submersas, especialmente de grande extensão, é possível utilizando-se receptores e fontes especiais. O sub-bottom profiler, ou simplesmente SBP, é um dispositivo sísmico simplificado, que reúne, em um só aparelho, fonte e receptor sísmicos e equipamento de registro dos dados (Figura 13). Foi desenvolvido para aquisições em lâminas d'água relativamente rasas, tanto em rios quanto no chamado “shore approach” (aproximação de costa para estruturas marítimas). A fonte é um canhão de ar com frequência central que pode variar de 1 a 15 KHz, enquanto o receptor é um hidrofone com resolução compatível com a frequência da fonte.



Figura 13: Equipamento SBP da marca Edge Tech [20]

A alta frequência da fonte faz com que a penetração do sinal seja restrita. O método é utilizado apenas em água, material para o qual a atenuação é proporcionalmente pequena, e permite imagear as camadas mais superficiais abaixo da lâmina d'água, dependendo de suas propriedades mecânicas.

### 2.2.3.1. Fundamentos teóricos e aquisição

Como apresentado no item 2.2.1.1, a partição da energia da onda na interface entre dois meios depende de suas propriedades e do ângulo de incidência da onda. Esta partição é regida pelas equações de Zoeppritz. Para o caso de uma onda com incidência normal, estas equações são simplificadas, e temos que

$$r = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad ; \quad rf = 0 \quad ; \quad t = \frac{2Z_2}{(Z_2 + Z_1)} \quad (13, 14, 15)$$

Neste caso, os coeficientes de reflexão (r) e de transmissão (t) podem atingir módulos maiores do que 1, pois têm significado vetorial – representam o deslocamento das partículas do meio. O coeficiente de refração (rf) é nulo porque em incidência normal não há geração de onda refratada ( $i = 0 < \text{ângulo crítico}$ ).

Se tomarmos as camadas de subsuperfície como aproximadamente horizontais teremos, no caso do SBP – em que fonte e receptor estão muito próximos – que a incidência pode ser considerada normal, e as equações 13, 14 e 15 são válidas. Neste caso, a modelagem numérica é bastante simples e os dados podem ter interpretação preliminar sem necessidade de processamento, dependendo do nível de ruído. O SBP lida apenas com ondas compressoriais, já que ondas cisalhantes não se propagam em fluidos.

A aquisição é realizada pelo “caminhamento” do equipamento pela linha que se deseja estudar, em velocidade constante e geralmente com o apoio de um GPS para garantir sua correta localização. Pode ser puxado manualmente e, em lâminas d’água mais profundas, é necessário acoplá-lo a um barco, o que dificulta o controle da velocidade e aumenta a importância de dados de GPS para possíveis correções de posicionamento no processamento. O resultado obtido é um perfil contínuo do subsolo, com amostragem proporcional à velocidade empregada no caminhamento, daí a importância de manter uma velocidade constante ou, ao menos, conhecida.

Dentre as limitações do método está a lâmina d’água, que precisa ser de pelo menos 50 centímetros para garantir o bom funcionamento do equipamento. Outra questão é que, a depender da frequência utilizada, a geologia pode ser um forte limitante, já que dependendo das características do solo a atenuação pode ser muito intensa.

### 2.2.3.2.

#### Processamento e análise de dados

Uma das grandes dificuldades da aquisição sob lâmina d'água é a ocorrência das chamadas reflexões múltiplas. A impedância da água é muito maior do que a impedância do ar. Este forte contraste faz com que a onda sísmica ascendente, ao se deparar com a interface água-ar, sofra uma reflexão praticamente sem transmissão de energia (das equações 13 e 15,  $r \approx -1$  e  $t \approx 0$ ). Essa reflexão acaba por funcionar como uma nova fonte, cujo sinal se sobrepõe ao original e dificilmente é retirada por um mecanismo automatizado – é necessária a intervenção do especialista para identificá-la. Assim, a freqüente ocorrência de múltiplas se apresenta como o maior desafio em termos de processamento dos sismogramas, mas um intérprete experiente deve ser capaz de separar as múltiplas das reflexões que realmente interessam, já que sua geometria pode ser inferida.

Outro tipo de ruído comum é o motor de barcos, especialmente quando é necessário o acoplamento com o equipamento. Como motores geram ruídos coerentes, a fase inicial do processamento não consegue retirá-lo facilmente; ao mesmo tempo, não é possível utilizar a técnica CMP, e por isso são necessários filtros adicionais.

O SBP costuma apresentar resultados mais interessantes em rios com camadas intercaladas de sedimentos argilosos e argilos-siltosos, que permitem melhor penetração do sinal, sendo possível também mapear o topo rochoso se este estiver na profundidade de alcance da onda sísmica. Sedimentos arenosos tendem a atenuar o sinal e, por isso, não fornecem resultados tão satisfatórios na maioria dos casos. O SBP se apresenta como um método primordialmente qualitativo.

### 2.3.

#### Métodos elétricos e eletromagnéticos

Nomeados a partir da energia utilizada para sondar o meio, os métodos elétricos e eletromagnéticos são diversos e bastante poderosos. As propriedades físicas que regem este grupo de métodos são três, como veremos a seguir.

A Condutividade Elétrica ( $\sigma$ ) de determinado material representa a facilidade com que uma corrente elétrica sobre ele aplicada poderá circular. A

Unidade no Sistema Internacional usada para representá-la é o Siemen/metro. Seu inverso é chamado Resistividade Elétrica ( $\rho$ ).

A condutividade é a constante que relaciona a intensidade de corrente e o campo elétrico na Lei de Ohm

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (16)$$

Para correntes alternadas, a condutividade varia com a frequência da corrente aplicada; no entanto, na prática condutividades na faixa de 1 a 103 milimhos/m podem ser consideradas independentes da frequência.

Solos e rochas são formados por minerais que, em sua maioria, têm condutividade muito baixa. Por isso, em geral a condutividade é eletrolítica e se manifesta através do excesso de umidade dos vazios da substância. Existem, no entanto, minerais condutivos como carbono, magnetita, pirrotita, entre outros, que podem ocorrer em rochas e que aumentam significativamente a condutividade total. Os fatores que influenciam a condutividade de solos e rochas são, portanto:

- Porosidade, forma e tamanho dos vazios;
- Teor de umidade;
- Concentração de eletrólitos dissolvidos na água;
- Temperatura e fase da água nos vazios;
- Quantidade e composição dos colóides;
- Formação mineral.

A Permissividade Dielétrica ( $\epsilon$ ) é a constante de proporcionalidade entre o campo elétrico e a polarização,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (17)$$

É comum representar essa propriedade do meio pela constante dielétrica, que nada mais é que uma razão com a permissividade dielétrica do vácuo  $k = \epsilon/\epsilon_0$ . Também a constante dielétrica é bastante influenciada pela umidade do material, pois a água com íons dissolvidos causa grande atenuação do campo eletromagnético aplicado sobre o meio. A Figura 14 ilustra essa influência.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (18)$$

Na equação 18, o campo magnético H e o campo de indução magnética B são relacionados pela chamada Permeabilidade Magnética ( $\mu$ ). No caso de materiais geológicos, no entanto, esta propriedade pouco varia e está muito próxima da permeabilidade magnética do vácuo. Como os métodos geofísicos se

baseiam na variação das propriedades, a permeabilidade magnética é das três a menos relevante.

A Tabela 4 indica resistividades e constantes dielétricas típicas de alguns tipos de solos e rochas, juntamente com outros materiais, a título de comparação.

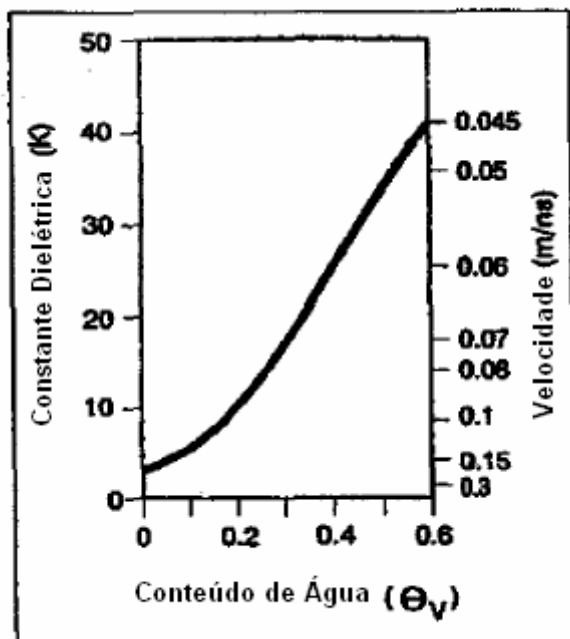


Figura 14: Conteúdo de água versus constante dielétrica [21]

Tabela 4: Propriedades elétricas dos materiais (adaptada de [21,22])

| Tipo de Material   | Condutividade (mS/m) |          | Constante Dielétrica |          |
|--------------------|----------------------|----------|----------------------|----------|
|                    | Seco                 | Saturado | Seco                 | Saturado |
| Ar                 | 0                    | -        | 1                    | -        |
| Água Destilada     | -                    | 0,01     | -                    | 81       |
| Água do Mar        | -                    | 3000     | -                    | 81       |
| Argilas            | 2                    | 1000     | 5                    | 40       |
| Areias e Cascalhos | 0,01                 | 0,1-1    | 2-6                  | 20-30    |
| Siltitos           | 1                    | 30       | 5                    | 100      |
| Arenitos           | 0,01                 | 40       | 2-6                  | 20-30    |
| Calcáreos          | 0,5                  | 2        | 4                    | 8        |
| Granito            | 0,01                 | 1        | 5                    | 7        |
| Diabásio           | 10                   | 100      | 7                    | 8        |
| Basalto            | 1                    | 10       | 6                    | 8        |
| Concreto           | 0                    | 0        | 5,5                  | 12,5     |
| Ferro / Aço        | 109                  | -        | 1                    | -        |
| PVC                | 0                    | -        | 3-5                  | -        |

### 2.3.1.

#### Caminhamento elétrico

O Caminhamento Elétrico, também chamado Tomografia Elétrica ou Sondagem Elétrica Multi-eletrodo (SEM), tem por princípio a transformação do

solo em um grande resistor, por meio da aplicação de uma corrente elétrica de baixa intensidade. Com a utilização de pares de eletrodos, é possível medir a resistividade do solo em diferentes pontos, e várias profundidades, produzindo assim um perfil resistivo do subsolo.

Essa resistividade é então correlacionada com camadas geotécnicas. A grande dificuldade do método reside no fato de que o valor de resistividade medido de um ponto é influenciado por todos os pontos em sua vizinhança, e por isso a correlação não é tão simples. Por isso mesmo, o caminhamento elétrico costuma ser usado com objetivos qualitativos, mais do que quantitativos.

A Figura 15 apresenta o um conjunto completo de equipamento para aquisição.



Figura 15: Equipamento ER 300 de Caminhamento elétrico, com detalhe de instalação do eletrodo no solo

### 2.3.1.1. Fundamentos teóricos e aquisição

Digamos que se instalem, numa superfície geológica, dois pares de eletrodos. Em um deles, que denominaremos AB, se aplica uma corrente de módulo  $I$ , para no outro (MN) medir a diferença de potencial entre cada eletrodo. (Figura 16)

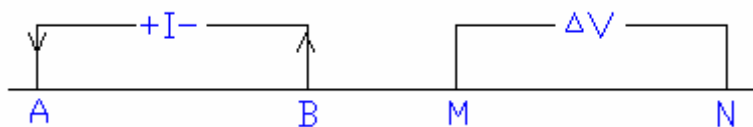


Figura 16: Esquema dos pares de eletrodos de corrente (AB) e potencial (MN)

Se traçarmos em torno de um eletrodo uma superfície semi-esférica qualquer, por simetria, a densidade de corrente  $J$  terá direção radial e módulo igual em qualquer ponto desta superfície. A integral de  $J$  sobre a semi-esfera será

$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{s} = \vec{J} \cdot 2\pi R^2 \rightarrow \vec{J} = \frac{I}{2\pi R^2} \quad (19)$$

Pela lei de Ohm (equação 16),

$$\vec{J} = \frac{E}{\rho} \rightarrow |E| = \frac{I\rho}{2\pi R^2} \quad (20)$$

O módulo do campo elétrico gerado por um eletrodo pontual é, portanto, inversamente proporcional ao quadrado da distância. A diferença de potencial,  $V$ , se relaciona com o campo eletromagnético através de

$$V_M^N = \int_M^N \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I\rho}{2\pi} (R_1^{-1} - R_2^{-1}) \quad (21)$$

Onde  $R_1$  e  $R_2$  são as distâncias dos pontos  $M$  e  $N$  ao eletrodo  $A$ , respectivamente. O potencial absoluto de um ponto é aquele para

$$(R_2 \rightarrow \infty) \Rightarrow V_p = \frac{I\rho}{2\pi R} \quad (22)$$

Com isso, conclui-se que o potencial de um ponto qualquer em um meio é inversamente proporcional a sua distância à fonte. Então, para os pontos  $M$  e  $N$ ,

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) ; \quad V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (23; 24)$$

Reunindo as duas equações e isolando a resistividade, temos que

$$\rho = \frac{2\pi}{1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN} * \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (25)$$

O primeiro fator do segundo membro depende unicamente da disposição geométrica dos quatro eletrodos, e por isso é denominado fator geométrico ( $K$ ).

Meios geológicos são não-homogêneos. Nesta situação, haverá variação da resistividade de um ponto para outro. No entanto, cada medição de DDP é influenciada por todo um segmento do meio que se quer analisar. Isso quer dizer que a resistividade lida não é real, mas uma resistividade aparente, influenciada pelas propriedades elétricas não homogêneas do meio e pela geometria dos eletrodos.

A capacidade de imageamento do subsolo está diretamente relacionada à penetração da corrente no meio. A percentagem de corrente que se mantém acima de determinada profundidade pode ser estimada em uma análise geométrica.



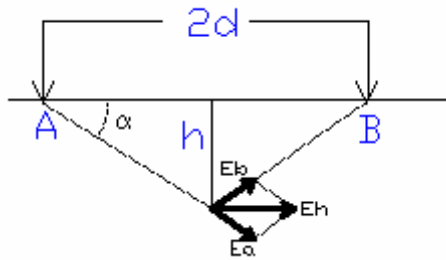


Figura 17: Campo elétrico de um ponto de profundidade 'h'

A polaridade dos eletrodos é oposta, e, por isso, as componentes verticais dos dois campos elétricos se anulam (Figura 17). As componentes horizontais, no entanto, têm mesmo valor, direção e sentido:

$$E_h = 2E_A \cos \alpha = 2E_B \cos \alpha \quad (26)$$

Também da geometria do problema, temos que

$$\cos \alpha = \frac{d}{(d^2 + h^2)^{1/2}} \quad ; \quad R^2 = (d^2 + h^2) \quad (27)$$

Pela equação 26, temos que

$$E_h = \frac{I\rho d}{\pi(d^2 + h^2)^{3/2}} \quad (28)$$

Da Lei de Ohm (equação 16), temos a densidade de corrente; e a percentagem de corrente que se mantém acima de determinada profundidade é a integral da densidade de corrente no intervalo de  $z=0$  a  $z=h$

$$J_z = \frac{I}{\pi d^2 (1 + h^2 / d^2)^{3/2}} \Rightarrow \int_{z=0}^{z=h} J_z \cdot dz = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{h}{d}\right) \quad (29)$$

Isso quer dizer que, para uma profundidade que é metade da distância entre os eletrodos, a percentagem de corrente confinada acima daquele ponto é de cerca de 70%. Esta dedução é válida para meios homogêneos; em meios não-homogêneos, a penetração depende ainda da distribuição espacial da resistividade.

Chama-se profundidade de investigação “(...)aquela na qual é máxima a parcela de contribuição de uma camada horizontal delgada (paralela à superfície do terreno) para o sinal medido na superfície.” [23]

Esta profundidade depende não apenas da penetração da corrente como também do posicionamento de AB e MN.

Uma vez que tanto a profundidade de investigação quanto a resistividade aparente dependem da disposição dos pares de eletrodos, esta tem grande relevância no método de aquisição. Alguns arranjos, no desenvolver da técnica, se

tornaram mais utilizados, seja por facilidade na aquisição ou na análise dos dados. Dentre eles, podem-se citar os arranjos tipo Wenner, Schlumberger, Dipolo-dipolo. A Figura 18 apresenta as disposições espaciais de cada um.

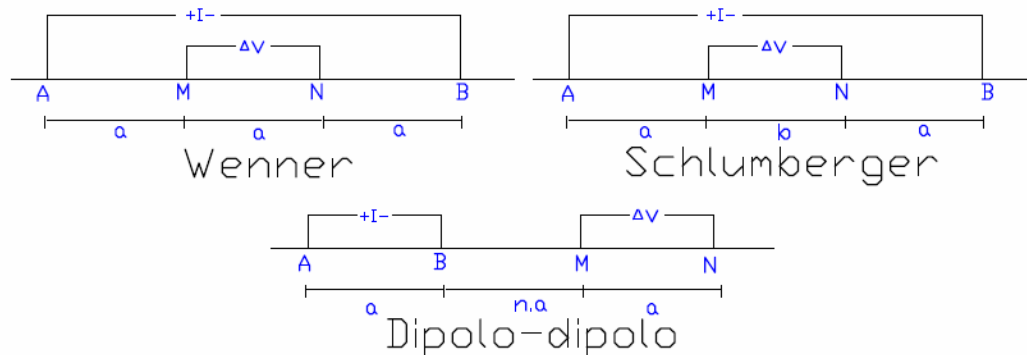


Figura 18: Arranjos de eletrodos mais usados

O arranjo tipo Wenner foi criado pelo geofísico norte-americano de mesmo nome em 1915. O par de eletrodos de potencial fica entre os eletrodos de corrente, sendo cada um deles equidistantes entre si. Para este arranjo, o fator geométrico é

$$K = 4\pi b \quad (\text{onde } b = \overline{MN} / 2) \quad (30)$$

No arranjo de Schlumberger, criado na França quase ao mesmo tempo que o Wenner, os eletrodos de potencial também ficam entre os de corrente, mas os eletrodos não são equidistantes, apenas a razão  $AB/MN > 5$  deve ser respeitada. No caso do arranjo utilizado ser simétrico, vale a relação

$$K = \frac{\pi}{2} \frac{(a^2 - b^2)}{b} \quad (\text{onde } a = \overline{AB} / 2 \quad \text{e} \quad b = \overline{MN} / 2) \quad (31)$$

O dispositivo dipolo-dipolo é relativamente mais recente e utilizado principalmente para investigações de superfícies mais profundas. Em geral, os eletrodos de corrente são bastante separados dos de potencial. As distâncias entre os eletrodos de cada par são iguais, e o espaçamento entre os pares é seu múltiplo, conseqüentemente, o fator geométrico é dado por

$$K = \pi n(n+1)(n+2)a \quad (\text{onde } a = \overline{MN}) \quad (32)$$

Para os arranjos dipolo-dipolo, se o valor de 'n' é suficientemente grande, o comportamento da injeção de corrente se aproxima daquele de um dipolo elétrico, o que aumenta a sensibilidade do método. Por outro lado, se as distâncias são grandes (como pode ser também o caso do arranjo de Schlumberger), o equipamento necessário à realização do ensaio é mais potente e custoso. [24]

Na prática, para cada aplicação de corrente fazem-se várias medições de potencial, ao longo de uma mesma linha. Também sobre essa linha deslocam-se os dipolos de corrente e de potencial, respeitando as características geométricas de cada arranjo, de modo que no final é obtido um perfil resistivo em duas dimensões do subsolo.

Por questões de segurança, os equipamentos necessários para o ensaio de caminhamento elétrico utilizam corrente contínua. Por conta disso, os resultados obtidos por este método não sofrem efeitos de variação de frequência que poderiam ocorrer sob corrente alternada.

### **2.3.1.2. Processamento e análise de dados**

Para transformar os dados de resistividade aparente em um modelo da subsuperfície mais próximo da realidade, é necessário processar estes dados. Este processamento leva em conta diversos parâmetros, como geometria da aquisição e relevo da área, e pode ser feito levando-se em conta diferentes princípios.

O primeiro passo é fazer um controle de qualidade dos dados, retirando aqueles que mostrem indícios de má aquisição. Uma forma comum de se fazer isso é uma análise estatística, descartando valores que estejam fora de determinado intervalo de confiança. Esta análise pode ser feita de forma global ou setorizando-se os dados, por exemplo, por nível de investigação.

Dentre os diversos métodos possíveis para a inversão dos dados, dois tipos têm sido mais utilizados: a modelagem poligonal, em que polígonos com valor constante de resistividade representam os corpos e camadas do subsolo; e o método de suavização, em que as seções obtidas pela modelagem são representadas sob a forma de isolinhas de resistividade, que se aproximam dos contornos dos corpos e camadas do subsolo.

Em ambos os casos, o modelo vai sendo aprimorado por tentativa e erro: faz-se uma simulação do resultado de campo que o modelo apresentaria, e este é corrigido de acordo com as diferenças encontradas entre a simulação e o perfil obtido em campo, até que se chegue a um dado suficientemente aproximado. Existem disponíveis no mercado diversos softwares para cada um dos métodos [25]

As pseudo-seções modeladas podem então ser interpretadas qualitativamente à luz da geologia local. Grandes discontinuidades na resistividade do subsolo podem ser identificadas como camadas geotécnicas, discontinuidades geológicas, e corpos enterrados de médio a grande porte – naturais (blocos, matacões) ou não. Zonas heterogêneas como áreas de cascalhos ou alternâncias entre sedimentos arenosos e argilosos, por exemplo, não são comumente delineadas por este método, que funciona em maior escala.

### **2.3.2. Ground penetrating radar**

O Radar de Penetração em Solo (comumente chamado georadar ou GPR, da sigla em inglês) é um método geofísico baseado na emissão de ondas eletromagnéticas, com leitura da sua reflexão nas camadas do subsolo.

Seu desenvolvimento remonta a 1929, quando ondas de rádio foram utilizadas na tentativa de mapear a espessura de uma geleira na Áustria. Por questões tecnológicas, seu uso ficou estagnado (havendo, no entanto, desenvolvimento da teoria que o embasa) até a década de 50, quando voltou a ser utilizado em ambientes gelados para determinação da espessura de placas de gelo nos continentes Ártico e Antártico [21].

Foi só a partir do início da década de 70, com a missão Apollo 17, que a pesquisa para utilização em outros ambientes ganhou força. A esta altura, o desenvolvimento tecnológico mundial já permitia a construção de equipamentos com aquisição digital, baixando significativamente os custos. Na seqüência, o GPR tornou-se comercial, sendo, na década de 80, reconhecido como método geofísico pela comunidade científica internacional. A Figura 19 representa uma aquisição GPR em campo.



Figura 19: GPR modelo Ramac I

### 2.3.2.1. Fundamentos e Aquisição

As equações de Maxwell descrevem o fenômeno eletromagnético de forma concisa, mas sua forma usual de apresentação não é a mais clara para aplicações práticas. Elas podem ser modificadas substituindo-se as relações constitutivas, pelo qual obtém-se as equações que regem a propagação de ondas eletromagnéticas no meio geológico [9].

Para um meio geológico de baixa perda, a velocidade de propagação da onda pode ser definida pela equação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (33)$$

onde  $v$  é a velocidade de propagação da onda,  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo e  $k$  é a constante dielétrica do meio em questão. Para obtenção do comprimento de onda  $\lambda$ , basta dividir a velocidade pela frequência  $f$ :

$$\lambda = \frac{v}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f\sqrt{k}} \quad (34)$$

Ondas eletromagnéticas também são regidas pela Lei de Snell, pela qual uma onda que se propaga em um meio, ao encontrar uma variação brusca em suas propriedades, se divide: parte de sua energia é refletida, parte é transmitida à camada seguinte. No caso de ondas de radar se propagando em meios geológicos, as propriedades relevantes para este fenômeno são a condutividade, a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, sendo as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos regidas pelas equações de Fresnel.

Na prática, os levantamentos GPR com vistas em estruturas geológicas são analisados ignorando-se o efeito da condutividade e da permeabilidade magnética porque, para frequências acima de 1 MHz, a permissividade dielétrica é o fator dominante na propagação das ondas [22]. Além disto, considera-se a ondas sempre com incidência normal, visto que as antenas emissora e receptora estão muito próximas.

Neste contexto, a análise do fenômeno fica bastante simplificada e o coeficiente de reflexão, que quantifica a partição de energia em um refletor, pode ser escrito como

$$r_{GPR} = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (35)$$

em que  $k_1$  e  $k_2$  representam as constantes dielétricas das camadas acima e abaixo do refletor, respectivamente. A

Tabela 5 apresenta alguns exemplos de coeficientes de reflexão para a interface entre diferentes materiais.

Tabela 5: Estimativa de coeficiente de reflexão (adaptado de [21])

| Meio Incidente (1) | Meio de Transmissão (2) | Coeficiente de Reflexão |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Ar                 | Solo Seco               | -0,38                   |
| Solo Seco          | Solo Saturado           | - 0,38                  |
| Solo Seco          | Rocha                   | - 0,12                  |
| Solo Saturado      | Rocha                   | 0,28                    |
| Solo               | Metal                   | - 1,00                  |

O método GPR utiliza ondas na faixa de 10 MHz a 2,5 GHz, sendo os aparelhos mais comuns tem capacidade de operar entre 25 e 400 MHz. Ao contrário do caminhamento elétrico, o método GPR sofre bastante influência da frequência utilizada, já que ela está diretamente relacionada tanto à penetração do sinal quanto à resolução vertical obtida.

Para um mesmo material, o aumento da frequência da onda transmitida gera um aumento da atenuação da onda, e conseqüentemente a diminuição da penetração do sinal. Por outro lado, a resolução vertical é inversamente proporcional ao comprimento de onda, aumentando com a frequência (Tabela 6).

O GPR é especificado pela frequência central de suas antenas, que rege as propriedades do sistema, mas a faixa de real funcionamento das antenas emissora e receptora vai de 0,5 a 1,5 vezes essa frequência central.

Tabela 6: Correlação aproximada entre frequência, penetração do radar e resolução vertical (adaptado de [21,22]). Variabilidade está ligada à velocidade de propagação da onda no material.

| Frequência Central (MHz) | Penetração Máxima (m) | Resolução Vertical (m) |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| 200                      | 4 – 8                 | 0,125 - 0,25           |
| 100                      | 15 – 25               | 0,25 - 0,50            |
| 50                       | 25 – 30               | 0,50 - 1,00            |
| 25                       | 40                    | 1,00 - 2,00            |

A resolução horizontal, por sua vez, é independente da frequência, estando relacionada apenas com o padrão de radiação da antena, que é bastante complexo. De forma simplificada, este padrão pode ser entendido como um feixe luminoso, com origem na antena emissora, na forma de um cone alinhado verticalmente e com a geratriz formando ângulo de 30° com a vertical. A resposta obtida pela antena receptora é uma média dos pontos alcançados por esse cone a cada nível. Como a área ‘iluminada’ por ele aumenta com a profundidade, a resolução horizontal diminui na mesma proporção.

A aquisição pode ser feita usando diferentes geometrias. A mais comumente utilizada é a chamada geometria TE, com as antenas perpendiculares à direção de caminhamento do perfil, pois esta é a geometria que consegue englobar a maior área. Em determinados casos, no entanto, a utilização de outros arranjos pode ser mais indicada para a resolução do problema.

Além disto, as aquisições podem variar de acordo com a distância entre as antenas, que pode ser constante (Aquisições a Afastamento Constante – a mais comum para aplicações práticas) ou variável, com intervalos discretos, tipo CMP. Esta última é também conhecida como sondagem de velocidade, pois é utilizada para determinar a velocidade do solo, permitindo assim a conversão tempo-profundidade.

O GPR pode ser utilizado tanto em terra quanto sobre lâmina d’água, sendo que em ambos os casos a obtenção de bons resultados está diretamente ligada à condutividade da(s) camada(s) mais superficial(ais), que rege a atenuação do sinal. Em terra, solos arenosos costumam apresentar melhores resultados; em água, a presença de sais dissolvidos na água é o grande limitador do método.

### **2.3.2.2. Processamento e análise de dados**

Os chamados radargramas, conjuntos de dados resultantes de uma campanha GPR, precisam passar por processamento antes de serem interpretados. Em grande parte, este processamento é análogo ao aplicado a dados sísmicos (item 2.2) e os mesmos programas podem ser utilizados. Além disto, os equipamentos de GPR comerciais costumam ser vendidos juntamente com pacotes de softwares desenvolvidos especialmente para o processamento deste tipo de dado, que trabalham no formato nativo de cada equipamento e que incluem as ferramentas necessárias.

Dentre fontes comuns de ruídos, pode-se citar a influência de construções, muros, margens de rios, postes, árvores de grande porte, linhas de transmissão e mesmo estações de rádio e telefones celulares. A retirada destes dados indesejáveis pode ser demorada e depende fortemente da experiência do intérprete, que deve separar o joio do trigo, mas também da clareza e detalhamento dos dados de campo, no que diz respeito ao mapeamento destas fontes de interferência.

Após todo o tratamento, as seções são interpretadas. Esta interpretação é feita observando-se não apenas superfícies identificáveis na seção, mas também mudanças de textura e presença de hipérbolos. Dentre as entidades que podem ser identificadas na interpretação, se destacam camadas geológicas, o nível d'água, corpos enterrados – especialmente corpos metálicos, já que o contraste de constante dielétrica é bastante alto, como indica a Tabela 5. Em alguns casos, é possível inferir ainda propriedades das camadas identificadas, como homogeneidade e coerência, e estruturas geológicas como acamamentos, fraturas etc.

A grande vantagem do GPR sobre outros métodos geofísicos é a rapidez com que ele fornece resultados, especialmente quando se faz uma aquisição com afastamento constante. Sua aquisição é simples e rápida; corpos enterrados podem ser identificados em tempo real e marcados em campo; e mesmo um processamento completo, que inclua filtragens e migração, é bastante rápido, podendo ser realizado em questão de minutos com o equipamento adequado.



### **3**

## **Casos e exemplos**

A combinação de diferentes métodos indiretos, bem como o uso de informações diretas sobre o subsolo, podem ser necessários para que um modelo adequado de subsuperfície possa ser desenvolvido. A determinação do conjunto de estudos necessário deve ser feita caso a caso, dependendo do objetivo da investigação bem como das condições do local a ser estudado. Serão apresentados neste capítulo alguns casos de estudos geofísicos realizados com fins de engenharia geotécnica.

#### **3.1.**

### **O projeto de túneis**

Túneis são obras lineares subterrâneas, usadas principalmente em duas situações: para vencer áreas de topografia acidentada, que ofereçam grande dificuldade construtiva, ou para ultrapassar objetos em superfície com a mínima interferência. Podem ser feitos em maciços terrosos ou rochosos, bem como em maciços mistos. O conhecimento prévio do maciço é imprescindível para o projeto, e informações sobre a interface entre os diferentes materiais a serem escavados são especialmente valiosas, visto que estes pontos costumam ser os de maior dificuldade construtiva.

Hoje, os métodos de escavação podem ser divididos entre aqueles totalmente mecanizados e os que necessitam de mão de obra atuando mais diretamente na frente de escavação. A escavação mecanizada pode ser utilizada tanto em maciços terrosos quanto rochosos, e costuma obter uma melhor produção, permitindo reduzir prazos. A velocidade de instalação do revestimento, que normalmente é pré-moldado, também a faz mais segura na maioria dos casos. (Figura 20)



Figura 20: Uma escavação com TBM (a) Canteiro com anéis pré-moldados (b) Cabeça de corte

No entanto, esta técnica não é indicada para regiões muito heterogêneas, como maciços com alto grau de fraturamento, ou para aqueles onde possa ocorrer o fenômeno de ‘squeezing’ (grandes deformações no maciço), que pode causar a perda da máquina. Além disto, o equipamento utilizado requer um alto investimento inicial, de modo que normalmente não é a melhor solução do ponto de vista econômico para túneis de menor extensão. Como a máquina é projetada especificamente para as condições geológicas a serem atravessadas, também é necessário considerar o prazo para sua disponibilização pelas fabricantes, que são estrangeiras e em número restrito.

Na escavação não mecanizada, o método depende das características do maciço. Para maciços em solo ou rochas de baixa coerência, são utilizados rompedores ou escavadeiras; quando a rocha é mais resistente, usam-se explosivos. Na maioria das vezes, a produtividade destes métodos é menor do que a da escavação mecanizada; isto pode, no entanto, ser contornado com a utilização de várias frentes de escavação simultâneas, incluindo janelas intermediárias.

A escavação com uso de explosivos também é conhecida como ‘Drill and Blast’. Consiste na realização de furos na frente de escavação, onde um determinado volume de explosivos é instalado, visando o desmonte de alguns metros do maciço rochoso. O desmonte da frente pode ser feito em uma única explosão (seção plena) ou em partes, com avanços independentes (seção compartimentada) dependendo das condições do maciço e da seção final que se pretende obter. Este método pode ser utilizado para maciços rochosos em quaisquer condições geológicas, contanto que bem conhecidas de modo a permitir a correta definição do avanço e previsão de suporte e drenagem adequados (Figura 21).



Figura 21: (a) Escavação mecanizada (b) Perfuração para instalação de explosivos [26]

A escavação em solo consiste no uso de fresas ou escavadeiras diretamente no maciço terroso, para o avanço da escavação. Quando o túnel é de pequeno diâmetro ou a seção precisa se parcializada em pequenas áreas, podem ser utilizados equipamentos operados manualmente (rompedores pneumáticos). Para garantir a estabilidade da frente de escavação, visto que o material escavado tem pouca capacidade de suporte, são usadas enfilagens, que são estruturas de contenção provisória, executadas previamente acima da seção a ser escavada. (Figura 22)

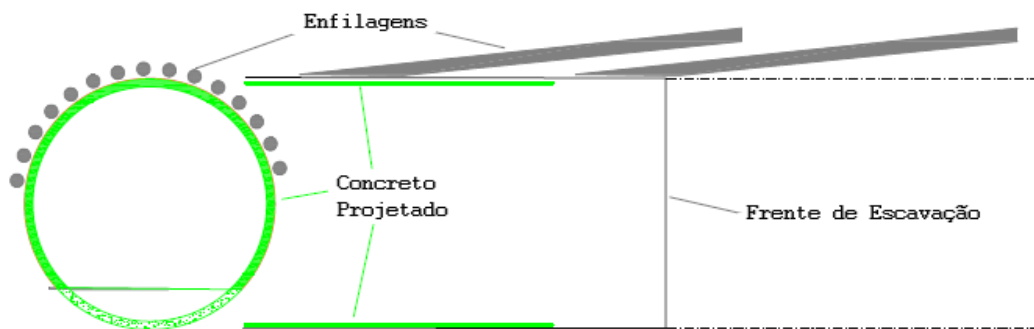


Figura 22: Esquema da utilização de enfilagens, com sobreposição para proteger a frente de escavação.

No caso de escavações não-mecanizadas, normalmente a filosofia de construção é do tipo NATM (Novo Método Austríaco de Tunelamento, na sigla em inglês), em que o revestimento do maciço é feito utilizando-se concreto projetado, logo após o avanço da escavação. Outras estruturas para o completo suporte da seção – cambotas metálicas, tirantes, chumbadores etc. – são instaladas para garantir paredes finas de revestimento, permitindo que o maciço fique relativamente livre, deformando-se parcialmente, redistribuindo as tensões e

fazendo do maciço parte integrante do sistema de suporte. O acompanhamento de deformações (convergência) deve ser feito, pois deformações excessivas podem representar a perda de capacidade de carga do maciço.

Qualquer que seja o material do maciço, túneis estão entre as obras de geotecnia de maior dificuldade técnica, envolvendo riscos e volume de investimentos relativamente elevados. Em comparação com outras obras civis, os trabalhos de investigação geotécnica costumam ser mais extensos para minimizar estes riscos.

É reconhecido que, quanto maior o recobrimento de um túnel, menores tendem a ser as dificuldades intrínsecas ao projeto. Isso ocorre por dois motivos: a interação com a superfície é menor, e o maciço tende a estar mais consolidado e menos heterogêneo. No entanto, as profundidades envolvidas, associadas ao caráter linear da obra, restringem o uso dos métodos diretos de investigação. Por este motivo, neste tipo de projeto os métodos indiretos são uma ferramenta indispensável à investigação.

As investigações, diretas ou indiretas, que precedem o projeto de um túnel têm por principal objetivo identificar e quantificar as classes de materiais a serem atravessados. Além de sondagens tipo SPT e rotativas, são comumente realizados ensaios de campo (perda d'água, tensões 'in situ'), ensaios de laboratório (compressão com ou sem curva 'tensão x deformação') e sondagens geofísicas, especialmente sísmica de refração.

Existem diversos métodos de classificação de maciços para obras de túneis, dentre os quais os mais notórios são o RMR [27] e Q [28]. O objetivo deles é basicamente o mesmo, identificar trechos de rocha que apresentam comportamento geomecânico semelhante e, portanto, necessitam de intervenção equivalente em termos de suporte e drenagem (Figura 23). As classificações de maciços são utilizadas para embasar opções entre métodos construtivos, além de estimativas de prazo, custo e até mudanças no traçado previsto para o túnel frente a dificuldades técnicas muito acentuadas.

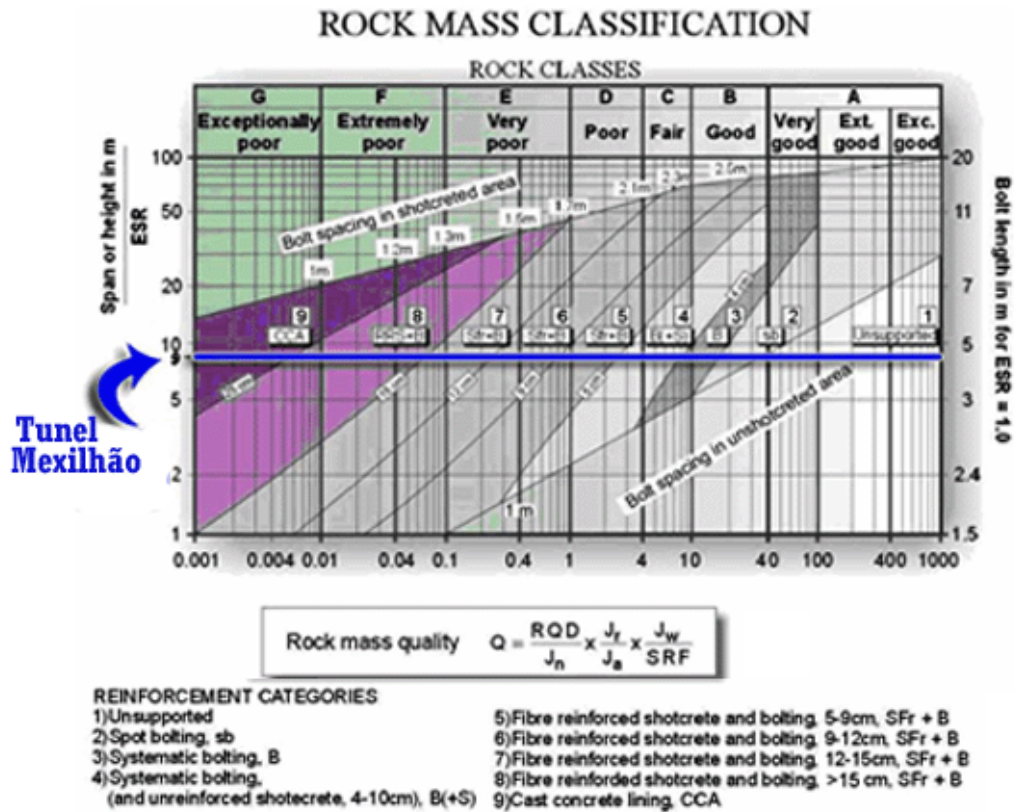


Figura 23: Tabela de classificação pelo método Q

### 3.1.1. Apresentação de um caso

Um gasoduto a ser implantado ligando o litoral ao centro do estado de São Paulo, região sudeste do Brasil, necessitava vencer a Serra do Mar, região de topografia acentuada e irregular, com toda a dificuldade construtiva e de manutenção que ela representa. Associa-se a isso a existência de um Parque Estadual na área, para os quais os requisitos do órgão regulador tornavam a execução de uma faixa de dutos convencional inviável. Optou-se, como solução, por passar por baixo do parque, realizando-se para tanto um túnel de cerca de 4,9 km de extensão.

A cobertura máxima do túnel projetado teria em torno de 600 m, sendo a cobertura mínima de 100 m excetuando-se a área de emboque. O ponto escolhido para o emboque se localizava a cerca de 60 m acima do nível do mar, em área pertencente a uma grande fazenda. Já o ponto de saída estaria localizado por volta da cota 500. Devido à sensibilidade ambiental da área, tanto o emboque quanto a saída dos poços foram locados pelo menos 100 m além dos limites do parque, visando minimizar os impactos negativos da obra. (Figura 24)

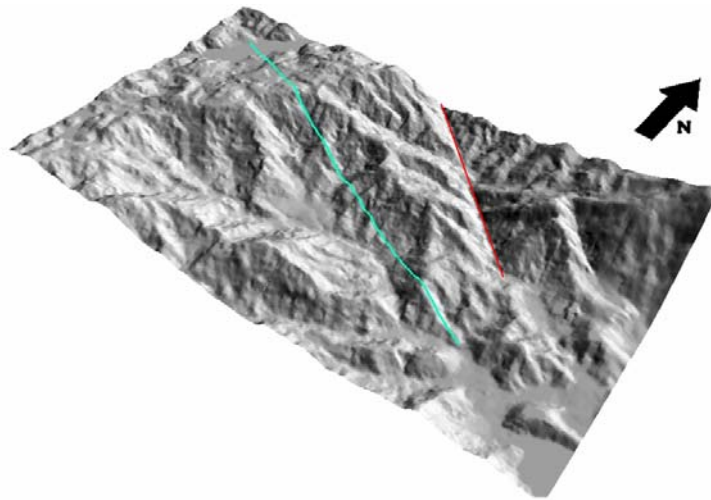


Figura 24: Diretriz primária para o túnel (em azul) sobre modelo digital de terreno. Em vermelho, lineamento significativo interpretado como dique de diabásio [29]

O grande desnível entre a região litorânea e a região central do estado forçava uma inclinação média de 9%, quando o usual para uma boa produtividade seria de cerca de 4%. Prolongar o túnel, para reduzir a inclinação, não era possível devido à existência, alguns quilômetros à frente, de represas do sistema de fornecimento de água de São Paulo. Estes fatores obrigaram o projeto a incluir poços de cerca de 400 m de profundidade, que fariam o papel do desemboque, abrigando a saída de cada um dos dutos. (Figura 25)

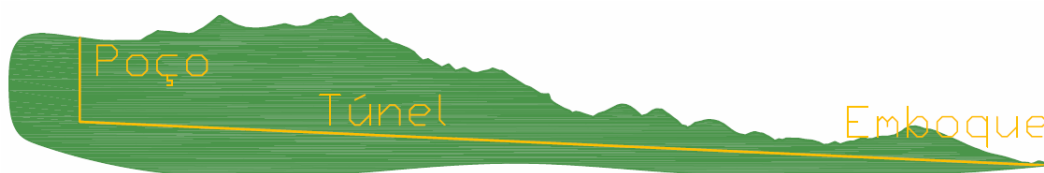


Figura 25: Esquema do projeto, com túnel associado a poço [29]

A primeira fase de investigação geológico-geotécnica compreendeu a análise de fotos aéreas da região e outros produtos existentes (Tabela 7), para microlocalização do emboque, avaliação da topografia ao longo do traçado, extração das drenagens mais importantes, além de determinar as principais feições lineares – falhas, fraturas, foliações, diques. (Figura 26) Pelos dados levantados, trata-se de um maciço metamórfico, sujeito a altas deformações, que tiveram como consequência a topografia acentuada e irregular. Pode-se citar ainda um dique que foi identificado, aproximadamente paralelo à diretriz do túnel (Figura 24). Sua distância, no entanto, é de no mínimo 700 metros, de modo que foi considerado que não ele terá influência sobre a construção.

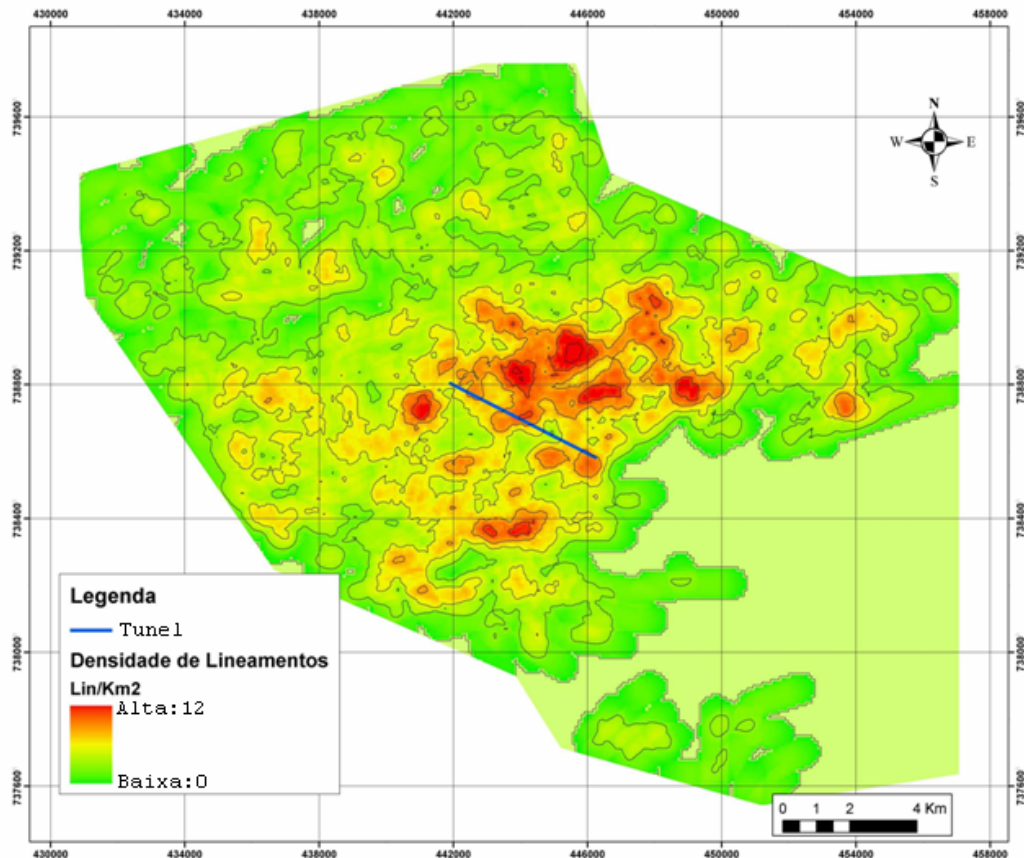


Figura 26: Densidade de lineamentos foto-interpretados na região do túnel [29]

Tabela 7: Material utilizado na primeira fase de investigação geológico-geotécnica [29]

| <b>Materiais</b>  |
|---|
| Fotos Aéreas na escala 1:35.000   |
| Fotos Aéreas na escala 1:20.000   |
| Fotos Aéreas na escala 1:6.000  |
| Mosaico de Fotos Aéreas Georeferenciados na escala 1:20.000               |
| Levantamento Topográfico na escala aproximada 1:50.000 (meio digital)     |
| Levantamento Topográfico na escala aproximada 1:10.000 (meio digital)     |
| Imagens de Satélite Landsat e Spot  |
| Arquivo em Cad contendo os planos de voo, para cada um dos levantamentos. |
| Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, IPT 1981.                     |
| Mapa Geológico na escala 1:250.000, CPRM 1999.                            |
| Relatório Técnico No 83 939-205, IPT 2006.                                |

Em seguida, foi realizado levantamento topográfico no emboque e na área dos poços, com base no qual se procedeu à programação dos levantamentos geotécnicos. As limitações impostas pelo órgão ambiental foram decisivas também na determinação do nível de investigação que poderia ser realizado, já que a autorização para abertura de passagem na vegetação do parque era bastante limitada, não sendo suficiente para o transporte de equipamento de sondagem rotativa.

Para investigação indireta, foram escolhidos os métodos de caminhamento elétrico e sísmica de refração. Com o caminhamento elétrico, esperava-se identificar seções onde o material se encontrasse alterado em meio a material são, e vice versa. Já a sísmica indicaria a localização do topo rochoso.

No emboque, onde havia acesso relativamente fácil, foram programadas sondagens diretas, seções sísmicas e de caminhamento elétrico. A locação dos estudos realizados no emboque encontra-se na Figura 27. No poço, devido a dificuldades de acesso, aliadas à grande profundidade de interesse (não imageável com os métodos geofísicos disponíveis), foi realizada apenas uma sondagem direta de cerca de 45 m.

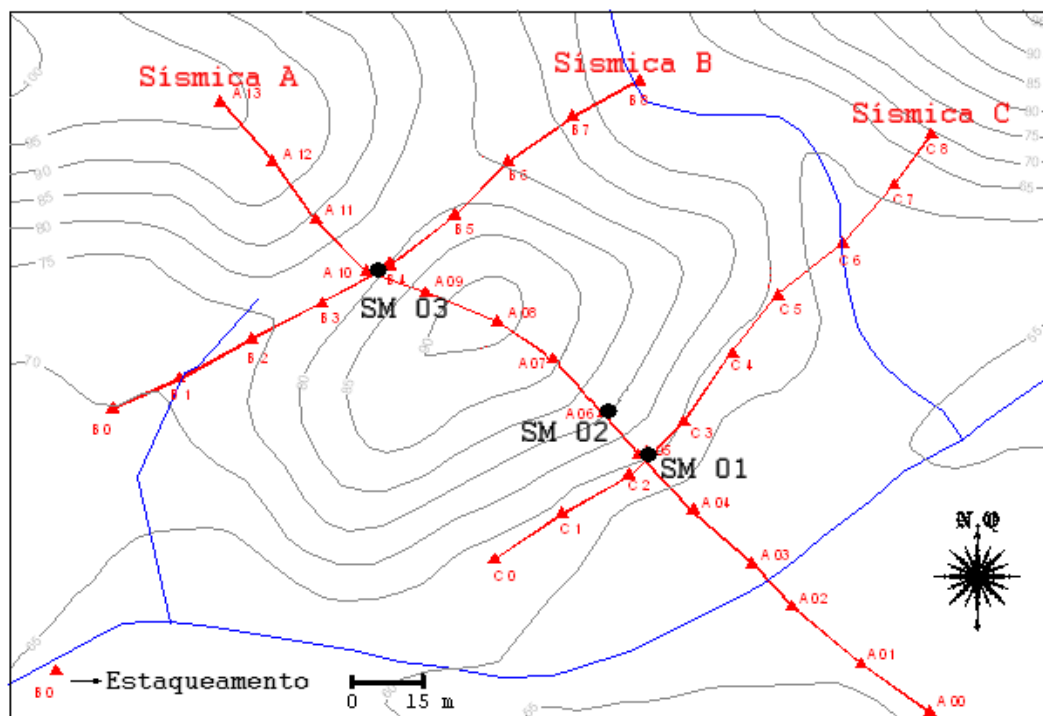


Figura 27: Sondagens diretas e indiretas realizadas no emboque [29]

Ao longo da diretriz, além do levantamento topográfico e do mapeamento de detalhe pela equipe de geologia, as limitações do órgão ambiental só possibilitaram realizar o caminhamento elétrico. Este levantamento foi feito com eletrodos espaçados de aproximadamente 30 m (variáveis de acordo com topografia) e 5 níveis de investigação. O mapeamento feito caracterizou o maciço como primordialmente composto por granito-gnaisses, com alguns trechos milonitizados e diques de diabásio esparsos (Figura 28). O sinal elétrico teve profundidade de penetração de até 80 m e permitiu identificar algumas áreas anômalas, de maior e menor resistividade, enquanto o maciço apresenta em média resistividades entre 1000 e 3000 ohm.m.



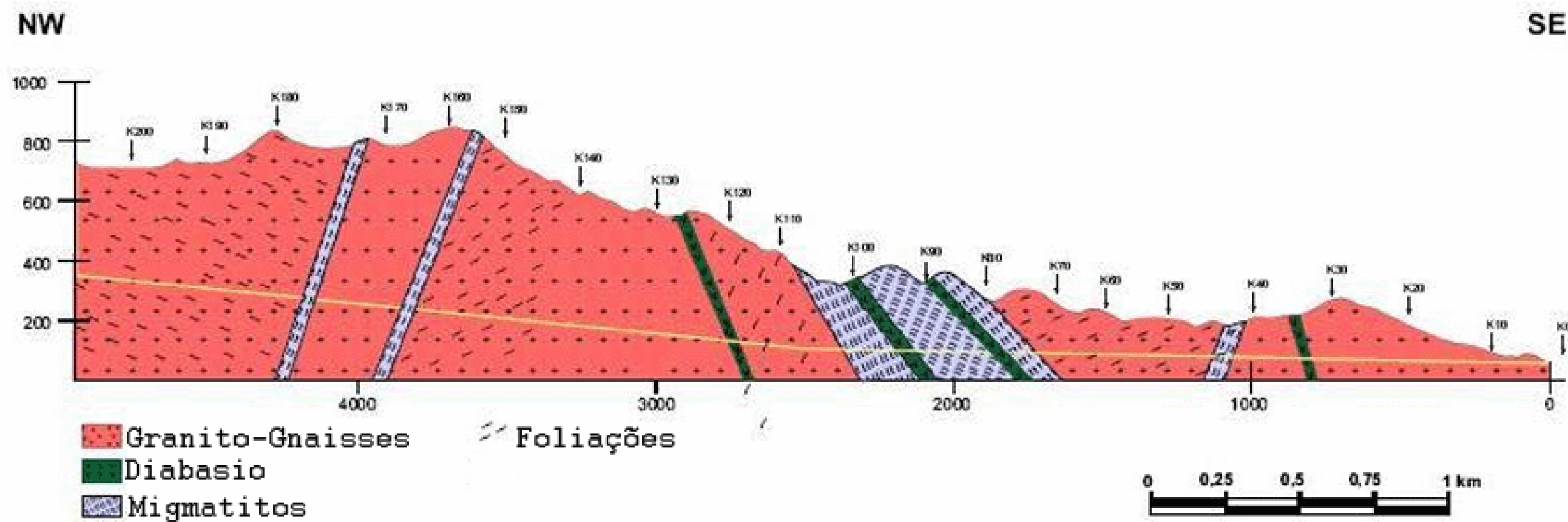


Figura 28: Perfil geológico do túnel, fruto do mapeamento realizado [29]

A sobreposição desta investigação com a fase de estudos anterior (Figura 29) permite analisar a continuidade em profundidade das estruturas mapeadas em superfície. Uma característica que pode ser observada é que os pontos de baixa resistividade ao longo da diretriz estão quase sempre associados à presença de milonitos, com exceção do emboque e de um ponto próximo à estaca K160.

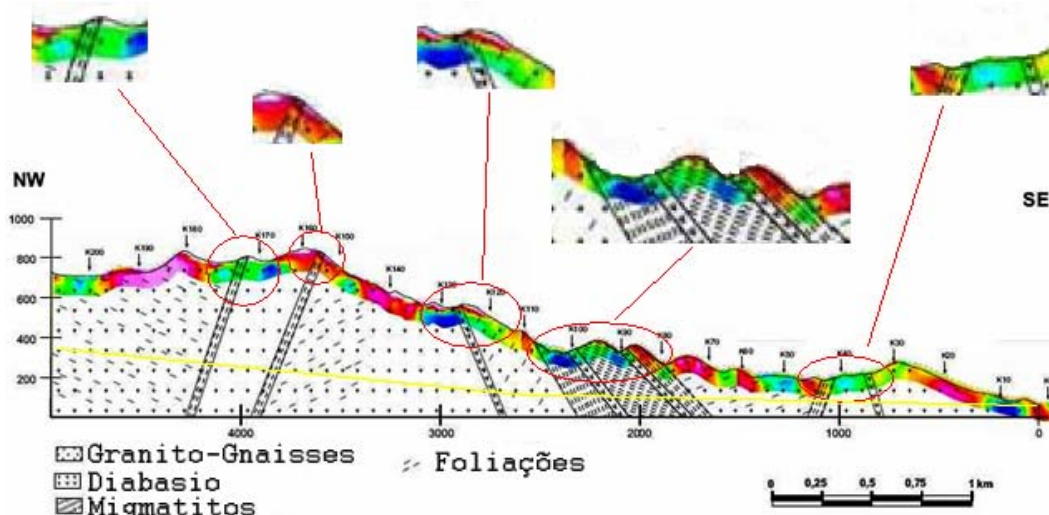


Figura 29: Sobreposição do perfil geológico com o levantamento elétrico; destaque para as zonas milonitizadas e com diques de diabásio [29]

Isso leva a crer que as porções milonitizadas identificadas pelo mapeamento em superfície podem continuar em subsuperfície. Os milonitos são rochas metamórficas que sofreram grandes esforços e, portanto, têm maior tendência a apresentar zonas de fraturamento, que favorecem a presença de água. Como consequência, tendem a apresentar resistividades mais baixas. Nem todos os pontos milonitizados mapeados em superfície apresentam baixa resistividade; no entanto, a homogeneidade do sinal com a profundidade nestes pontos foi interpretado como indicação de que o que existe em superfície também está abaixo dela.

A grande maioria dos diques de diabásio mapeados não pode ser identificada pela investigação geofísica, possivelmente por se encontrarem em meio ao material milonitizado. Sua continuação em subsuperfície foi inferida a partir da interpretação do mapeamento de feições lineares da fase anterior.

No emboque, as três seções sísmicas realizadas utilizaram o método de refração, para obtenção da geometria e das velocidades das camadas superficiais. A fonte utilizada foi o martelo sobre placa metálica, com sismógrafo de 12 canais e espaçamento entre receptores de 10 e 15 m. Uma única seção de caminhamento elétrico foi realizada, coincidente com a seção sísmica longitudinal, visando

identificar estruturas como fraturas e blocos e teve profundidade máxima de aproximadamente 90 metros. Superficialmente, o local do emboque foi caracterizado como sendo predominantemente terroso, formado por colúvios, aluviões e também solo residual.

Três estratos sísmicos, com diferentes velocidades de propagação, foram identificados (Figura 30). O primeiro, com velocidades próximas a 500m/s, representa a camada menos compacta de solo. Esta camada tem pouca espessura (entre 2 e 4 metros) na maior parte do emboque, chegando localmente a até 17 m.

O estrato intermediário apresenta velocidades de propagação entre 1500 e 1700 m/s, valores que podem tanto representar uma camada de solo mais rígido quanto a presença do nível d'água, já que este valor é aproximadamente o mesmo para a  $V_p$  da água. As sondagens diretas contribuíram para interpretar esta ambigüidade, já que o nível d'água se encontrava mais profundo, a pelo menos 19 m da superfície (ANEXO I). Nestas condições, dificilmente haveria uma mudança brusca de propriedades devido à presença de água a menos de 10 m de profundidade, mesmo considerando-se o efeito de capilaridade (que em solo predominantemente arenoso, como é o caso, não é tão significativa). A interface foi interpretada, portanto, como uma mudança na rigidez do solo.

Por fim, a terceira camada, com velocidades em torno de 5400 m/s e pouca variabilidade, foi interpretada como o substrato rochoso. Na seção elétrica, a divisão em camadas não pôde ser identificada. No entanto, é possível observar duas anomalias pontuais e uma seção de menor resistividade. Esta última é aproximadamente coincidente com um ponto mais alto do embasamento interpretado da sísmica, como pode ser visto na Figura 31 nas proximidades da estaca A10.

Tabela 8: Correlação entre classe de maciço e os índices RMR e Q [29]

| CLASSE DE MACIÇO ROCHOSO | QUALIDADE DO MACIÇO | VALOR RMR (Bieniawsky) | INDICE "Q" (Barton) |
|--------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| I                        | Muito Boa           | 81 -100                | > 40                |
| II                       | Boa                 | 61 – 80                | 10 – 40             |
| III                      | Regular             | 41 – 60                | 1 – 10              |
| IV                       | Má                  | 21 -40                 | 0,1 – 1             |
| V                        | Muito Má            | < 20                   | < 0,1               |

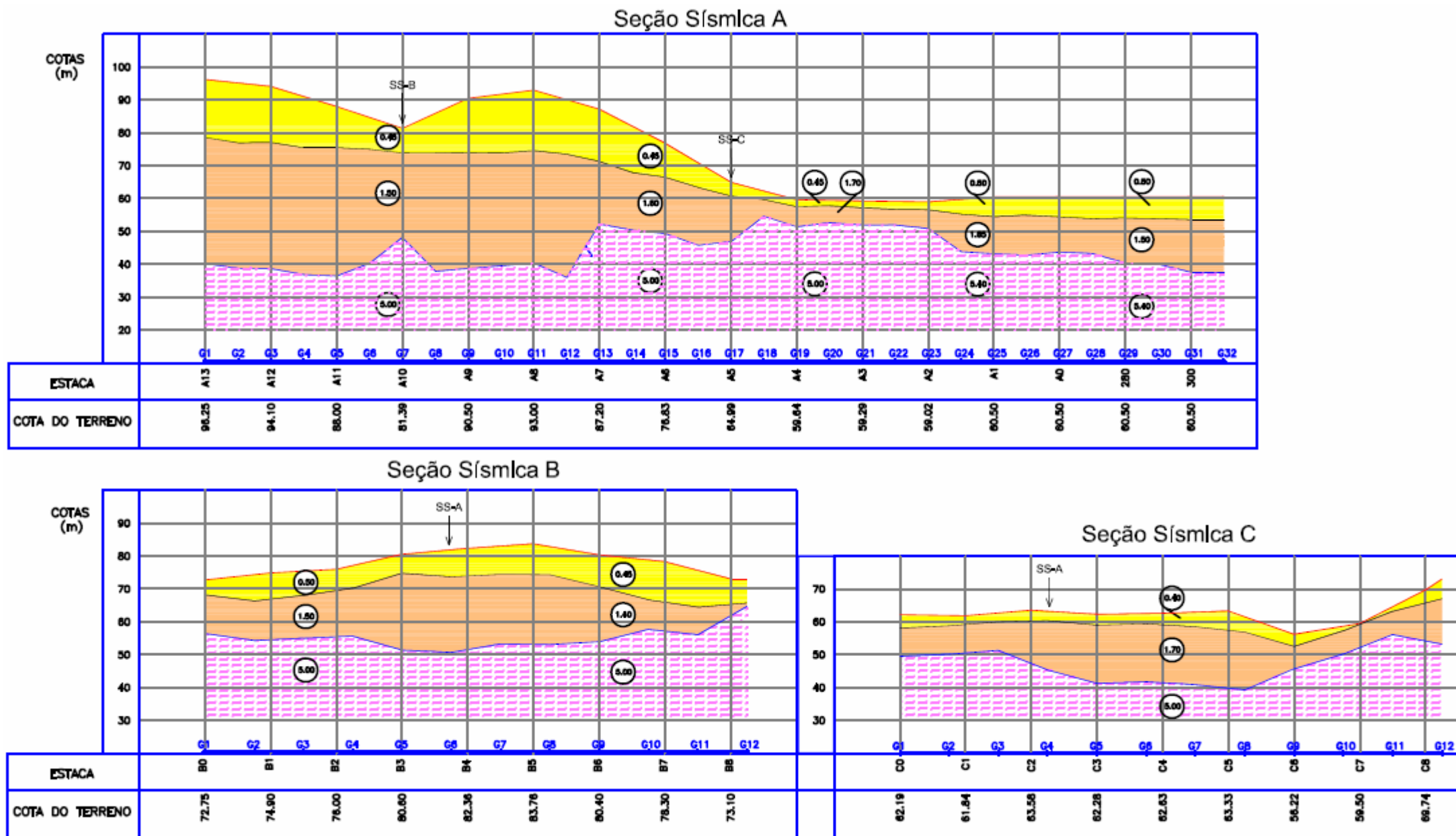


Figura 30: Seções sísmicas realizadas no emboque, que identificaram 3 zonas distintas [29]

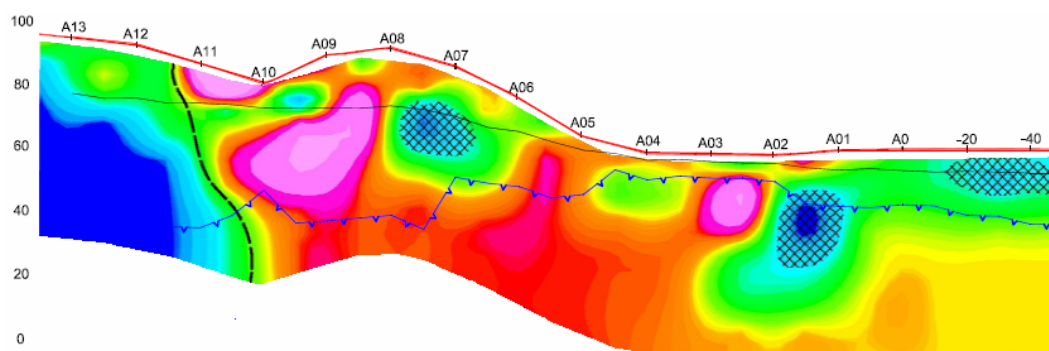


Figura 31: Sobreposição de seção de resistividades com camadas sísmicas [29]

A partir da análise conjunta de todos os dados levantados, buscou-se extrair informações que possibilitassem realizar a classificação geomecânica do maciço (Tabela 8). São relevantes para tal classificação o grau de alteração e fraturamento da rocha, o estado das fraturas (preenchimento, rugosidade, abertura), além da presença de água. O objetivo desta classificação foi quantificar o volume de suporte necessário para a escavação do túnel, visando estimativa de custos. Apesar da dificuldade apresentada pela impossibilidade de sondagens na área do parque estadual, a classificação foi realizada, baseada principalmente no mapeamento de campo e na tomografia elétrica, e considerando-se que o maciço tende a estar em pior condição quando mais próximo da superfície. As classes de maciço inferidas ao longo da diretriz são apresentadas na Tabela 9 e no Anexo I.

Tabela 9: Comprimento inferido para as classes rochosas ao longo do túnel [29]

| CLASSE DE MACIÇO ROCHOSO | COMPRIMENTO DO TRECHO (m) |
|--------------------------|---------------------------|
| I                        | 780                       |
| II                       | 1.754                     |
| III                      | 1.080                     |
| IV                       | 950                       |
| V                        | 350                       |
| TOTAL                    | 4.914                     |

Cerca de 100 m adiante na diretriz, havia na topografia uma sela, onde as investigações diretas e indiretas indicaram alteração do material e provável presença de água (vide Figura 32 e anexo I). A seção de caminhamento elétrico também indicou resistividade baixa até a estaca K14 (Figura 33), cuja interpretação foi de topo rochoso bastante abaixo da cota definida para o projeto, elevando-se apenas cerca de 350 m à frente do emboque. O projeto, por conta disto, passou a considerar, nesta extensão, solo saprolítico a rocha muito alterada (Classe V), o que representava uma extensão significativa com alta necessidade de

suporte e, com isso, alto custo e prazo de execução. O resultado da classificação geomecânica, neste trecho, gerou dúvidas.

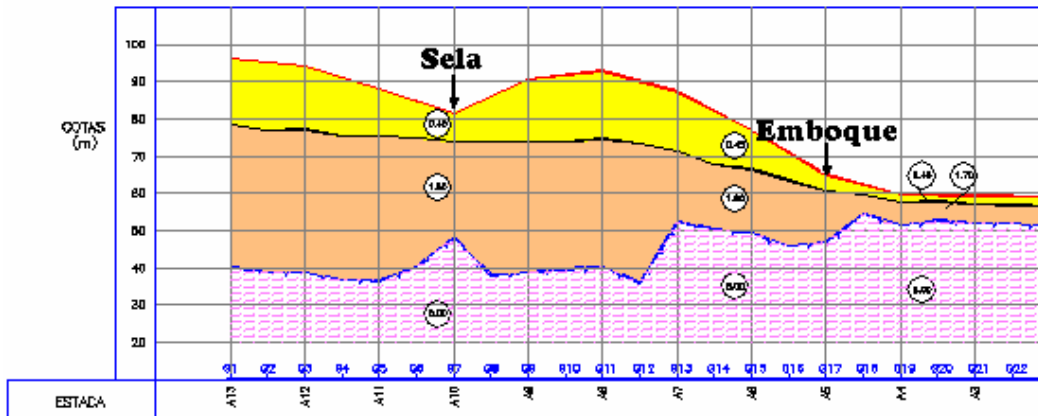


Figura 32: Sela topográfica à frente do emboque previsto. (adaptado de [29])

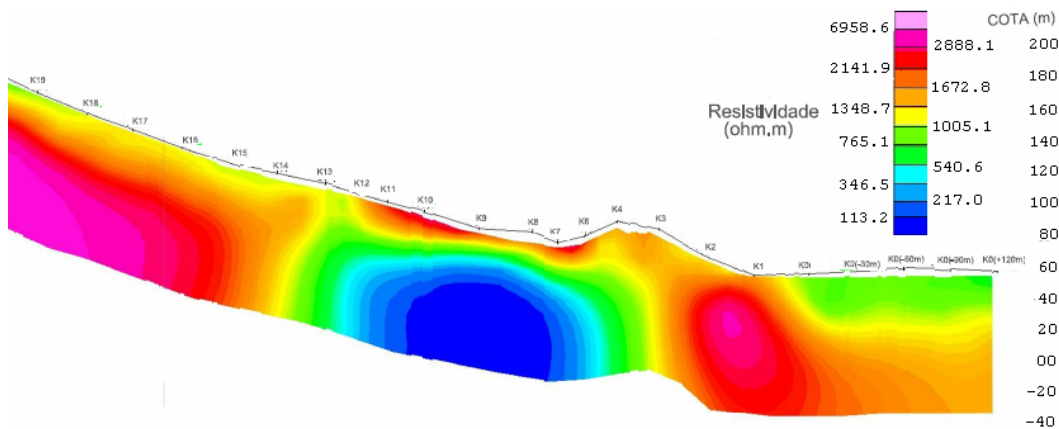


Figura 33: Zona de baixa resistividade, que parece estar relacionada à sela topográfica [29]

Estes resultados não condiziam com o que era esperado inicialmente para o maciço no ponto do emboque. Os técnicos responsáveis decidiram pela execução de sondagem horizontal com a mesma orientação da diretriz do túnel, com amostragem contínua, de modo a qualificar definitivamente os primeiros 200 m da escavação a ser realizada. Esta sondagem, denominada SM05, representou um desafio técnico em si mesma, pela dificuldade tanto em retirar as amostras como em garantir a horizontalidade do furo com o equipamento disponível (Figura 34). A sondagem acabou não seguindo exatamente a direção do túnel, como pode ser visto da Figura 35.



Figura 34: Equipamento realizando sondagem SM 05

Após 110 m de sondagem, atingiu-se um trecho de 60 m com maciço de melhor qualidade. A rocha se encontrava pouco alterada a sã, ocasionalmente fraturada e por vezes com preenchimento granular. Intervalos de material de pior qualidade, com RQD muito baixo e preenchimento argiloso, ocorreram apenas localmente neste trecho. A diferença de cota entre a sondagem e o perfil do túnel neste ponto era de cerca de 22 m e, de acordo com a interpretação feita do perfil de resistividade, nesta profundidade era esperada rocha bastante alterada em todo o trecho (Figura 35). Aos 172 m, atingiu-se nova zona de maior alteração, com praticamente nenhuma recuperação. Devido a dificuldades de execução, a sondagem foi interrompida com 188,6 m desenvolvidos, que equivalem a 183,5 m do traçado do túnel. O boletim de sondagem SM05 é apresentado no anexo I.

Foi realizada ainda uma sondagem adicional (SM06), mais profunda do que as realizadas inicialmente, cerca de 70 m à frente da sela topográfica. Esta sondagem foi a 75 m de profundidade e alcançou o topo rochoso (nível de alteração A2) a 35 m, também na área onde pelos métodos indiretos se esperava rocha com maior grau de alteração devido à baixa resistividade (Figura 35). O nível d'água, neste ponto, se encontrava a cerca de 25 m de profundidade, cerca de 8 m acima do piso do túnel.

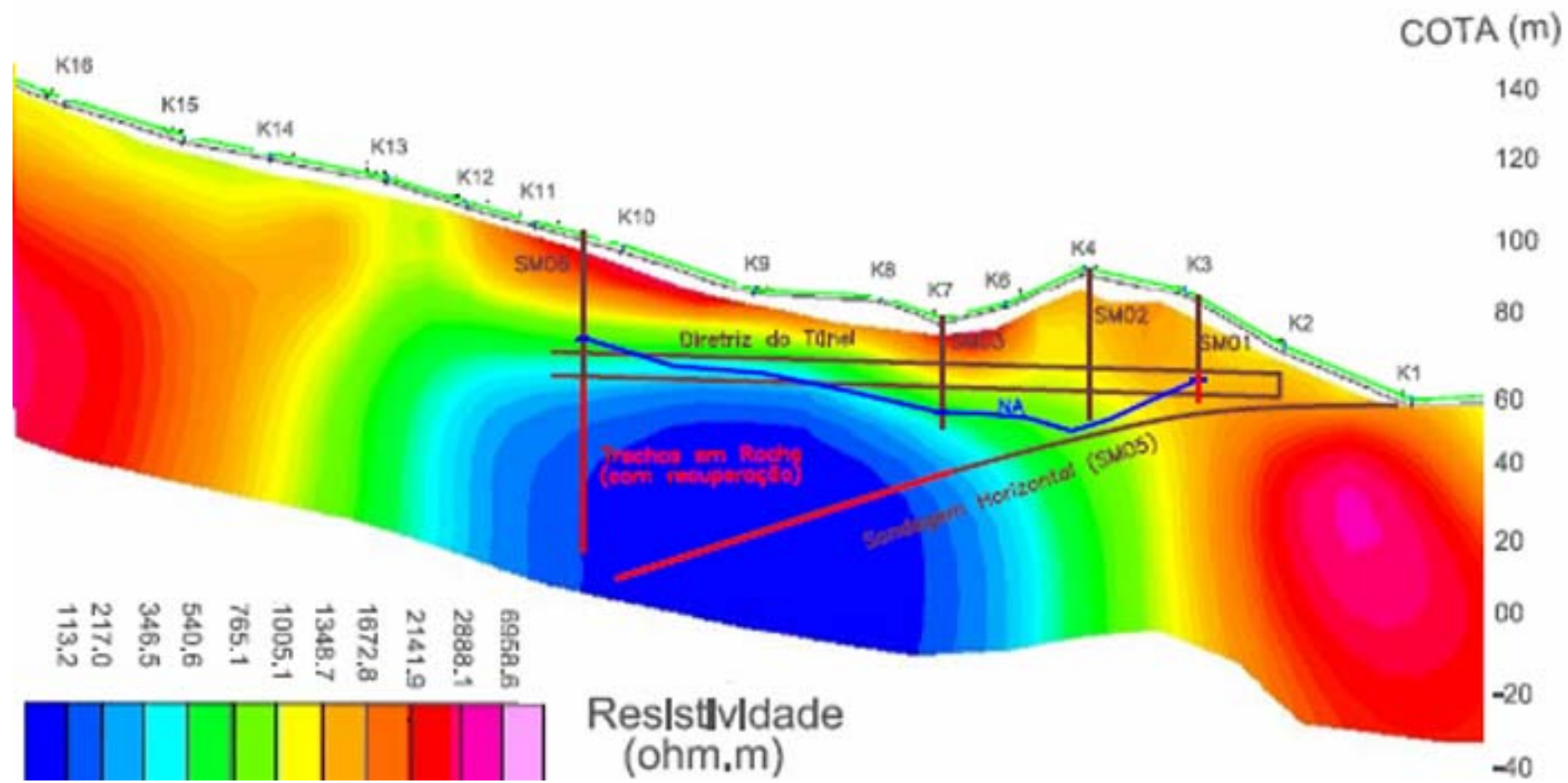


Figura 35: Sobreposição de dados de caminhamento elétrico com sondagens realizadas (adaptado [29])



As sondagens confirmaram, portanto, que os métodos indiretos utilizados subestimaram a qualidade do maciço na área do emboque. Possivelmente, a forte presença de água na área mascarou os resultados da resistividade, uma vez que o nível d'água local (identificado pelas sondagens diretas) apresenta tendência coincidente com o topo da anomalia condutiva (Figura 35).

No entanto, apenas a presença de água não explica a anomalia, pois o nível d'água também está presente na sondagem SM01, por exemplo. No trecho mais condutivo, o topo da rocha sã tende a estar mais profundo, como mostram as sondagens SM02 e SM03 em comparação com SM01. Além disto, a sondagem SM05 mostra que há intercalação entre material sã e material fraturado e alterado. Acredita-se que a existência de intervalos de rocha mais alterada, na presença de água, teria mascarado a igual existência de material de melhor qualidade. De alguma forma, a resolução horizontal do método não teria sido suficiente para diferenciar estes intervalos na presença de água.

Com a informação adicional fornecida pelas sondagens, é possível fazer uma nova classificação geomecânica para a área com resistividade mais baixa. Os diversos dados apresentados nos boletins de sondagem (IQR, frequência de fraturas, descrição dos testemunhos, ensaios tipo Lugeon) podem ser interpretados e transformados nos parâmetros dos métodos de classificação RMR [27]. Uma nova classificação, realizada no caminhamento da sondagem, é apresentada na Tabela 10.

Pode-se perceber que a partir de 107 m o trecho em rocha alterna condições de classe III a classe II, com alguns trechos bastante fraturados – considerados classes IV e V. A informação mais relevante que se obtém desta análise, portanto, é que existe uma variabilidade no material a ser escavado. Como este padrão se mantém a profundidades de até 75 m, é possível que esta alternância não se restrinja ao trecho inicial. Zonas de transição representam dificuldades técnicas na escavação, e por isso essa informação é valiosa para o desenvolvimento do projeto detalhado do túnel. No que diz respeito ao emboque do túnel, o comprimento do trecho em material classes IV e V foi reconsiderado, passando para 210 m, distância que na Figura 35 equivale aproximadamente à posição da estaca K12, pouco antes do ponto de inflexão da anomalia elétrica.

Tabela 10: Classificação geomecânica da sondagem SM 05

| Início do intervalo | Fim do intervalo | Pontuação Total RMR | Classificação RMR |
|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| 0,00                | 107,44           | Sem recuperação     | IV ou V           |
| 107,44              | 110,44           | 42                  | III               |
| 110,44              | 113,04           | 54                  |                   |
| 113,04              | 115,36           | 50                  |                   |
| 115,36              | 116,26           | 52                  |                   |
| 116,26              | 119,74           | 58                  |                   |
| 119,74              | 122,79           | 48                  |                   |
| 122,79              | 125,01           | 57                  |                   |
| 125,01              | 128,01           | 59                  |                   |
| 128,01              | 129,44           | 59                  |                   |
| 129,44              | 133,46           | 52                  |                   |
| 133,46              | 137,28           | 44                  |                   |
| 137,28              | 140,28           | 56                  |                   |
| 140,28              | 143,33           | 63                  |                   |
| 143,33              | 146,02           | 65                  |                   |
| 146,02              | 149,07           | 59                  | III               |
| 149,07              | 151,38           | 65                  | II                |
| 151,38              | 154,14           | 68                  |                   |
| 154,14              | 156,05           | 65                  |                   |
| 156,05              | 158,18           | 63                  |                   |
| 158,18              | 160,43           | 60                  | III               |
| 160,43              | 163,05           | 63                  | II                |
| 163,05              | 166,1            | 60                  | III               |
| 166,1               | 169,45           | 60                  |                   |
| 169,45              | 172,27           | 45                  |                   |
| 172,27              | 183,65           | Sem recuperação     | IV ou V           |

O método de escavação escolhido foi o mecanizado, com TBM Double-Shield, com o sistema de gripper, que permite melhor produtividade e reduz prazos porque permite a instalação de revestimento sem interrupção da escavação. No entanto, este tipo de máquina não é adequado para escavação em material de tão baixa coerência quanto o esperado nos primeiros 210 m do túnel do Gastau. Por este motivo, decidiu-se iniciar a escavação pelo método NATM, que permite maior flexibilidade no que diz respeito a avanços e suportação, e   por isso mais indicado para condi oes como a identificada no emboque.

O baixo nível de investiga o permitido ao longo do traçado levou   op o por uma investiga o   frente da escava o, cujo projeto foi elaborado com base no perfil geológico-geotécnico existente. Esta investiga o será aplicada apenas a partir do trecho escavado pela TBM, e tem por objetivo minimizar os riscos devido a um conhecimento do maciço abaixo do ideal   obra.

Está previsto o uso de investiga o elétrica (tipo BEAM, que utiliza resistividade e polaridade induzida). Esta metodologia tem uma penetra o de cerca de 20 m e deve ser utilizada de forma contínua, uma vez que pode ser realizada com a tuneladora em funcionamento. Será utilizado também um método

sísmico, conhecido como TRT (Tunneling Reflection Tomography), que tem penetração do sinal de até 150 metros dependendo das condições do maciço. Como este método só pode ser utilizado com o TBM parado, sua frequência de aplicação poderá variar, de acordo também com a penetração do sinal, utilizando-se as paradas obrigatórias para manutenção do equipamento.

### 3.2. Perfuração Direcional Horizontal

Quando um duto precisa vencer um obstáculo como um rio ou uma estrada, freqüentemente não é possível usar o método convencional de abertura de vala a céu aberto [30]. Nestes casos, é necessário recorrer a outras técnicas, chamadas ‘não destrutivas’, dentre as quais tem se destacado a perfuração direcional, especialmente no caso de travessias de rios.

O método de perfuração direcional horizontal (Horizontal Directional Drilling, HDD) com fins de instalação de dutos consiste na utilização de broca, acoplada a uma sonda, para a perfuração de um furo piloto, normalmente com diâmetro de entre 8 e 12 ¼ polegadas. Os drill pipes mais comuns são de 5”, podendo-se empregar drill pipes de 5,5” de diâmetro em casos de maior solicitação. É utilizado sistema de fluido de perfuração para a manutenção da abertura do furo, bem como para carreamento do material cortado e resfriamento da broca. No caso de perfuração em materiais inconsolidados, a broca utiliza apenas a força do jato de fluido para garantir o progresso da perfuração. (Figura 36)

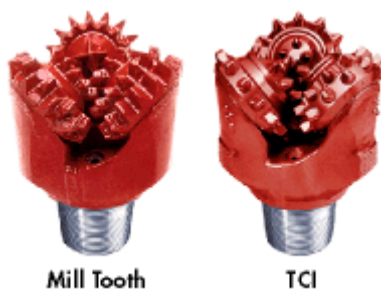


Figura 36: Exemplos de brocas utilizadas para materiais inconsolidados (Mill Tooth, ou dentes fresados) e materiais de maior resistência (TCI, com insertos de Tungstênio). [31]

Em seguida, o furo sofre alargamentos sucessivos, preferencialmente no sentido contrário ao da perfuração inicial, até atingir um diâmetro cerca de 50% maior do que a dimensão do duto que se pretende instalar. As ferramentas utilizadas nesta fase são chamadas alargadores e, assim como as brocas, devem

ser adequadas ao material a ser perfurado – abrasividade e resistência sendo as principais propriedades. Completados os alargamentos, o duto é então puxado para dentro do furo pela mesma sonda, sendo suas extremidades posteriormente soldadas ao restante da linha. (Figura 37)

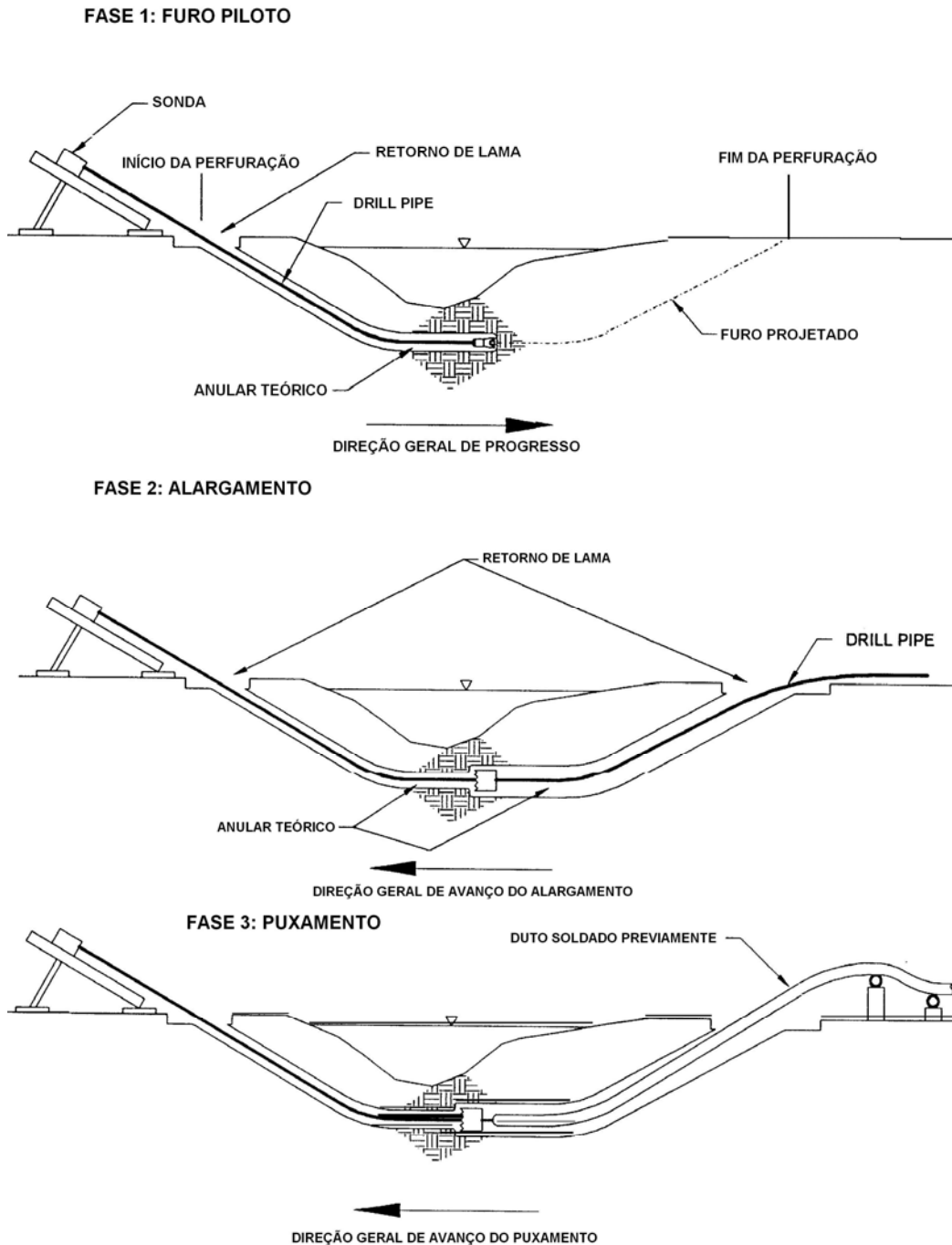


Figura 37: Fases da Perfuração Direcional (A) Furo Piloto (B) Alargamentos (C) Puxamento da coluna

As limitações do método estão ligadas, em sua maioria, à geometria do furo. Os ângulos e deflexões admissíveis em um duto são função de seu diâmetro (D),

espessura ( $e$ ), material de que é feito (representado pela tensão de escoamento,  $\sigma_y$ , e pelo módulo de elasticidade,  $E_c$ ) e também da pressão de projeto ( $P$ ):

$$R = \frac{E_c * D / 2}{0,9\sigma_y - 0,7P(e * D / 2)} \quad (36)$$

Curvas com raio menor do que o permitido representam tensões adicionais sobre o duto, tanto no puxamento quanto na operação, bem como risco de mossas e de corrosão. Desta forma, qualquer desvio durante a perfuração deve ser evitado, pois pode levar à perda da extensão já perfurada. Neste sentido, o grande inimigo do HDD são heterogeneidades, com mudanças bruscas nas propriedades do maciço, que dificultam o trabalho do operador da sonda. Alguns exemplos são a interface rocha-solo, contato entre diferentes litotipos, matacões, bandamentos muito salientes, áreas muito fraturadas em meio a maciço pouco fraturado, e vice-versa.

Uma condição geológica muito prejudicial à perfuração direcional é aquela em que exista uma camada significativa de pedregulhos, especialmente material transportado (cascalho). Ao encontrar uma camada deste tipo, nenhum dos métodos de corte disponíveis se comporta de maneira adequada: um jato não é capaz de mobilizar partículas deste porte, e uma broca tenderá a girar em falso, desgastando-se por abrasão, mas sem conseguir avançar. Quando a geometria não permite evitar este tipo de material, é recomendável viabilizar outro método para a instalação do duto.

Outra dificuldade encontrada é a possibilidade de fechamento do furo, devido ao colapso do material perfurado. Esse risco é especialmente forte no trecho mais horizontal do HDD, em condições de solo arenoso, que possua pouca coesão. O uso de fluido de perfuração visa garantir a estabilidade do furo, e para isso são utilizados em sua composição materiais como bentonita, polímeros, agentes espumantes. Cada um destes aditivos pode ter também a função de ajudar na limpeza do furo, encapsulando/mantendo em suspensão o material cortado. Casos em que exista possibilidade de interação química entre o fluido de perfuração e o maciço, como rochas calcáreas, por exemplo, requerem cuidados especiais com a composição da lama, mas são em sua maioria contornáveis.

Como condicionante do método em superfície, existe a necessidade de área adequada para a instalação de todo o equipamento: sonda, bombas, recicladoras de fluido etc. A área necessária depende da capacidade da sonda, mas não é menor

que 1200 m<sup>2</sup>, na margem de início do furo (chamada 'rig side'), e mais cerca de 800 m<sup>2</sup> na margem final ('pipe side'), normalmente não cabendo na área de uma faixa de dutos. Por isso, apesar de ser considerado em geral ambientalmente menos nocivo, o HDD pode não ser o melhor método em casos de travessias de pequeno porte, pois a área necessária para o canteiro pode ser maior do que a que seria impactada em uma travessia convencional. (Figura 38 e Figura 39)

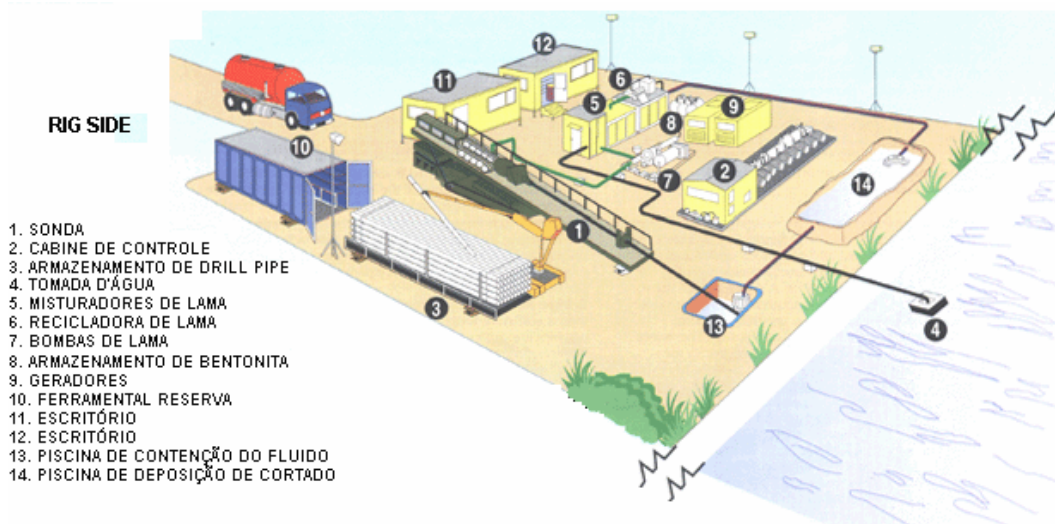


Figura 38: Esquema do canteiro no lado da sonda (Rig Side)

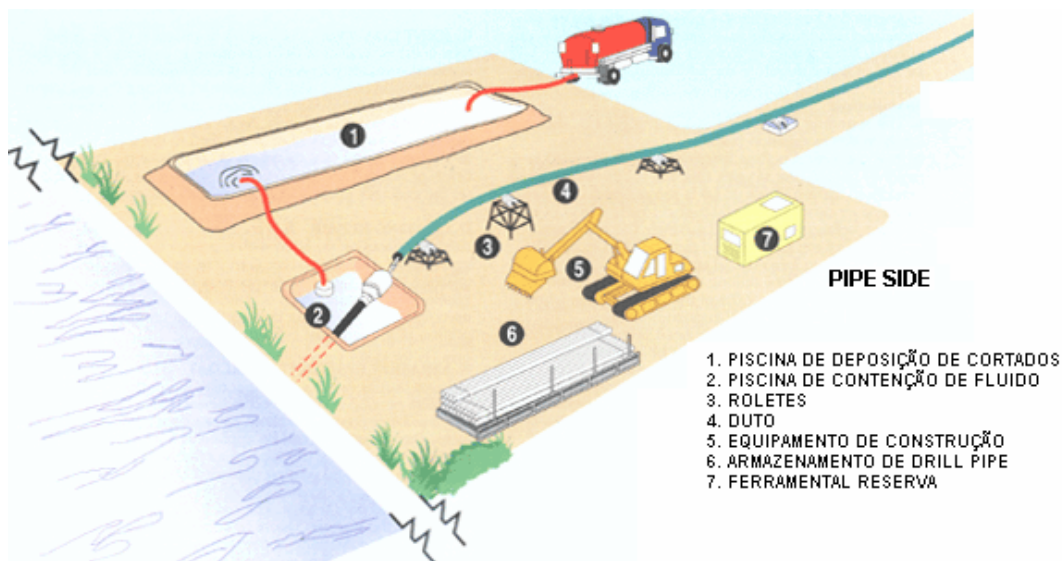


Figura 39: Esquema do canteiro no lado da coluna de tubos (Pipe Side)

O processo de puxamento do duto para dentro do trecho perfurado é um dos momentos mais sensíveis da obra. Quando ele se inicia, deve-se evitar ao máximo qualquer parada. Por conta disto, a coluna de dutos deve estar completamente montada, com soldas e revestimento, antes de seu início, para o quê é necessário que haja local adequado para que ela seja 'desfilada' dentro das restrições geométricas do duto. Quando o comprimento disponível em superfície é menor do

que a coluna, é possível dividir o duto em dois ou mesmo três trechos. No entanto, este tipo de solução deve ser evitado, pois força a parada do puxamento para a soldagem entre os trechos.

Uma vez que o HDD é indicado para casos em que a abertura de vala não é adequada, é possível imaginar que, freqüentemente, também existam limitações quanto a investigações diretas mais extensas. A questão então é como determinar a presença (ou eliminar sua possibilidade) de cada uma das condições de subsolo que representam dificuldades ao método, sem ter acesso a ele. Neste sentido, investigações geofísicas são a principal aposta.

### 3.2.1.

#### Caso 1: Rio Paraíba do Sul

Vejam os estudos realizados para travessia do rio Paraíba do Sul por um gasoduto de 18" de diâmetro. Trata-se de área em faixa de dutos já implantada, a oeste do estado do Rio de Janeiro, próximo da fronteira com Minas Gerais. O ponto havia sido escolhido anteriormente para a travessia porque existe uma ilha fluvial, que permite travessia por método convencional, com instalação do duto em vala aberta por escavação no leito do rio (Figura 40). No entanto, devido ao volume e velocidade de fluxo do rio neste ponto, houve ao longo da operação dos dutos já existentes alguns casos de exposição dos mesmos. Por este motivo, foi escolhido para o novo gasoduto o método de perfuração direcional, que permite instalação em profundidades maiores, aumentando a segurança operacional, sem necessidade de intervenção direta na calha do rio.



Figura 40: Travessia do rio Paraíba do Sul

Primeiramente, buscaram-se dados de mapeamento geológico existentes, que indicaram a presença de rocha metamórfica próxima à superfície (Figura 41). Os mesmos mapeamentos indicaram a provável existência de uma zona de cisalhamento da região, sendo esta de fato o caminho preferencial para o fluxo das águas do Paraíba do Sul, e também de áreas de depósito aluvial com espessuras máximas de 6 metros. Utilizando-se um modelo digital do terreno com precisão vertical de 0,5 m, fruto de levantamento anterior, foi desenvolvida uma primeira geometria para o furo direcional, a partir do qual foi possível determinar a área total de estudo e as profundidades envolvidas.

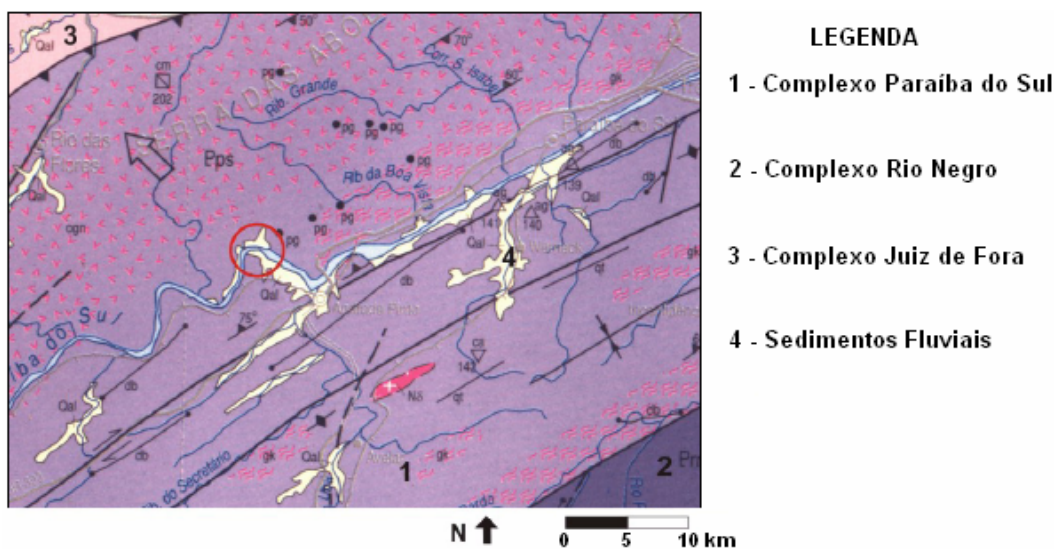


Figura 41: Mapa geológico da região, com a travessia em destaque [32]

Com base nestes dados, optou-se pela combinação de 9 sondagens diretas com três métodos indiretos: Georadar, Caminhamento Elétrico e Sub-Bottom Profiler. O Georadar foi escolhido por sua facilidade em identificar o topo rochoso quando raso, e também por ser capaz de localizar interferências enterradas, uma vez que se tratava de faixa de dutos já implantada. As antenas utilizadas foram de 200 MHz blindadas, para minimizar ruídos. Já a utilização do Caminhamento Elétrico visava identificar prioritariamente mudanças laterais nas camadas, em especial do topo rochoso, pela suposta existência de zona de cisalhamento. O arranjo utilizado foi o Wenner, com  $AB=MN=10$  m e 5 níveis de investigação (2, 5, 10, 20 e 30 m). O SubBottom foi considerado adequado para identificar o topo rochoso sob lâmina d'água, e diferenciá-lo das camadas depositadas. Se imaginava que, embora predominantemente arenosas, estas camadas fossem pouco espessas (visto a capacidade de mobilização do rio, que teria exposto



alguns dutos) e, portanto, a atenuação do sinal não seria significativa. A frequência da fonte utilizada foi de 3,5 kHz.

A programação foi feita de modo a cobrir uma área de 32 mil metros quadrados de forma regular. O GPR e o Caminhamento Elétrico foram aplicados em terra, em seções longitudinais e transversais ao caminhamento do duto, totalizando cerca de 1500 m de seções cada. O SBP, aplicado em lâmina d'água, também deveria ter seguido uma aquisição regular com seções longitudinais e transversais; no entanto, o grande fluxo do rio e o leito rochoso irregular dificultaram a navegação e forçaram uma aquisição menos regular. As seções de fato realizadas para cada método podem ser vistas na Figura 43. Toda a área foi coberta por topobatimetria com malha regular, para permitir as correções topográficas nas seções, necessárias à correta interpretação geológico-geotécnica dos dados.

Devido a questões de prazo, não foi possível aguardar os resultados dos métodos indiretos para a locação das sondagens diretas, que foram por isso realizadas, igualmente espaçadas, ao longo da diretriz prevista para o duto (figura 42). O critério de parada foi a profundidade prevista para o duto (a partir da geometria preliminar) acrescentada de cerca de 10 m, totalizando 46,36 m de sondagem a percussão e 154,16 m em rotativa. Essa margem de segurança (10 m) foi considerada adequada para que, encontrando-se alguma restrição ao traçado inicialmente previsto para o HDD, haja conhecimento suficiente do subsolo para a tomada de decisão de se aprofundar o duto. O diâmetro utilizado na sondagem rotativa foi o NW, para minimizar quebras na realização das manobras e possibilitar a obtenção de amostras adequadas para ensaios de laboratório.

Os diferentes métodos permitiram diferenciar 4 camadas geotécnicas principais: aterro, aluvião, solo residual e rocha em diferentes níveis de alteração. Suas extensões e profundidades são variáveis.

O aterro é composto por areia fina e argila arenosa, com consistência fofa e presença de detritos orgânicos. Esta camada só foi encontrada nas margens do rio, sendo ausente na ilha. O aluvião, encontrado em toda a área com exceção da ilha fluvial, é formado por sedimentos areno-argilosos, micáceos. No leito do rio, esta camada é formada basicamente por areias grosseiras, de coloração amarelada. A espessura desta camada é variável, podendo ir de 1,1 a 5,65 metros.

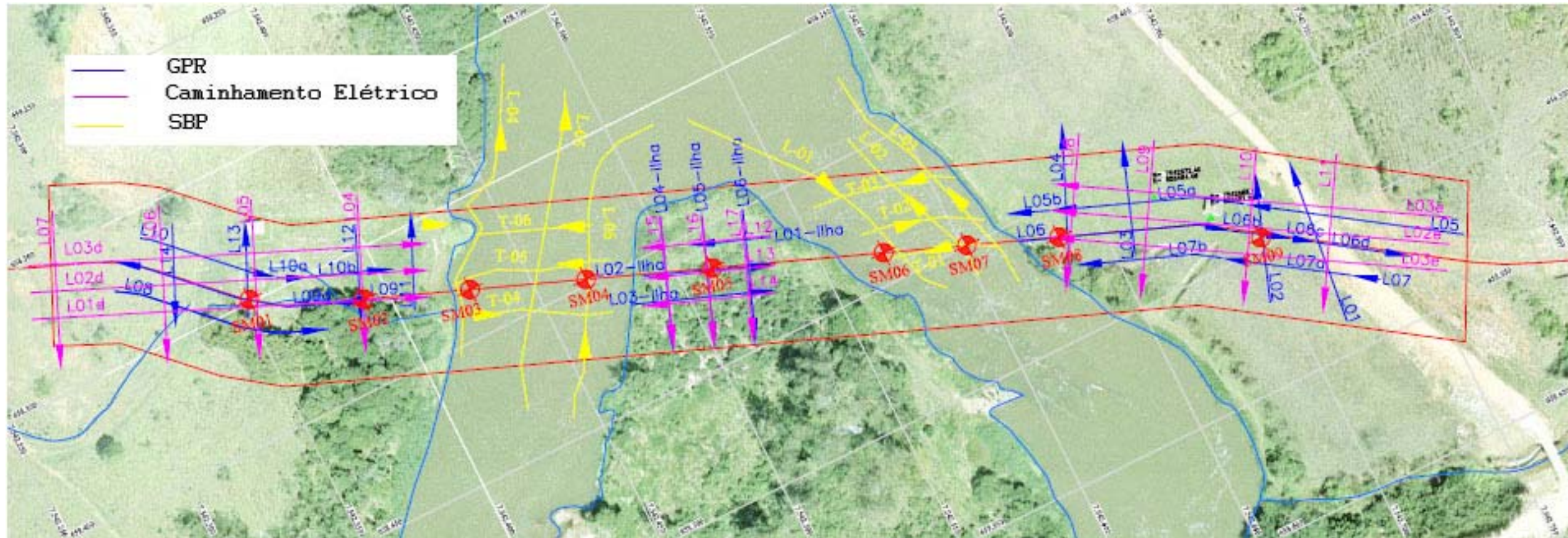


Figura 43: Sondagens diretas e indiretas realizadas [29]

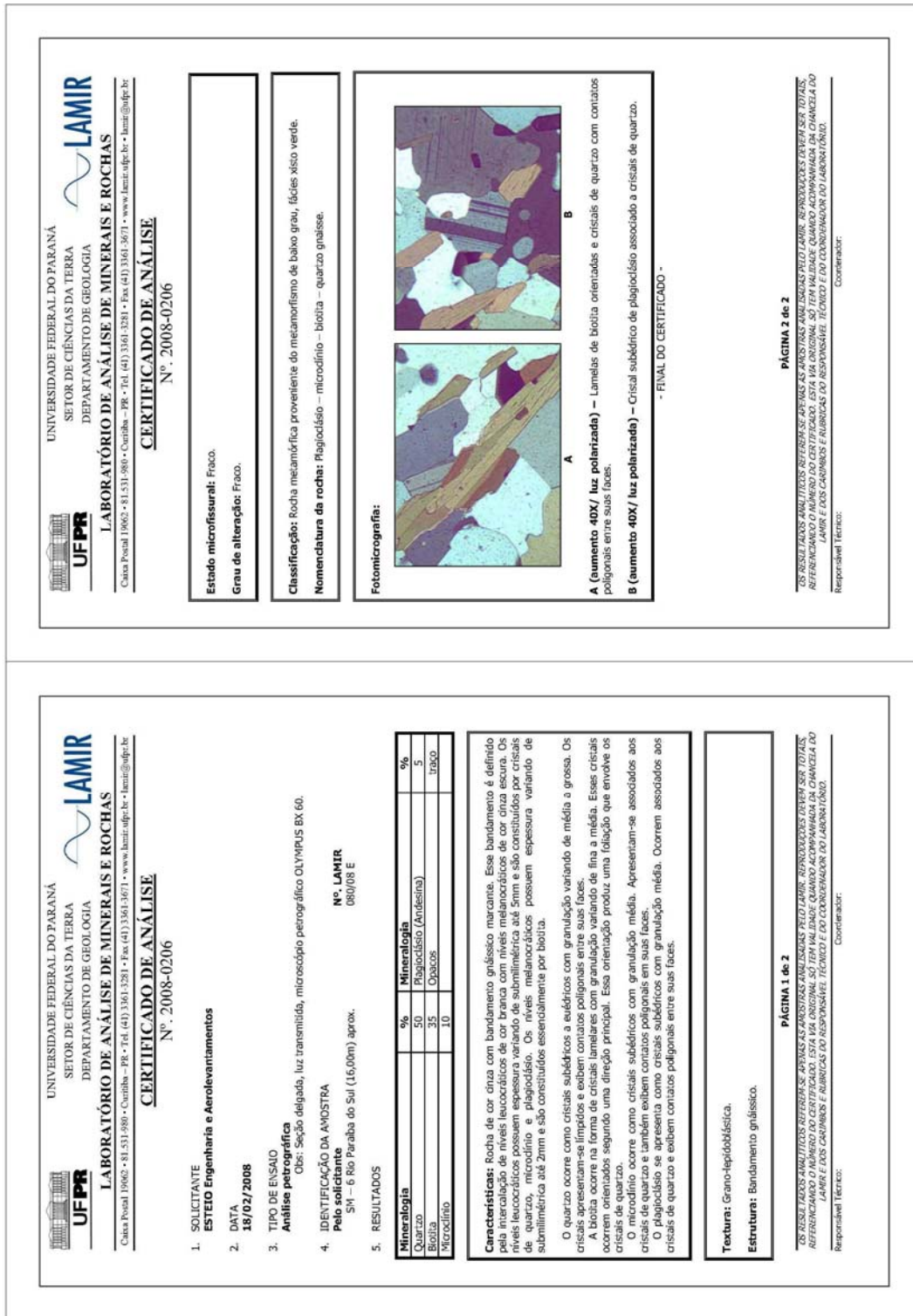


Figura 44: Resultado da análise petrográfica por lâmina delgada [29]

Logo abaixo, encontra-se solo residual de rocha, inicialmente maduro e, em profundidade, jovem (regolito). Esta camada, formada basicamente por areias grosseiras, micáceas, e por fragmentos de quartzo, está em superfície na ilha fluvial e neste ponto tem pouca espessura. No restante da área, sua espessura varia

entre 0,4 e 5,6 metros. Segue-se a rocha matriz, passando quase que diretamente do regolito à rocha sã, exceto localmente onde a camada alterada pode ser mais espessa. Trata-se de biotita granito gnaisse, com granada e, localmente, pirita. Apresenta-se com poucas fraturas subverticais e com RQD alto.

Dentre os testemunhos de rocha obtidos com as sondagens, foram selecionadas amostras representativas para realização de ensaios em laboratório, com o objetivo de permitir o correto dimensionamento de brocas e alargadores utilizados na perfuração direcional. Para caracterização geológica do maciço, foi realizada uma análise de lâmina petrográfica delgada, a partir de uma amostra retirada da sondagem SM-06, profundidade aproximada de 16 m. Os resultados se encontram na Figura 44, e confirmaram se tratar de rocha gnáissica, com presença de diversos minerais e bandamento marcante.

A

Tabela 11 apresenta a identificação das amostras que foram enviadas a laboratório para realização de ensaios de determinação de abrasividade e resistência. As metodologias utilizadas foram o CERCHAR [33], para abrasividade, e ISRM [34], para compressão uniaxial. Complementarmente, foram realizados ensaios de determinação de massa específica [35], umidade [36] e velocidade ultrassônica das amostras [37]. Os ensaios foram realizados pela Fundação CIENTEC.

Tabela 11: Identificação das amostras ensaiadas [29]

| Identificação | Litologia | Furo  | Prof Inicial | Prof Final |
|---------------|-----------|-------|--------------|------------|
| 23885/3       | Gnaisse   | SM-03 | 6,88         | 7,32       |
| 23885/4       | Gnaisse   | SM-04 | 6,37         | 7,87       |
| 23885/5       | Gnaisse   | SM-05 | 11,30        | 12,05      |
| 23885/6       | Gnaisse   | SM-06 | 7,28         | 7,65       |
| 23885/7       | Gnaisse   | SM-07 | 7,14         | 7,71       |

Para os ensaios de compressão uniaxial, as amostras foram preparadas utilizando-se serra diamantada (para corte) e retífica (para acabamento das superfícies planas). Como pode ser observado na Tabela 12, algumas das amostras não atenderam integralmente às recomendações de dimensão para os ensaios (54 mm de diâmetro mínimo e  $B/H > 2,5$ ), devido à limitação de material disponível. Nos casos em que isso ocorreu, os resultados devem ser analisados com maior cuidado.

Tabela 12: Resultados dos diversos ensaios realizados [29]

| Identificação | D (cm)       | H (cm) | Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> ) | Vp (km/s) | W (%) | SC (MPa) | Observações                                   |
|---------------|--------------|--------|---------------------------------------|-----------|-------|----------|---|
| 23885/3       | 5,42         | 11,16  | 2,72                                  | 1,81      | 0,0   | 56,38    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
|               | 5,42         | 11,29  | 2,69                                  | 1,80      | 0,0   | 59,56    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
| 23885/4       | 5,42         | 12,11  | 2,59                                  | 1,33      | 0,1   | 36,99    | Ruptura por cisalhamento                      |
|               | 5,42         | 12,64  | 2,59                                  | 1,36      | 0,0   | 36,68    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
| 23885/5       | 5,44         | 13,93  | 2,73                                  | 2,24      | 0,0   | 44,05    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
| 23885/6       | 5,40         | 12,59  | 2,71                                  | 3,50      | 0,1   | 55,21    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
|               | 5,42         | 12,75  | 2,75                                  | 3,78      | 0,0   | 56,88    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
| 23885/7       | 5,40         | 12,69  | 2,69                                  | 2,08      | 0,3   | 15,62    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
|               | 5,43         | 9,95   | 2,71                                  | 2,43      | 0,0   | 66,63    | Ruptura por cisalhamento                      |
|               | 5,40         | 10,62  | 2,74                                  | 2,16      | 0,3   | 23,72    | Ruptura por cisalhamento                      |
|               | 5,42         | 13,43  | 2,66                                  | 3,29      | 0,1   | 61,38    | Ruptura por cisalhamento                      |
|               | 5,41         | 13,44  | 2,60                                  | 1,88      | 0,2   | 20,03    | Ruptura por cisalhamento em plano de foliação |
|               | Média Aritm. |        |                                       | 2,68      | 2,37  | 0,2      | 37,48   |
| DesvioPadrao  |              |        | 0,05                                  | 0,55      | 0,1   | 24,46    | ---   |

Previamente à ruptura dos corpos de prova, foram realizados ensaios de massa específica, umidade e velocidade ultrassônica das amostras, que podem ser utilizados para apoiar a interpretação dos resultados. Os resultados obtidos são apresentados também na Tabela 12. Pode-se perceber uma variação significativa nos valores obtidos, especialmente nos corpos de prova da SM-07. Pode-se

identificar também que uma resistência mais baixa (abaixo dos 40 MPa) está associada a uma ruptura em plano de foliação, ou a amostras com grande percentual de biotita, mineral menos resistente (Figura 45). A exceção, o segundo corpo de prova da SM-04, apresentou uma velocidade de onda ultrassônica abaixo da média, o que pode indicar um grau de microfraturamento da rocha maior do que a maioria das amostras, e pode, portanto, explicar o resultado do ensaio de compressão.

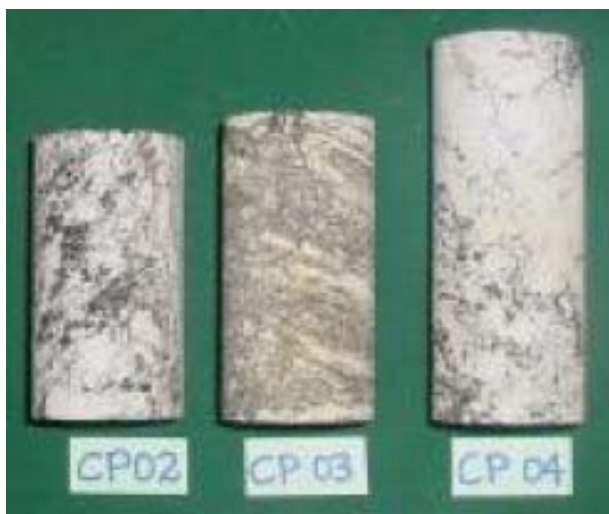


Figura 45: Corpos de prova retirados de testemunhos da SM 07 [29]

O índice CAI (CERCHAR Abrasivity Index) representa o desgaste de uma ponteira de aço (Figura 46) quando é arrastada continuamente sobre 10 cm da rocha, com velocidade e força controladas. Por se tratar de análise da abrasão do aço em atrito com a rocha, é considerado mais adequado para a determinação de desgaste de ferramental do que outros ensaios mais comuns, como o Los Angeles [38]. Cada uma das amostras foi ensaiada 20 vezes, com exceção da amostra da SM-04, que por seu pequeno volume só permitiu 5 ensaios. Os resultados podem ser vistos na Tabela 13.



Figura 46: Ponteira de metal utilizada no ensaio CERCHAR [29]

Tabela 13: Resultados dos ensaios CERCHAR [29]

| Identificação | Litologia | Furo  | Índice CERCHAR (CAI) |               |
|---------------|-----------|-------|----------------------|---------------|
|               |           |       | Média                | Desvio padrão |
| 23885/3       | Gnaisse   | SM-03 | 1,6                  | 0,7           |
| 23885/4       | Gnaisse   | SM-04 | 1,0                  | 0,4           |
| 23885/5       | Gnaisse   | SM-05 | 1,8                  | 0,9           |
| 23885/6       | Gnaisse   | SM-06 | 3,1                  | 0,4           |
| 23885/7       | Gnaisse   | SM-07 | 0,9                  | 1,1           |

O GPR teve dificuldades de penetração do sinal, devido ao efeito combinado de solo predominantemente argiloso com nível d'água próximo à superfície. Ainda assim, foi possível mapear o nível d'água ao longo de boa parte da área, resultado que pôde ser aferido pelas sondagens diretas. Os limites da camada de aterro, descontínua, também puderam ser identificados. Alguns sinais hiperbólicos identificados podem ser correlacionados com dutos existentes na faixa (Figura 47 e Figura 48). O topo rochoso, mais profundo, não foi imageado, possivelmente por ter sido utilizada uma antena de frequência demasiado alta.

O Caminhamento Elétrico foi mais bem sucedido em identificar o embasamento rochoso, que representa um aumento grande na resistividade do maciço por conta do contraste com o solo argiloso e úmido. Ele indicou ainda a presença de discontinuidades localizadas ao pé da encosta da margem esquerda do rio (Figura 49), que não foram identificadas pelas sondagens diretas. Por outro lado, este método não conseguiu diferenciar claramente as várias camadas de solo.

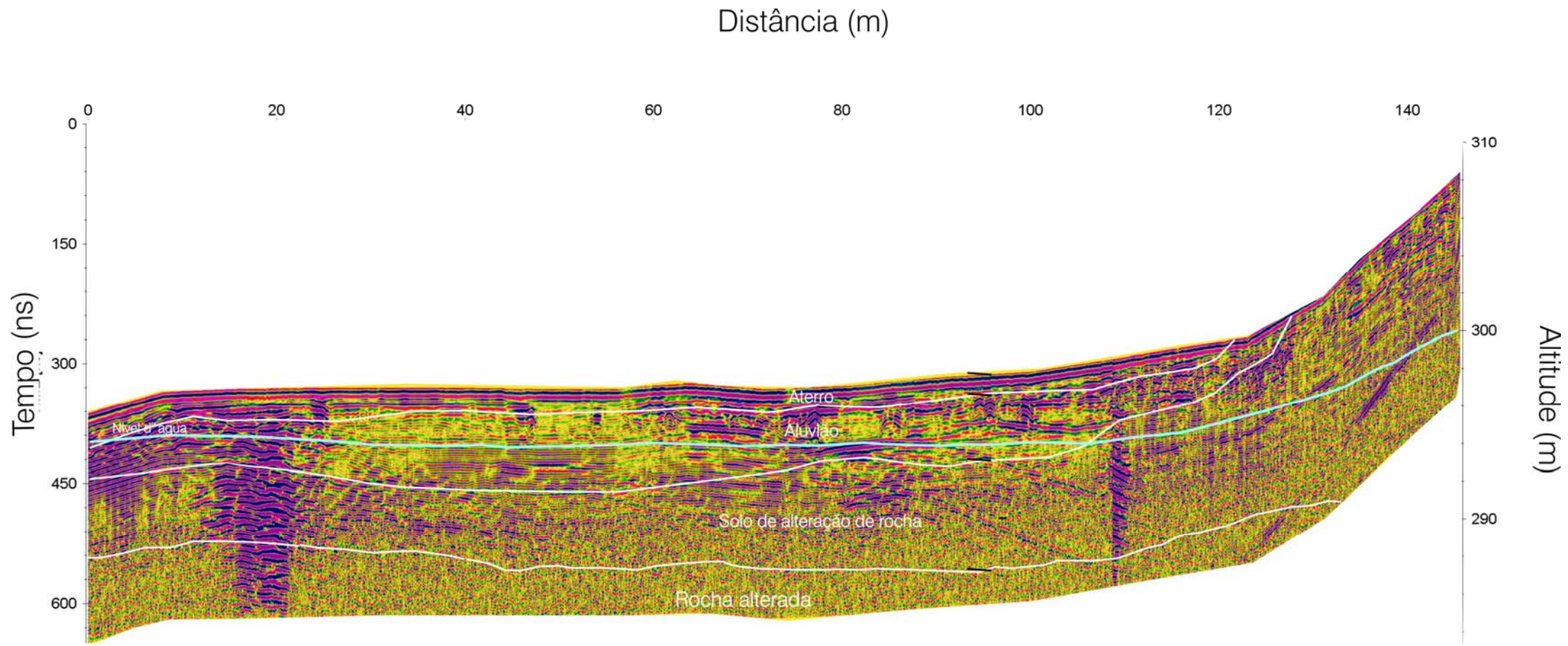


Figura 47: Perfil de GPR interpretado – linha L06 a L06d [29]

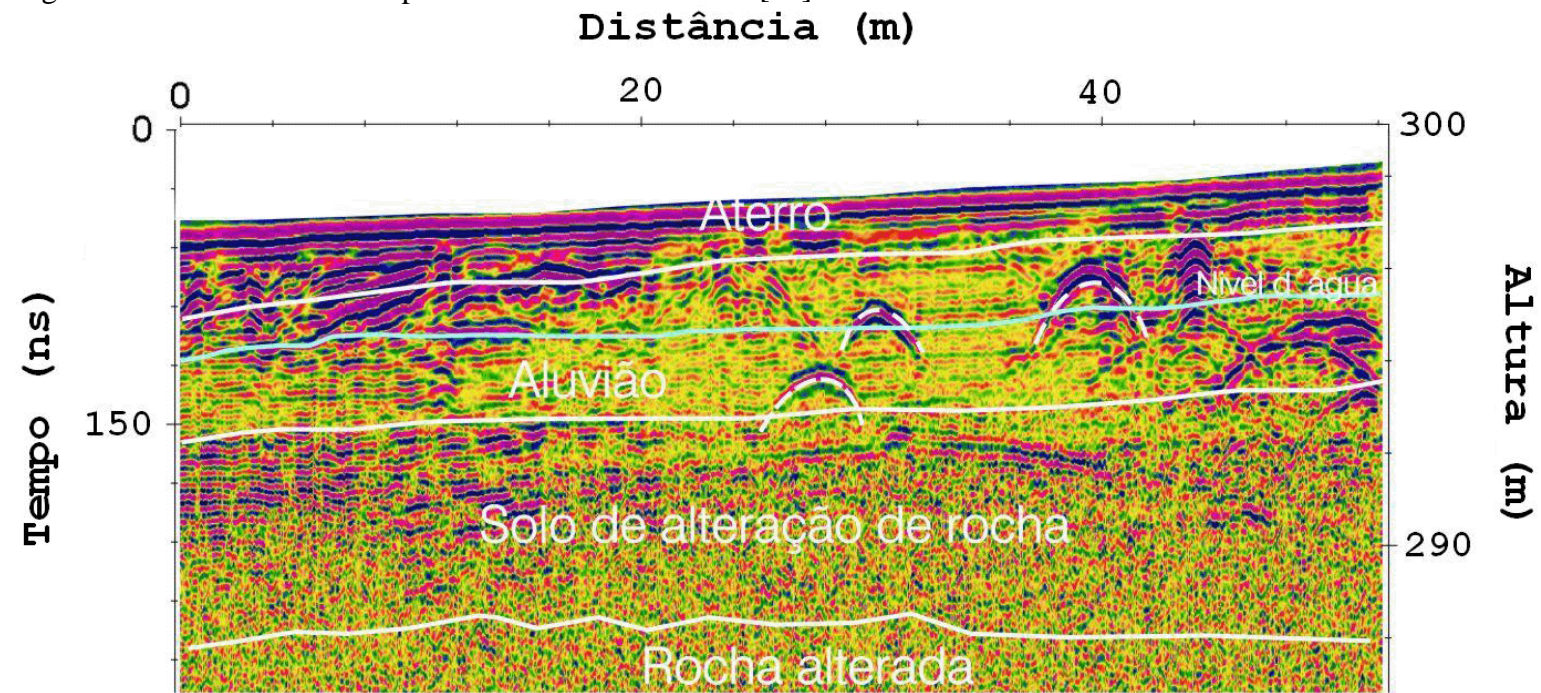


Figura 48: Linha transversal interpretada, especial interesse nos sinais hiperbólicos identificados [29]



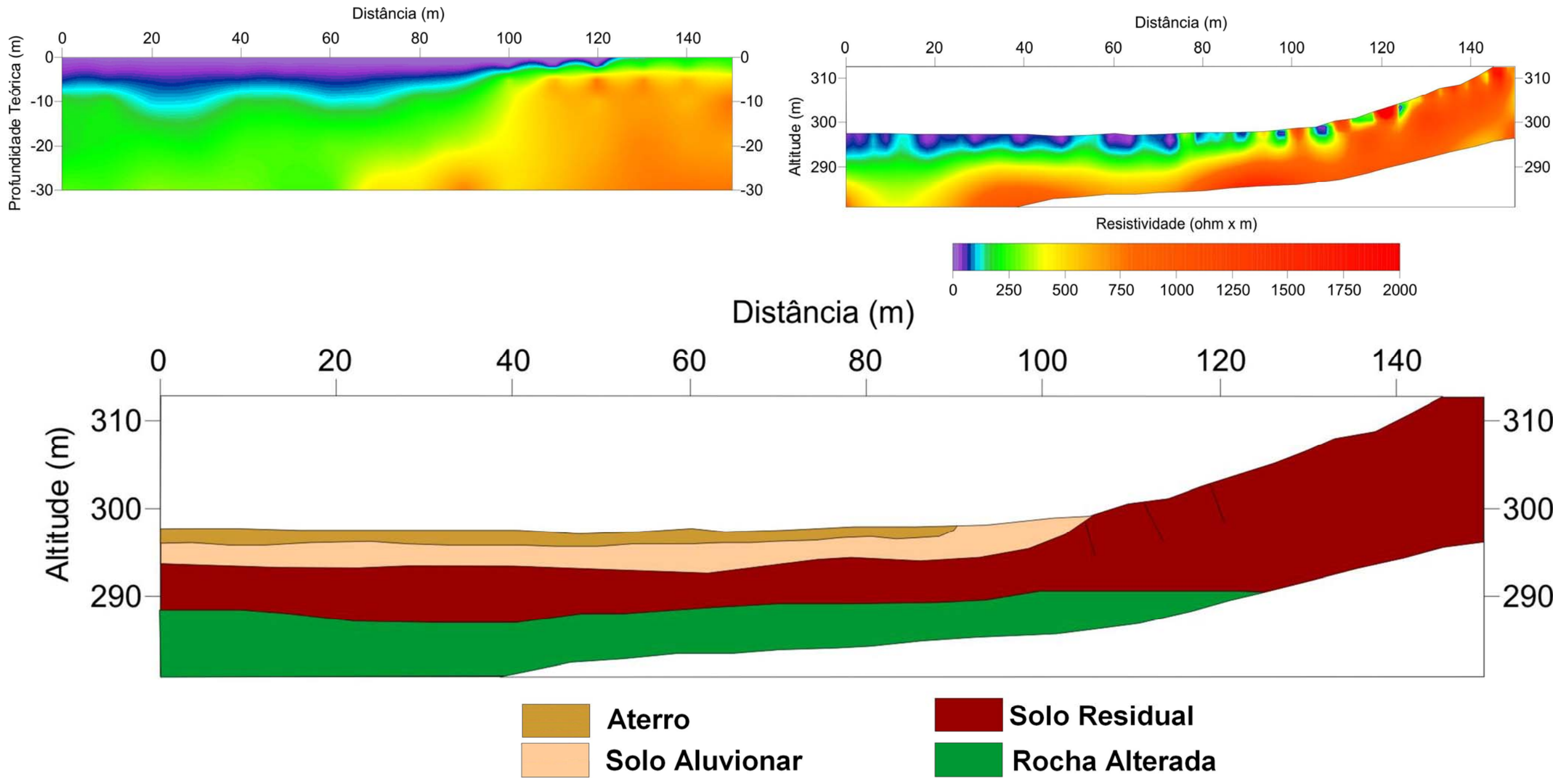


Figura 49: Perfil de Caminhamento Elétrico interpretado (linha L02e), com algumas fraturas inferidas na base do talude [29]

Chama a atenção que houve uma ‘inversão’ entre o que se pretendia com cada um dos dois métodos utilizados em terra e o que foi de fato observado. Considerando que a literatura aponta o arranjo Dipolo-dipolo como o mais sensível a mudanças laterais, é de se pensar que ele teria sido mais indicado para que os resultados de caminhamento elétrico em termos de variabilidade lateral tivessem sido de melhor qualidade; a sensibilidade a variações verticais, no entanto, teria sido comprometida, e possivelmente o topo rochoso não teria sido mapeado. Neste sentido, a utilização do arranjo Wenner teve um efeito benéfico ao projeto.

O SBP obteve bons resultados, apesar das dificuldades de navegação e da predominância de areia no leito. A Figura 50 mostra um perfil já processado do SBP. Foi possível mapear os pontos de rocha aflorante, bem como sedimentos de fundo e topo rochoso. A Figura 51 mostra um mapeamento do fundo de acordo com a espessura dos sedimentos. É possível verificar que a máxima espessura de sedimentos não chega a 3 m, de modo que o risco de se enfrentar intercalação entre rocha e aluvião no trecho de perfuração sob o rio foi afastado.

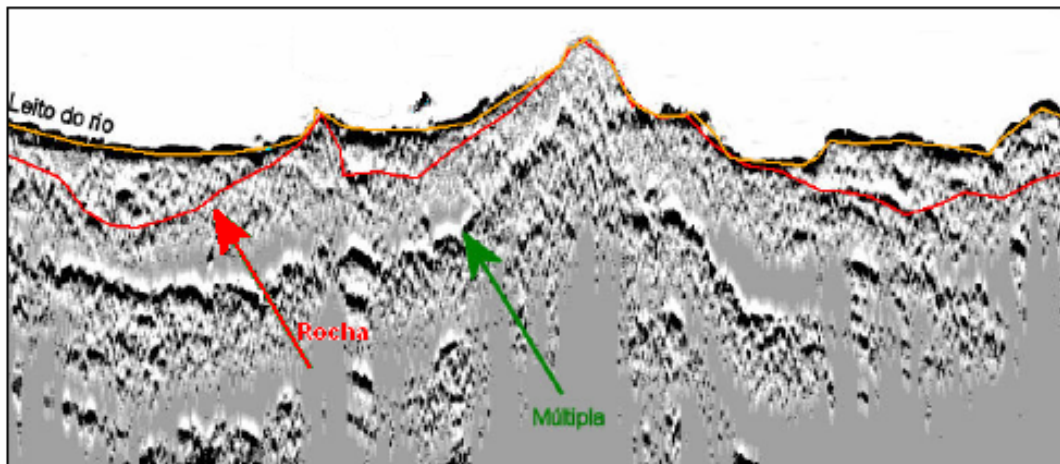


Figura 50: Seção de sub-bottom profiler interpretada (adaptada de [29])

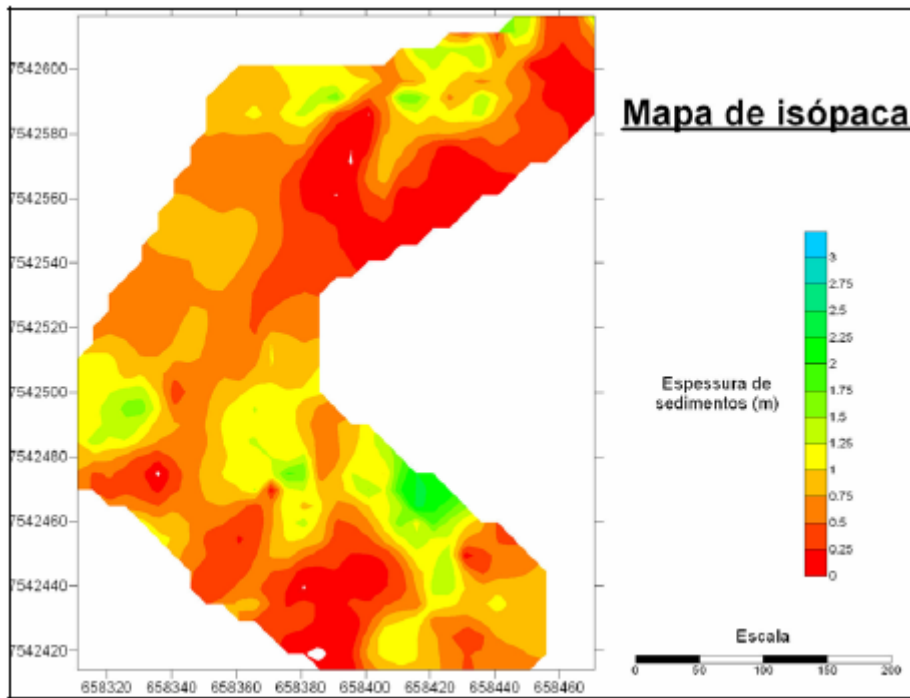


Figura 51: Mapa de isopacas da travessia do Paraíba do Sul [29]

Em termos gerais, a margem direita do rio pode ser identificada como a mais adequada para o início da perfuração, tanto pela facilidade de desfile da coluna na margem oposta, como pelo mergulho inferido do topo rochoso, que permite um ângulo de ataque mais vantajoso (mais perpendicular à rocha) para a broca (Figura 52). Um ataque perpendicular diminui a probabilidade de que a broca escorregue na interface solo-rocha.

Na margem esquerda, as seções 4 e 5 (mais próximas da margem) indicam mergulho do topo rochoso na direção transversal à perfuração. Essa feição, quando muito acentuada, pode ser prejudicial por gerar desvios durante a execução. No entanto, neste caso, por se tratar apenas de ligeiro mergulho, não deve haver impacto significativo no projeto. (Figura 53) Exceto por essa característica, a análise das linhas geofísicas transversais realizadas indicou que o subsolo tem propriedades homogêneas na área estudada. Por isto, não foi identificada vantagem em modificar a diretriz microlocalizada e o projeto foi mantido na locação original.

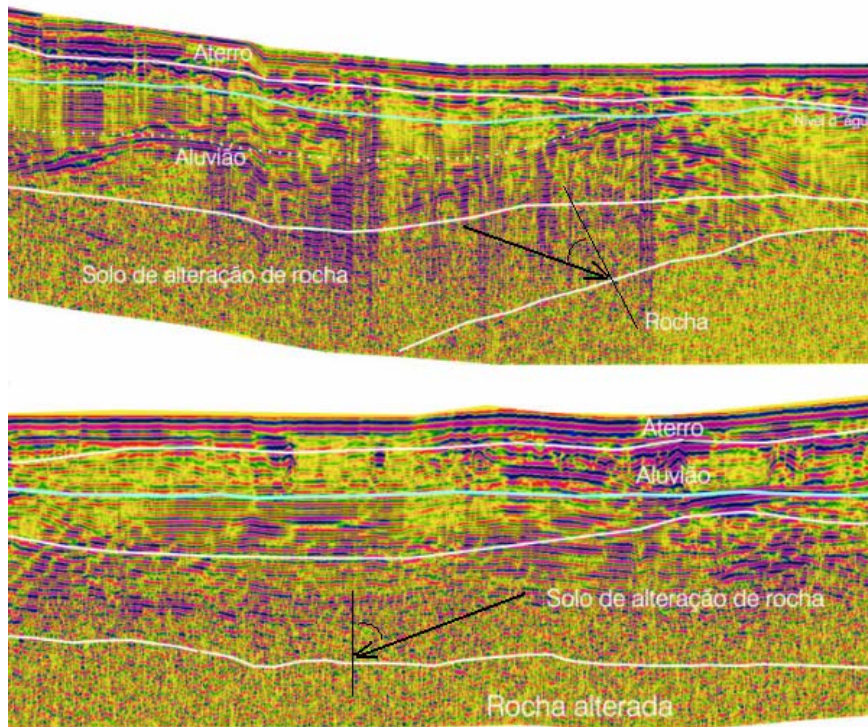


Figura 52: Comparação entre o mergulho do topo rochoso nas margens direita (acima) e esquerda (abaixo). O ângulo de ataque é mais vantajoso na margem direita. [29]

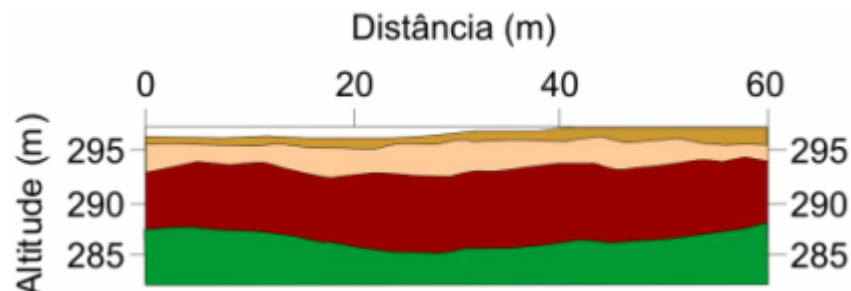


Figura 53: Inclinação transversal do topo rochoso [29]

No projeto de túneis, é comum utilizar métodos de classificação do maciço para identificar os trechos de maior e menor dificuldade ao longo do traçado, permitindo aos técnicos se preparar para o que está à frente da escavação. Para o desenvolvimento do projeto de perfuração direcional, algo deste tipo seria interessante, especialmente aplicado a toda uma seção ou volume, dentro do qual fosse possível escolher a melhor geometria para o furo.

No entanto, se analisamos as classificações mais conhecidas – RMR de Bieniawsky, Q de Barton – identificamos que estas não são adequadas para o problema da perfuração direcional. Isso acontece porque, por serem baseadas na soma de uma pontuação que provém de diversas características, duas condições de maciço bastante diferentes podem receber uma mesma classificação. Desta forma, nenhuma delas é suficientemente eficaz na identificação de variações nas

propriedades do maciço para ser aplicada ao problema em questão. Por este motivo, um enfoque diferente, mais qualitativo, foi utilizado na análise dos dados.

O objetivo principal era identificar trechos que deveriam ser evitados na trajetória escolhida para a perfuração. Os boletins foram analisados, buscando-se visualmente pontos onde as propriedades da rocha destoassem do restante do maciço. Em sua maioria, os pontos identificados apresentavam nível de fraturamento e/ou alteração acima do material envolvente. Também foram identificadas as zonas de transição entre materiais. Os boletins de sondagem de SM01 a SM09b (Anexo II) apresentam esta análise para cada sondagem.

O resultado final do conjunto de investigações foi um perfil geológico-geotécnico da travessia, a partir do qual um projeto mais detalhado pôde ser elaborado (Anexo II). Neste caso, a geometria do HDD foi modificada, ficando menos profunda, menos extensa, e permitindo ângulos de entrada e saída mais benéficos à realização do projeto. Contudo, não foi possível escapar de todos os intervalos considerados desvantajosos para a perfuração. No entanto, o conhecimento da existência de pontos de maior fraturamento é informação relevante, que certamente norteará a especificação do fluido de perfuração a ser utilizado, minimizando possíveis dificuldades à obra.

### **3.2.2.**

#### **Caso 2: substituição de trecho**

Quando um duto em operação apresenta problemas, pode ser necessário substituir algum trecho deste para solucioná-lo. Foi o caso de duas travessias, ambas no município de Mossoró, RN. O duto havia sido implantado na década de 80, e para adequá-lo aos padrões operacionais atuais, optou-se pela substituição dos trechos, originalmente implantados em vala subfluvial, pelo método de perfuração direcional.

Por se tratar de uma reabilitação, o nível de restrições impostas a este projeto foi muito maior do que o caso apresentado na seção anterior. Para o sucesso da substituição, é necessário garantir a suavidade dos ângulos entre o duto existente e o novo trecho, permitindo o correto acoplamento das novas soldas. Além disto, a faixa já se encontrava praticamente toda ocupada, havendo apenas o suficiente para a instalação segura da nova travessia. Havia ainda a limitação de recursos para a realização do serviço de investigação geotécnica.

Com estas restrições, fazer um estudo tão detalhado quanto o apresentado anteriormente não era possível ou mesmo adequado. Como a linha para instalação do duto já estava definida, não havendo liberdade para desvios laterais, era menor a utilidade de informações transversais. Decidiu-se então que apenas uma linha de investigações geofísicas seria realizada, e com apenas um método geofísico, acompanhado de sondagens diretas e alguns ensaios, caso se encontrasse rocha em subsuperfície.

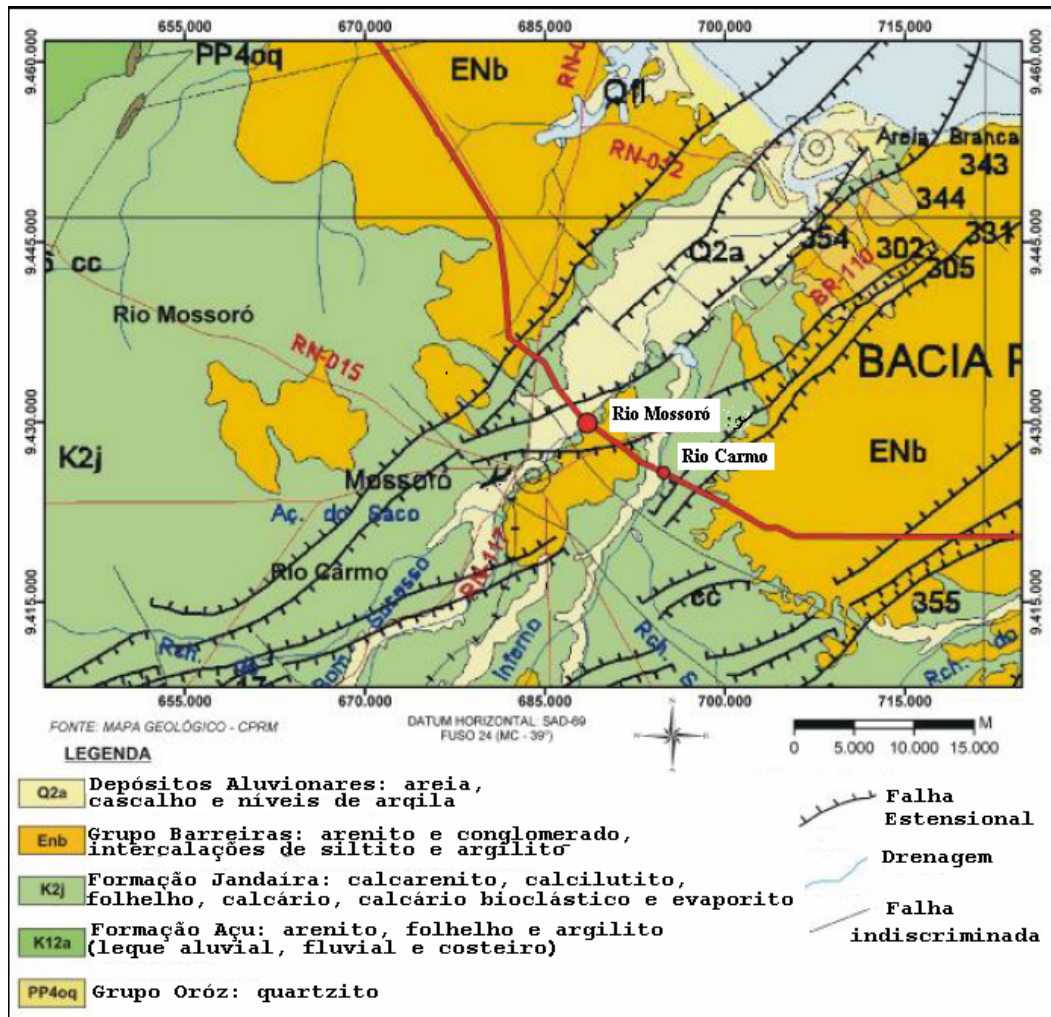


Figura 54: Mapa geológico da região das duas travessias [39]

O levantamento preliminar de dados incluiu a revisão de mapas temáticos existentes e uma visita a campo. Os mapas indicaram se tratar de área com depósitos aluvionares de espessura média, sotopostos a rochas da Formação Jandaíra, predominantemente calcarenitos e calcilutitos, variando de brando a resistentes (Figura 54). Na visita a campo foram levantadas as características que se consideravam relevantes para a determinação dos estudos a serem realizados, utilizando como base uma planilha de verificação (Figura 55 e Figura 56).

Figura 55: Planilha de campo do Rio Mossoró [29]

| IDENTIFICAÇÃO DA TRAVESSIA – PLANILHA DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO IDENTIFICAÇÃO DA TRAVESSIA                             |  |  |  |
|--|--|--|--|
| NOME   | MUNICÍPIO  | UF   | LOCALIZAÇÃO  |
| Rio Mossoró  | Mossoró  | RN   | KM CARTA TRACADO   |
| FOTOS Nº   | FAVIA  | RESPONSÁVEL PELA VERIFICAÇÃO   | COORDENADAS  |
|  | Ernesto Figueira   | José Adriano Trevisan  | 688.521/8.428.814  |
|  |  |  | DATA   |
|  |  |  | 18/01/2007   |
| CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DE VAZÃO  |  |  |  |
| FORMA:   |  | DIMENSÕES APROXIMADAS:   |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Espiralada   | <input type="checkbox"/> Encalhada                                       | Largura: 60 metros   | Profundidade: 2,00 m   |
| NÍVEL DE CHEIA: MM (última cheia) = aproximadamente 2,00 - 3,00 m. VELOCIDADE APROXIMADA (m/s): Superior a 1 minuto. |  |  |  |
| ATIVIDADES EXTRATIVAS:   |  |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Potencial  | <input type="checkbox"/> Garimpo   | <input type="checkbox"/> Outras  | <input type="checkbox"/> Barrenta  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Área   | <input type="checkbox"/> Seixos  | <input checked="" type="checkbox"/> Turva (esverdeada)                   | <input type="checkbox"/> Limpida   |
| OBRAS PRÓXIMAS:  |  |  |  |
| OBSERVAÇÕES:   |  | OBRAS:   |  |
| <input type="checkbox"/> Emissários  | <input type="checkbox"/> Barragem  | <input type="checkbox"/> Barragem  |  |
| <input type="checkbox"/> Pontes  | <input checked="" type="checkbox"/> Rede de energia elétrica             | 1.000 m a montante.  |  |
| <input type="checkbox"/> Bueiros   | <input checked="" type="checkbox"/> Duto                                 |  |  |
| USO DO SOLO:   |  |  |  |
| <input type="checkbox"/> Não há  | <input type="checkbox"/> Cultura Perene                                  | <input type="checkbox"/> Uso Permanente                                  |  |
| <input type="checkbox"/> Urbano  | <input type="checkbox"/> Cíclica   | <input checked="" type="checkbox"/> Pastagem (Margem direita)            |  |
| INFORMAÇÕES REGIONAIS:   |  |  |  |
| Extensa planície de inundação (aproximadamente 3 km) e barragem a montante.  |  |  |  |
| CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA   |  |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  | MARGEM DIREITA   | MARGEM DIRETA  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terreno Rochoso  | <input type="checkbox"/> Rocha Cristalina                                | <input type="checkbox"/> Terreno Rochoso                                 | <input type="checkbox"/> Rocha Cristalina                                |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terreno não Rochoso  | <input type="checkbox"/> Rocha Estratificada                             | <input checked="" type="checkbox"/> Terreno não Rochoso                  | <input type="checkbox"/> Rocha Estratificada                             |
| <input type="checkbox"/> Material Coesivo  | <input type="checkbox"/> Solo de Alteração                               | <input type="checkbox"/> Solo de Alteração                               | <input type="checkbox"/> Solo de Alteração                               |
|  | <input checked="" type="checkbox"/> Material não coesivo                 | <input type="checkbox"/> Solo Transportado                               | <input type="checkbox"/> Solo Transportado                               |
|  |  | <input type="checkbox"/> Material Coesivo                                | <input checked="" type="checkbox"/> Material não Coesivo                 |
| LADO ESQUERDO  |  |  |  |
| LADO DIREITO   |  |  |  |
| <input type="checkbox"/> Leito Rochoso   | <input type="checkbox"/> Seixos  | <input type="checkbox"/> Leito Rochoso                                   | <input type="checkbox"/> Seixos  |
| <input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo   | <input checked="" type="checkbox"/> Areia                                | <input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo                 | <input checked="" type="checkbox"/> Areia                                |
| <input type="checkbox"/> Matacões  | <input type="checkbox"/> Grossa  | <input type="checkbox"/> Matacões  | <input type="checkbox"/> Grossa  |
| <input type="checkbox"/> Silte   | <input type="checkbox"/> Média   | <input type="checkbox"/> Silte   | <input type="checkbox"/> Média   |
| <input type="checkbox"/> Argila  | <input type="checkbox"/> Fina  | <input type="checkbox"/> Argila  | <input type="checkbox"/> Fina  |
| CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA  |  |  |  |
| VERTENTES  |  |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |  | MARGEM DIREITA   |  |
| <input type="checkbox"/> Côncava   | <input checked="" type="checkbox"/> Declividade > 45°                    | <input type="checkbox"/> Côncava   | <input type="checkbox"/> Declividade > 45°                               |
| <input type="checkbox"/> Convexa   | <input type="checkbox"/> Declividade < 45°                               | <input type="checkbox"/> Convexa   | <input checked="" type="checkbox"/> Declividade < 45°                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aplanada   |  | <input checked="" type="checkbox"/> Aplanada                             |  |
| FORMA DA CALHA   |  |  |  |
| CALHA EM FORMA DE V  |  | CALHA EM FORMA DE U  |  |
| <input type="checkbox"/> Agudo   | <input type="checkbox"/> Simétrico                                       | <input type="checkbox"/> Agudo   | <input type="checkbox"/> Simétrico                                       |
| <input type="checkbox"/> Intermediário   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     | <input type="checkbox"/> Intermediário                                   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     |
| <input type="checkbox"/> Aberto  |  | <input checked="" type="checkbox"/> Aberto                               |  |
| DINÂMICA FLUVIAL   |  |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |  | MARGEM DIREITA   |  |
| <input type="checkbox"/> Dissecção Contínua  | <input type="checkbox"/> Dissecção Contínua                              | <input type="checkbox"/> Dissecção Contínua                              | <input type="checkbox"/> Dissecção Contínua                              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Abrasão  | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Abrasão                  | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Abrasão                  | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Abrasão                  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Preenchimento  | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Preenchimento            | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Preenchimento            | <input checked="" type="checkbox"/> Terraços de Preenchimento            |
| <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação   | <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação               | <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação               | <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação               |
| <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação  | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação                | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação                | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação                |
| <input type="checkbox"/> Feições de Agradiação   | <input type="checkbox"/> Feições de Agradiação                           | <input type="checkbox"/> Feições de Agradiação                           | <input type="checkbox"/> Feições de Agradiação                           |
| <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais  | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial   | <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial | <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial | <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial |
| Comportamento em planta da margem  |  | Comportamento em planta da margem  |  |
| <input type="checkbox"/> Retilínea   | <input type="checkbox"/> Retilínea                                       | <input type="checkbox"/> Retilínea                                       | <input type="checkbox"/> Retilínea                                       |
| <input type="checkbox"/> Curva Esquerda  | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                                  | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                                  | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                                  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita  | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                        | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                        | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                        |
| VEGETAÇÃO CLAR   |  |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |  | MARGEM DIREITA   |  |
| <input type="checkbox"/> Densa   | <input type="checkbox"/> Densa   | <input type="checkbox"/> Densa   | <input type="checkbox"/> Densa   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Rala   | <input checked="" type="checkbox"/> Rala                                 | <input checked="" type="checkbox"/> Rala                                 | <input type="checkbox"/> Rala  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial  | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial        | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial        | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial        |
| <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana   | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana         | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana         | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana         |
| OBSERVAÇÕES  |  |  |  |
| - Barragem a jusante e tanques para a criação de camarão na margem esquerda;   |  |  |  |
| - Barragem expressiva, aproximadamente 80 metros. Água retida devido à barragem à jusante (controle hidráulico);     |  |  |  |
| - A água apresenta coloração esverdeada;   |  |  |  |
| - Disposição de lixo (lixão) na planície de inundação (acesso ao rio).   |  |  |  |

IDENTIFICAÇÃO DA TRAVESSIA – PLANILHA DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO IDENTIFICAÇÃO DA TRAVESSIA

|  |   |   |   |  |  |
|--|---|---|---|--|--|
| NOME<br>Rio Carmo  |   | MUNICÍPIO<br>Mossoró  | UF<br>RN  | LOCALIZAÇÃO<br>Km CARTA TRACADO  | COORDENADAS<br>894.884 / 9.425787  |
| FOTOS Nº<br>FAIXA  |   | RESPONSÁVEL PELA VERIFICAÇÃO<br>Ernesto Figueira                  |   | DATA<br>18/01/2007   |  |
| CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DE VAZIO  |   |   |   |  |  |
| FORMA:<br><input checked="" type="checkbox"/> Espiralada <input type="checkbox"/> Encaixada  |   |   |   |  |  |
| DIMENSÕES APROXIMADAS:<br>Largura: 50 – 80 m Profundidade: 0,50 – 1,00 m   |   |   |   |  |  |
| NÍVEL DE CHEIA:<br>NM (última cheia) = 3,00 - 4,00 m VELOCIDADE APROXIMADA (m/s): Superior a 1 minuto (fluxo de água parada).  |   |   |   |  |  |
| ATIVIDADES EXTRATIVAS:<br><input checked="" type="checkbox"/> Areia <input type="checkbox"/> Garimpo <input type="checkbox"/> Outras <input type="checkbox"/> Turva <input type="checkbox"/> Barrenta<br><input checked="" type="checkbox"/> Potencial <input type="checkbox"/> Seixos <input checked="" type="checkbox"/> Pesca |   |   |   |  |  |
| OBRAS:<br><input type="checkbox"/> Emissários <input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input type="checkbox"/> Duto<br><input checked="" type="checkbox"/> Dique <input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input type="checkbox"/> Duto<br><input type="checkbox"/> Bueiros |   |   | OBRAS PRÓXIMAS:<br><input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input type="checkbox"/> Duto |  |  |
| OBSERVAÇÕES:<br>Paralelo a faixa a jusante.  |   |   |   |  |  |
| USO DO SOLO:<br><input type="checkbox"/> Não há <input type="checkbox"/> Cultura Perene <input type="checkbox"/> Uso Permanente<br><input type="checkbox"/> Urbano <input type="checkbox"/> Cíclica <input checked="" type="checkbox"/> Pastagem   |   |   |   |  |  |
| OBSERVAÇÕES:<br>Ao longo da faixa.   |   |   |   |  |  |
| INFORMAÇÕES REGIONAIS:<br>Extensa planície de inundação, dique paralelo à faixa.   |   |   |   |  |  |
| CAPACIZAÇÃO GEOMECÂNICA  |   |   |   |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |   | MARGEM DIREITA  |   |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terreno Rochoso  | <input type="checkbox"/> Rocha Cristalina                 | <input type="checkbox"/> Terreno Rochoso                          | <input type="checkbox"/> Rocha Cristalina   | <input type="checkbox"/> Rocha Estratificada                             | <input type="checkbox"/> Solo c/ matacões                                |
| <input checked="" type="checkbox"/> Terreno não Rochoso  | <input type="checkbox"/> Rocha Estratificada              | <input checked="" type="checkbox"/> Terreno não Rochoso           | <input type="checkbox"/> Solo c/ matacões   | <input type="checkbox"/> Solo de Alteração                               | <input checked="" type="checkbox"/> Solo Transportado                    |
| <input type="checkbox"/> Material Coesivo  | <input checked="" type="checkbox"/> Solo de Alteração     | <input type="checkbox"/> Material não coesivo                     | <input checked="" type="checkbox"/> Solo Transportado   | <input checked="" type="checkbox"/> Material não Coesivo                 | <input type="checkbox"/> Material não Coesivo                            |
| LADO ESQUERDO  |   | LADO DIREITO  |   |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Leito Rochoso  | <input checked="" type="checkbox"/> Seixos                | <input type="checkbox"/> Leito Rochoso                            | <input checked="" type="checkbox"/> Seixos  | <input checked="" type="checkbox"/> Areia                                | <input checked="" type="checkbox"/> Grossa                               |
| <input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo   | <input checked="" type="checkbox"/> Área                  | <input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo          | <input checked="" type="checkbox"/> Média   | <input type="checkbox"/> Média   | <input type="checkbox"/> Fina  |
| <input type="checkbox"/> Matacões  | <input type="checkbox"/> Grossa                           | <input type="checkbox"/> Matacões                                 | <input type="checkbox"/> Fina   | <input type="checkbox"/> Argila  | <input type="checkbox"/> Argila  |
| <input type="checkbox"/> Silte   | <input type="checkbox"/> Média                            | <input type="checkbox"/> Silte                                    | <input type="checkbox"/> Média  | <input type="checkbox"/> Média   | <input type="checkbox"/> Fina  |
| <input type="checkbox"/> Argila  | <input type="checkbox"/> Fina                             | <input type="checkbox"/> Argila                                   | <input type="checkbox"/> Argila   | <input type="checkbox"/> Argila  | <input type="checkbox"/> Argila  |
| CAPACIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA   |   |   |   |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |   | MARGEM DIREITA  |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Côncava   | <input type="checkbox"/> Declividade > 45°                | <input type="checkbox"/> Côncava                                  | <input type="checkbox"/> Declividade > 45°  | <input type="checkbox"/> Côncava   | <input type="checkbox"/> Declividade > 45°                               |
| <input checked="" type="checkbox"/> Convexa  | <input checked="" type="checkbox"/> Declividade < 45°     | <input checked="" type="checkbox"/> Convexa                       | <input checked="" type="checkbox"/> Declividade < 45°   | <input checked="" type="checkbox"/> Convexa                              | <input checked="" type="checkbox"/> Declividade < 45°                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Aplanada   | <input type="checkbox"/> Simétrico                        | <input checked="" type="checkbox"/> Aplanada                      | <input type="checkbox"/> Simétrico  | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     |
| CALHA EM FORMA DE V  |   |   |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Agudo   | <input type="checkbox"/> Simétrico                        | <input type="checkbox"/> Agudo                                    | <input checked="" type="checkbox"/> Simétrico   | <input type="checkbox"/> Intermediário                                   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     |
| <input type="checkbox"/> Intermediário   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                      | <input type="checkbox"/> Intermediário                            | <input type="checkbox"/> Assimétrico  | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto                           | <input type="checkbox"/> Aberto                                   | <input type="checkbox"/> Aberto   | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| CALHA EM FORMA DE U  |   |   |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Agudo   | <input type="checkbox"/> Simétrico                        | <input type="checkbox"/> Agudo                                    | <input checked="" type="checkbox"/> Simétrico   | <input type="checkbox"/> Intermediário                                   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     |
| <input type="checkbox"/> Intermediário   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                      | <input type="checkbox"/> Intermediário                            | <input type="checkbox"/> Assimétrico  | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto                           | <input type="checkbox"/> Aberto                                   | <input type="checkbox"/> Aberto   | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| CALHA EM FORMA DE U  |   |   |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Agudo   | <input type="checkbox"/> Simétrico                        | <input type="checkbox"/> Agudo                                    | <input checked="" type="checkbox"/> Simétrico   | <input type="checkbox"/> Intermediário                                   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                                     |
| <input type="checkbox"/> Intermediário   | <input type="checkbox"/> Assimétrico                      | <input type="checkbox"/> Intermediário                            | <input type="checkbox"/> Assimétrico  | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto                           | <input type="checkbox"/> Aberto                                   | <input type="checkbox"/> Aberto   | <input type="checkbox"/> Aberto  | <input type="checkbox"/> Aberto  |
| DINÂMICA FLUVIAL   |   |   |   |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |   |   | MARGEM DIREITA  |  |  |
| <input type="checkbox"/> Dissecação Contínua   | <input type="checkbox"/> Dissecação Contínua              | <input type="checkbox"/> Terrações de Abrasão                     | <input type="checkbox"/> Terrações de Abrasão   | <input type="checkbox"/> Terrações de Preenchimento                      | <input type="checkbox"/> Planícies de Inundação                          |
| <input type="checkbox"/> Terrações de Abrasão  | <input type="checkbox"/> Terrações de Preenchimento       | <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação        | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação   | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Agradação                 | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Planícies de Inundação   | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Degradação | <input checked="" type="checkbox"/> Feições de Agradação          | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais   | <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial | <input checked="" type="checkbox"/> Canais e Ilhas de Construção Fluvial |
| <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais  | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais     | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais             | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais   | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    | <input type="checkbox"/> Presença de Diques Marginais                    |
| COMPORTAMENTO EM PLANTA DA MARGEM  |   |   |   |  |  |
| <input type="checkbox"/> Retilínea   | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                   | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                 | <input type="checkbox"/> Retilínea  | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                                  | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                        |
| <input type="checkbox"/> Curva Esquerda  | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita         | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                           | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita   | <input type="checkbox"/> Curva Esquerda                                  | <input checked="" type="checkbox"/> Curva Direita                        |
| VEGETAÇÃO CLIMAR   |   |   |   |  |  |
| MARGEM ESQUERDA  |   |   | MARGEM DIREITA  |  |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> Densa  | <input checked="" type="checkbox"/> Gramíneas             | <input type="checkbox"/> Densa                                    | <input type="checkbox"/> Gramíneas  | <input type="checkbox"/> Grande Porte                                    | <input checked="" type="checkbox"/> Gramíneas                            |
| <input checked="" type="checkbox"/> Rala   | <input type="checkbox"/> Inexistente                      | <input checked="" type="checkbox"/> Grande Porte                  | <input type="checkbox"/> Inexistente  | <input type="checkbox"/> Médio Porte                                     | <input type="checkbox"/> Inexistente                                     |
| <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial  | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial    | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial  | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial        | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Fluvial                   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana   | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana     | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana  | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana   | <input checked="" type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana         | <input type="checkbox"/> Evidências de Remoção Humana                    |
| OBSERVAÇÕES  |   |   |   |  |  |
| - Barragem (diqe) paralela à faixa transversal do rio;   |   |   |   |  |  |
| - O escoamento de água se dá através de 03 bueiros tubulares;  |   |   |   |  |  |
| - A jusante da barragem observa-se níveis com alta concentração de seixos;   |   |   |   |  |  |
| - Ilha fluvial a montante;   |   |   |   |  |  |
| - Não foram observadas feições erosivas marcantes;   |   |   |   |  |  |
| - Foram observados blocos de rocha carbonática com feições de dissolução;  |   |   |   |  |  |
| - Vegetação e sedimentação características de mangues a jusante do dique.  |   |   |   |  |  |

Figura 56: Planilha de campo do Rio Carmo [29]

Dados de restituição aerofotogramétrica do início da década de 2000 foram utilizados para desenvolvimento de uma geometria preliminar para os furos direcionais. A partir destes pré-projetos, foram locadas sondagens com espaçamento aproximado de 50 m e profundidades variando entre 15 e 27 m, já



incluída uma margem de 10 m para cada sondagem em relação às profundidades dos pré-projetos.

Como, em ambos os casos, o nível d'água parecia relativamente profundo e a proporção de argila no solo mais superficial não era grande (vide caracterização das margens nas planilhas), decidiu-se que o método geofísico a ser utilizado em terra seria o GPR. A antena utilizada foi de 100 MHz, para uma profundidade de investigação de cerca de 20 m, com intervalo entre traços máximo de 5 cm, para evitar o 'aliasing' espacial. Por causa da baixa cota, foi identificada a influência da maré no Rio Carmo, e a conseqüente maior salinidade da água determinou que este método não seria adequado para a lâmina d'água. Por isso, apesar do leito arenoso, optou-se pelo SBP, que foi adotado em ambos os rios, com freqüência de 3,5 MHz (Figura 57).

Nas margens do rio Mossoró, os estudos realizados indicaram rocha a pouca profundidade, entre 5 e 6,5 m, com apenas 4 metros de recobrimento aluvionar no leito do rio. Em conformidade com os mapeamentos existentes, a rocha foi caracterizada como calcarenito, pouco a medianamente alterado, por vezes intercalado com calcilutitos mais resistentes. O levantamento com GPR permitiu identificar a continuidade lateral do topo rochoso, por volta dos 5m de profundidade, no entanto não conseguiu identificar a existência de material mais grosseiro nas camadas aluvionares sotopostas (que costumam se apresentar na forma de hipérboles), atravessadas por sondagens diretas. Já o SBP não conseguiu identificar o topo rochoso com clareza, por conta do grande número de reflexões múltiplas encontradas (Figura 58).

Os levantamentos do Rio Carmo (Figura 59) obtiveram resultados mais difíceis de se interpretar. Ao contrário da outra travessia, neste caso o topo rochoso não se encontra a profundidade regular, sendo aflorante em uma das margens e não tendo sido encontrado em uma das sondagens diretas feitas na outra margem. Além disto, as camadas de solo transportado tinham presença de pedregulhos, material que costuma causar problemas à perfuração direcional. Ambos os métodos geofísicos identificaram estas heterogeneidades. Nas seções GPR realizadas, é possível identificar pontos de difração, na forma de refletores verticalizados; no SBP, leituras inconstantes nas proximidades das margens. Em nenhum dos métodos, o topo rochoso foi claramente identificável (Figura 60).

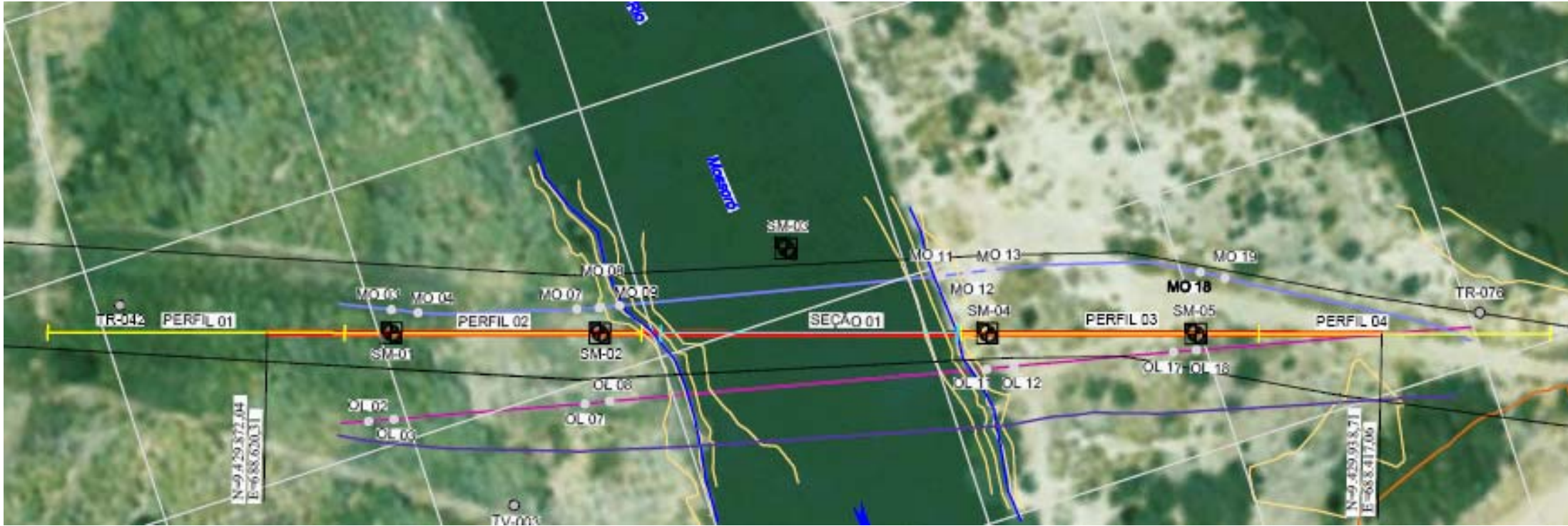


Figura 57: Estudos realizados no Rio Mossoró [29]

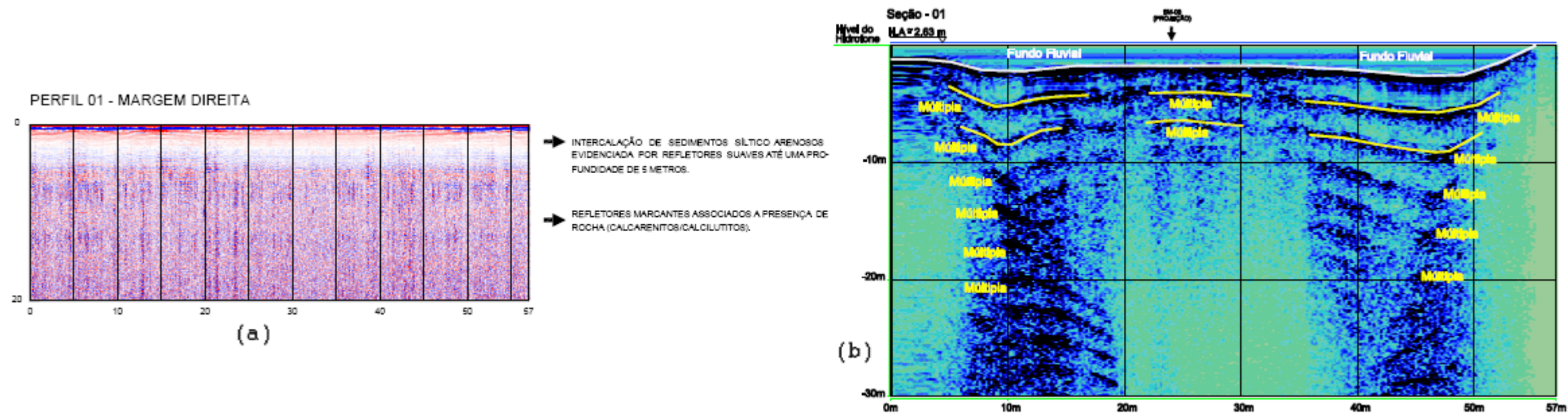


Figura 58: Resultados de (a) GPR e (b) SBP do Rio Mossoró [29]

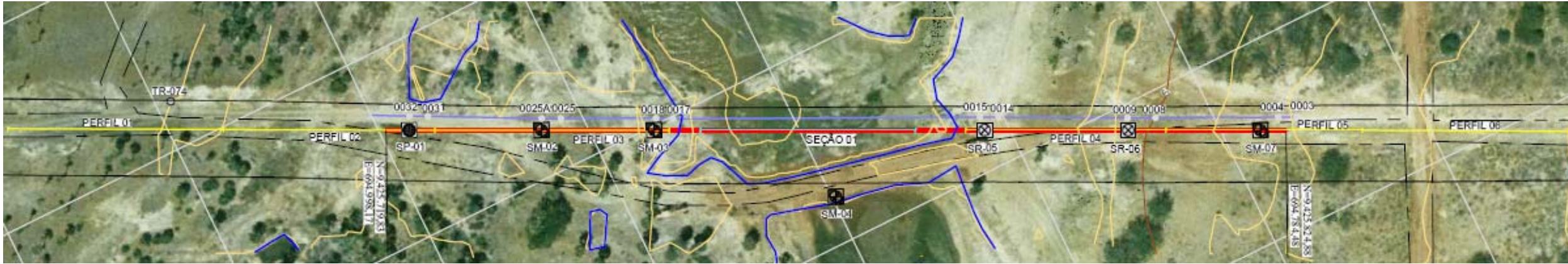


Figura 59: Estudos realizados no rio Carmo [29]

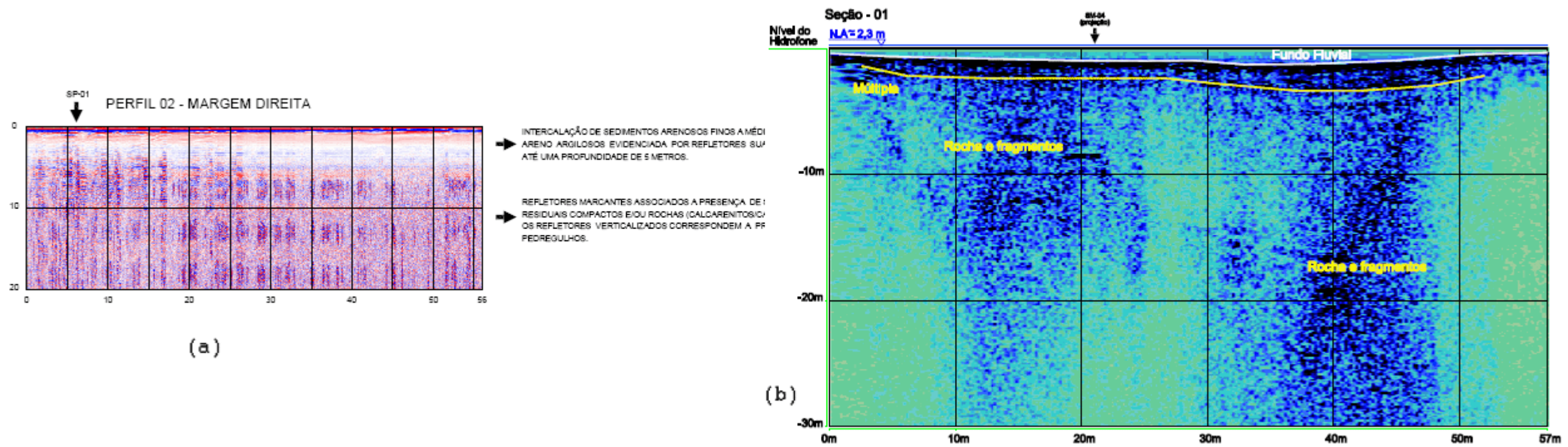


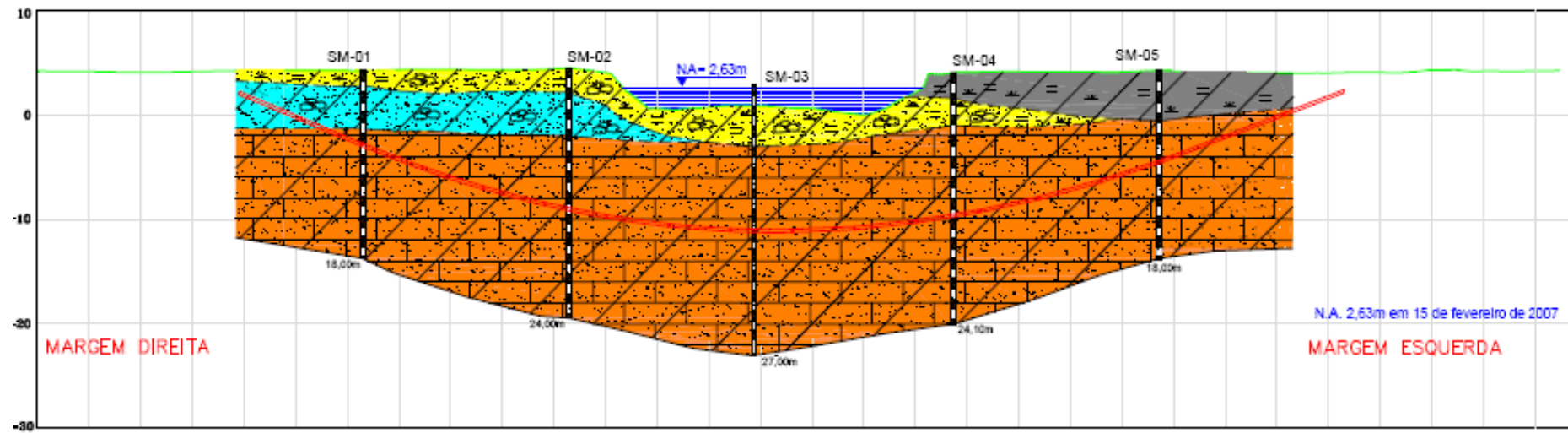
Figura 60: Resultados de (a) GPR e (b) SBP no rio Carmo [29]

Com o conjunto de dados levantados, foram produzidos perfis geológico-geotécnicos para cada travessia (Figura 61 e Figura 62), a partir dos quais foram projetados os furos direcionais para instalação do duto. Uma das preocupações levantadas, além da presença de pedregulhos, foram as rochas calcáreas da região. Este tipo de rocha é sensível quimicamente à presença de água, podendo dissolver-se, gerando cavidades subterrâneas. Estas cavidades, se de diâmetro comparável ao da broca, poderiam gerar desvios significativos na perfuração piloto.

É esperado, no entanto, que cavidades de grande dimensão sejam identificadas pelo método GPR, na forma de hipérboles, bem como por uma campanha de sondagens com espaçamento como a realizada, em que haveria perda de circulação. Nada deste tipo foi mapeado por estes métodos, de modo que seria pouco provável sua existência no ponto estudado. As dificuldades antecipadas devido ao litotipo ficaram, portanto, limitadas ao fluido de perfuração, cuja circulação deveria ser cuidadosamente acompanhada.

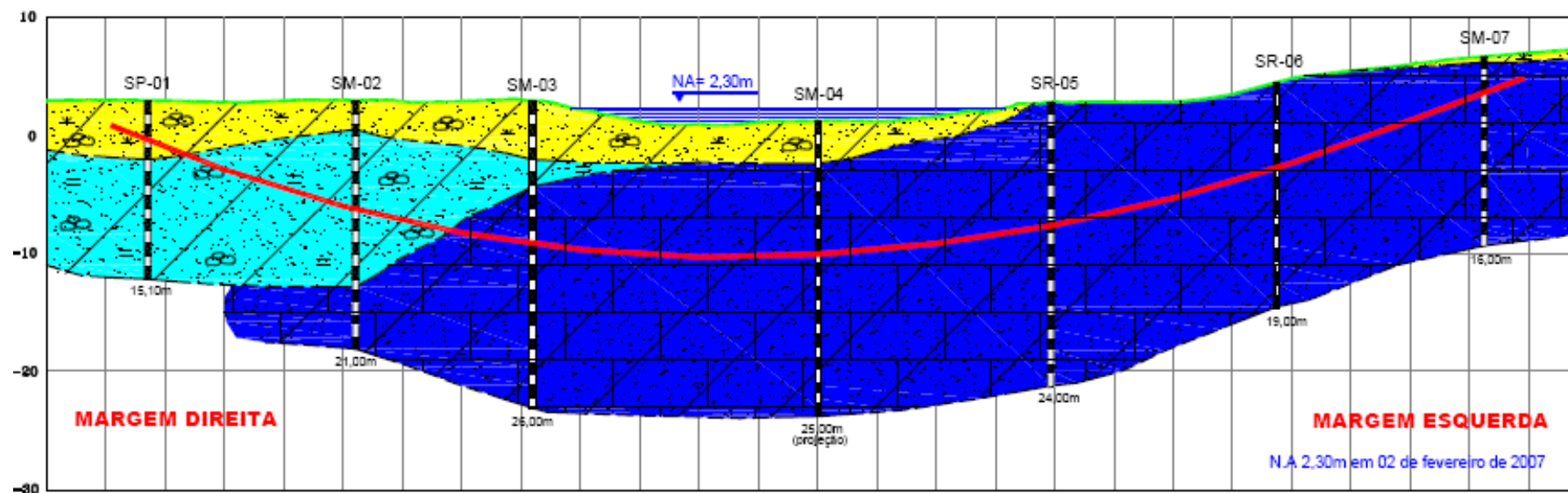
Os dois furos direcionais foram realizados em um mesmo mês. A instalação completa do Rio Carmo, incluindo perfuração piloto, alargamentos e puxamento da tubulação, demorou apenas 8 dias, trabalhando-se com equipes em dois turnos a partir da fase final de alargamento. A perfuração correu sem surpresas, e, embora não estejam disponíveis dados de progresso da perfuração ou de material recolhido na peneira, o cumprimento dos prazos previstos indica que as condições encontradas em subsolo foram compatíveis com o previsto nas investigações.

A perfuração no rio Mossoró foi um pouco mais complicada. Durante a execução, houve dois afloramentos de fluido de perfuração que, embora pouco volumosos (menos de  $0,3 \text{ m}^3$  de fluido somando-se as duas ocorrências), são indicativos de que algo não saiu como esperado. Ambos os afloramentos ocorreram na margem esquerda, onde em superfície encontra-se solo com alto percentual de matéria orgânica. Este tipo de solo apresenta densidade mais baixa do que a média. É possível que a definição da pressão de fluido utilizada não tenha levado isto em conta, sendo maior do que a peso aplicado pelo solo e gerando, com isso, a fuga do fluido para superfície. Infelizmente, não é possível confirmar essa tese pela inexistência de documentação específica da execução.



| COLUNA LITOSTRATIGRÁFICA |   |
|--------------------------|---|
| CENOZÓICO<br>QUATERNÁRIO | DEPÓSITOS ALUVIONARES   |
|                          | AREIA FINA E MÉDIA, ARGILLO SILTOSA, COM PEDREGULHOS, MATÉRIA ORGÂNICA E PELotas DE ARGILA, PLASTICIDADE ALTA, FOFA, CINZA  |
|                          | SILTE ARGILOSO, MUITO MOLE A MOLE, COM MATÉRIA ORGÂNICA E ALTA PLASTICIDADE, CINZA  |
| MESOZÓICO<br>CRETÁCEO    | GRUPO APODI - FORMAÇÃO JANDAIRA   |
|                          | AREIA FINA E MÉDIA, COM PEDREGULHOS E PELotas DE ARGILA, FOFA E POUCO COMPACTA, CINZA (ALTERAÇÃO DE ROCHA)  |
|                          | INTERCALAÇÃO DE CALCARENITOS E CALCILUTITOS, BRANCOS A EXTREMAMENTE RESISTENTES, DE COR CINZA, BRANCA E AMARELA, GRANULADOS FINOS A MÉDIOS/AFANÍTICOS, LAMINADOS, MACIÇOS |

Figura 61: Perfil geológico-geotécnico do rio Mossoró [29]



| COLUNA LITOSTRATIGRÁFICA |   |
|--------------------------|---|
| CENOZÓICO<br>QUATERNÁRIO | DEPÓSITOS ALUVIONARES E COLUVIONARES  |
|                          | AREIAS FINAS E MÉDIAS, ARGILOSAS, DE PLASTICIDADE MÉDIA A ALTA, COM PEDREGULHOS, MATÉRIA ORGÂNICA E CONCREÇÕES, FOFA A COMPACTAS, VARIEGADAS EM TONS DE CINZA, VERMELHO E AMARELO. APRESENTA SILTE E COMPOSIÇÃO CALCÍFERA NO FURO SM-04 E FRAGMENTOS E SEIXOS ROLADOS DE QUARTZO NO FURO SM-07. |
| MESOZÓICO<br>CRETÁCEO    | GRUPO APODI - FORMAÇÃO JANDAIRA   |
|                          | SEDIMENTOS ARENOSOS FINOS E MÉDIOS, ARGILLO ARENOSOS E SILTOSOS, CALCÍFEROS, DE PLASTICIDADE BAIXA A ALTA, COM PEDREGULHOS, FOFA A COMPACTOS/DUROS, VARIEGADOS EM TONS DE CINZA E AMARELO (SOLOS RESIDUAIS). APRESENTAM FRAGMENTOS DE VALVAS NOS FURROS SM-02 E SM-03.                          |
|                          | INTERCALAÇÃO DE CALCARENITOS E CALCILUTITOS, BRANCOS A RESISTENTES, DE COR CINZA, BRANCA E AMARELA, GRANULADOS FINOS A MÉDIOS/AFANÍTICOS, LAMINADOS/MACIÇOS, OCASIONALMENTE FRATURADOS.   |

Figura 62: Perfil geológico-geotécnico do rio Carmo [29]

Apesar destas dificuldades, o tempo de execução das travessias, de aproximadamente uma semana cada um, é bastante baixo para um perfil com presença de rocha (ainda que branda). Por isso, as perfurações realizadas nos Rios Carmo e Mossoró foram consideradas um sucesso. Pode-se dizer que as investigações geotécnicas realizadas contribuíram para este resultado, permitindo a correta especificação do equipamento utilizado e também o acompanhamento adequado do fluido de perfuração, que permitiu minimizar as dificuldades encontradas.

## 4 Conclusões

### 4.1. Casos Estudados

Foram analisados dados relativos a investigações geotécnicas com fins em obras lineares, em especial, um túnel e três perfurações direcionais horizontais para instalação de dutos. Em todos os casos, lançou-se mão dos chamados métodos indiretos de investigação, que, em conjunto com métodos diretos, permitem uma investigação contínua do subsolo, com custos mais baixos e de forma não destrutiva.

O túnel estudado foi projetado para que um duto pudesse ultrapassar a Serra do Mar, minimizando os impactos sobre o parque estadual de mesmo nome, no estado de São Paulo. Neste caso, o uso de métodos indiretos se mostrou necessário por conta das profundidades envolvidas, bem como aspectos de ordem legal e ambiental que impediam o acesso de máquinas de sondagem à área do parque. Embora, ao longo da diretriz do túnel, o método geofísico utilizado não tenha alcançado a profundidade de projeto, a boa correlação do mapeamento geológico com a investigação indireta faz inferir que há continuidade, em profundidade, das feições observadas em superfície. Estas informações direcionaram uma separação do maciço em trechos, de acordo com a classificação de Bieniawski, visando a quantificação do suporte necessário bem como o prazo para a escavação.

Os estudos geofísicos realizados no emboque inicialmente faziam supor que haveria cerca de 350 metros de escavação em solo. Esta informação foi inferida a partir da pouca inclinação do topo rochoso, identificado pela sísmica de refração, mas especialmente por conta de uma anomalia de alta condutividade apresentada pelo caminhamento elétrico realizado. Zonas de alta condutividade costumam estar associadas a material argiloso e saturado. No entanto, a existência desta anomalia instigou a realização de uma sondagem direta horizontalizada, aproximadamente na diretriz do túnel, cujo principal resultado foi reduzir a

estimativa de maciço tipo V para 210 metros. A anomalia, que se supunha indicar solo, na realidade correspondia a material rochoso intercalado a material terroso, na presença de água. A possibilidade de realização da investigação direta em fase posterior à interpretação da geofísica permitiu a correta interpretação do dado indireto.

Os casos de HDD estudados dividiam-se em dois grupos: um estudo detalhado, em que foi utilizada uma combinação de métodos indiretos, cuja perfuração ainda não foi realizada; e outras duas investigações, mais restritas em área de abrangência bem como disponibilidade de recursos, cujas perfurações foram realizadas com sucesso.

O estudo para travessia do Rio Paraíba do Sul por um duto de 18 polegadas utilizou uma combinação de três métodos indiretos, com aquisição em malha, bem como algumas sondagens diretas igualmente espaçadas ao longo da diretriz prevista para o duto, com o intuito de apoiar a interpretação. Os métodos indiretos obtiveram bons resultados em conjunto, permitindo o desenvolvimento de um bom modelo de subsuperfície. No entanto, individualmente os métodos utilizados em terra tiveram sucesso em mapear características diferentes daquelas imaginadas inicialmente e, caso se tivesse optado por apenas um dos métodos, abrindo mão de determinada informação por outra, o detalhamento obtido teria sido insuficiente. Este caso nos mostra como o uso de vários métodos geofísicos em conjunto pode resultar em benefício para a investigação.

Os rios Mossoró e Carmo são atravessados por diversos dutos, um dos quais precisava ter as travessias substituídas. Por diversos motivos, estes rios não puderam ser estudados de maneira tão detalhada quanto o caso anterior, tendo sido utilizado apenas um método geofísico em terra e outro em lâmina d'água. Também foram realizadas sondagens diretas, com espaçamento de cerca de 50 m, que encontraram rocha calcárea em ambas as travessias. Os modelos obtidos da combinação dos diferentes resultados, ainda que mais restritos, foram relevantes para a execução, cujo prazo (cerca de uma semana cada) foi considerado um sucesso. Infelizmente, a falta de dados detalhados da execução, como avanço da perfuração, pressão de fluido, dentre outros, impede uma análise mais minuciosa da qualidade dos perfis geológico-geotécnicos gerados.



## 4.2. Fluxograma de Investigação

Com respeito à bibliografia consultada e diante das lições aprendidas com os casos analisados, sugere-se um fluxograma para investigações que coordenem métodos diretos e indiretos de investigações, visando obter dados contínuos sobre o subsolo. Este fluxograma é apresentado na Figura 63.

Cada um dos diversos métodos de geofísica aplicáveis a geotecnia é mais indicado para determinada situação. Neste sentido, a obtenção de dados sobre a área a ser investigada, previamente a realização das aquisições, é imprescindível para a correta programação das investigações. Por isso, o levantamento de dados existentes deve ser a primeira fase de investigação.

Sempre que possível, uma vistoria de campo pelos técnicos responsáveis pela investigação é indicada, para a confirmação ou não dos dados previamente obtidos. Nesta visita, outros detalhes podem ser observados, como facilidade de acesso, possíveis afloramentos rochosos, granulometria predominante do solo, dentre outros.

De posse destes dados, deve ser feita a opção pelos métodos de investigação a serem utilizados, levando-se em conta também a obra de engenharia a ser realizada, a área e profundidade dos estudos e os custos envolvidos. A combinação de métodos deve ser tal que permita uma modelagem adequada do subsolo, através da complementaridade de resultados.

O passo seguinte é a programação propriamente dita, com locação das sondagens diretas e indiretas. Os métodos geofísicos são métodos indiretos e, portanto, sua correta interpretação depende da experiência do profissional, bem como da disponibilidade de dados diretos. A combinação com sondagens diretas é necessária não apenas para que os modelos de subsolo possam ser elaborados, mas para a análise da qualidade da aquisição, por isso é recomendável que algumas sondagens sejam executadas em paralelo à aquisição geofísica. Não se pode esquecer que estes estudos devem ser acompanhados de levantamentos topográficos, pois sem a correção topográfica das seções a interpretação do geofísico não será tão confiável.

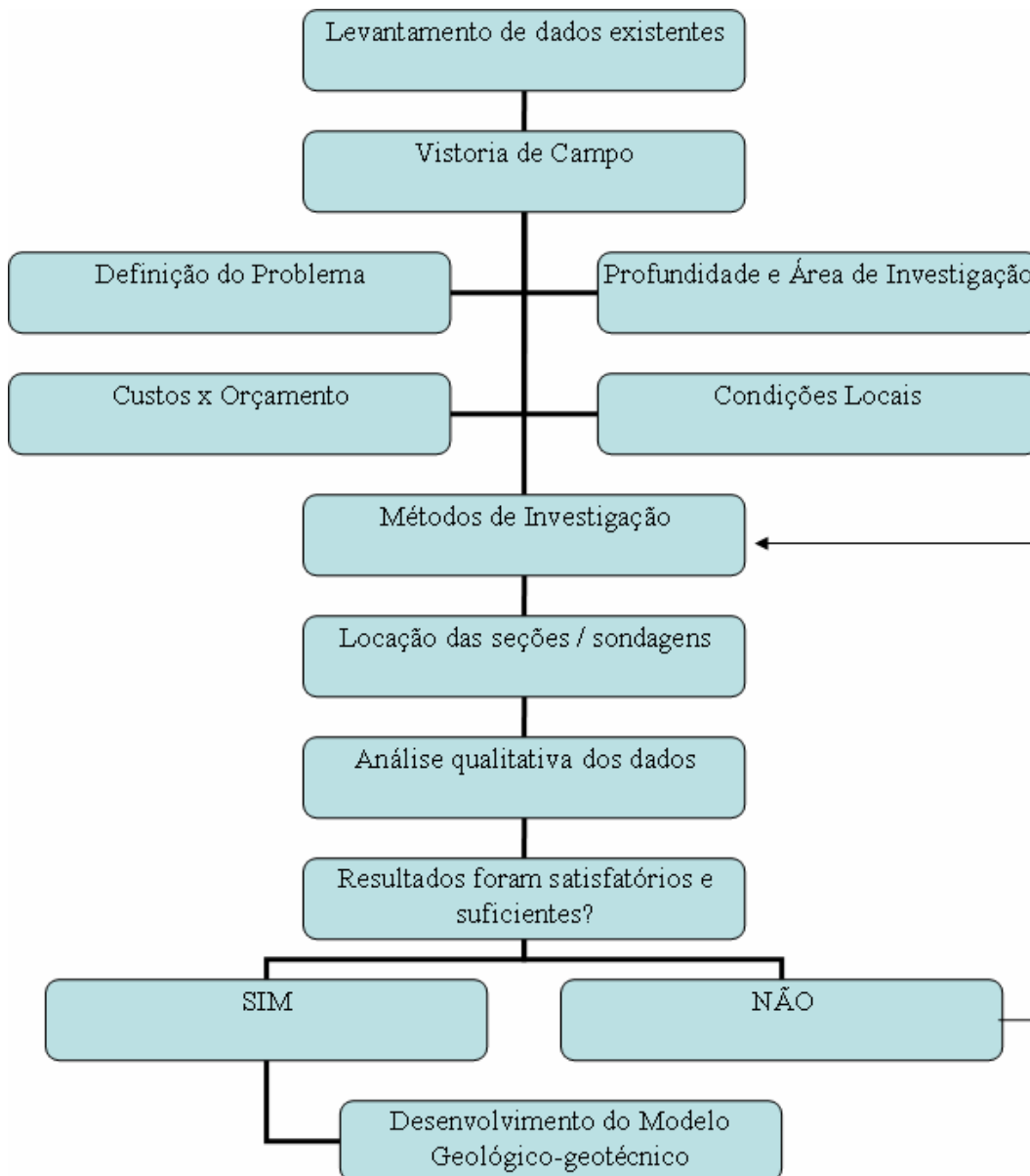


Figura 63: Fluxograma sugerido para investigações geotécnicas

Os dados devem então passar por uma análise, onde será avaliado se os levantamentos realizados foram suficientes. Dentre os parâmetros que devem ser analisados, incluem-se a qualidade das aquisições geofísicas (nível de ruído, etc.), a comparação entre os métodos utilizados, a coerência dos boletins de sondagem, e a existência de feições e anomalias identificadas nas seções, mas não mapeadas pelas sondagens. Se os dados não forem suficientes, deve-se retornar à fase de determinação dos métodos a serem (re)utilizados.

Caso os dados sejam considerados suficientes, passa-se ao desenvolvimento do modelo geológico-geotécnico, com a interpretação conjunta dos diversos métodos. A interpretação deve levar em conta a natureza do projeto, de modo que

sejam mapeadas as feições mais significativas para cada caso. A partir deste modelo, se dá prosseguimento ao desenvolvimento do projeto.

#### **4.3. Classificação de maciço**

Outra questão que merece ser comentada surgiu da comparação da metodologia de projetos de túneis e de perfuração direcional. Túneis estão entre as obras geotécnicas mais antigas, cujas técnicas vêm sendo desenvolvidas há vários séculos. Por este motivo, já foram objeto de estudo de muitos estudiosos, que desenvolveram diferentes metodologias para classificação dos maciços a serem escavados, tendo em vista a identificação de níveis de dificuldade a serem enfrentados na execução da obra.

Estas metodologias de classificação não são adequadas para uma análise de perfuração direcional, devido às especificidades da obra. Em um projeto de HDD, é relativamente comum modificar o caminhamento do projeto para evitar dificuldades pontuais identificadas no subsolo. No entanto, não existe uma metodologia que permita uma comparação quantitativa das dificuldades entre duas diretrizes propostas para um mesmo projeto. O desenvolvimento de um método de classificação do maciço, terroso e/ou rochoso, que seja específico para esta técnica seria um avanço e permitiria uma tomada de decisão menos qualitativa do que a que é feita no presente.

## 5

### Referências bibliográficas

- 1 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Land Geophysics in Rock Engineering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 885-914, 2004.
- 2 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Borehole Geophysics in Rock Engineering, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 337-368, 2006.
- 3 STEIN, D. P.; GIRALDO, A. : Canais e Hidrovias In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. (Org) Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- 4 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E GEOTECNIA, UFMG: Análise Técnico-Econômica de Transportes. Disponível em <http://www.etg.ufmg.br/>
- 5 JUNIOR, J. N ; MARQUES, A. S. Linhas de Transmissão e Dutovias In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. (Org) Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- 6 TAKAHASHI, T.; TAKEUCHI, T.; SASSA K. ISRM Suggested Methods for land and borehole geophysics in rock engineering. In: Proceedings of the 7th International Workshop on the application of Geophysics to Rock Engineering, 2007.
- 7 RODRIGUEZ, C. Apostila de aula do curso de Sísmica de Reservatórios
- 8 SHERIFF, R.E.. Petrophysical and geophysical background In: SHERIFF, R.E. (ed.) Reservoir Geophysics, SEG Investigations in Geophysics, vol. 7, 1992
- 9 GRANT, F. S ; WEST, G. F. Interpretation Theory in Applied Geophysics. New York: McGraw-Hill Book Company, 1965
- 10 TAO, G.; KING, S.; NABI-BIDHEDI, M. Ultrasonic Wave propagation in dry and Brine-Saturated Sandstones as Function of Effective Stress: Laboratory measurements and Modeling. Geophysical Prospecting, vol. 43, p. 299-327, 1995
- 11 TEZCAN, S. S., KECELI, A. e OZDEMIR Z. Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity. Geotechnical and Geological Engineering , vol. 24, p. 203–218, 2006
- 12 REDAELLI, L.L. e CERELLO, L. Escavações In: OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. (Org) Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- 13 SHERIFF, R.E. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Third Edition, 384p., 1999

- 14 YLMAZ, O. Seismic Data Processing. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, 1987
- 15 THOMAS, J.E. Velocidades sísmicas. Rio de Janeiro: Universidade Petrobras, 132 p, 2003
- 16 STEEPLES, D.W ; MILLER, R. D. Seismic Reflection Methods Applied to Engineering, Environmental, and Groundwater Problems In: WARD, S.H. (ed), Geotechnical and engineering geophysics, volume 1: Society of Exploration Geophysicists, 389 p., 1990
- 17 BARTON, N. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. London: Taylor and Francis Group, 2007
- 18 PALMSTRÖM, A. Application of Seismic Refraction Survey in assessment of jointing. New Delhi: Conference on Recent Advances in Tunnelling Technology, 1996
- 19 Catálogo comercial disponível em <http://www.geogiga.com/en/product.php>
- 20 Catálogo comercial disponível em <http://www.edgetech.com>
- 21 NUNES, C. M. F. Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas no rio de janeiro; Rio de Janeiro: 2002. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio.
- 22 PORSANI, J. L. Método GPR: Fundamentos e Aplicações – Short Course in 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2006
- 23 FERREIRA, F. J. F. 1º Curso Sul-Americano sobre Avaliação e Vulnerabilidade de Aquíferos, 1994
- 24 MIRANDA, J. M. et al. Manual de Fundamentos de Geofísica. Lisboa, Instituto Geofísico do Infante D. Luis. Disponível em <http://www.igidl.ul.pt/>
- 25 ELIS, V. R.; BARROSO, C. M. R.; KIANG, C. H. Aplicação de ensaios de resistividade na caracterização do sistema aquífero barreiras / marituba em maceió- AL. Rio de Janeiro: Revista da Sociedade Brasileira de Geofísica, Volume 22, número 2, 2004.
- 26 Catálogo comercial de equipamentos disponível em <http://www.liebherr.com>
- 27 BIENIAWSKI, Z. T. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley, 1989.
- 28 BARTON, N; LIEN, R; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech, v.6, n.4, 1974
- 29 MACHADO, G.Q.; PINHEIRO, A.C.O.; SIQUEIRA, J. Travessias de Rios e Áreas de Proteção Ambiental. In: Rio Pipeline Conference & Exposition, Rio de Janeiro, 2005.
- 30 Documento de circulação interna
- 31 Catálogo comercial de equipamentos disponível em <http://www.inrock.com>
- 32 SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro, escala 1:500.000 / 2000
- 33 CENTRE D'ÉTUDES ET RECHERCHES DÊS CHARBONAGES DE FRANCE. The CERCHAR abrasiveness index, 12 S. Verneuil, 1986

- 34 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials (part 1). Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.. Vol. 16, nº 2, p. 137-138, 1979.
- 35 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties (parte 1). Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.. Vol. 16, nº 2, p. 143-146 , 1979.
- 36 ASTM INTERNATIONAL, D 2216 - Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, 2005
- 37 INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Suggested Methods for Determining Sound Velocity. Int. Journal of Rock Mech. and Min. Scienc. & Geomech. Abstr.. Vol. 15, nº 2, p. 53-58, 1978.
- 38 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6465: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”; Rio de Janeiro, 1984
- 39 SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, Carta Geológica Brasil ao Milionésimo, Carta Jaguaribe SB-24 / 2000

## Anexo I

Boletins de Sondagem do Túnel.



SONDOSOLO GEOTECNIA E ENGENHARIA LTDA.



SONDOSOLO GEOTECNIA E ENGENHARIA LTDA.

| Método de Perforação | Diâmetro de Perforação | Profundidade (m) | Perfil Geológico | Descrição do Material   | Coerência | Grau de Alteração | Incussão de Travação | Reconstrução | Reconstrução a Penetração                        | Frequência de Fraturas (por trecho horizontal) (FRATURAS/M) | Índice de Alteração de Rocha (I.Q.R.) | Classe de Rocha |
|----------------------|------------------------|------------------|------------------|---|-----------|-------------------|----------------------|--------------|--|---|---------------------------------------|-----------------|
|                      |                        | 1.70             |                  | AREOLA arenosa (areia média, fina e grossa), pouco argilosa, pouco arenosa, pouco arenosa a muito arenosa (Solo Residual).                                    |           |                   |                      |              | BARRILETE - SPT<br>ÚLTIMOS 30 CM<br>SPT ESTIMADO | 15 10 5   | 25 10 75                              |                 |
|                      |                        | 3.80             |                  | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca argila, pouco compacta, arenoso saturado (Solo de Alteração da Rocha).                                   |           |                   |                      |              |  |   |                                       |                 |
|                      |                        | 4.70             |                  | AREIA fina, média e grossa silteosa com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta, arenosa (Solo de Alteração da Rocha). |           |                   |                      |              |  |   |                                       |                 |
|                      |                        | 6.50             |                  | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca argila, pouco compacta, arenoso saturado (Solo de Alteração da Rocha).                                   |           |                   |                      |              |  |   |                                       |                 |
|                      |                        | 16.00            |                  | AREIA lúxura variada com mica e espaços pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta, arenosa (Solo de Alteração da Rocha).        |           |                   |                      |              |  |   |                                       |                 |
|                      |                        |                  |                  | CONTINUA NA PRÓXIMA PÁGINA  |           |                   |                      |              |  |   |                                       |                 |

| Método de Perforação | Diâmetro de Perforação | Profundidade (m) | Perfil Geológico | Descrição do Material  | Coerência | Grau de Alteração | Incussão de Travação | Reconstrução | Reconstrução a Penetração | Frequência de Fraturas (por trecho horizontal) (FRATURAS/M) | Índice de Alteração de Rocha (I.Q.R.) | Classe de Rocha |
|----------------------|------------------------|------------------|------------------|--|-----------|-------------------|----------------------|--------------|---------------------------|---|---------------------------------------|-----------------|
|                      |                        | 18.50            |                  | AREIA lúxura variada pouco silteosa com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, muito compacta, cinza amarelado. (Alargação de Gneisse).                         |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 20.00            |                  | GNAISSE cinza claro rosado, muito alterado, fraturado, com pedregulhos, muito arenoso, branco e rosado a mica. Em pedregulhos.   |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 21.30            |                  | AREIA lúxura variada pouco silteosa com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, muito compacta, cinza amarelado e rósea. (Alargação de Gneisse).                 |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 22.50            |                  | GNAISSE cinza claro rosado, muito alterado, granulação média, formado por quartzo, feldspato róseo e branco e mica. Mediosamente alterado, pouco fraturado. Fraturas sem plastercimento. |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 23.00            |                  |  |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 23.50            |                  |  |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        | 24.50            |                  | LIMITE DA SONDAGEM   |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |
|                      |                        |                  |                  | OBSERVAÇÃO<br>1) O critério de penetração de sondagem foi definido pelo Cliente.<br>2) * - Número de golpes referente aos primeiros 15 cm de penetração do amostrador.                   |           |                   |                      |              |                           |   |                                       |                 |



| MÉTODO DE PENETRAÇÃO<br>SILMETER, INVESTIMENTO<br>NÍVEL D'ÁGUA | PROFUNDIDADE (M) | MANGUEIRAS | PERFIL GEOLÓGICO  | DESCRIÇÃO DO MATERIAL | PERFIL DE SONDAGEM MISTA |          |  |                        |                              | CLASSE DE ROCHA |
|--|------------------|------------|---|-----------------------|--------------------------|----------|--|------------------------|------------------------------|-----------------|
|  |                  |            |   |                       | COERÊNCIA                | FRATURAS | RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO BARRILETE - SPT | FREQÜÊNCIA DE FRATURAS | ÍNDICE DE QUALIDADE DE ROCHA |                 |
| WIDIA 81 NW  | 1.70             | 1          | ARGILA arenosa (areia média, fina e grossa), pouco silteosa, muito mole, marrom amarelado. (Solo Residual).   |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 2.80             | 2          | ARGILA arenoso-silteosa (areia grossa, média e fina) com pouca mica e esparsos pedregulhos finos, mole, avermelhada. (Solo Residual).   |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 3          | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca mica, pouco compacta, marrom. (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 5.70             | 4          | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca mica, pouco compacta, marrom. (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 5          | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca mica, pouco compacta, marrom. (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 6          | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca mica, pouco compacta, marrom. (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 7          | AREIA fina, média e grossa muito silteosa, com pouca mica, pouco compacta, marrom. (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 8          | AREIA textura variada silteosa, com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta e medianamente compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Solo de Alteração de Rocha).             |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 9          | AREIA textura variada silteosa, com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta e medianamente compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Solo de Alteração de Rocha).             |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 10         | AREIA textura variada silteosa, com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta e medianamente compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Solo de Alteração de Rocha).             |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  |                  | 11         | AREIA textura variada silteosa, com mica e pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, pouco compacta e medianamente compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Solo de Alteração de Rocha).             |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 11.80            | 12         | FRAGMENTOS de rocha em decomposição com areia de textura variada silteosa, variegada (Solo de Alteração de Rocha).  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 12.00            | 13         | AREIA fina, média e grossa silteosa, pouco argilosa com mica e esparsos pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, medianamente compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Solo de Alteração de Rocha). |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 15.00            | 14         | CONTINUA NA PRÓXIMA PÁGINA  |                       |                          |          |  |                        |                              |                 |

| MÉTODO DE PENETRAÇÃO<br>SILMETER, INVESTIMENTO<br>NÍVEL D'ÁGUA | PROFUNDIDADE (M) | MANGUEIRAS | PERFIL GEOLÓGICO | DESCRIÇÃO DO MATERIAL   | PERFIL DE SONDAGEM MISTA |          |  |                        |                              | CLASSE DE ROCHA |
|--|------------------|------------|------------------|---|--------------------------|----------|--|------------------------|------------------------------|-----------------|
|  |                  |            |                  |   | COERÊNCIA                | FRATURAS | RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO BARRILETE - SPT | FREQÜÊNCIA DE FRATURAS | ÍNDICE DE QUALIDADE DE ROCHA |                 |
| WIDIA 81 NW  | 15               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 16               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 17               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 18               |            |                  | AREIA textura variada silteosa, com mica e esparsos pedregulhos (fragmentos de rocha em decomposição) finos, compacta a muito compacta, variegada (acizentada). (Solo de Alteração de Rocha). |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 19               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 20               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 21               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 22               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 23               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 24               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 25               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 26               |            |                  | AREIA textura variada pouco silteosa, com pouca mica, muito compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Alteração de Grausão).   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 27               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 28               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
| 29   |                  |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |

| MÉTODO DE PENETRAÇÃO<br>SILMETER, INVESTIMENTO<br>NÍVEL D'ÁGUA | PROFUNDIDADE (M) | MANGUEIRAS | PERFIL GEOLÓGICO | DESCRIÇÃO DO MATERIAL   | PERFIL DE SONDAGEM MISTA |          |  |                        |                              | CLASSE DE ROCHA |
|--|------------------|------------|------------------|---|--------------------------|----------|--|------------------------|------------------------------|-----------------|
|  |                  |            |                  |   | COERÊNCIA                | FRATURAS | RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO BARRILETE - SPT | FREQÜÊNCIA DE FRATURAS | ÍNDICE DE QUALIDADE DE ROCHA |                 |
| WIDIA 81 NW  | 30               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 31               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 32               |            |                  | AREIA textura variada pouco silteosa, com pouca mica, muito compacta, variegada (acizentada e amarelada). (Alteração de Grausão). |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 33               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 34               |            |                  |   |                          |          |  |                        |                              |                 |
|  | 35               |            |                  | LIMITE DA SONDAGEM  |                          |          |  |                        |                              |                 |

**OBSERVAÇÕES**

- As amostras 24 e 35 não foram recuperadas pelo amostrador.
- O critério de paralisação da sondagem foi definido pelo Cliente.
- Nº - Número de golpes referente aos primeiros 15 cm de penetração do amostrador.
- NFE = Não Foi Encontrado.

OBS.: ALTERAÇÃO  
 A1 - RS - Rocha Sã  
 A2 - RAD - Rocha dura alterada  
 A3 - RAM - Rocha mole alterada  
 A4 - SA - Solo de alteração  
 SED - Sedimentos

COERÊNCIA  
 C1 - Coerente  
 C2 - Medianamente coerente  
 C3 - Pouco coerente  
 C4 - Incoerente

FRATURAS  
 F1 - Muito pouco fraturada  
 F2 - Pouco fraturada  
 F3 - Medianamente fraturada  
 F4 - Muito fraturada  
 F5 - Excessivamente fraturada  
 F6 - Pedregosa

DESCONTINUIDADES  
 H - Horizontal  
 SH - Sub-Horizontal (0° a 20°)  
 I - Inclínada (20° a 70°)  
 BV - Sub-Vertical (70° a 90°)  
 A - Aberta  
 F - Fechada

SUSCOSPIDADE  
 R1 - Rugosa  
 R2 - Estrada  
 R3 - Plana  
 R4 - Sedosa

PREENCHIMENTO  
 PO - Suspeita de preenchimento  
 P1 - Granular  
 P2 - Misto  
 P3 - Argiloso

LOCAL: ÁREA DE EMBOQUE DO TÚNEL DO GASODUTO CARAGUATATUBA - TAUBATÉ (CARAGUATATUBA / SP)  
 CLIENTE: SHAFT CONSULTORIA LTDA  
 ESCALA: 1:100 DATA: 02/12/2006 DESTA. LUCIANO COTA DA BOCA: 86,71M  
 PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA INICIAL: NÃO FOI ENCONTRADO FINAL: NÃO FOI ENCONTRADO  
 Nº=7.385.832.5572 E= 446.236,4564

OBS.: ALTERAÇÃO  
 A1 - RS - Rocha Sã  
 A2 - RAD - Rocha dura alterada  
 A3 - RAM - Rocha mole alterada  
 A4 - SA - Solo de alteração  
 SED - Sedimentos

COERÊNCIA  
 C1 - Coerente  
 C2 - Medianamente coerente  
 C3 - Pouco coerente  
 C4 - Incoerente

FRATURAS  
 F1 - Muito pouco fraturada  
 F2 - Pouco fraturada  
 F3 - Medianamente fraturada  
 F4 - Muito fraturada  
 F5 - Excessivamente fraturada  
 F6 - Pedregosa

DESCONTINUIDADES  
 H - Horizontal  
 SH - Sub-Horizontal (0° a 20°)  
 I - Inclínada (20° a 70°)  
 BV - Sub-Vertical (70° a 90°)  
 A - Aberta  
 F - Fechada

SUSCOSPIDADE  
 R1 - Rugosa  
 R2 - Estrada  
 R3 - Plana  
 R4 - Sedosa

PREENCHIMENTO  
 PO - Suspeita de preenchimento  
 P1 - Granular  
 P2 - Misto  
 P3 - Argiloso

LOCAL: ÁREA DE EMBOQUE DO TÚNEL DO GASODUTO CARAGUATATUBA - TAUBATÉ (CARAGUATATUBA / SP)  
 CLIENTE: SHAFT CONSULTORIA LTDA  
 ESCALA: 1:100 DATA: 02/12/2006 DESTA. LUCIANO COTA DA BOCA: 86,71M  
 PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA INICIAL: NÃO FOI ENCONTRADO FINAL: NÃO FOI ENCONTRADO  
 Nº=7.385.832.5572 E= 446.236,4564

OBS.: ALTERAÇÃO  
 A1 - RS - Rocha Sã  
 A2 - RAD - Rocha dura alterada  
 A3 - RAM - Rocha mole alterada  
 A4 - SA - Solo de alteração  
 SED - Sedimentos

COERÊNCIA  
 C1 - Coerente  
 C2 - Medianamente coerente  
 C3 - Pouco coerente  
 C4 - Incoerente

FRATURAS  
 F1 - Muito pouco fraturada  
 F2 - Pouco fraturada  
 F3 - Medianamente fraturada  
 F4 - Muito fraturada  
 F5 - Excessivamente fraturada  
 F6 - Pedregosa

DESCONTINUIDADES  
 H - Horizontal  
 SH - Sub-Horizontal (0° a 20°)  
 I - Inclínada (20° a 70°)  
 BV - Sub-Vertical (70° a 90°)  
 A - Aberta  
 F - Fechada

SUSCOSPIDADE  
 R1 - Rugosa  
 R2 - Estrada  
 R3 - Plana  
 R4 - Sedosa

PREENCHIMENTO  
 PO - Suspeita de preenchimento  
 P1 - Granular  
 P2 - Misto  
 P3 - Argiloso

LOCAL: ÁREA DE EMBOQUE DO TÚNEL DO GASODUTO CARAGUATATUBA - TAUBATÉ (CARAGUATATUBA / SP)  
 CLIENTE: SHAFT CONSULTORIA LTDA  
 ESCALA: 1:100 DATA: 02/12/2006 DESTA. LUCIANO COTA DA BOCA: 86,71M  
 PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA INICIAL: NÃO FOI ENCONTRADO FINAL: NÃO FOI ENCONTRADO  
 Nº=7.385.832.5572 E= 446.236,4564



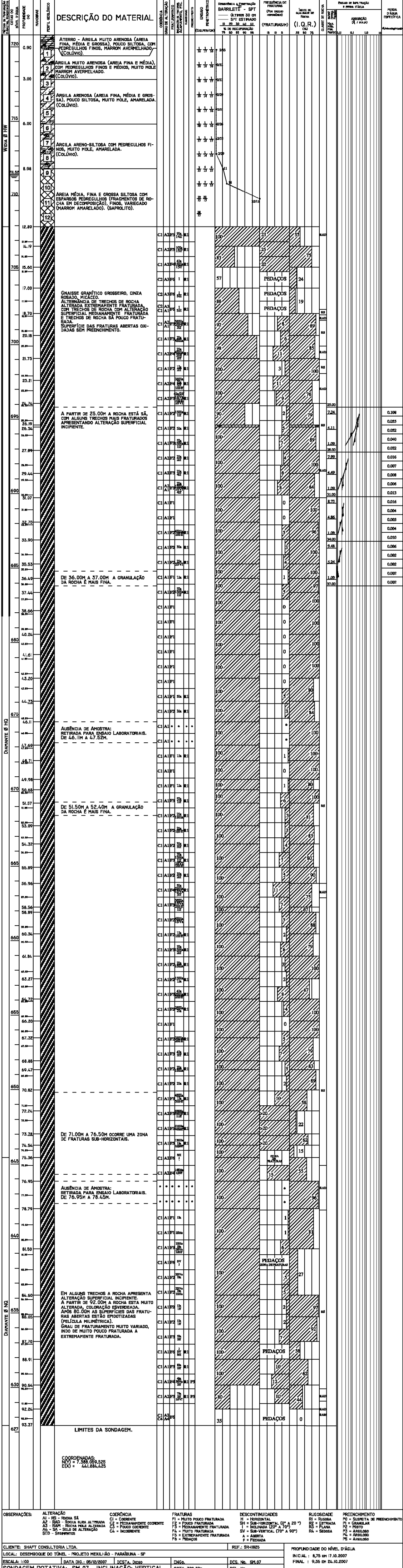
SONDOSOLO GEOTECNIA E ENGENHARIA LTDA.



SONDOSOLO GEOTECNIA E ENGENHARIA LTDA.

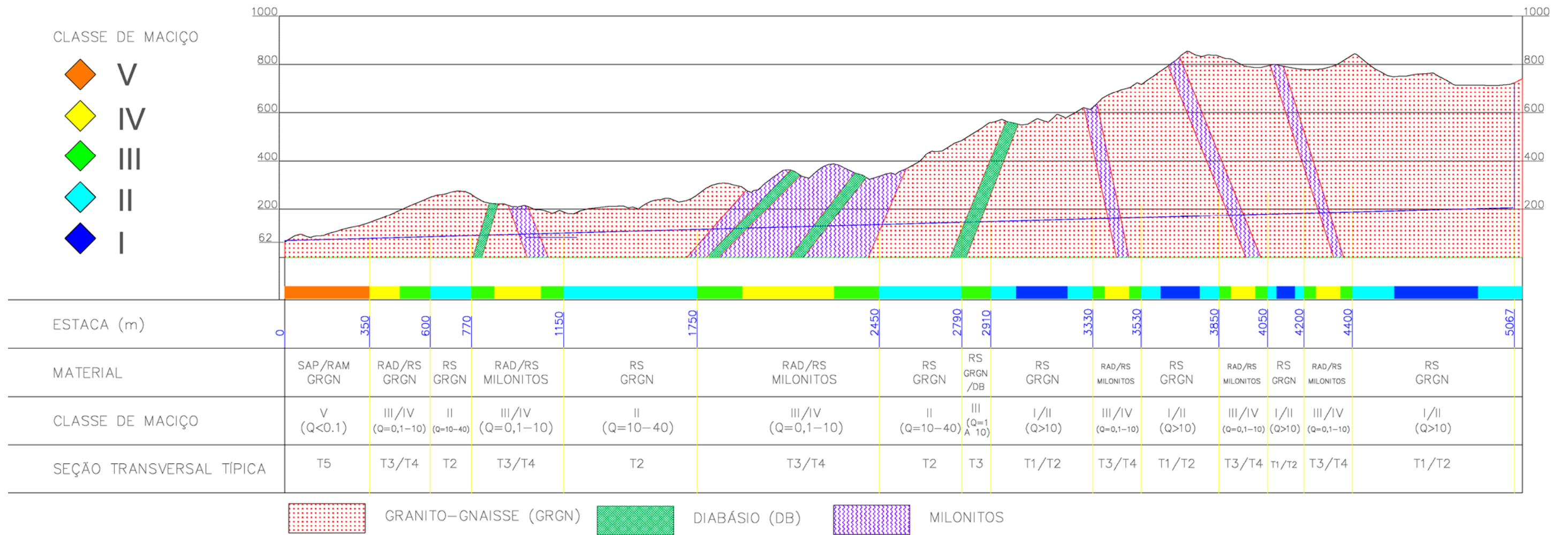
| PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA  | DATA: 16/02/2006             | DESTA: LUCIANO                     | COTA DA BOCA: 76,30m | COORDENADAS |
|---|------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|
| INICIAL: 22,50 m em 16.12.2006  | FINAL: 22,50 m em 16.12.2006 | SONDAGEM ROTATIVA: SM-03 (FOLHA A) |                      |             |
| 0,20  |                              |                                    |                      |             |
| 1,80  |                              |                                    |                      |             |
| 7,30  |                              |                                    |                      |             |
| 11,00   |                              |                                    |                      |             |
| 17,00   |                              |                                    |                      |             |
| CONTINUA NA PRÓXIMA PÁGINA  |                              |                                    |                      |             |
| <p>CLIENTE: SHAFT CONSULTORIA LTDA N°7.386.857.7393<br/>         ESCALA: 1:100 DATA: 16/02/2006 DESTA: LUCIANO COTA DA BOCA: 76,30m<br/>         SONDAGEM ROTATIVA: SM-03 (FOLHA A)</p> |                              |                                    |                      |             |

| PROFUNDIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA  | DATA: 16/02/2006             | DESTA: LUCIANO                     | COTA DA BOCA: 76,30m | COORDENADAS |
|---|------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|
| INICIAL: 22,50 m em 16.12.2006  | FINAL: 22,50 m em 16.12.2006 | SONDAGEM ROTATIVA: SM-03 (FOLHA B) |                      |             |
| 17  |                              |                                    |                      |             |
| 18  |                              |                                    |                      |             |
| 19  |                              |                                    |                      |             |
| 20  |                              |                                    |                      |             |
| 21  |                              |                                    |                      |             |
| 22  |                              |                                    |                      |             |
| 23  |                              |                                    |                      |             |
| 24  |                              |                                    |                      |             |
| 25  |                              |                                    |                      |             |
| CONTINUA NA PRÓXIMA PÁGINA  |                              |                                    |                      |             |
| <p>CLIENTE: SHAFT CONSULTORIA LTDA N°7.386.857.7393<br/>         ESCALA: 1:100 DATA: 16/02/2006 DESTA: LUCIANO COTA DA BOCA: 76,30m<br/>         SONDAGEM ROTATIVA: SM-03 (FOLHA B)</p> |                              |                                    |                      |             |



## Anexo II

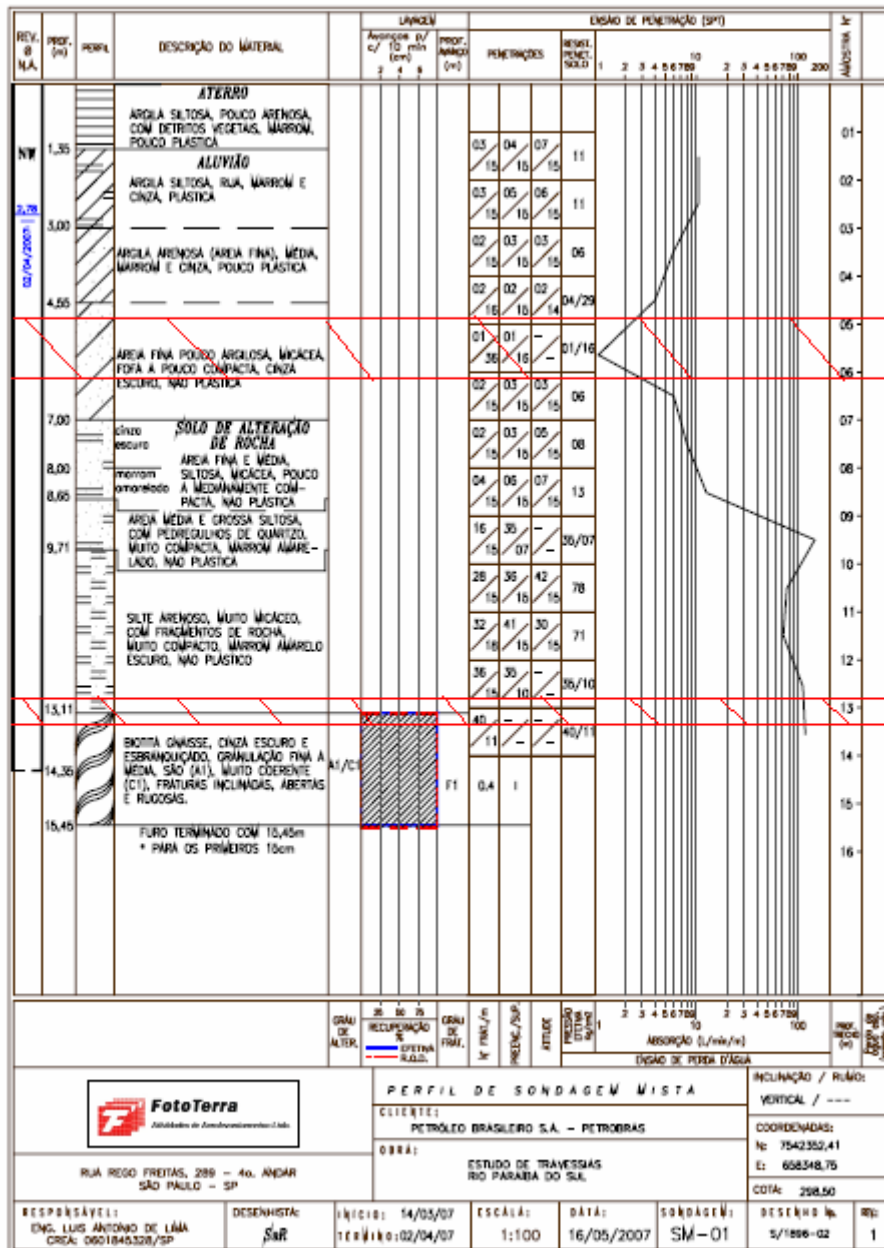
Perfil do Túnel com Classificação Geomecânica.

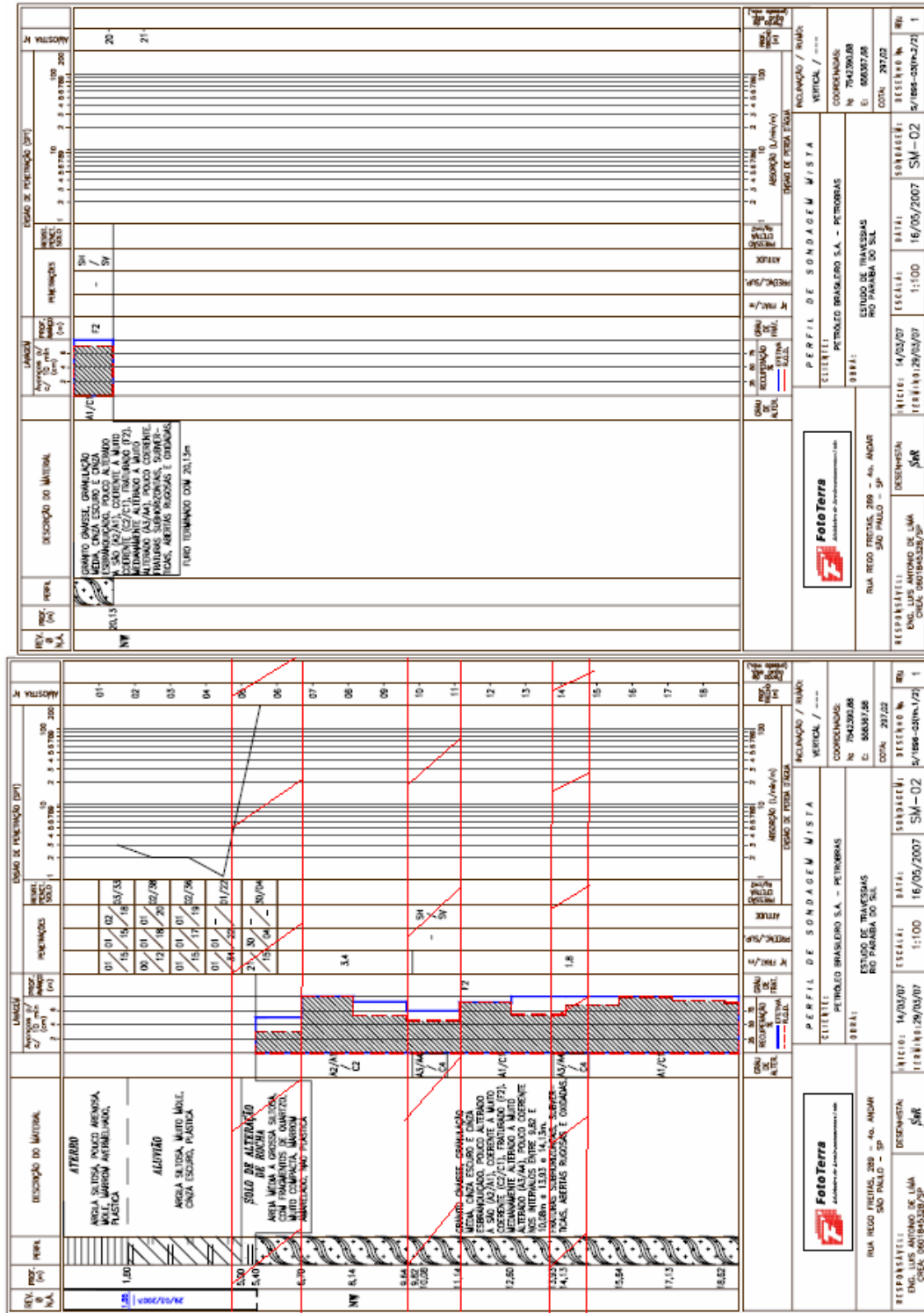


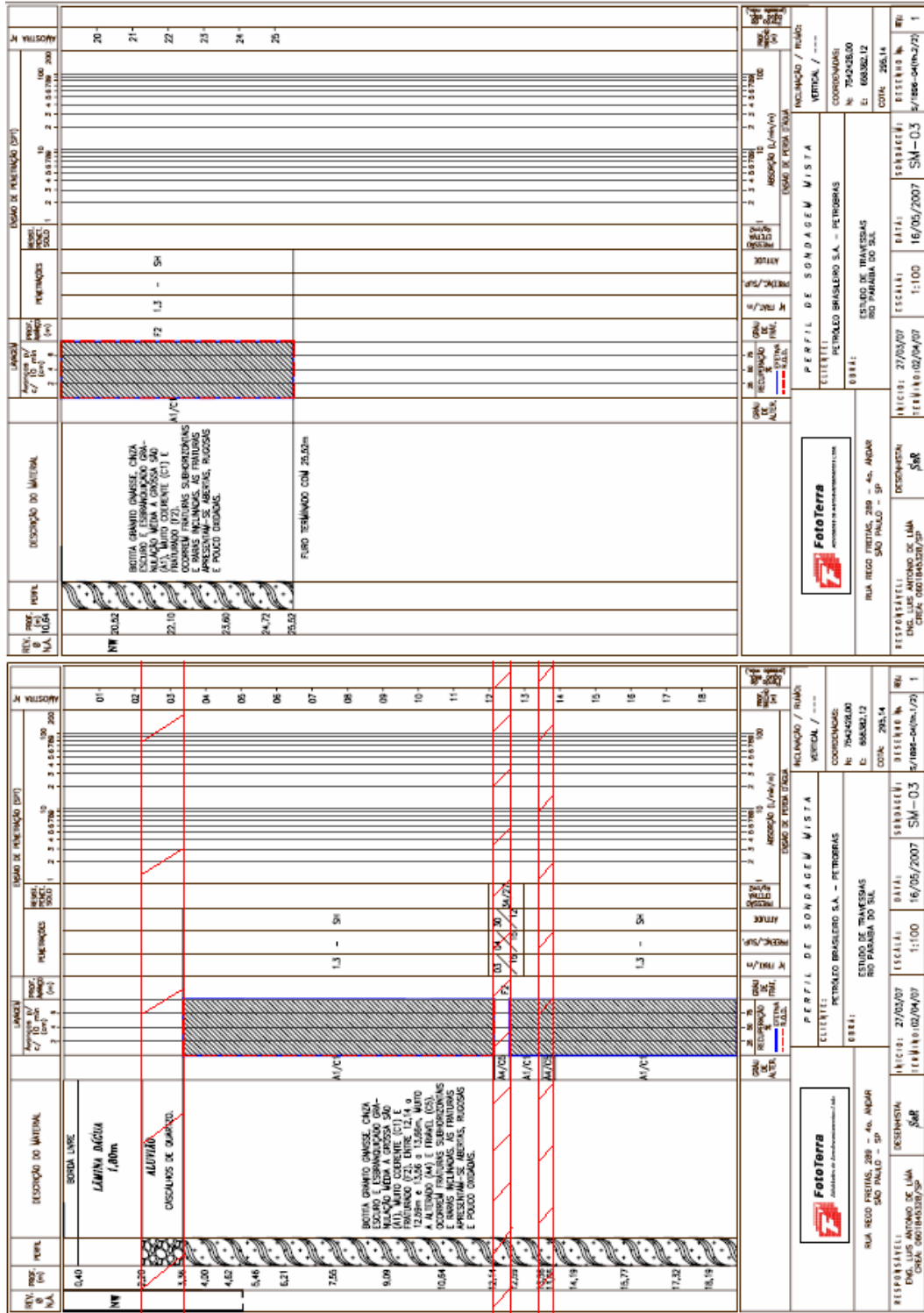
Fonte: Documenta Interno

# Anexo III

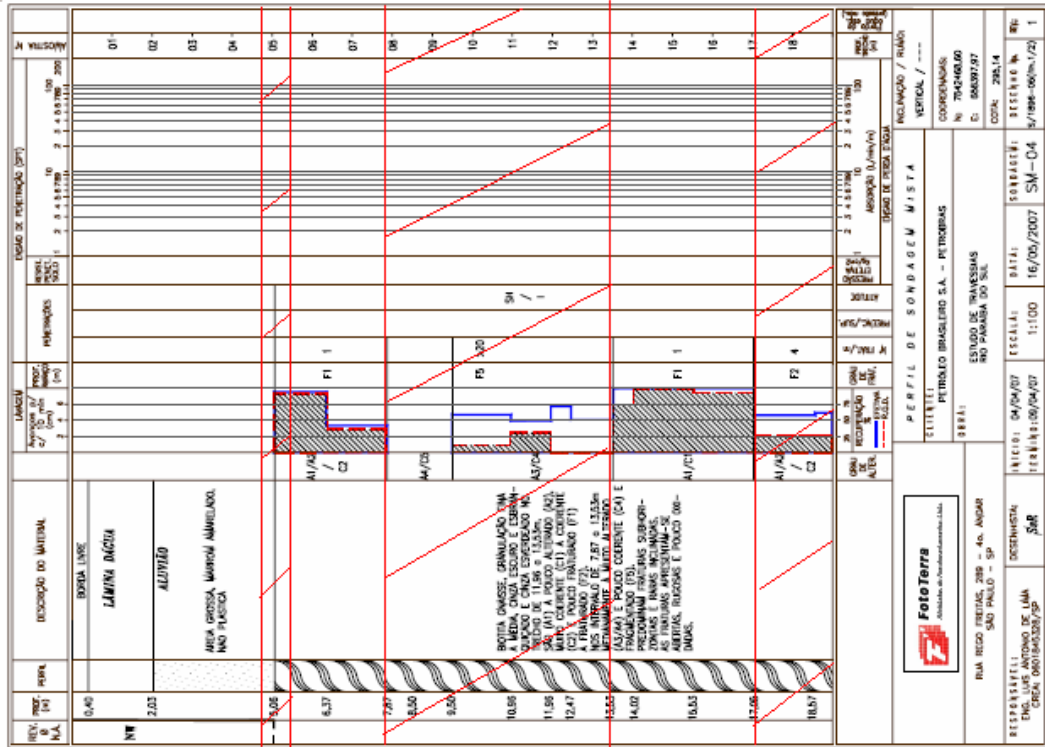
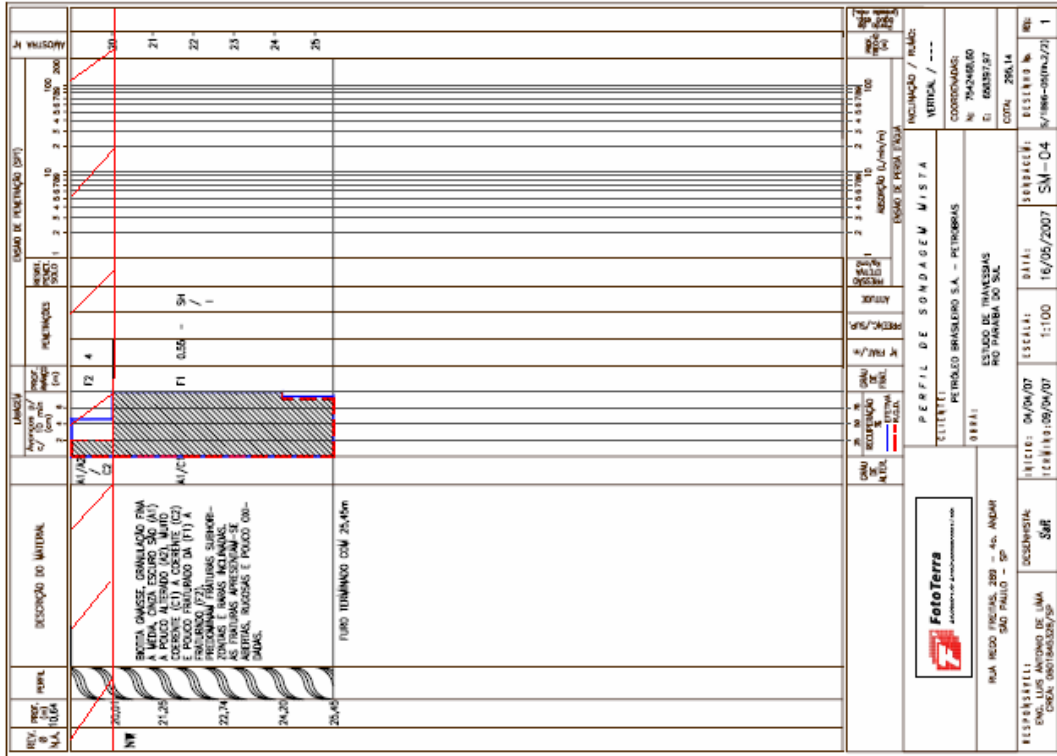
## Boletins de Sondagem do Furo Direcional.











**FotoTerra**  
 Associação de Engenharia de Solos

PERFIL DE SONDAÇÃO MISTA  
 ESTUDO DE TRAVESSIAS NO PARQUE DO SUL

RUA RECO RECULOS, 289 - 4.º ANDAR  
 SÃO PAULO - SP

COORDENADAS:  
 N: 704260,00  
 E: 508927,97  
 COTA: 295,14

PROJETO: ESTUDO DE TRAVESSIAS NO PARQUE DO SUL

DATA: 04/04/07

ESCALA: 1:100

SOBRADO: 16/05/2007

SM-D4

REVISÃO Nº: 1

ELABORADO POR: SAAR

DESENHISTA: SAAR

DATA: 16/05/2007

SM-D4

REVISÃO Nº: 1

**FotoTerra**  
 Associação de Engenharia de Solos

PERFIL DE SONDAÇÃO MISTA  
 ESTUDO DE TRAVESSIAS NO PARQUE DO SUL

RUA RECO RECULOS, 289 - 4.º ANDAR  
 SÃO PAULO - SP

COORDENADAS:  
 N: 704260,00  
 E: 508927,97  
 COTA: 295,14

PROJETO: ESTUDO DE TRAVESSIAS NO PARQUE DO SUL

DATA: 04/04/07

ESCALA: 1:100

SOBRADO: 16/05/2007

SM-D4

REVISÃO Nº: 1

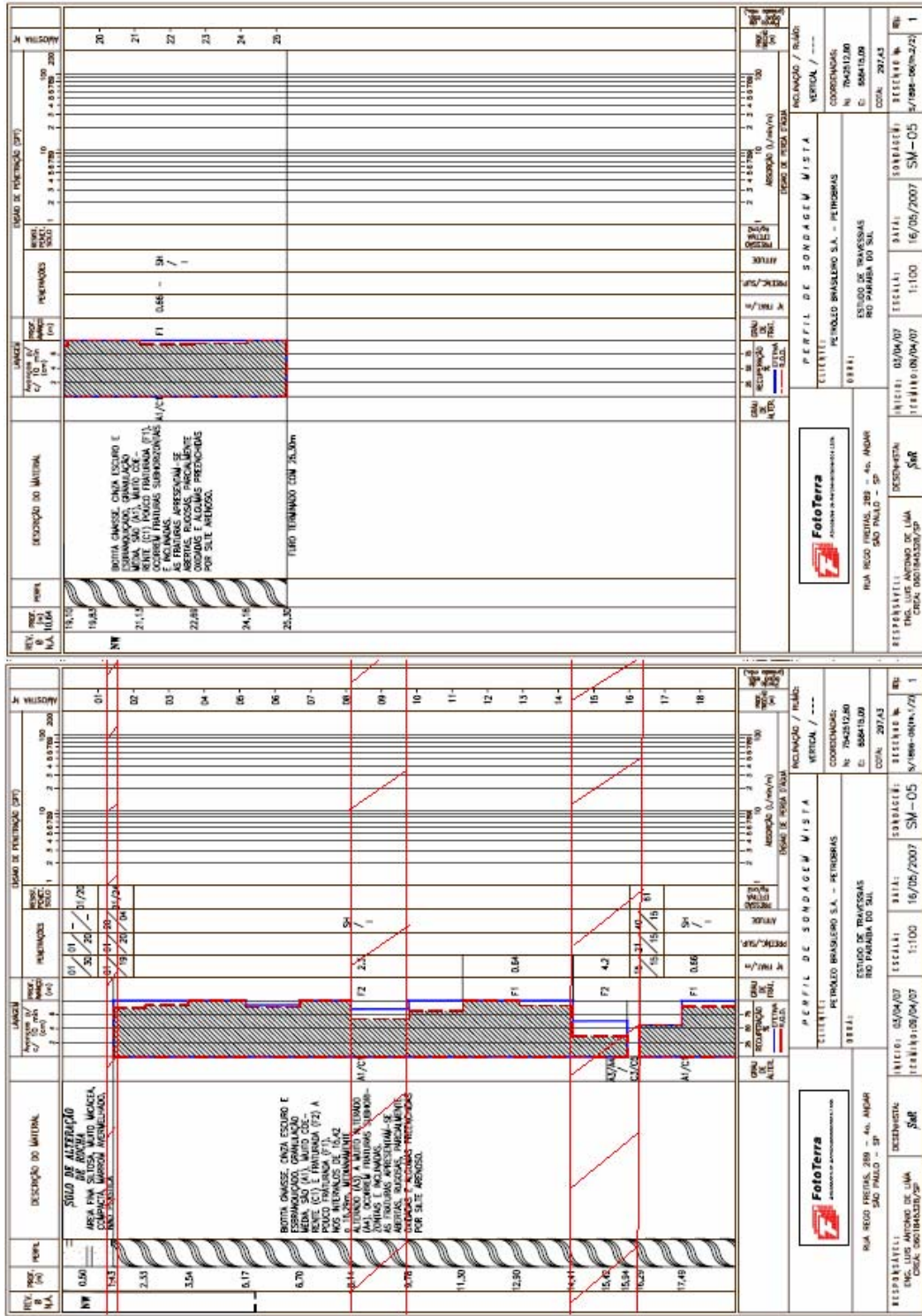
ELABORADO POR: SAAR

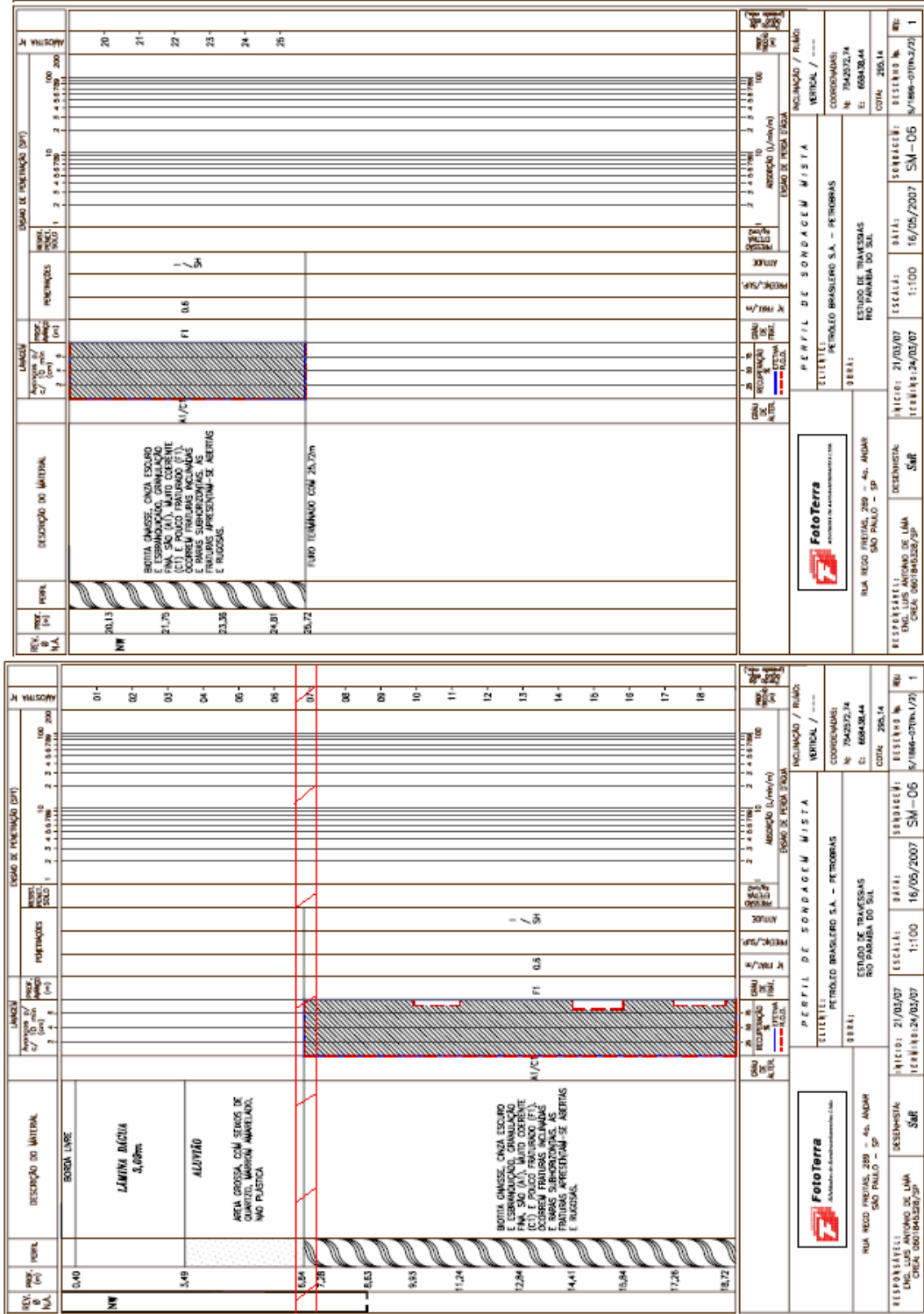
DESENHISTA: SAAR

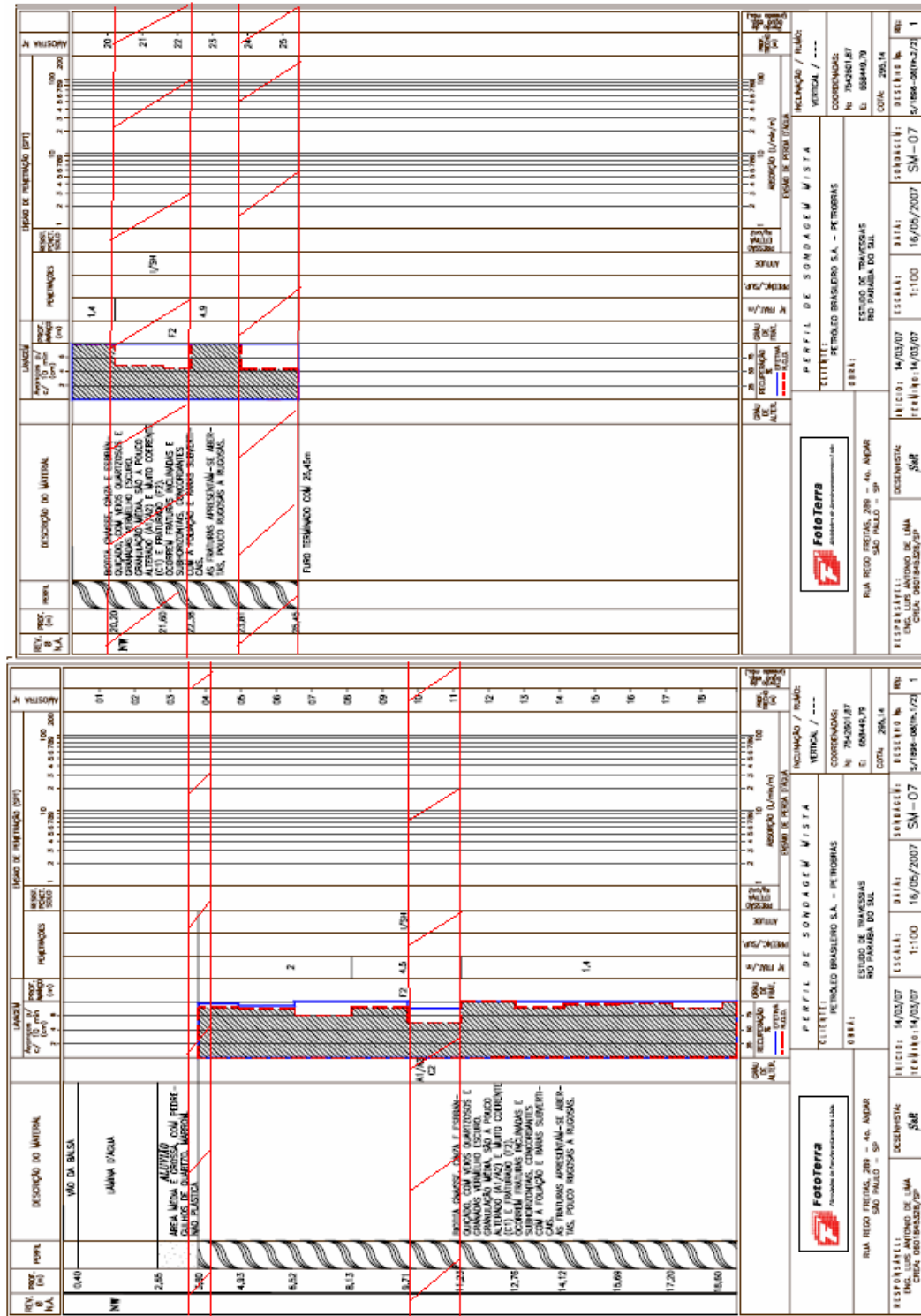
DATA: 16/05/2007

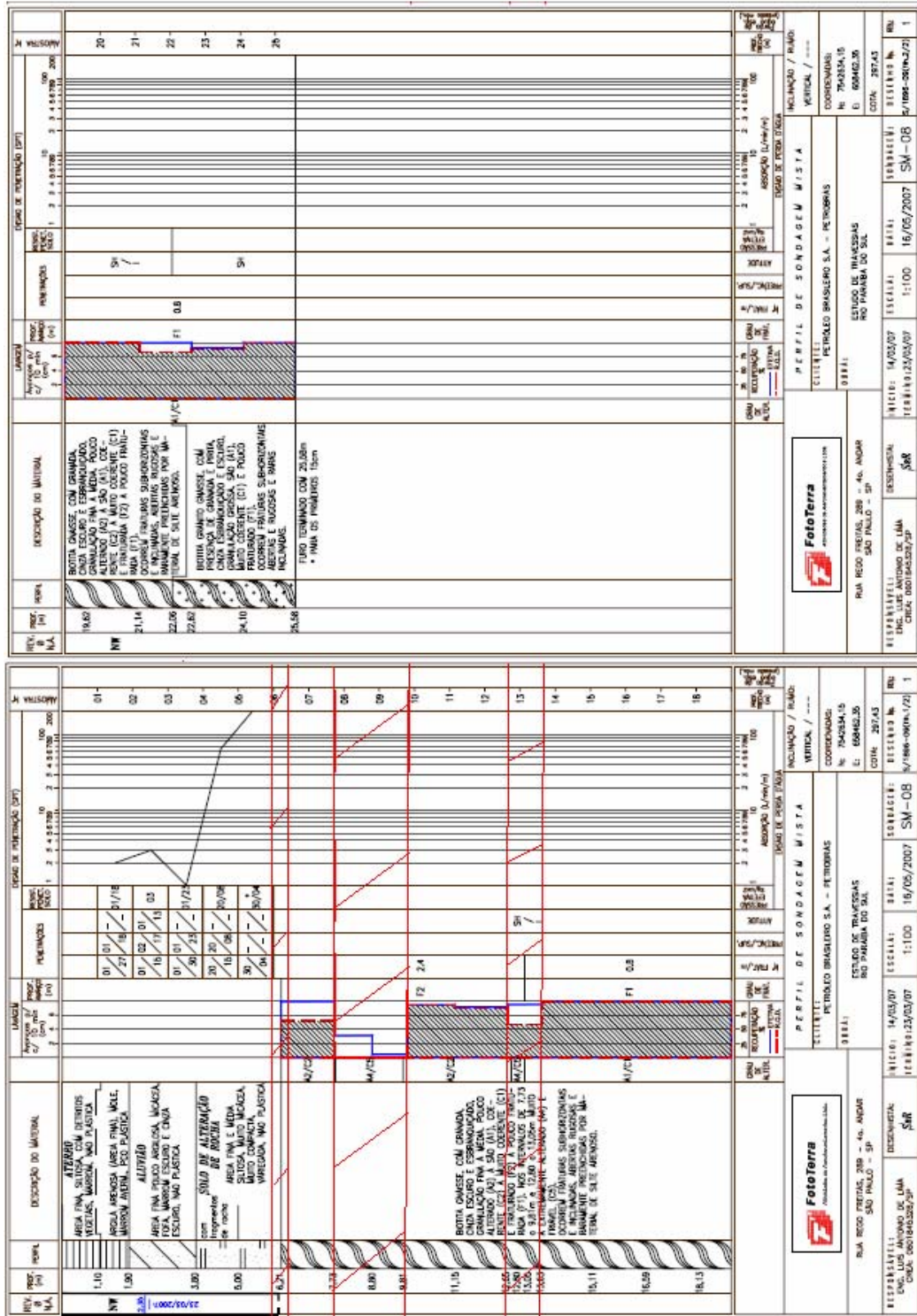
SM-D4

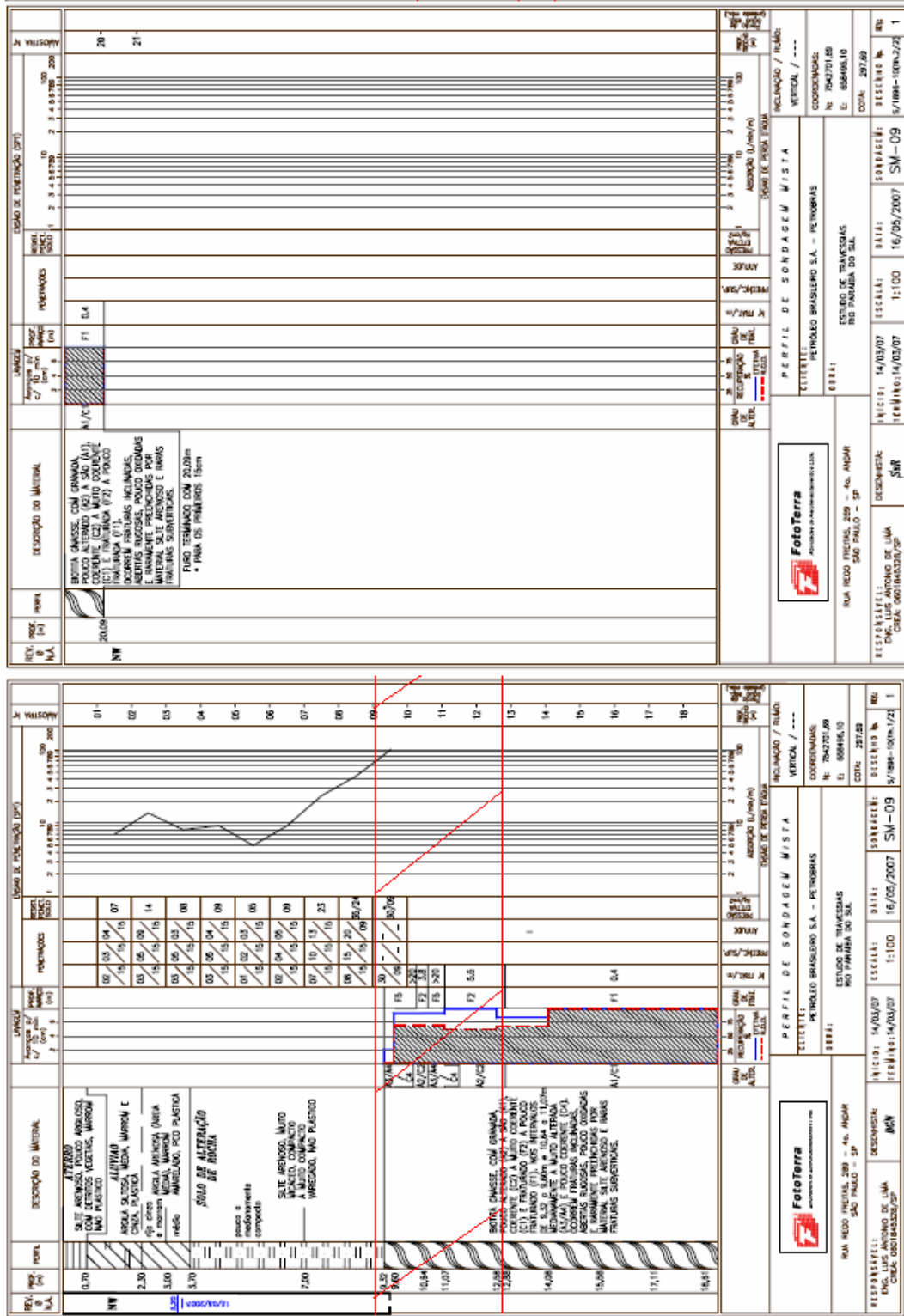
REVISÃO Nº: 1











## Anexo IV

Perfil geológico-geotécnico da travessia.





# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)