

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)

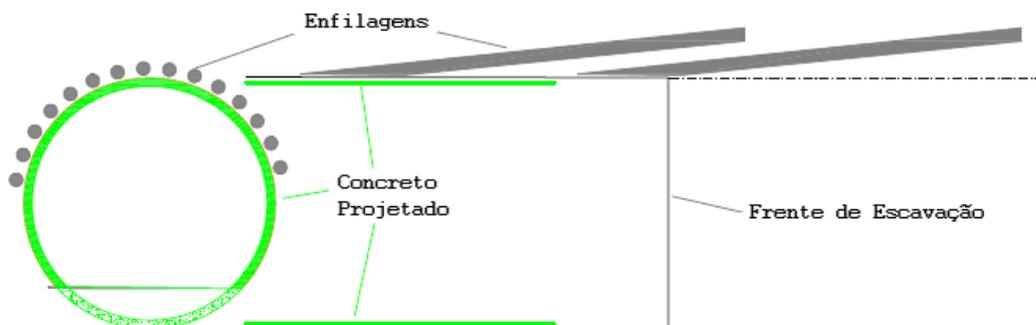


Figura 22: Esquema da utilização de enfilagens, com sobreposição para proteger a frente de escavação.

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.

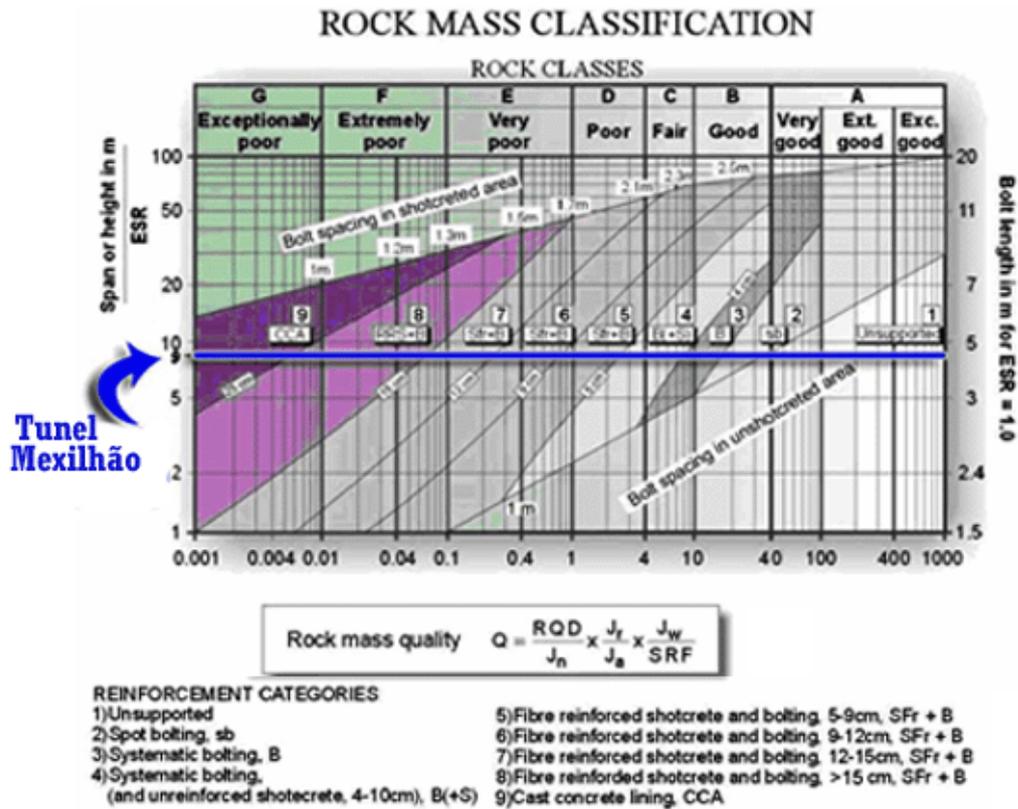


Figura 23: Tabela de classificação pelo método Q

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)

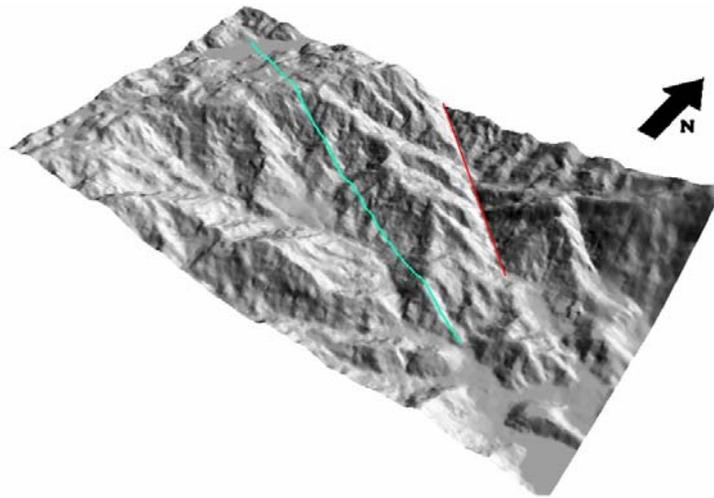


Figura 24: Diretriz primária para o túnel (em azul) sobre modelo digital de terreno. Em vermelho, lineamento significativo interpretado como dique de diabásio [29]

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)

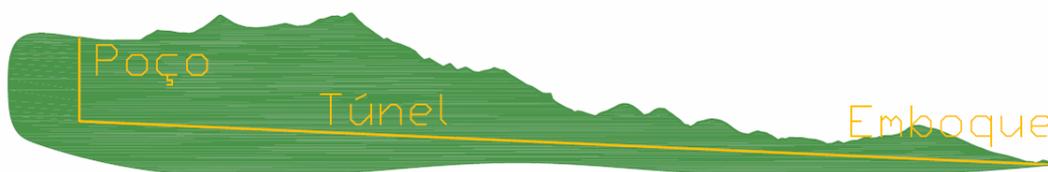


Figura 25: Esquema do projeto, com túnel associado a poço [29]

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.

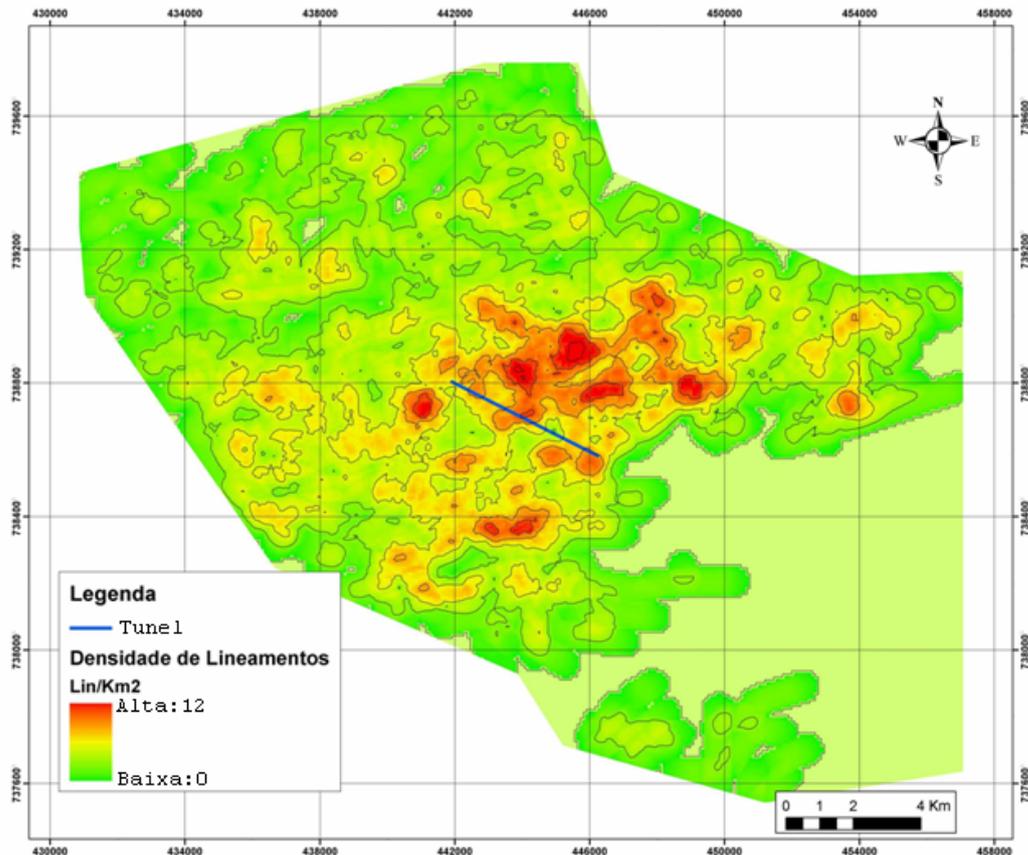


Figura 26: Densidade de lineamentos foto-interpretados na região do túnel [29]

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

Materiais
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.

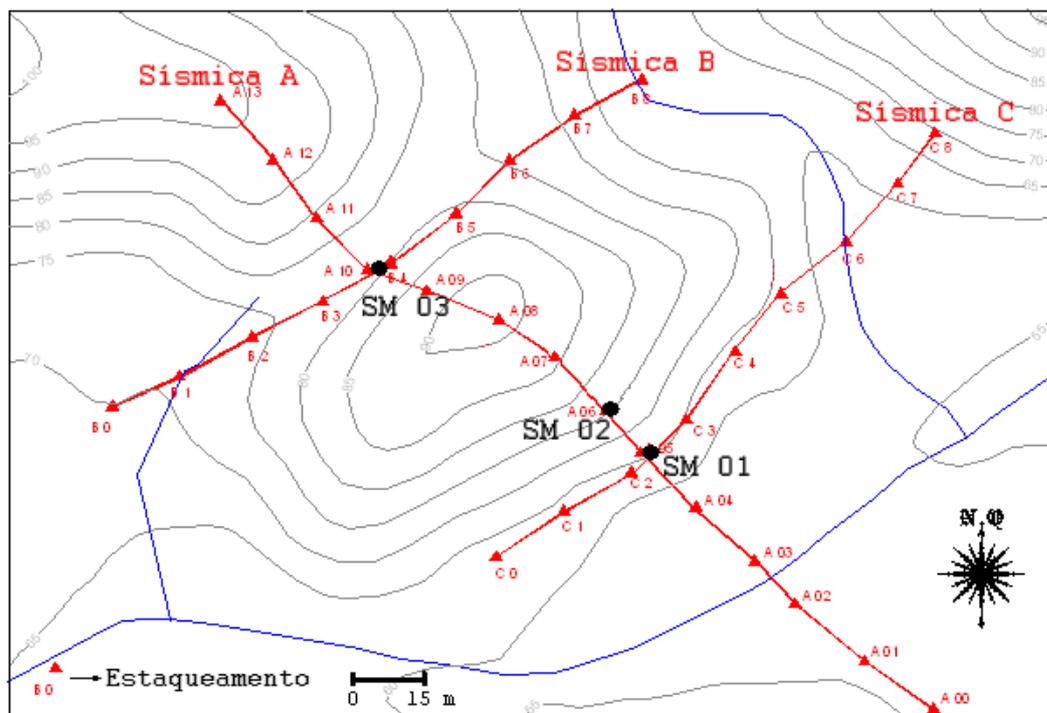


Figura 27: Sondagens diretas e indiretas realizadas no emboque [29]

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.

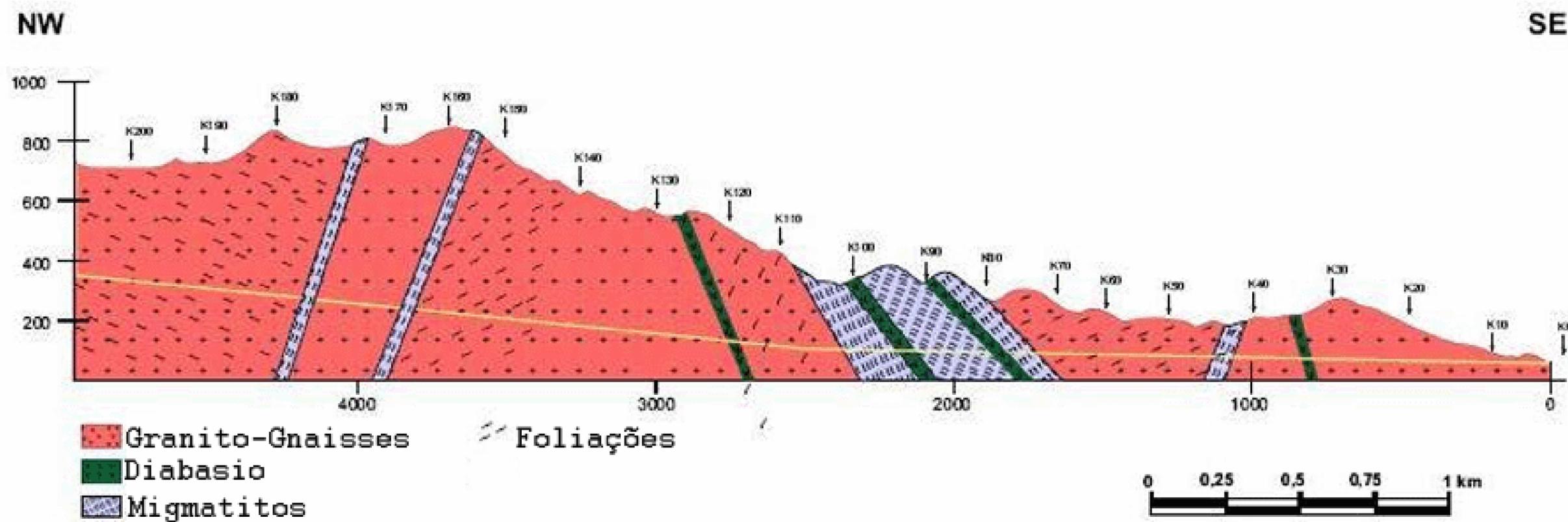


Figura 28: Perfil geológico do túnel, fruto do mapeamento realizado [29]

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.

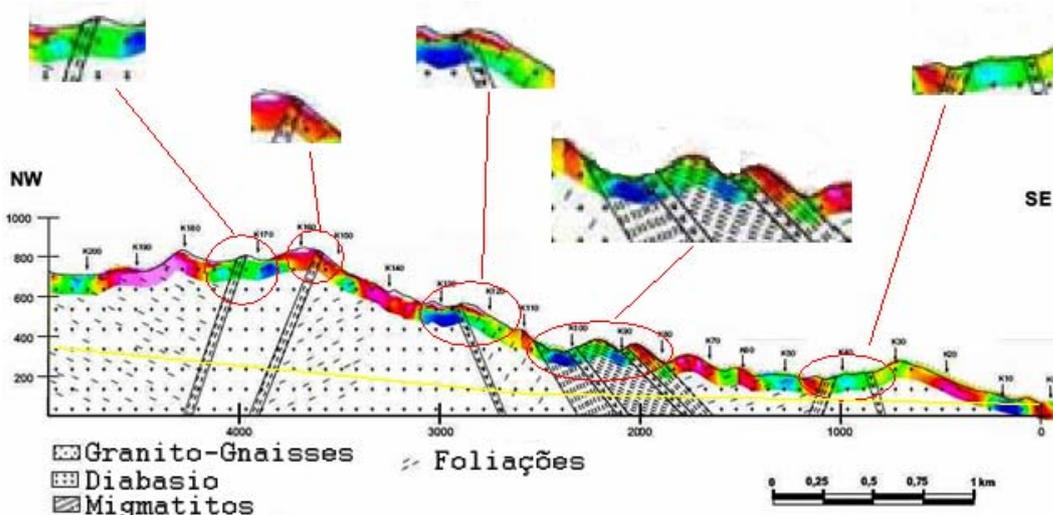


Figura 29: Sobreposição do perfil geológico com o levantamento elétrico; destaque para as zonas milonitizadas e com diques de diabásio [29]

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

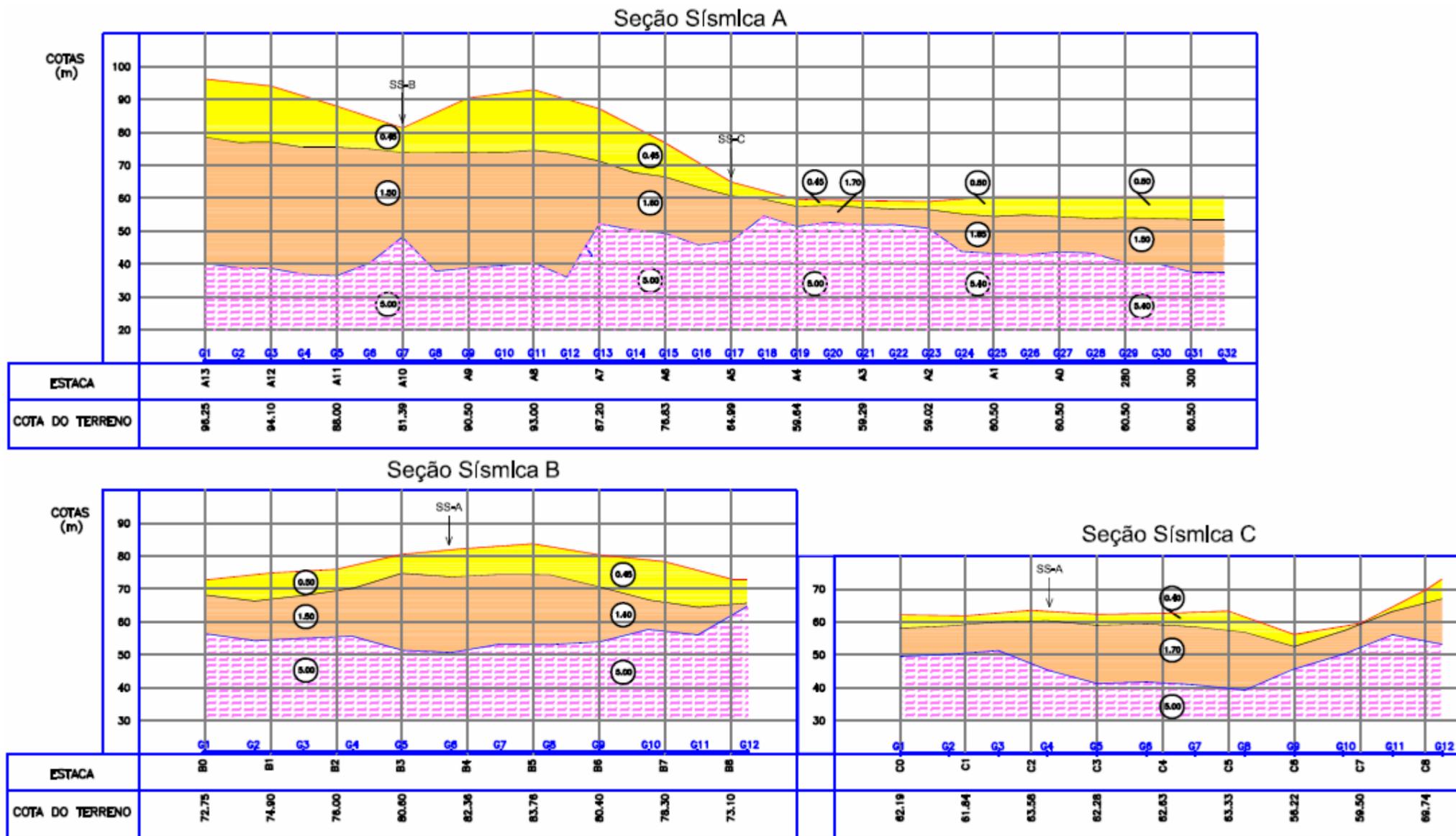


Figura 30: Seções sísmicas realizadas no emboque, que identificaram 3 zonas distintas [29]

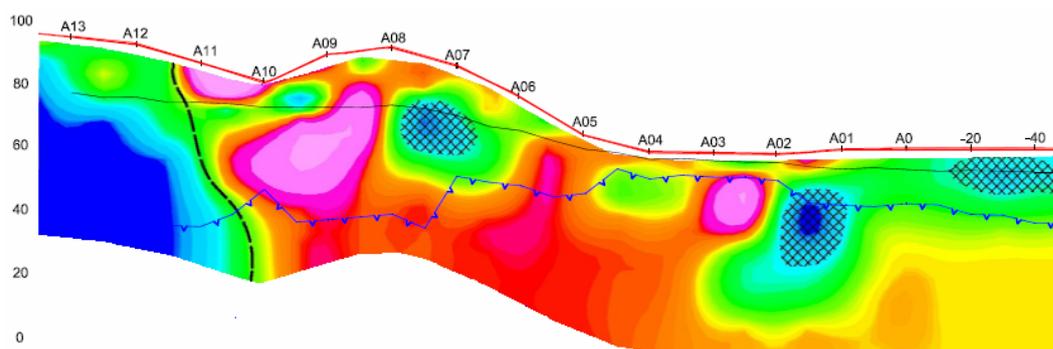


Figura 31: Sobreposição de seção de resistividades com camadas sísmicas [29]

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.

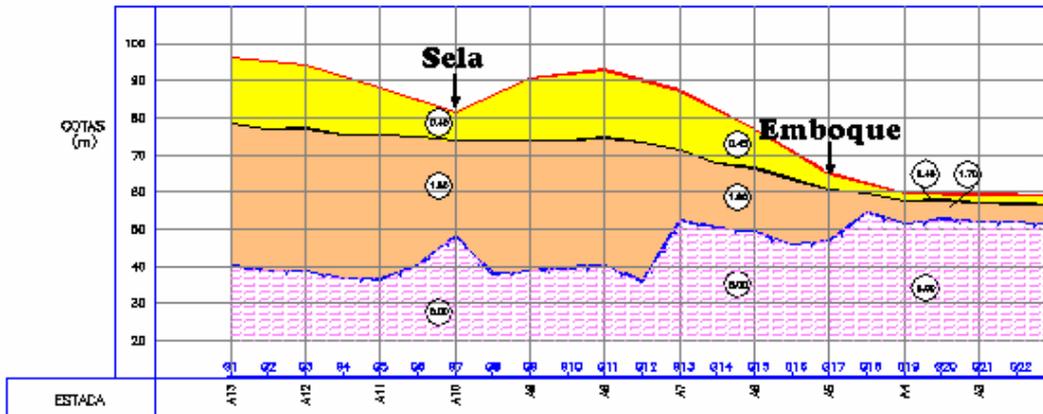


Figura 32: Sela topográfica à frente do emboque previsto. (adaptado de [29])

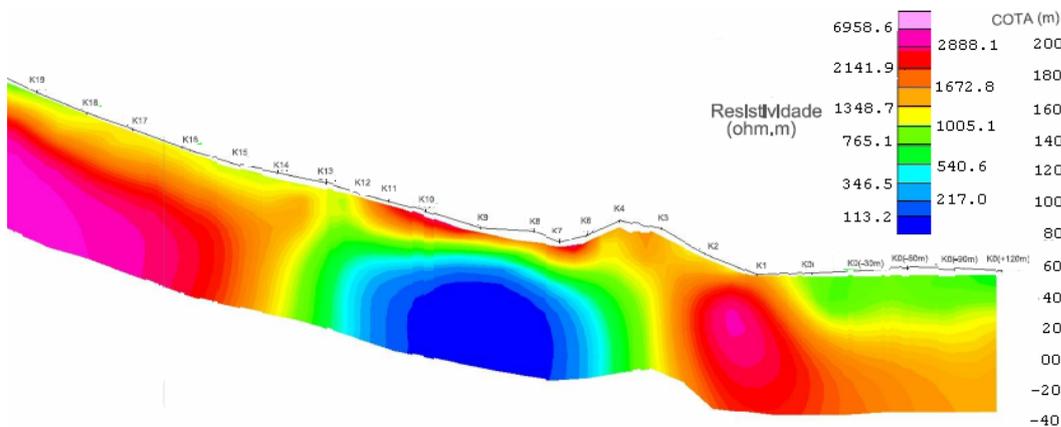


Figura 33: Zona de baixa resistividade, que parece estar relacionada à sela topográfica [29]

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.

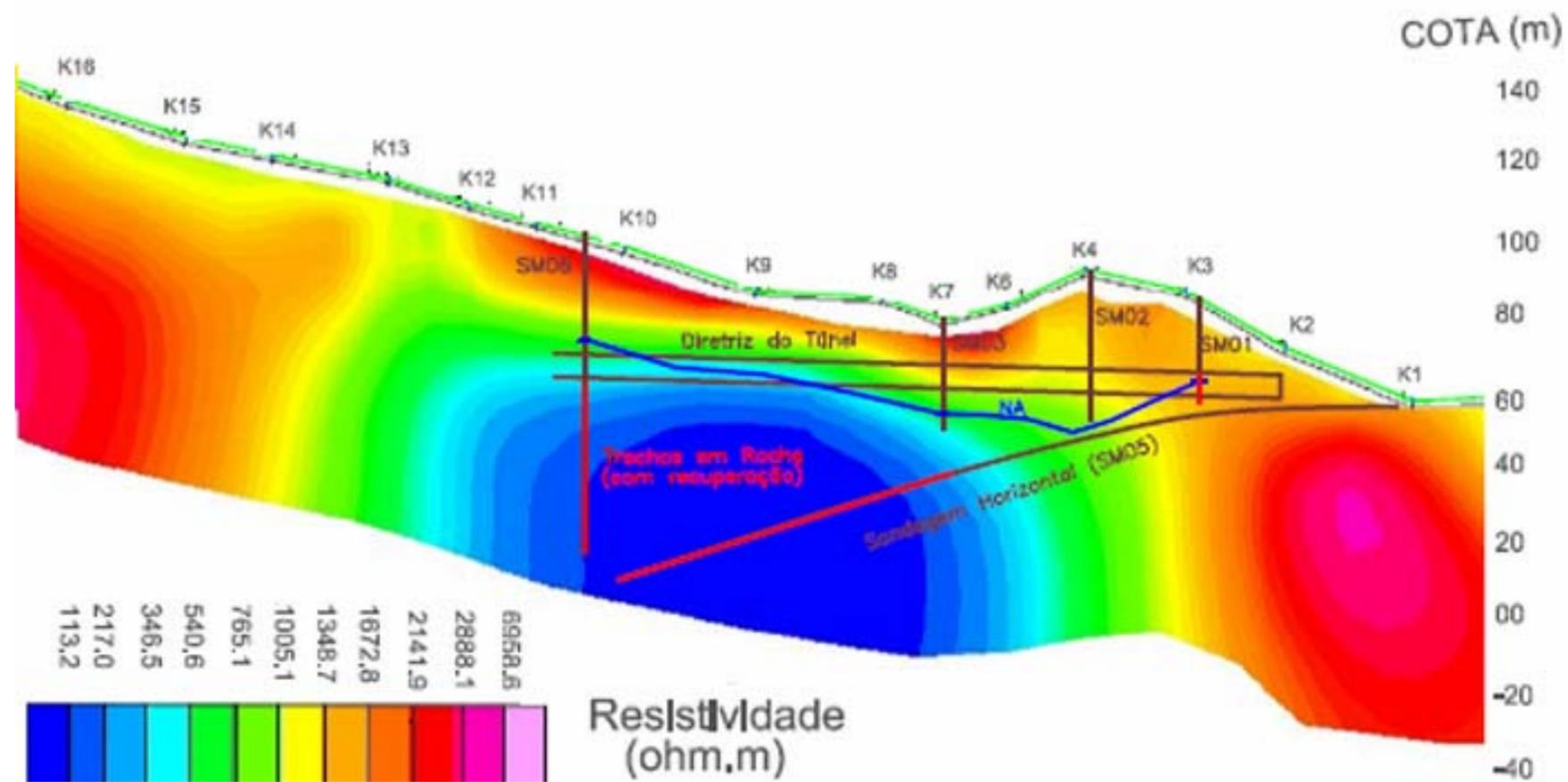


Figura 35: Sobreposição de dados de caminhamento elétrico com sondagens realizadas (adaptado [29])

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)

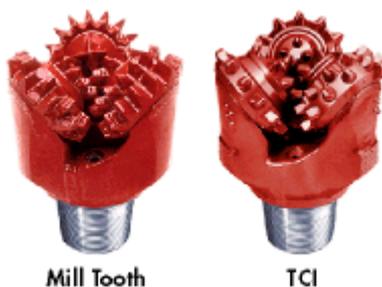


Figura 36: Exemplos de brocas utilizadas para materiais inconsolidados (Mill Tooth, ou dentes fresados) e materiais de maior resistência (TCI, com insertos de Tungstênio). [31]

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)

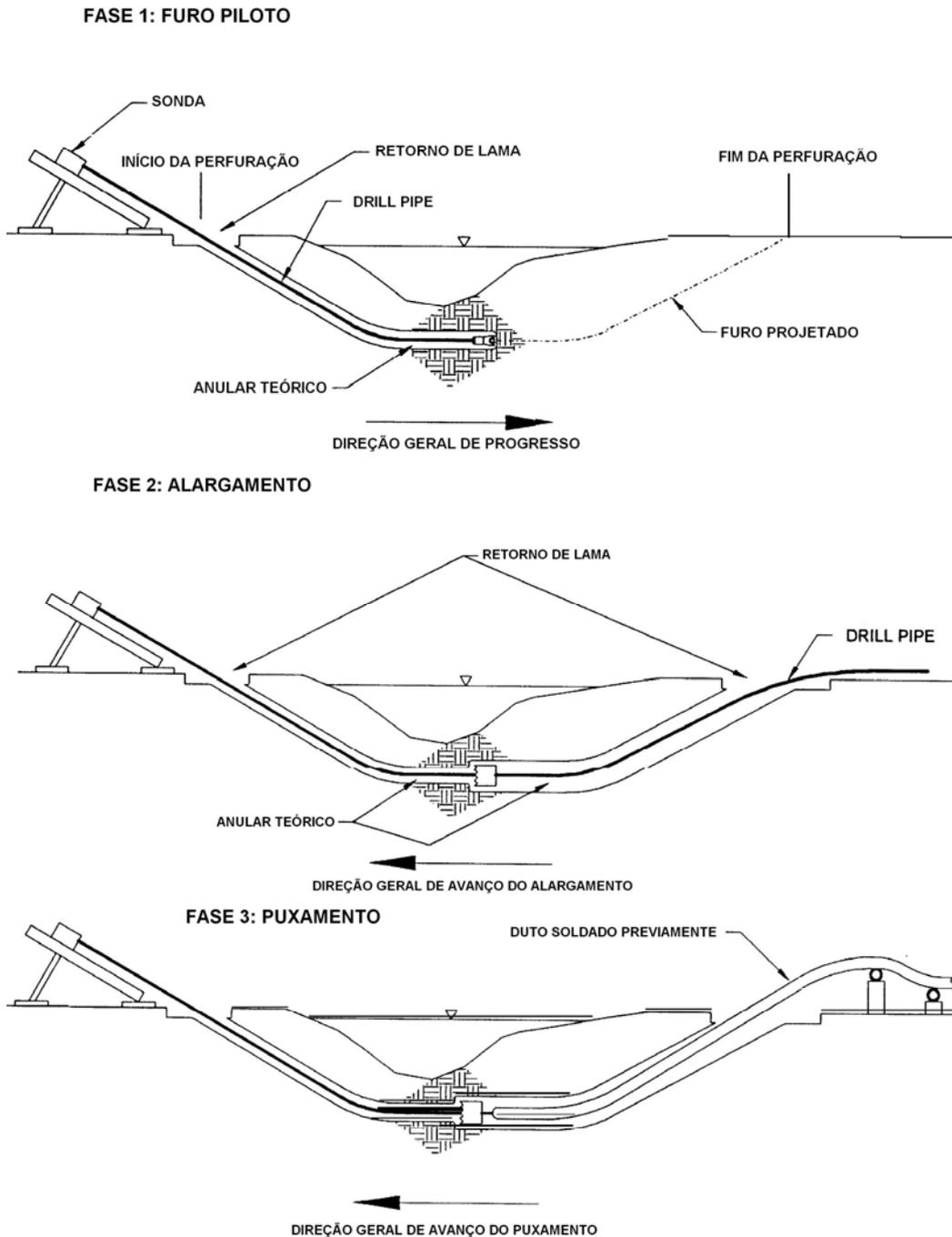


Figura 37: Fases da Perfuração Direcional (A) Furo Piloto (B) Alargamentos (C) Puxamento da coluna

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, σ_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 mochas 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 m², na margem de início do furo (chamada 'rig side'), e mais cerca de 800 m² 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)

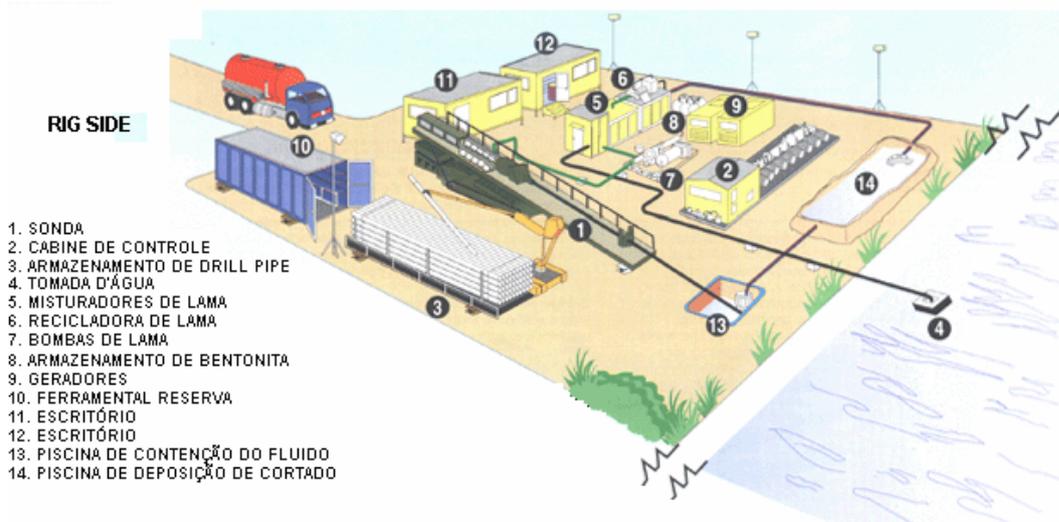


Figura 38: Esquema do canteiro no lado da sonda (Rig Side)

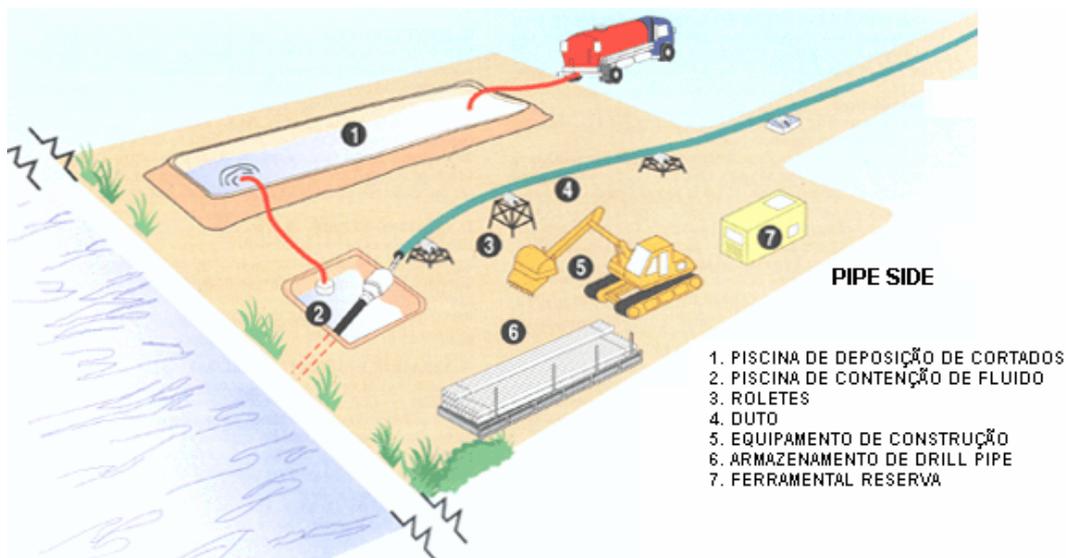


Figura 39: Esquema do canteiro no lado da coluna de tubos (Pipe Side)

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.

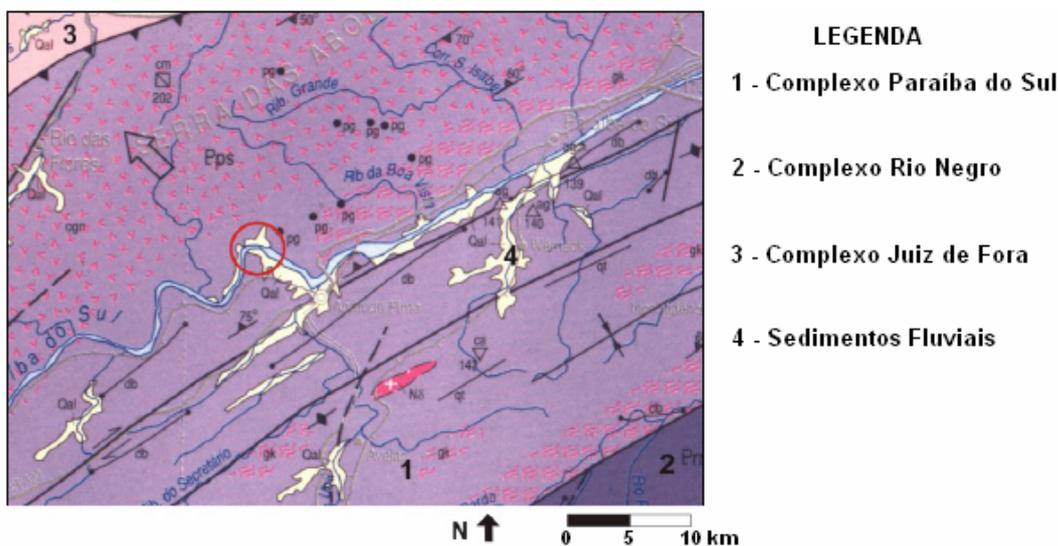


Figura 41: Mapa geológico da região, com a travessia em destaque [32]

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.

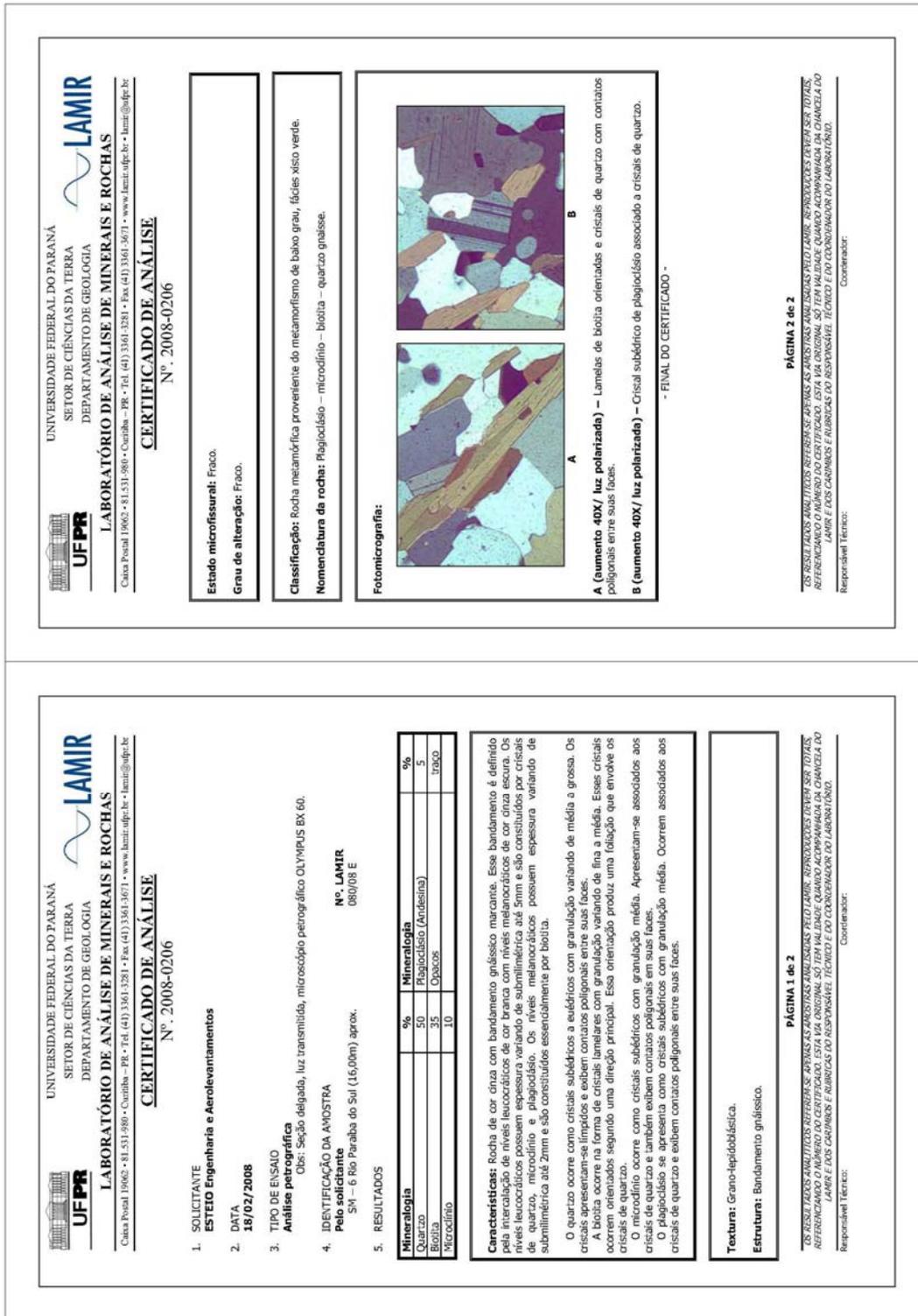


Figura 44: Resultado da análise petrográfica por lâmina delgada [29]

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 ³)	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.

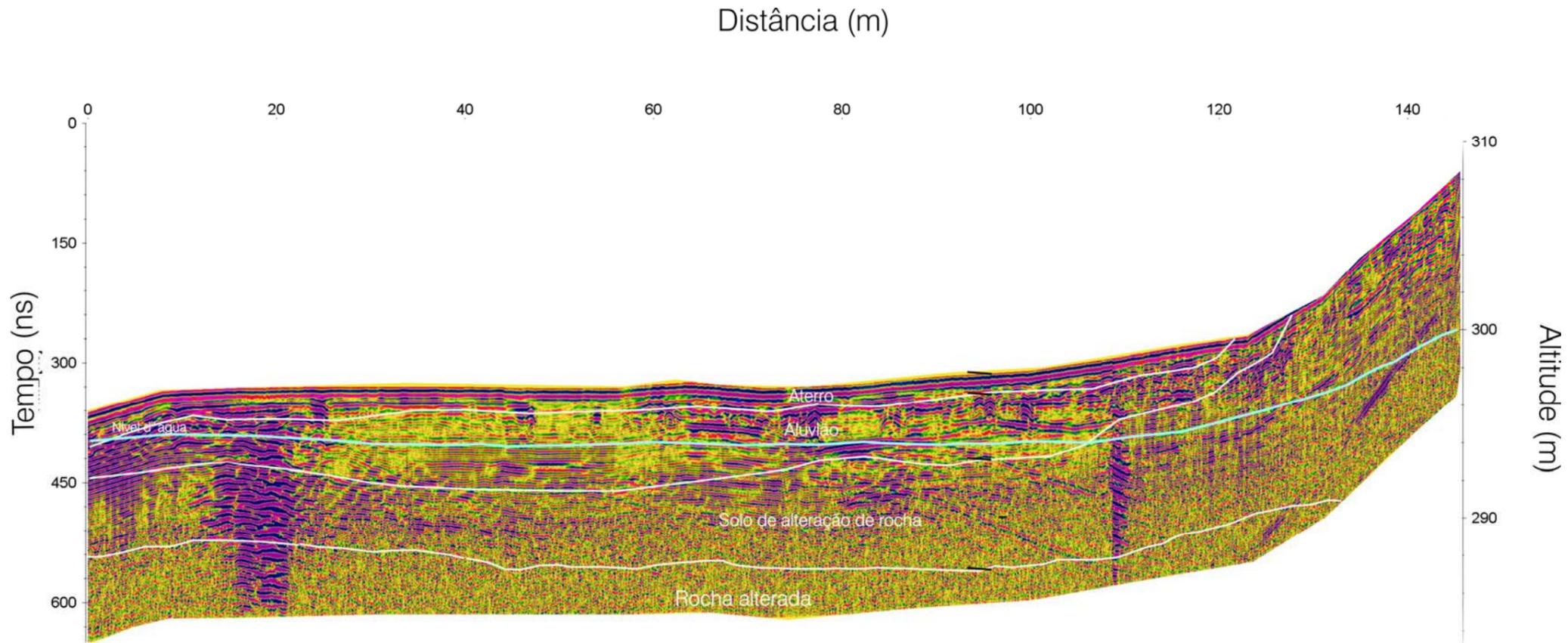


Figura 47: Perfil de GPR interpretado – linha L06 a L06d [29]

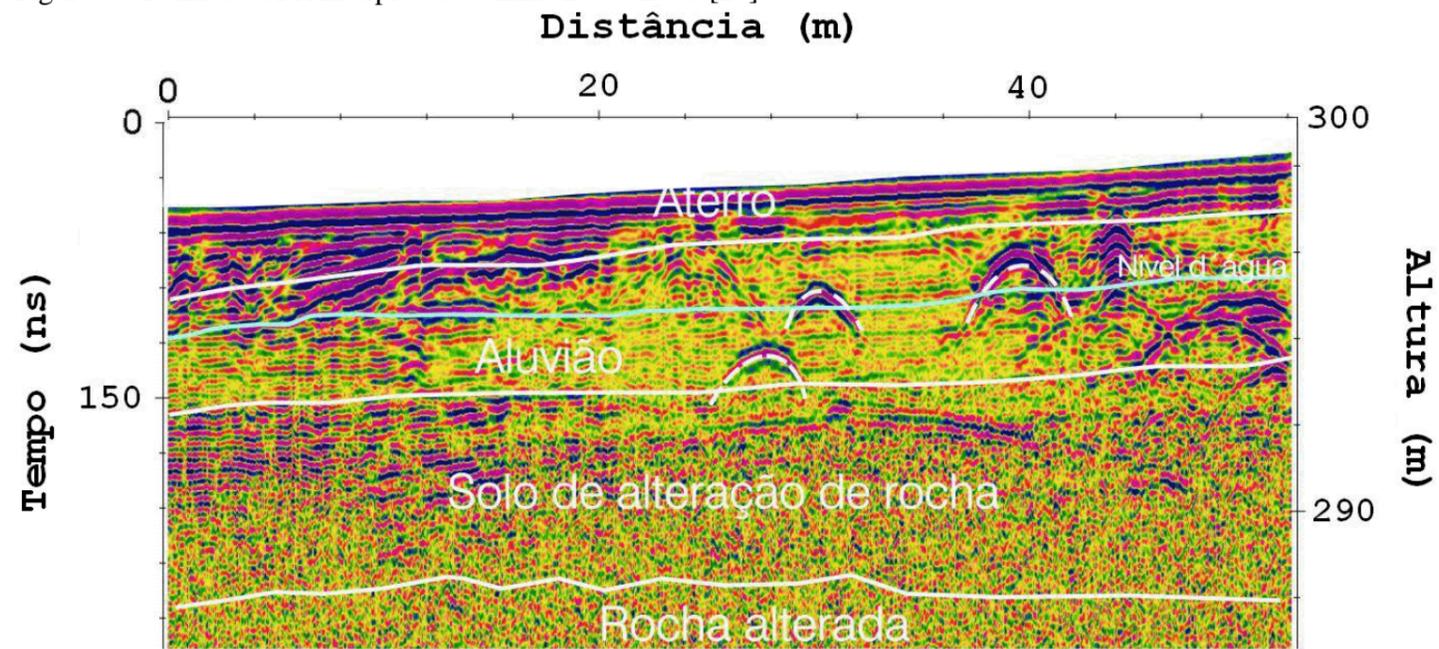


Figura 48: Linha transversal interpretada, especial interesse nos sinais hiperbólicos identificados [29]

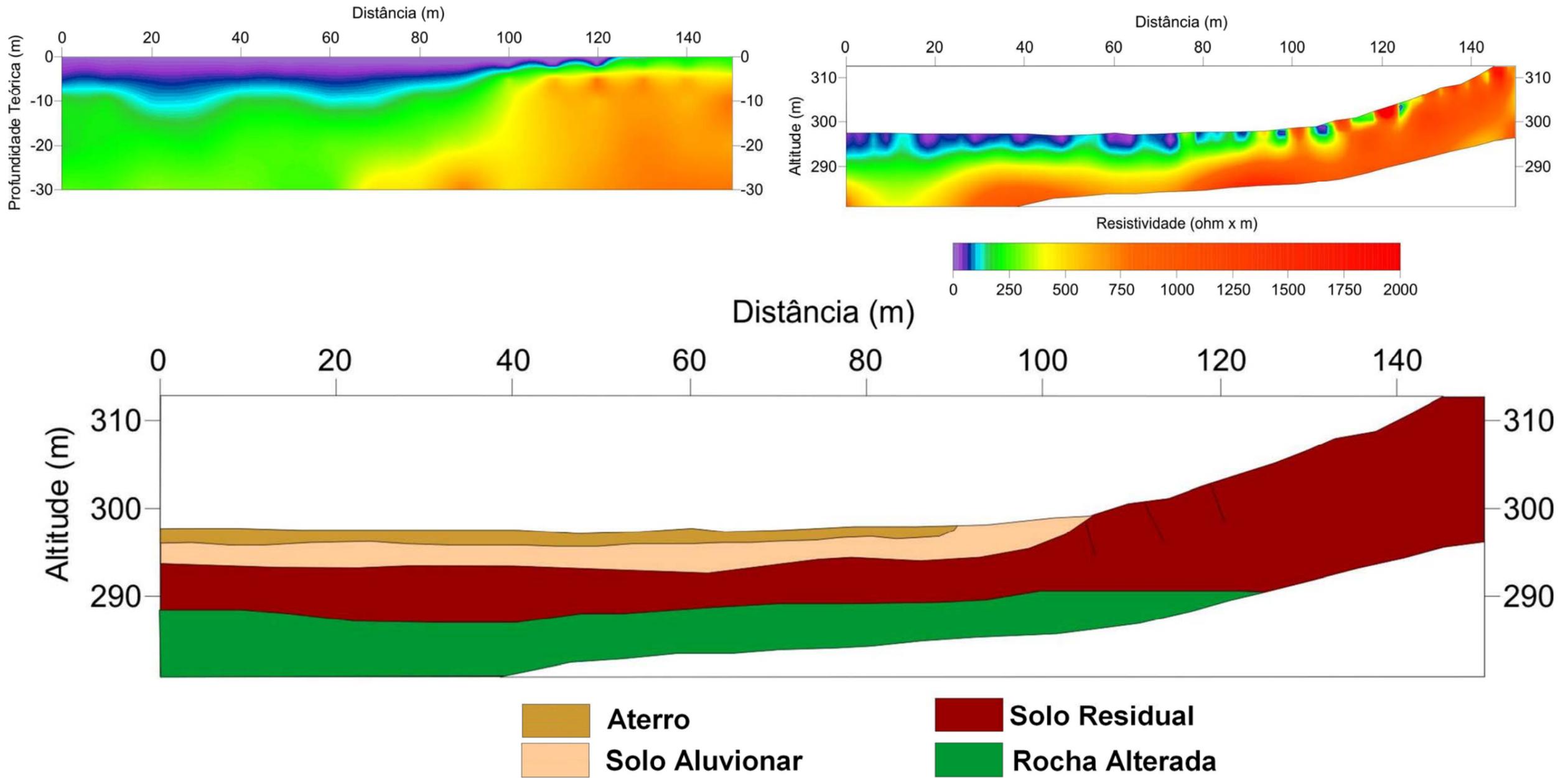


Figura 49: Perfil de Caminhamento Elétrico interpretado (linha L02e), com algumas fraturas inferidas na base do talude [29]

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.

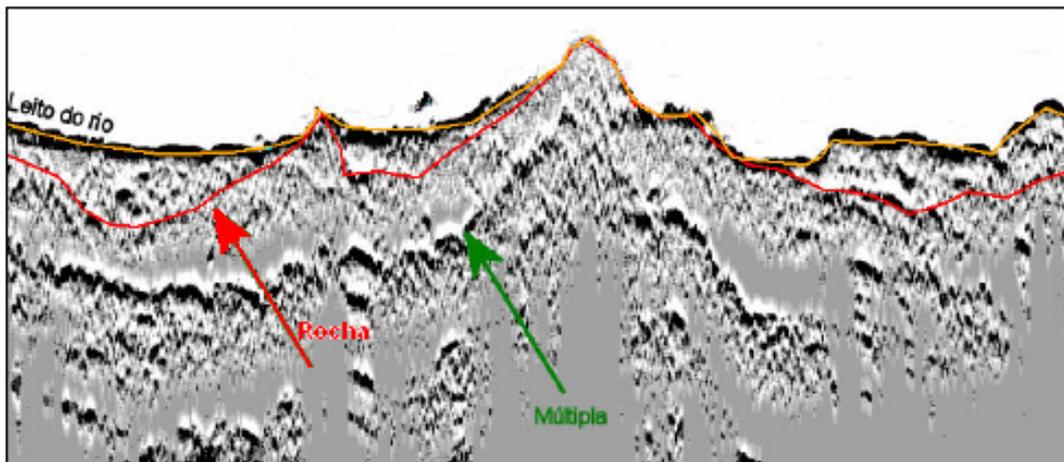


Figura 50: Seção de sub-bottom profiler interpretada (adaptada de [29])

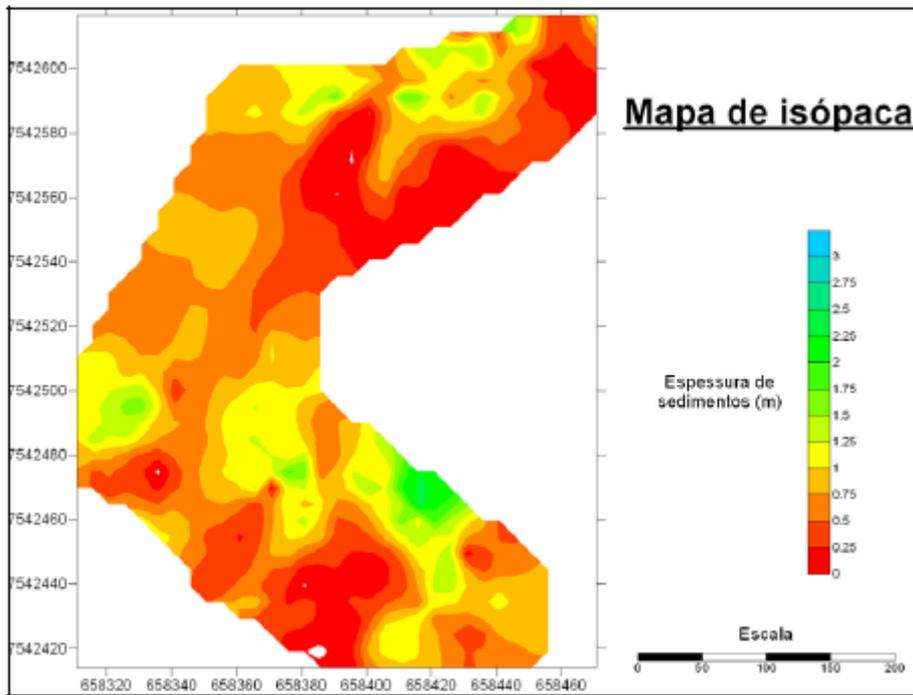


Figura 51: Mapa de isopacas da travessia do Paraíba do Sul [29]

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.

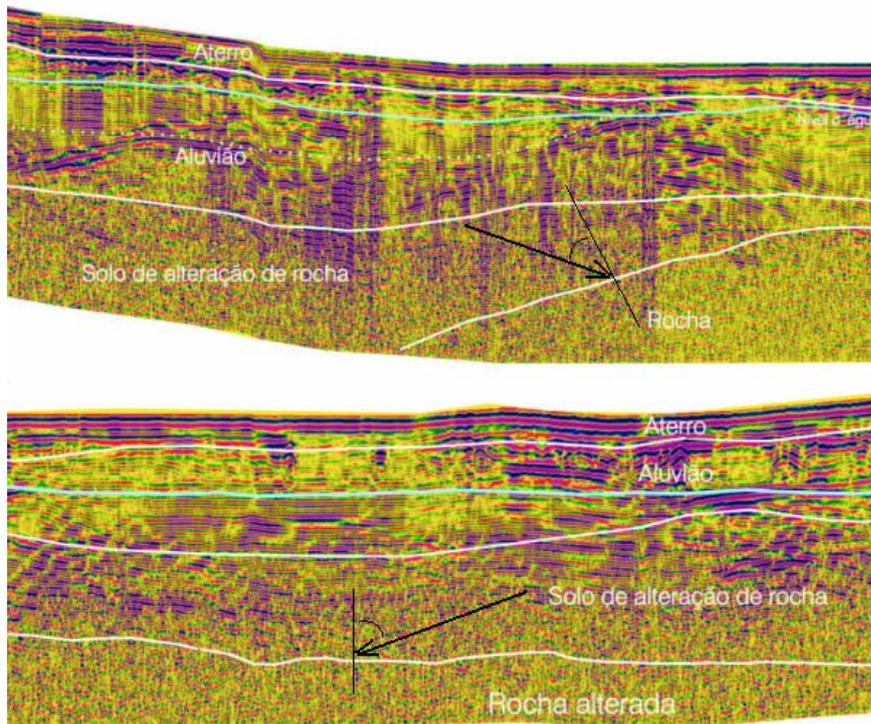


Figura 52: Comparação entre o mergulho do topo rochoso nas margens direita (acima) e esquerda (abaixo). O ângulo de ataque é mais vantajoso na margem direita. [29]

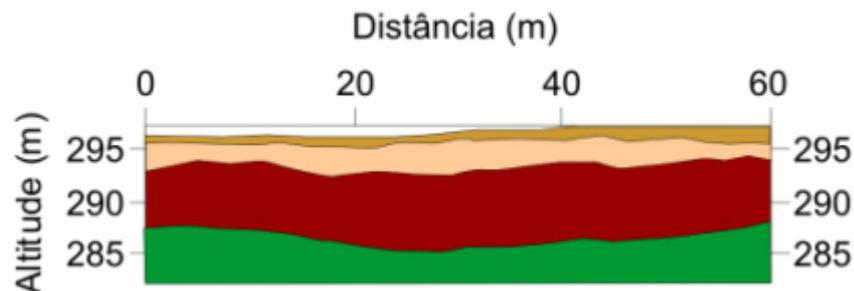


Figura 53: Inclinação transversal do topo rochoso [29]

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.

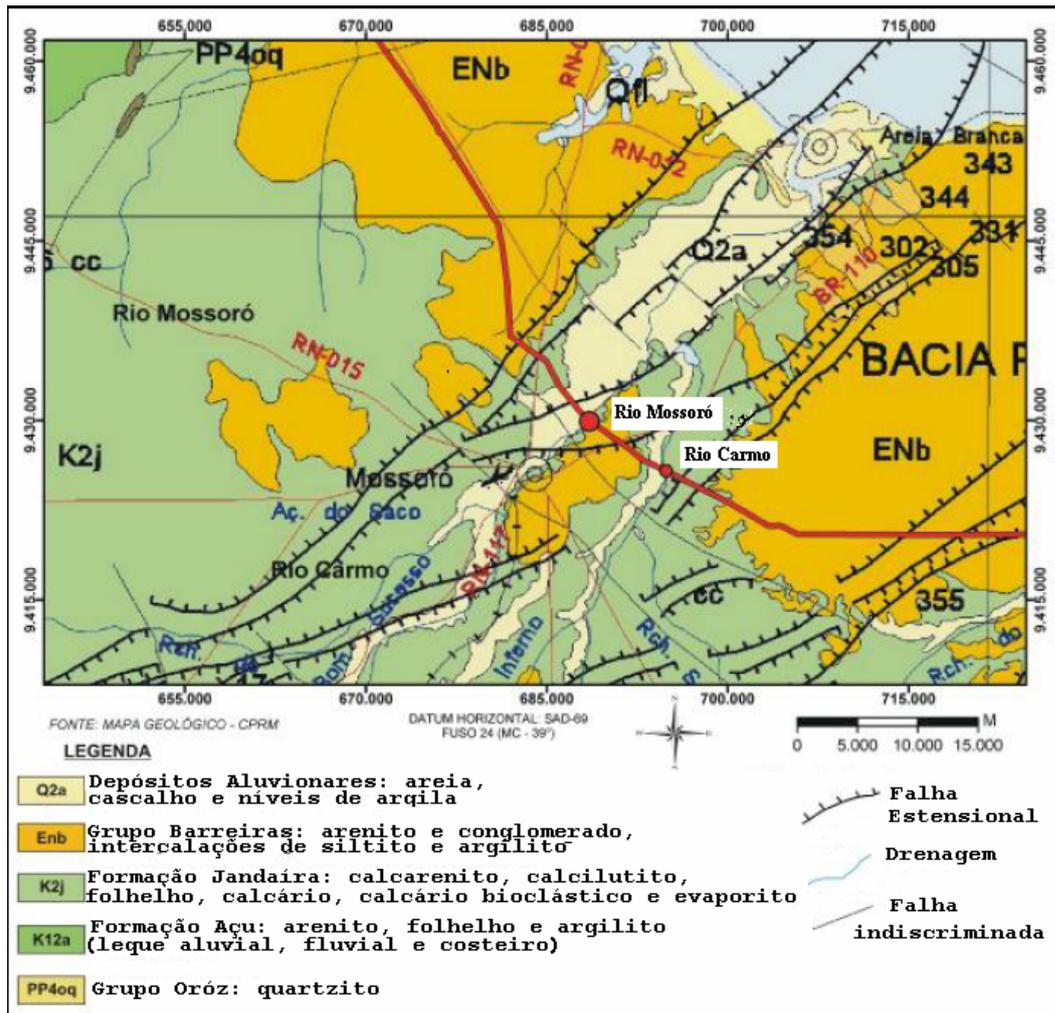


Figura 54: Mapa geológico da região das duas travessias [39]

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"/> Limpida	<input checked="" type="checkbox"/> Turva	<input type="checkbox"/> (esverdeada)
OBRAS PRÓXIMAS:			
OBRAS:	OBSERVAÇÕES:	OBRAS:	OBSERVAÇÕES:
<input type="checkbox"/> Emissários	<input checked="" type="checkbox"/> Barragem	<input type="checkbox"/> Barragem	<input type="checkbox"/> Rede de energia elétrica
<input type="checkbox"/> Pontes	<input checked="" type="checkbox"/> Duto	<input checked="" type="checkbox"/> Duto	<input type="checkbox"/> 1.000 m a montante.
<input type="checkbox"/> Bueiros			
USO DO SOLO:			
<input type="checkbox"/> Não há	<input type="checkbox"/> Cultura Perene	<input type="checkbox"/> Cultura Perene	<input type="checkbox"/> Uso Permanente
<input type="checkbox"/> Urbano	<input type="checkbox"/> Cíclica	<input checked="" 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	MARGEM DIRETA
<input 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"/> Leito Rochoso	<input type="checkbox"/> Leito Rochoso	<input type="checkbox"/> Seixos
<input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo	<input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo	<input checked="" type="checkbox"/> C/ Depósito no Fundo	<input checked="" type="checkbox"/> Areia
<input type="checkbox"/> Matacões	<input type="checkbox"/> Matacões	<input type="checkbox"/> Matacões	<input type="checkbox"/> Grossa
<input type="checkbox"/> Silte	<input type="checkbox"/> Silte	<input type="checkbox"/> Silte	<input type="checkbox"/> Média
<input type="checkbox"/> Argila	<input type="checkbox"/> Argila	<input type="checkbox"/> Argila	<input type="checkbox"/> Fina
CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA			
VERTENTES			
MARGEM ESQUERDA	MARGEM DIREITA	MARGEM DIREITA	MARGEM DIREITA
<input type="checkbox"/> Côncava	<input type="checkbox"/> Côncava	<input type="checkbox"/> Côncava	<input type="checkbox"/> Decividade > 45°
<input type="checkbox"/> Convexa	<input checked="" type="checkbox"/> Convexa	<input type="checkbox"/> Convexa	<input checked="" type="checkbox"/> Decividade < 45°
<input checked="" type="checkbox"/> Aplanada	<input checked="" type="checkbox"/> Aplanada	<input checked="" type="checkbox"/> Aplanada	
FORMA DA CALHA			
CALHA EM FORMA DE V			
<input type="checkbox"/> Simétrico	<input type="checkbox"/> Simétrico	<input checked="" type="checkbox"/> Simétrico	<input type="checkbox"/> Simétrico
<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Assimétrico
<input type="checkbox"/> Intermediário	<input type="checkbox"/> Intermediário	<input type="checkbox"/> Intermediário	
<input type="checkbox"/> Aberto	<input checked="" type="checkbox"/> Aberto	<input 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 Agradação	<input type="checkbox"/> Feições de Agradação	<input type="checkbox"/> Feições de Agradação	<input type="checkbox"/> Feições de Agradação
<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			
<input type="checkbox"/> Retilínea	<input type="checkbox"/> Retilínea	<input type="checkbox"/> Retilínea	<input type="checkbox"/> Retilínea
<input type="checkbox"/> Curva Esquerda	<input checked="" 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 Rio Carmo		MUNICÍPIO Mossoró	UF RN	LOCALIZAÇÃO Km CARTA TRACADO	COORDENADAS 894.884 / 9.425787
FOTOS Nº FAIXA		RESPONSÁVEL PELA VERIFICAÇÃO Ernesto Figueira		DATA 18/01/2007	
CARACTERÍSTICAS DA SEÇÃO DE VAZIO					
FORMA: <input checked="" type="checkbox"/> Espiralada <input type="checkbox"/> Encaixada					
NÍVEL DE CHEIA: NM (última cheia) = 3,00 - 4,00 m					
VELOCIDADE APROXIMADA (m/s): Superior a 1 minuto (fluxo de água parada): Largura: 50 – 80 m Profundidade: 0,50 – 1,00 m					
ATIVIDADES EXTRATIVAS: <input checked="" type="checkbox"/> Areia <input type="checkbox"/> Garimpo <input type="checkbox"/> Outras <input type="checkbox"/> Turva <input type="checkbox"/> Barrenta <input checked="" type="checkbox"/> Potencial <input type="checkbox"/> Seixos <input checked="" type="checkbox"/> Pesca					
OBRAS: <input type="checkbox"/> Emissários <input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input type="checkbox"/> Duto <input checked="" type="checkbox"/> Dique <input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input type="checkbox"/> Duto <input type="checkbox"/> Bueiros			OBRAS PRÓXIMAS: <input type="checkbox"/> Barragem <input type="checkbox"/> Rodovia <input 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"/> Círcica <input checked="" type="checkbox"/> Pastagem					
INFORMAÇÕES REGIONAIS: 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"/> Média	<input type="checkbox"/> Média	<input type="checkbox"/> Fina
<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"/> Simétrico	<input type="checkbox"/> Simétrico
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"/> Simétrico	<input type="checkbox"/> Simétrico
<input type="checkbox"/> Intermediário	<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Intermediário	<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Assimétrico	<input type="checkbox"/> Assimétrico
<input type="checkbox"/> Aberto	<input type="checkbox"/> Aberto	<input checked="" type="checkbox"/> Aberto	<input type="checkbox"/> Aberto	<input type="checkbox"/> Aberto	<input type="checkbox"/> Aberto

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]

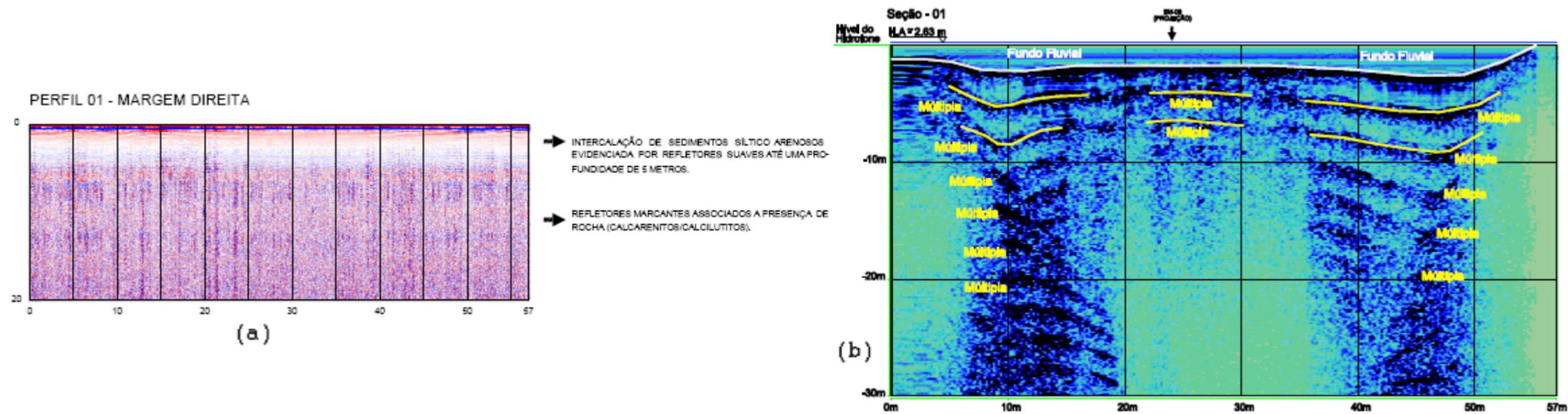


Figura 58: Resultados de (a) GPR e (b) SBP do Rio Mossoró [29]

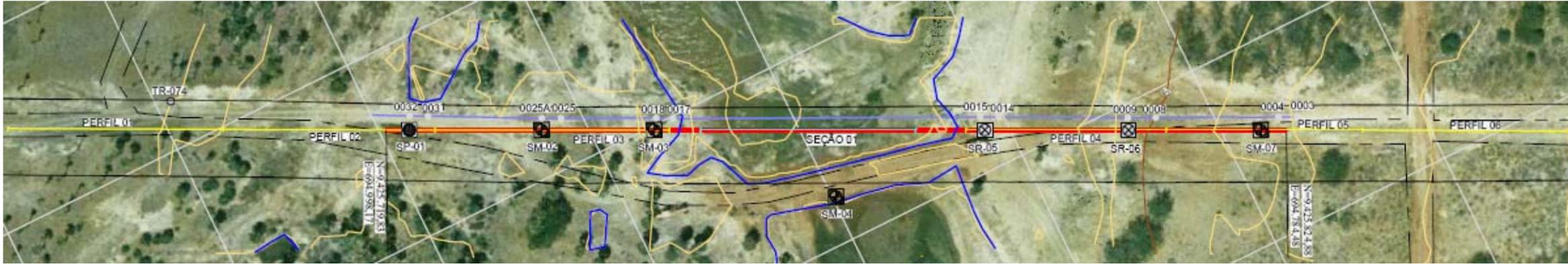


Figura 59: Estudos realizados no rio Carmo [29]

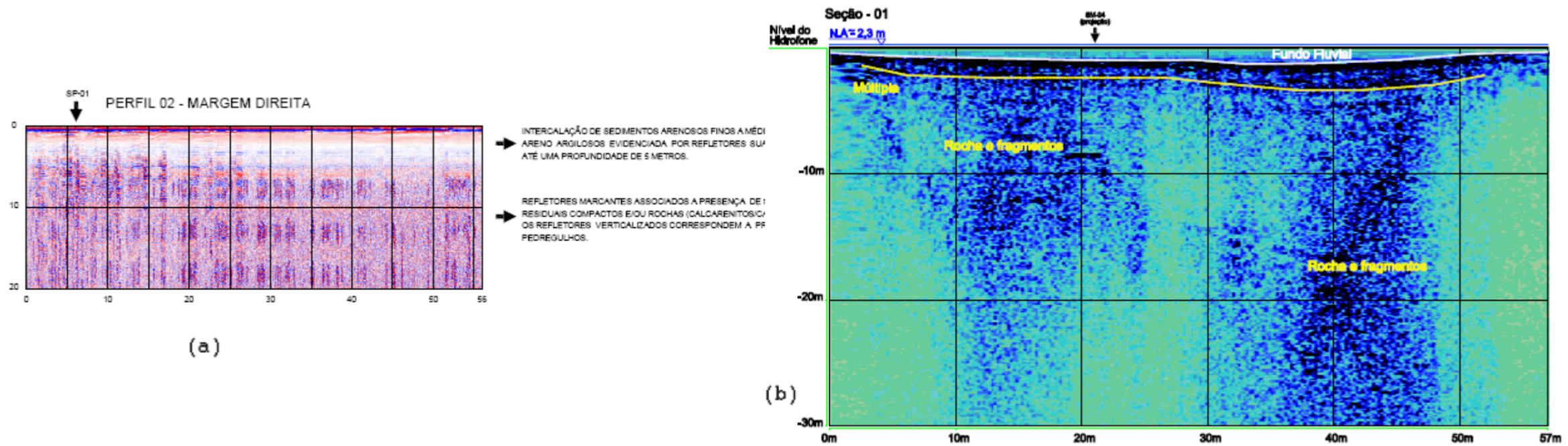


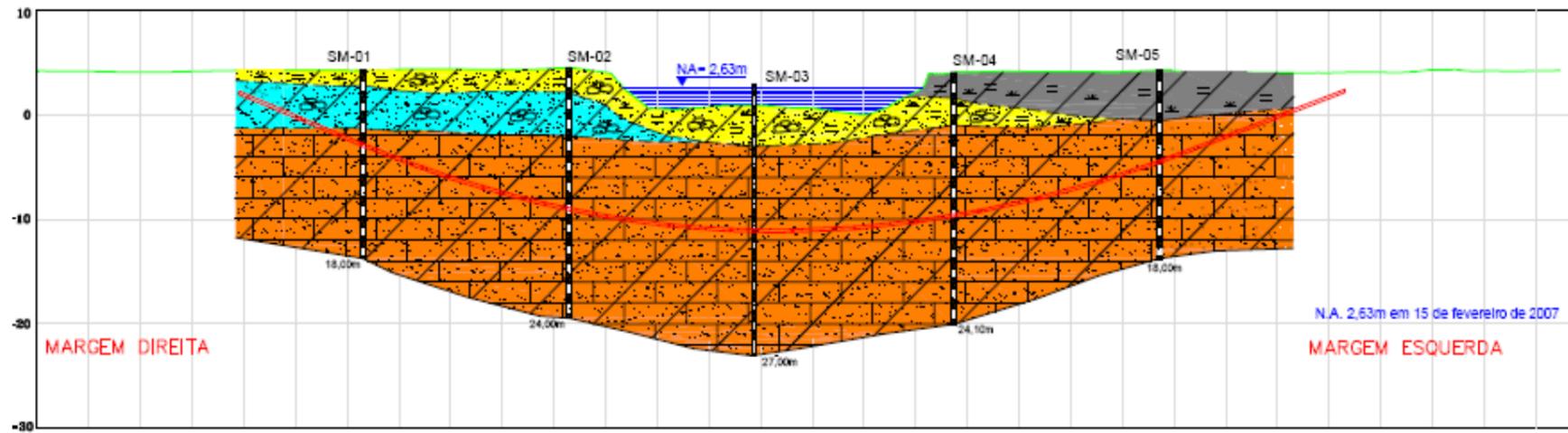
Figura 60: Resultados de (a) GPR e (b) SBP no rio Carmo [29]

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.

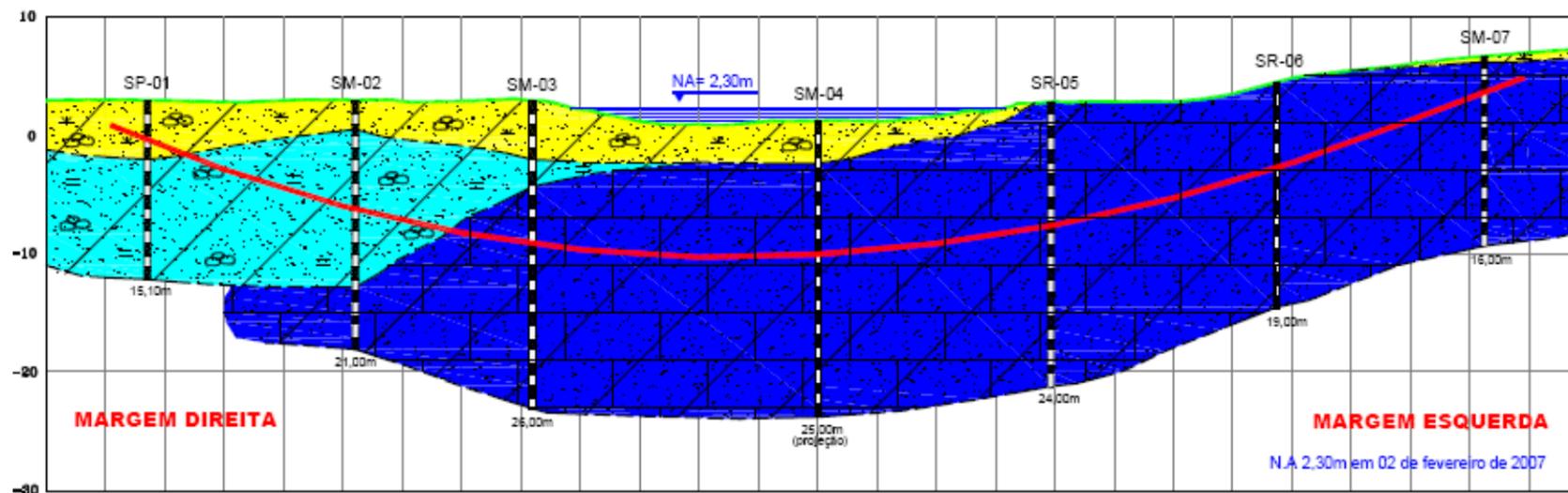
Os dois furos direcionais foram realizados em um mesmo mês. A instalação completa do Rio Carmo, incluindo perfuração piloto, alargamentos e puxamento da tubulação, demorou apenas 8 dias, trabalhando-se com equipes em dois turnos a partir da fase final de alargamento. A perfuração correu sem surpresas, 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 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 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 QUATERNÁRIO	DEPÓSITOS ALUVIONARES E COLUVIONARES
	AREIAS FINAS E MÉDIAS, ARGILOSAS, DE PLASTICIDADE MÉDIA A ALTA, COM PEDREGULHOS, MATÉRIA ORGÂNICA E CONCREÇÕES, FOFAS 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 CRETÁCEO	GRUPO APODI - FORMAÇÃO JANDAIRA
	SEDIMENTOS ARENOSOS FINOS E MÉDIOS, ARGILLO ARENOSOS E SILTOSOS, CALCÍFEROS, DE PLASTICIDADE BAIXA A ALTA, COM PEDREGULHOS, FOFOS A COMPACTOS/DUROS, VARIEGADOS EM TONS DE CINZA E AMARELO (SOLOS RESIDUAIS). APRESENTAM FRAGMENTOS DE VALVAS NOS FUROS 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.