

Camile Urban

**Condicionantes geológicas do processo de bombeamento de lama
e deformação do substrato de ferrovias em rochas sedimentares**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Geologia, curso de
Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da
Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:	Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes
Co-orientadores:	Prof. Dr. Wilson Shoji Iyomasa
	Prof. Dr. Francisco J. F. Ferreira
	Prof. Dr. Alberto Pio Fiori

Curitiba
2007

Urban, Camile

Condicionantes geológicos do processo de bombeamento de lama e deformação do substrato de ferrovias em rochas sedimentares / Camile Urban. – Curitiba, 2007.

ix, 88 f. : il., grafs., tabs.

Orientador: Luiz Alberto Fernandes

Co-orientadores: Wilson Shoji Iyomasa, Francisco J. F. Ferreira, Alberto Pio Fiori.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Inclui Bibliografia.

1. Geologia de engenharia. 2. Ferrovias. 3. Geofísica. I. Fernandes, Luiz Alberto. II. Iyomasa, Wilson Shoji. III. Ferreira, Francisco José Fonseca. IV. Fiori, Alberto Pio. V. Título. VI. Universidade Federal do Paraná.

CDD 624.151

TERMO DE APROVAÇÃO

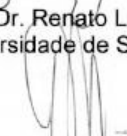
Camile Urban

"CONDICIONANTES GEOLÓGICOS DO PROCESSO DE BOMBEAMENTO DE LAMA E DEFORMAÇÃO DO SUBSTRATO DE FERROVIAS EM ROCHAS SEDIMENTARES".

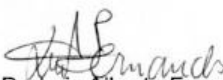
Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:



Prof. Dr. Renato Luiz Prado
Universidade de São Paulo



Prof. Dr. Rodolfo José Angulo
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes
Universidade Federal do Paraná
Presidente

Curitiba, 20 de Abril de 2007.

“A introdução de uma obra ou qualquer forma de uso do solo num determinado ambiente, ainda que garantida com seus próprios fatores de estabilidade e segurança, pode não manter uma relação equilibrada com o meio circundante.”
(Oliveira, Bilar e Formasari Filho, 1995)

Agradecimentos

Agradeço às várias pessoas e instituições que de alguma maneira auxiliaram ou incentivaram o desenvolvimento deste trabalho:

Ao orientador e amigo, professor Dr. Luiz Alberto Fernandes, da UFPR, que incentivou esta pesquisa;

Aos co-orientadores professores Dr. Wilson Shoji Iyomasa, do IPT – SP, Dr. Francisco José Fonseca Ferreira do LPGA – UFPR, e Dr. Alberto Pio Fiori da UFPR;

Ao engenheiro Rudinei A. Barcellos – ALL, que acreditou na pesquisa científica;

Ao senhor Mário Prodo, que me acompanhou nas etapas de campo;

Aos amigos e geólogos Cristiane R. Dutra e José Carlos Branco e ao amigo Daniel Paredes;

Ao técnico de laboratório Adilson Antonio Dellagassa;

Ao geólogo Rodoilton Stevanato, que auxiliou na coleta e interpretação de dados de geofísica;

Ao Laboratório de Estudos Sedimentológicos e Petrologia Sedimentar – LabESed-UFPR;

Ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA;

Ao Laboratório de Laminação Petrográfica – LAMIN-UFPR;

À empresa ALL, financiadora da pesquisa;

À Capes-CNPq, que financiou a bolsa de estudos no início da pesquisa;

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT/SP), que propiciou a pesquisa de dados e interpretação;

À Associação Brasileira de Preservação Ferroviária - ABPF, e ao Sr. Carlos D. C. Augusto, presidente da associação;

Ao museu Ferroviário de Curitiba e ao sr. Abel;

Ao Arquivo da rede – patrimônio e ao sr. Celso;

E finalmente à minha família, alicerce da minha vida, e ao meu marido, incentivador e amigo nas horas mais difíceis!

Resumo

A Estrada Ferroviária Central do Paraná (PR) (EFCP) foi construída sobre as rochas da Bacia do Paraná e seus regolitos, na direção sudeste-noroeste. Em locais onde a ferrovia está assentada sobre argilitos, siltitos e arenitos, manifestam-se problemas geotécnicos de recalque diferencial. A passagem dos trens em locais com água na plataforma provoca o movimento vertical dos trilhos e dormentes que “bombeia” água com partículas finas do substrato rochoso para a camada de lastro. Os espaços vazios desta camada constituída por seixos angulosos e muito bem selecionados são preenchidos pela lama que se solidifica após secagem por evaporação natural. Tal processo enrijece o lastro, dificulta o processo de drenagem e, em especial, sua capacidade elástica, além de causar desnivelamento e propiciar condições de instabilidade da via férrea. O objetivo desta pesquisa foi descrever e compreender as causas geológicas associadas ao desenvolvimento do processo, e propor um método de estudo para ser aplicado em outros locais com recalque da estrutura ferroviária provocado pela retirada do material de sustentação da ferrovia. Foram selecionados cinco trechos com base na identificação de problemas decorrentes de recalques diferenciais, causas geotécnicas e geologia, nos quais se realizaram um mapeamento geológico e a aquisição de dados geofísicos com as técnicas sondagem elétrica vertical (arranjo Schlumberger) e caminhamento elétrico (arranjo dipolo-dipolo). Os dados geoeletricos facilitaram a interpretação do fluxo da água subterrânea dentro do maciço rochoso após comparados com os dados geológicos dos locais estudados. Os resultados indicaram que o “bombeamento” da lama ocorre sobre um sistema de surgência de água subterrânea em camadas permeáveis confinadas por camadas menos permeáveis, ou num sistema de zonas verticais condutoras de maior transmissividade relativa associada que atingem a superfície da plataforma. Como a água permanece estagnada no contato entre o substrato ferroviário e a camada de lastro, acelera o processo de alteração das rochas constituintes da plataforma, produzindo os fragmentos de rocha que constituem a lama, além de se comportar como mecanismo de transporte e retirada dos sedimentos da plataforma, p que provoca um recalque da estrutura ferroviária (dormentes e trilhos). Os resultados indicaram que a administração adequada do fluxo da água subterrânea dentro dos maciços rochosos é a solução mais adequada para minimizar e até extinguir o desenvolvimento do processo nos trechos que apresentam rebaixamento da ferrovia causado pelo afloramento da água subterrânea.

Abstract

The Central do Paraná (PR) railroad (EFCP, in Portuguese) was constructed over Paraná Basin rocks and its regoliths, in southeastern-northeastern general direction. Where the railroad lays over claystones, siltstones and sandstones, geotechnical problems appear, such as differential pressing down. When trains cross sections with water in the platform, the vertical movement of the trails and railway sleepers “pumps” water with fine particles from the bed rock to the ballast layer. The empty spaces of this layer, which is formed by very well selected angular pebbles, are filled with mud that consolidates after drying by natural evaporation. This process hardens the ballast and makes the drying process difficult; especially ballast’s elastic capacity as well makes it uneven and propitiates railroad instability conditions. The aim of this research was describe and understand the geological causes associate to the process development, and propose a study method to be applied in other places with railroad structure pressing down caused by the removed material that supports the railroad. It had been selected five sections with base on the identification of the problems due to differential pressing down and geotechnical and geological causes, in which had been realized geological mapping and acquisition of geophysical data using vertical electrical sounding technique – Schlumberger arrangement and electrical profiling surveys – and dipole-dipole arrangement. The geoelectrical data facilitated the mapping of the underground water flow inside the massifs, after being compared with the geological data of the studied places. The results indicated that the mud “pumping” occurs over an underground water surgency system in permeable layers confined by less permeable layers, or in system of conducted vertical zones with greater associated relative transmissivity, that reach the platform surface. As the water remains stagnant in the contact between the railroad underground and the ballast layer, the alteration process of the platform rocks is accelerated, producing the rock fragments that constitute mud, besides behaving like a mechanism of transportation and retreated of sediments of the platform, which causes railroad structure (railroad sleepers and trails) pressing down. The results indicated that the adequate management of the underground water flow inside the rocks massifs is the most adequate solution to minimize and even extinguish the process development in the sections that presents railroad pressing down caused by underground water exposure (surgency).

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Caracterização do problema.....	2
1.2.1 Conhecimento prévio.....	2
1.2.2 Estrutura da ferrovia.....	3
1.2.2.1 Descrição do processo de retirada do material de sustentação da ferrovia.....	4
1.3 Localização dos trechos pesquisados.....	7
1.4 Contexto geológico regional.....	10
2. Materiais e métodos.....	13
2.1 Fases de trabalho.....	13
2.1.1 Pesquisa bibliográfica.....	13
2.1.2 Coleta de dados.....	13
2.1.3 Processamento dos dados geológicos.....	17
2.1.4 Processamento dos dados geofísicos.....	18
2.1.5 Interpretação dos dados.....	19
2.2 Método eletroresistivimétrico.....	19
2.2.1 Resistividade.....	21
2.2.2 Fundamentos teóricos da resistividade aparente.....	21
2.2.3 Técnicas geoeletricas.....	22
2.2.3.1 Sondagem Elétrica Vertical – SEV.....	22
2.2.3.2 Caminhamento elétrico – CE.....	24
3. Resultados.....	26
3.1 Descrição dos trechos.....	26
3.1.1 Trecho 1.....	26
3.1.2 Trecho 2.....	30
3.1.3 Trecho 3.....	34
3.1.4 Trecho 4.....	38
3.1.5 Trecho 5.....	43
3.2 Processamento dos dados geofísicos.....	47
3.2.1 Sondagem elétrica vertical.....	47
3.2.2 Caminhamento elétrico.....	53
4. Análise e discussão.....	59
4.1 Trechos.....	59
4.1.1 Trecho 1.....	59
4.1.2 Trecho 2.....	63
4.1.3 Trecho 3.....	66
4.1.4 Trecho 4.....	69
4.1.5 Trecho 5.....	72
4.2 Modelos conceituais.....	75
4.2.1 Modelo 1: contato entre estrato altamente permeável e pouco permeável.....	75
4.2.2 Modelo 2: confinamento de camadas permeáveis e compartimentação estrutural.....	77
4.2.3 Modelo 3: confinamento de camadas porosas e permeáveis.....	80
4.3 Recomendações.....	80
4.3.1 Trecho 1.....	81
4.3.2 Trecho 2.....	81
4.3.3 Trecho 3.....	82
4.3.4 Trecho 4.....	82
4.3.5 Trecho 5.....	82
5. Conclusões.....	84
6. Referências bibliográficas.....	86

Lista de ilustrações

Figura 1:	Esquema em perfil perpendicular de uma ferrovia e seus elementos componentes.....	03
Figura 2:	Movimento vertical da grade ferroviária (trilhos + dormentes) em seção longitudinal.....	05
Figura 3:	Esquema em seção perpendicular à ferrovia do mecanismo de bombeamento e retirada do material da constituição da plataforma causado pelo movimento da grade ferroviária na EFCP.....	05
Figura 4:	Mapa de localização da Estrada Ferroviária Central do Paraná (EFCP) (modificado de Mineropar, 2001).....	09
Figura 5:	Mapa geológico da área adjacente à ferrovia com localização dos trechos estudados (modificado de Mineropar, 2005).....	11
Figura 6:	Coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná (modificado de Milani, 1994).....	12
Figura 7:	Posição em planta estacas para coleta de dados geoeletricos nos trechos estudados.....	16
Figura 8:	Esquema da organização de equipamentos para medida de resistividade elétrica.....	20
Figura 9:	Esquema do posicionamento sucessivo dos eletrodos de corrente – AB e de potencial – MN para o arranjo Schlumberger na sondagem elétrica vertical.....	24
Figura 10:	Esquema da disposição sucessiva dos eletrodos para uma medição com o arranjo dipolo-dipolo no caminhamento elétrico.....	25
Figura 11:	Mapa geológico das imediações do trecho 1.....	27
Figura 12:	Seção colunar para o trecho 1.....	28
Figura 13:	Mapa geológico da área adjacente do trecho 2.....	31
Figura 14:	Seção colunar do trecho 2 à esquerda.....	32
Figura 15:	Diagrama Schmidt-Lambert de atitudes de planos de 10 fraturas do trecho 2.....	33
Figura 16:	Mapa geológico das imediações do trecho 3.....	35
Figura 17:	Seção colunar para o trecho 3.....	36
Figura 18:	Diagrama Schmidt-Lambert de atitudes de planos de 14 fraturas do trecho 3.....	37
Figura 19:	Mapa geológico do trecho 4.....	39
Figura 20:	Seção colunar para o trecho 4.....	40
Figura 21:	Diagrama Schmidt-Lambert de atitudes de planos de 14 fraturas do trecho 3.....	41
Figura 22:	Mapa geológico do trecho 5.....	44
Figura 23:	Seção colunar do trecho 5.....	46
Figura 24:	Diagrama Schmidt-Lambert de planos de 10 fraturas do trecho 5.....	46
Figura 25:	Curvas de resistividade campo (preto) e de resistividade de aparente (vermelho) e modelo de profundidade em forma de colunas das SEVs (A – E).....	48-52
Figura 26:	Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos (A – E).....	54-58
Figura 27:	Colunas geoeletricas e interpretação geológica das colunas geoeletricas no trecho 1.....	60
Figura 28:	Correlação da resistividade com as informações litológicas e estruturais*. CET1M e CET1J.....	61
Figura 29:	Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 1.....	62

Figura 30:	Colunas geoeletricas e interpretaçao geologica das colunas no trecho 2.....	63
Figura 31:	Correlaçao da resistividade com as informaço es litol ogicas e estruturais.....	65
Figura 32:	Correlaçao da resistividade com locais de sa ida ou circula çao de a gua no trecho 2.....	66
Figura 33:	Colunas geoeletricas e interpretaçao geologica das colunas geoeletricas no trecho 3.....	67
Figura 34:	Correlaçao da resistividade com as informaço es litol ogicas e estruturais.....	68
Figura 35:	Correlaçao da resistividade com locais de sa ida ou circula çao de a gua no trecho 2.....	69
Figura 36:	Colunas geoeletricas e interpretaçao geologica das colunas geoeletricas no trecho 4.....	70
Figura 37:	Correlaçao da resistividade com as informaço es litol ogicas e estruturais.....	71
Figura 38:	Correlaçao da resistividade com locais de sa ida ou circula çao de a gua no trecho 2.....	72
Figura 39:	Colunas geoeletricas e interpretaçao geologica das colunas geoeletricas no trecho 5.....	73
Figura 40:	Correlaçao da resistividade com as informaço es litol ogicas e estruturais.....	74
Figura 41:	Correlaçao da resistividade com locais de sa ida ou circula çao de a gua no trecho 2.....	75
Figura 42:	Modelos de circula çao da a gua em estratos altamente permeaveis barrados por litotipos muito pouco permeaveis ou impermeaveis.....	76
Figura 43:	Modelo de circula çao de a gua por meio de camadas permeaveis confinadas por camadas pouco permeaveis, seccionadas por estruturas verticais que compartimentam estruturalmente o maciço e servem de condutos da a gua. Perfil paralelo a ferrovia, trecho 2.....	77
Figura 44:	Modelo de circula çao de a gua por meio de camadas permeaveis confinadas por camadas pouco permeaveis seccionadas por fraturas abertas que servem de condutos preferenciais da a gua. Caso tipico no trecho 3.....	78
Figura 45:	Modelo de circula çao de a gua por meio de camadas permeaveis confinadas por camadas pouco permeaveis, seccionadas por estruturas verticais condutoras.....	79
Figura 46:	Modelo de circula çao de a gua por meio de camadas permeaveis confinadas por camadas pouco permeaveis.....	80

Lista de fotos

Foto 01:	Trecho ferroviário desnivelado devido à remoção da fração pelítica do material de sustentação da superestrutura para o lastro (local: trecho 4).....	06
Foto 02:	Primeiros respingos de lama sobre a camada de lastro.....	08
Foto 03:	Área de aproximadamente 1m ² afetado pelo processo.....	08
Foto 04:	Área maior com lama na camada de lastro devido ao desenvolvimento do processo.....	08
Foto 05:	Estrutura de extrusão de lama em forma de vulcão sobre a via férrea.....	08
Foto 06:	Estrutura de extrusão de lama em forma de vulcão na lateral da via férrea.....	08

Foto 07:	Extravasamento de lama para a lateral da via férrea.....	08
Foto 08:	Equipamentos utilizados para a coleta de resistividade aparente: à esquerda o aparelho receptor VR250 que mede a resistividade aparente, à direita o aparelho transmissor VT250 que injeta corrente alternada no substrato.....	17
Foto 09:	Siltito em contato erosivo no topo com o arenito. Trecho 1, talude NW	28
Foto 10:	Gabro que constitui o dique no trecho 1. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.....	29
Foto 11:	Detalhe da falha observada no talude do trecho 1, de atitude N50E/71SE.....	30
Foto 12:	Imagem do siltito no talude SE – montante, onde se verifica escoamento superficial constante de água.....	30
Foto 13:	Perfil da infraestrutura no trecho 2. Observa-se que não há material selecionado nem sublastro.....	33
Foto 14:	Arenito muito fino do trecho 3. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.....	34
Foto 15:	Dobra com atitude do eixo N286/05 observada no talude sudoeste do trecho 3.....	37
Foto 16:	Arenito muito fino do trecho 4. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.....	38
Foto 17:	Contato do dique de basalto com as rochas sedimentares encaixantes no trecho 4.....	41
Foto 18:	Zona de cisalhamento observada em planta do trecho 4. Fr1-N20W/90 e Fr2-N10E/50SW.....	42
Foto 19:	Exudação localizada de água no talude a montante (SW), no trecho 4.	42
Foto 20:	Siltitos com estratificação plano paralela no trecho 5.....	45
Foto 21:	Arenito muito fino do trecho 5. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.....	45

Lista de tabelas

Tabela 01:	Classificação dos graus de alteração proposto pelo IPT (1984).....	14
Tabela 02:	Classificação dos graus de coerência proposta por Guidicini <i>et al.</i> (1972, <i>apud</i> Serra Junior e Ojima, 1998).....	15
Tabela 03:	Resistividade de alguns materiais e litotipos. Fonte: Telford <i>et al.</i> (1990).....	16
Tabela 04:	Abertura em metros dos eletrodos de eletricidade AB e potencial MN para a sondagem elétrica vertical.....	23

1. Introdução

A Estrada Ferroviária Central do Paraná (EFCP) foi construída sobre as rochas da Bacia do Paraná e seus regolitos. Em alguns trechos da ferrovia ocorrem recalques diferenciais devido à remoção de material pelítico constituinte da plataforma para a estrutura ferroviária.

O processo desenvolve-se devido à associação de alguns fatores observados em campo:

- onde a plataforma é constituída por rocha sedimentar pelítico-psamítica;
- onde há água permanente oriunda de surgências naturais subterrâneas ou de elevação do nível freático após chuvas;
- onde há deficiência na drenagem plataforma;
- e devido ao movimento da grade ferroviária provocado pela passagem dos trens.

A oscilação vertical repetida associada à presença de água gera o “bombeamento hidráulico” de sedimentos da plataforma para o interior da camada de lastro. A retirada de parte do material de sustentação da ferrovia causa desnivelamentos por recalques diferenciais e enrijece a superestrutura, propiciando desgaste excessivo e irregular dos trilhos, assim como do rodado dos trens, manutenção freqüente dos trechos problemáticos, restrição de velocidade e de cargas das composições, podendo assim provocar descarrilamentos graves.

1.1 Objetivos

O objetivo principal da pesquisa foi descrever e compreender as causas geológicas associadas ao desenvolvimento do processo de recalque da ferrovia em cinco trechos para subsidiar medidas de mitigação do problema.

Também visou estabelecer um método de estudo para aplicação em outros locais com recalque da estrutura ferroviária provocado pela retirada do material de sustentação da ferrovia.

1.2 Caracterização do problema

1.2.1 Conhecimento prévio

O processo chamado de “bombeamento de finos” foi relatado pela primeira vez na literatura por Carlstron Filho & Salomão (1976) em trechos ferroviários no Rio Grande do Sul construídos sobre siltitos, argilitos e camadas de carvão da Formação Rio Bonito da Bacia do Paraná. Os autores sugeriram que o fenômeno desenvolveria-se devido à combinação de três fatores: constituição argilo-siltosa da plataforma, saturação da plataforma pela posição do nível freático alto, e devido à pressão exercida pela passagem dos vagões, que romperia o subleito, desagregando-o e formando lama sugada para o lastro altamente permeável.

No trecho ferroviário General Luz (RS) – Ponta Grossa (PR), Miotto & Carlstron Filho (1976) sugeriram que a saturação da plataforma também poderia ocorrer devido à drenagem ineficiente de água superficial. A água seria represada em valetas interrompidas por material desagregado de taludes constituídos por diamictitos do Grupo Itararé da Bacia do Paraná.

Na EFOP o problema é recorrente pelo menos desde o ano 1978, quando foi registrado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT, 1978). No trecho entre as estações Uvaranas e Ipiranga foi caracterizada a “extrusão do material do subleito” com maior intensidade, e conseqüentes recalques mais acentuados da superestrutura.

Segundo o IPT (1978) a água causadora do processo surgiria no subleito devido à tendência do nível freático de se equilibrar com a nova superfície criada após a abertura dos taludes para a construção da ferrovia. Também ressaltou que a ausência de drenagens profundas e a falta ou má conservação de sistema de drenagem superficial acentuariam o desenvolvimento do processo.

1.2.2 Estrutura da ferrovia

Neste capítulo será descrita a estrutura de uma ferrovia para compreender a organização dos componentes e as características recomendadas para os materiais que a compõem.

A ferrovia é um conjunto composto por infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura compreende a plataforma ou leito, que é a superfície de terraplenagem, e todas as instalações abaixo da plataforma, como sistemas de drenagem e obras de contenção de talude (figura 1).

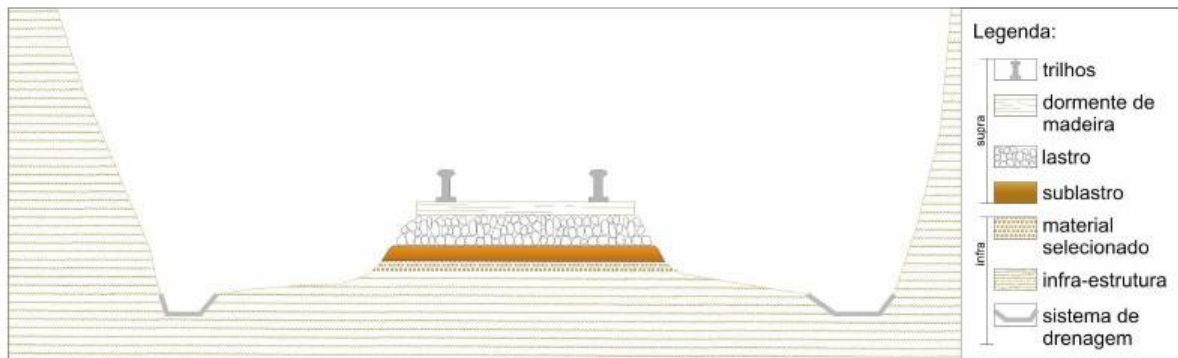


Figura 1: Esquema em perfil perpendicular de uma ferrovia e seus elementos componentes.

A plataforma pode ser construída em solo residual, aterro ou corte em rocha sã, desde que os materiais apresentem capacidade de suporte adequado aos esforços produzidos pela superestrutura (Stopatto, 1987). Na ausência dessa característica, é necessário implantar uma camada de “material selecionado” (figura 1) com resistência à pressão vertical causada pelo trânsito dos trens. Sua função é a de evitar deformações no traçado da linha e conseqüente acumulação de água na plataforma.

Sobre a infraestrutura assenta-se a superestrutura ou via permanente constituída pelo sublastro, lastro, dormentes e trilhos (figura 1).

O sublastro é uma camada de material que aumenta a capacidade de suporte da plataforma e permite relativa elasticidade da via. Também evita a penetração do lastro e aumenta a resistência da plataforma à erosão e à infiltração da água (Brina, 1979).

O lastro é constituído por seixos angulosos e muito bem selecionados. Pode ser material rochoso ou artificial e é resistente à pressão dos dormentes quando há movimentação de trens. Dormentes e trilhos formam a grade

ferroviária que oscila de forma tênue no sentido vertical quando há circulação das composições. Este movimento requer um lastro com capacidade elástica que distribua de forma uniforme os esforços produzidos pela passagem dos trens e que permita a drenagem efetiva da superestrutura.

1.2.2.1 Descrição do processo de retirada do material de sustentação da ferrovia

Esta descrição tem por fundamento observações feitas em campo no momento da passagem de trens sobre um local que apresentava o problema de lastro colmatado intensamente desenvolvido.

A interação do trem com o maciço rochoso no qual é implantada a ferrovia é muito acentuada (Stopatto, 1987). A frequência da circulação de trens influencia no desenvolvimento do processo de colmatção do lastro pelas vibrações transmitidas ao maciço rochoso. No momento da passagem cada eixo das composições causa o movimento da grade ferroviária para baixo com pressão determinada pelo peso das locomotivas ou vagões (figura 2A – 1). O alívio da pressão após a passagem do eixo faz com que a grade tenda a retornar na posição horizontal inicial (figura 2B – 2). Esse movimento se repete com a passagem dos eixos dos vagões posteriores (figura 2B – 3).

Quando associado a trechos com água na plataforma (figura 3A), esse movimento atua como o de um êmbolo num sistema de bomba de sucção (figura 3B). Nos locais em que o substrato é rocha sedimentar pelítica ou seu regolito e não há sublastro e nem “material selecionado”, ou existe uma camada de material com baixa capacidade de drenagem e má compactada, a atuação constante da água acelera o processo de alteração do substrato rochoso ou desagrega a camada mal compactada, e fornece sedimentos que constituem a lama pelítica em contato direto com os seixos que compõem a camada de lastro (figura 3C).

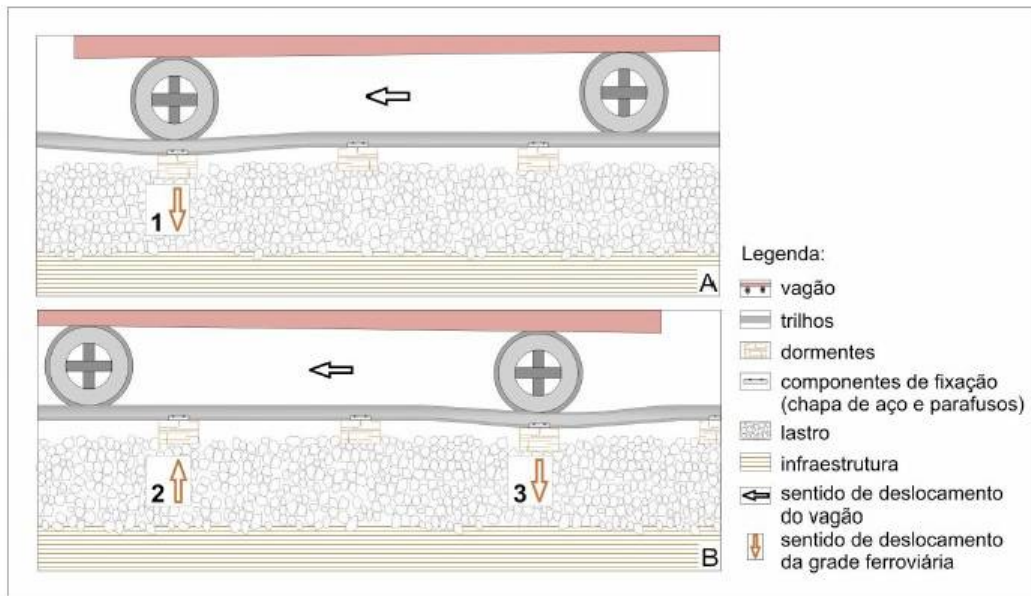


Figura 2: Movimento vertical da grade ferroviária (trilhos + dormentes) em seção longitudinal. A1: Movimento descendente da grade devido à passagem do eixo anterior da locomotiva ou vagão de trem; B2: Alívio da pressão após a passagem do eixo e horizontalização da grade ferroviária; B3 Repetição do movimento descendente provocado pela passagem do eixo posterior da locomotiva ou vagão de trem.

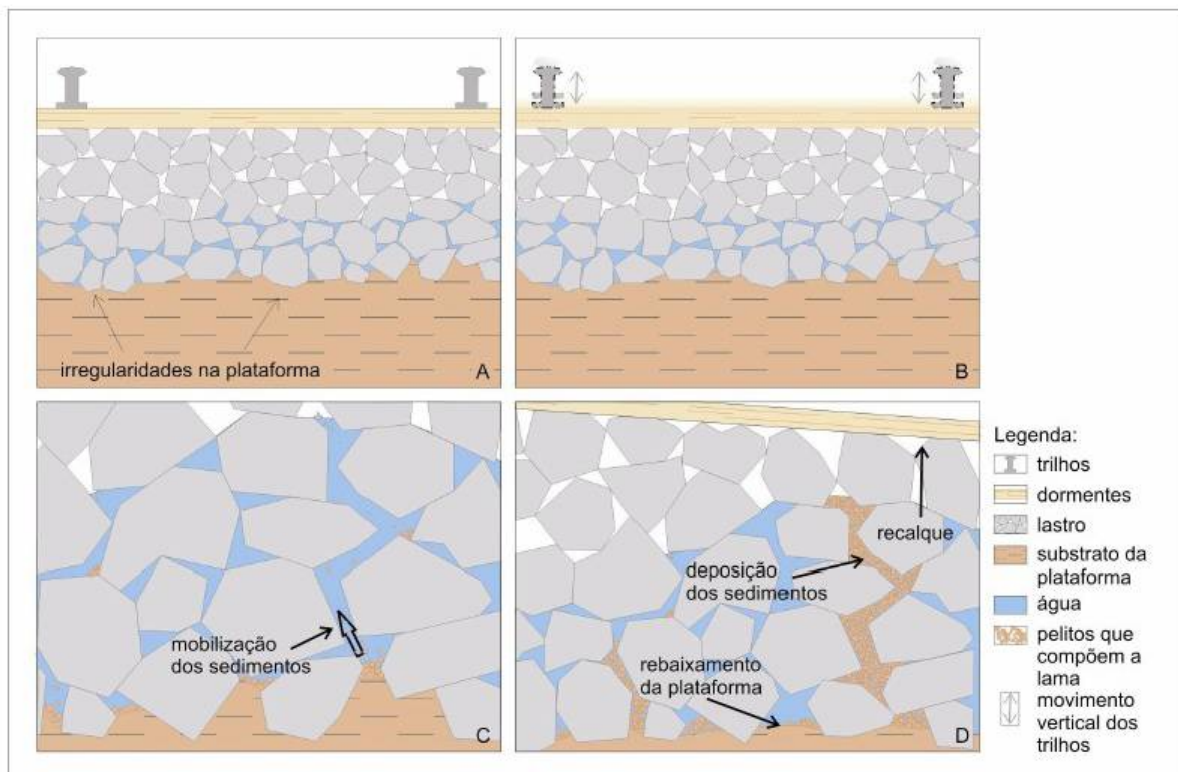


Figura 3: Esquema em seção perpendicular à ferrovia do mecanismo de bombeamento e retirada do material da constituição da plataforma causado pelo movimento da grade ferroviária na EFCP. A: Plataforma com água na superfície; B: Movimento vertical da grade ferroviária causadora da sucção da água; C: Detalhe do transporte do material pelítico para o lastro; D: Consolidação do lastro por sedimentos finos após secagem da lama e recalque da superestrutura por acomodação do lastro.

A circulação da água remove as partículas sedimentares desagregadas para a camada de lastro (figura 3C), que preenchem os espaços vazios (poros) entre os seixos (figura 3D). Após secagem por evaporação natural o lastro torna-se consolidado pelos sedimentos finos o que reduz a elasticidade da superestrutura devido ao enrijecimento.

A retirada de parte do material que constitui a plataforma produz um rebaixamento localizado do lastro, dormentes e trilhos por acomodação dos seixos do lastro (figura 3D no topo a direita). O principal problema gerado pelo processo é o desnivelamento de um local da via férrea por recalque diferencial (foto 1) o que propicia a instabilidade da ferrovia. Há então um desgaste excessivo e irregular de trilhos, dormentes, componentes de fixação e rodado dos trens. Esses problemas ocasionam prejuízos devido à necessidade de freqüentes nivelamentos e reparos da ferrovia, determinam restrição de velocidade nos trechos problemáticos, assim como de cargas dos vagões.

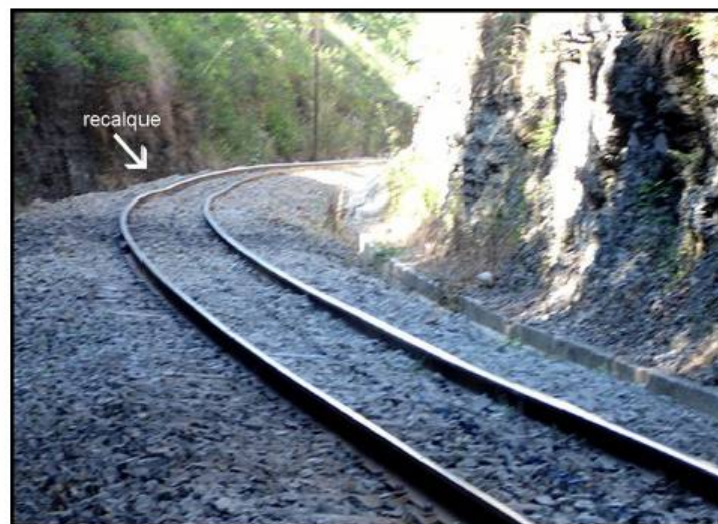


Foto 1: Trecho ferroviário desnivelado devido à remoção da fração pelítica do material de sustentação da superestrutura para o lastro (local: trecho 4).

O processo de cimentação do lastro foi caracterizado por etapas de desenvolvimento. É mais facilmente constatado na via férrea quando surgem os primeiros respingos de lama na superfície da camada de lastro (foto 2), momento em que naquele ponto os espaços entre os seixos estão parcialmente colmatados por sedimentos, como mostra a figura 3D; a continuidade do processo gera uma área cada vez maior com lama no lastro (fotos 3 e 4), formação de estruturas com extrusão de lama na forma de vulcões sobre a

superestrutura e em áreas contíguas (fotos 5 e 6), que culmina com extravasamento da lama para a lateral da via (foto 7).

1.3 Localização dos trechos pesquisados

A ferrovia na qual se encontram os trechos de estudo localiza-se na região centro-leste do estado do Paraná, com marco inicial em Ponta Grossa – km 266 – na estação Uvaranas, e marco final em Apucarana – km 506 – na Estação Jardim América (figura 4). Atualmente a sua administração é feita pela América Latina Logística (ALL) sob forma de concessão, empresa interessada e financiadora desta pesquisa.

Para a caracterização geológico-geotécnica foram selecionados cinco trechos da ferrovia (figura 4). Os locais de estudo são designados pela quilometragem da posição central, utilizada como referência para a localização e registro de levantamento de dados. Nos capítulos seguintes serão assim designados:

- km 353,7 → *trecho 1*, a sudeste da estação Lustosa, município de Ipiranga;
- km 379,9 → *trecho 2*, a noroeste da estação Campinas Belas, município de Reserva;
- km 399,1 → *trecho 3*, a sul da estação Reserva, município de Reserva;
- km 474,25 → *trecho 4*, entre as estações Ortigueira e Bairro dos França, no município de Ortigueira; e
- km 488,3 → *trecho 5*, a norte da estação Bairro dos França, município de Ortigueira.



Foto 2: Primeiros respingos de lama sobre a camada de lastro; Foto 3: Área de aproximadamente 1m² afetado pelo processo; Foto 4: Área maior com lama na camada de lastro devido ao desenvolvimento do processo; Fotos 5: estrutura de extrusão de lama em forma de vulcão sobre a via férrea; Fotos 6: estrutura de extrusão de lama em forma de vulcão na lateral da via férrea; Foto 7: extravasamento de lama para a lateral da via férrea.

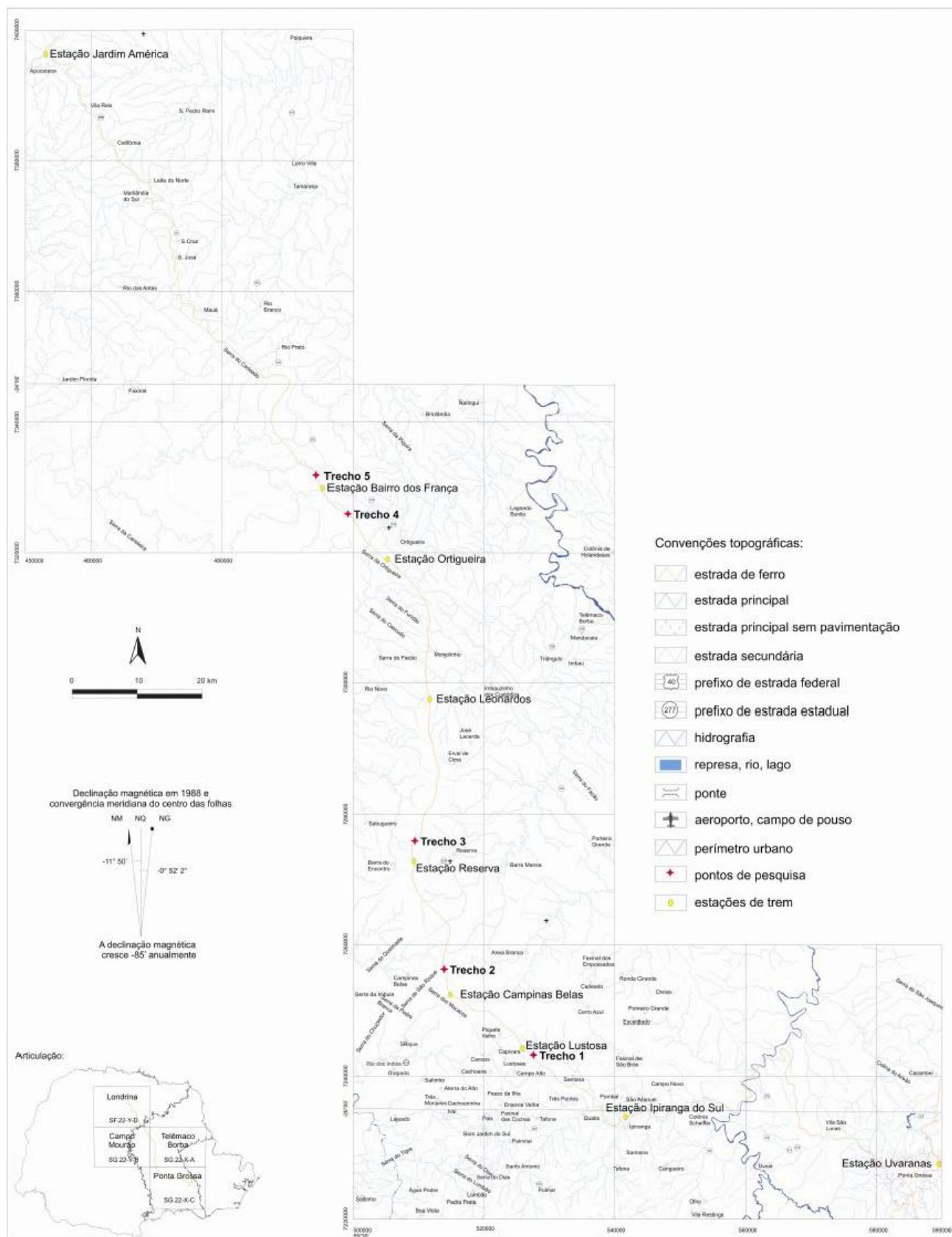


Figura 4: Mapa de localização da Estrada Ferroviária Central do Paraná (EFCP) (modificado de Mineropar, 2001).

1.4 Contexto geológico regional

A ferrovia pesquisada foi construída sobre as rochas da Bacia do Paraná e seus regolitos na direção geral sudeste – noroeste (figura 5).

A Bacia do Paraná é uma bacia sedimentar do tipo intracratônica com área aproximada de 1.500.000 km². Abrange o sul do Brasil, oeste do Paraguai, nordeste da Argentina e norte do Uruguai.

O registro estratigráfico teve início no Ordoviciano, representado por grandes ciclos transgressivos, que se desenvolveram para depósitos sedimentares continentais com rochas ígneas associadas no Cretáceo (Milani, 1997).

A litoestratigrafia da Bacia do Paraná (figura 6) constitui-se, da base para o topo, pelo Basalto Três Lagoas, Grupos Rio Ivaí, Paraná, Itararé, Guatá, Passa Dois, Formações Pirambóia, Rosário do Sul, Botucatu e Serra Geral. Neste capítulo serão descritas as unidades que constituem o substrato rochoso dos trechos ferroviários estudados: Grupos Itararé e Passa Dois e Fm. Serra Geral.

O Grupo Itararé depositou-se principalmente sob influência glacial e constitui-se essencialmente por diamictitos intercalados a arenitos (Milani & Ramos, 1998). Subdivide-se nas Formações Lagoa Azul, Campo Mourão e Taciba na parte sul e Aquidauana na parte norte da bacia (Milani *et al.*, 1994). A Formação Lagoa Azul, basal, é formada por arenitos sobrepostos por folhelhos e diamictitos; a Formação Campo Mourão, intermediária, constitui-se por arenitos com diamictitos na porção média; e a Formação Taciba, de topo, é composta por folhelhos com intercalações de arenitos na parte sul da bacia, e diamictitos nas porções central e norte (França & Potter, 1988).

O Grupo Passa Dois corresponde a uma seção regressiva composta na base por folhelhos e siltitos (Milani & Ramos, 1998). Subdividem-se, da base para o topo, em Formação Irati, composta por folhelhos, folhelhos pirobetuminosos, arenitos, margas, carbonatos e anidritas; Formação Serra Alta, que compreende argilitos, folhelhos e siltitos; Formação Teresina, abrangendo argilitos, folhelhos com siltitos e arenitos muito finos, com calcários e coquinas no topo; e pela Formação Rio do Rasto composta por arenitos, siltitos e camadas finas de argilitos e siltitos.

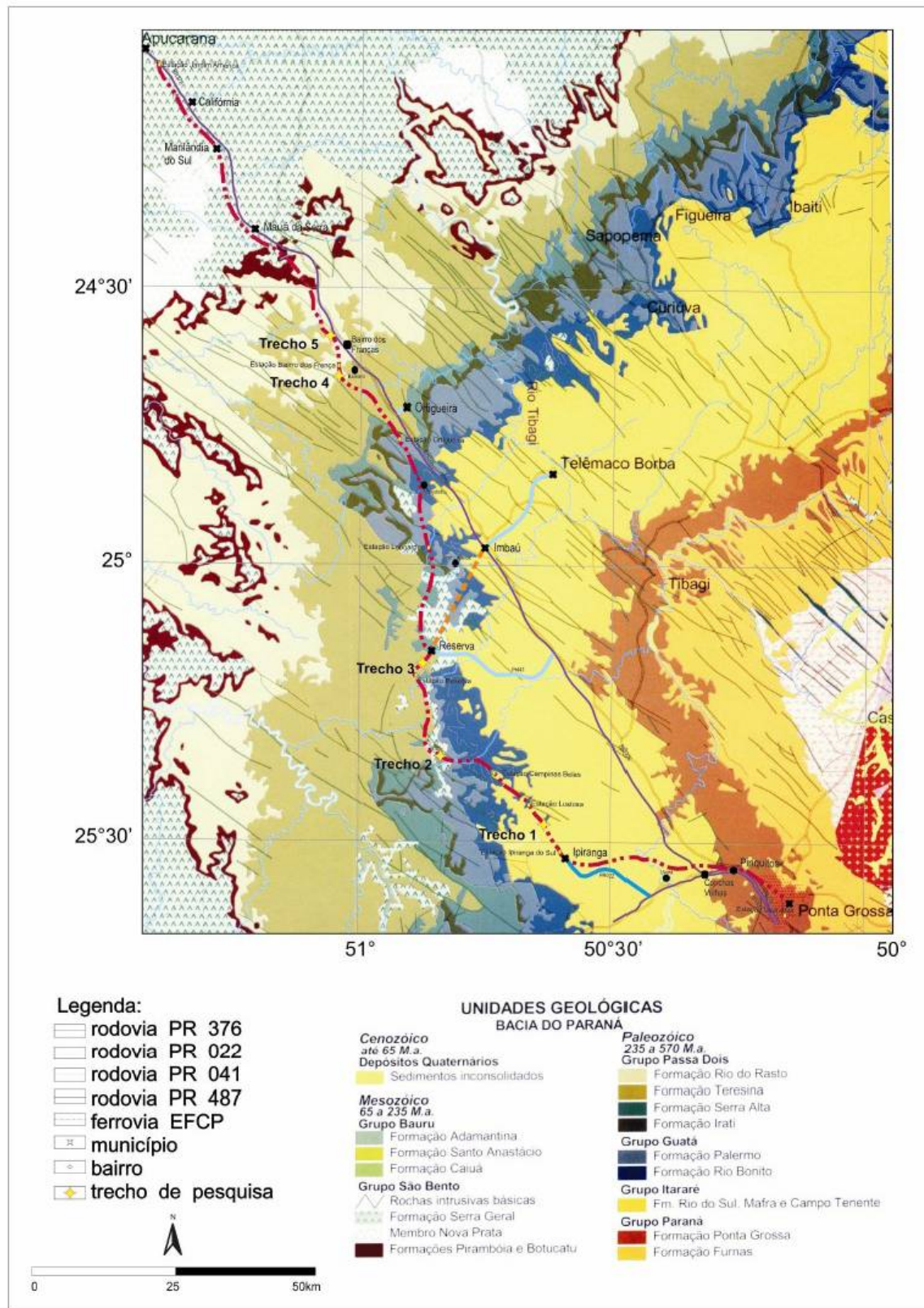


Figura 5: Mapa geológico da área adjacente à ferrovia com localização dos trechos estudados (modificado de Mineropar, 2005).

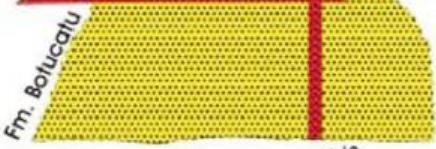
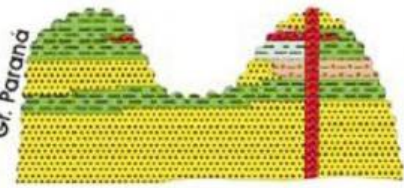
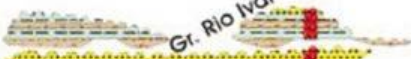
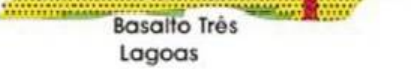
Geocronologia	litoestratigrafia		evolução tectônica	ambiente deposicional
Período	litologia			
	NW	SE		
Cretáceo			rifte	vulcanismo plutonismo
Jurássico			intumescência	eólico
Triássico				flúvio-lacustre/ eólico
Permiano			sinéclise	flúvio-lacustre/marés
				nerítico
				nerítico
				deltáico
Carbonífero			orogenia eoherciniana	continental transicional
Mississippiano				
Devoniano			margem passiva proto - pacífico	marinho
				fluvial a nerítico
Siluriano				marinho
Ordoviciano				glacial
Camb.			rifte	continental a nerítico
Pré-C.				

Figura 6: Coluna litoestratigráfica da Bacia do Paraná (modificado de Milani, 1994)

A Formação Serra Geral corresponde a derrames e diques basálticos relacionados à fase distensional da Bacia do Paraná e ao desenvolvimento do Arco de Ponta Grossa com direção geral NW – SE (Zalán *et al.*, 1990).

2. Materiais e métodos

Para caracterizar os condicionantes geológico-geotécnicos de cada local selecionado da ferrovia nesta pesquisa técnico-científica efetuou-se um mapeamento geológico de detalhe nos taludes e plataformas dos cinco trechos.

Para compreender o fluxo subterrâneo da água, a distribuição litológica e as estruturas geológicas em subsuperfície e no interior do maciço rochoso optou-se pela utilização do método eletroresistivimétrico. Esse método auxiliou na identificação e localização de zonas de comportamento geotécnico distinto, determinadas pelas diferenças de constituição do substrato geológico.

Neste capítulo são descritas as fases de trabalho realizadas e os métodos utilizados no estudo.

2.1 Fases de trabalho

2.1.1 Pesquisa bibliográfica

A etapa de levantamento de informações bibliográficas consistiu na aquisição de fotografias aéreas da ferrovia e seu entorno em faixa de 10 km de largura na escala 1:25.000 (ITC, 1980); mapas topográficos na escala 1:50.000 (ALL, 2003) e 1:10.000 (Comissão da EFCP, 1973); além de mapas geológicos na escala 1:650.000 (Mineropar, 2001), 1:250.000 (Mineropar, 2005) e 1:100.000 (RFFSA, 1985).

Também foi realizada pesquisa em artigos sobre o processo de movimentação de sedimentos do substrato ferroviário para a camada de lastro, na literatura da geologia da Bacia do Paraná da área de interesse aos estudos, nos métodos de geofísica elétrica e bases teóricas, entre outros assuntos pertinentes ao tema de pesquisa.

2.1.2 Coleta de dados

A coleta de dados de campo foi dividida em três etapas: uma inspeção técnica à ferrovia para reconhecimento geral do problema de “bombeamento”

de finos, e uma vistoria posterior de dois dias, na qual foram selecionados cinco trechos para desenvolver a pesquisa. A escolha dos locais de estudo fundamentou-se na gravidade da estabilidade no tráfego de trens e na identificação de problemas decorrentes de recalques diferenciais, causas geotécnicas, geologia (litotipos e estruturas), qualidade da exposição dos litotipos e acesso aos trechos. A terceira etapa consistiu na coleta de dados geológicos por meio de levantamento de campo e na aquisição dos dados geofísicos pelos ensaios realizados nos locais escolhidos.

Em campo efetuou-se a descrição dos litotipos, a identificação das estruturas geológicas, a classificação das rochas de acordo com o grau de alteração proposto pelo IPT (1984) apresentada na Tabela 1, e classificação das rochas segundo a coerência definida por Guidicini *et al.* (1972, *apud* Serra Junior e Ojima, 1998) conforme apresentada na Tabela 2. As seções colunares foram elaboradas em papel milimetrado, coletaram-se as atitudes de estruturas tectônicas e sedimentares, e amostras representativas dos litotipos, realizou-se a descrição do estado de mobilização de sedimentos finos da plataforma para o interior da camada de lastro, descreveu-se o estado das obras de drenagem, bem como a existência de surgências de água nos taludes ou plataforma ferroviária.

Tabela 1: Classificação dos graus de alteração proposto pelo IPT (1984)

SIGLA	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração ou com alteração física e química incipientes, neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha pe bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Tabela 2: Classificação dos graus de coerência proposta por Guidicini *et al.* (1972, *apud* Serra Junior e Ojima, 1998).

SIGLA	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
C1	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Rocha medianamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
C3	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo. Produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
C4	Rocha incoerente	Quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço, friável e escavável com lâmina.

Nesta etapa dos trabalhos também foram posicionadas as estacas e realizadas as medições de resistividade aparente do substrato rochoso. Foram feitas duas linhas paralelas para aquisição de informações geelétricas da sondagem elétrica vertical e do caminhamento elétrico em cada local pesquisado, uma de cada lado da ferrovia no topo dos taludes, com distância de 50m em média do eixo central da ferrovia (figura 7). As estacas foram posicionadas com espaçamento de 20m, por uma distância total de 400m, considerando o centro (posição em 200m), local onde foi realizada a sondagem elétrica vertical (figura 7). O estabelecimento de linhas paralelas visou o mapeamento de estruturas perpendiculares à ferrovia pela técnica do caminhamento elétrico.

A coleta de resistividade aparente foi feita com os aparelhos receptor VR250 e transmissor VT250 (foto 8), cabos elétricos e eletrodos de metal, equipamentos do Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Paraná (LPGA/UFPR). Para estabelecer o contato galvânico entre os eletrodos e o solo foi utilizada uma solução eletrolítica composta de 2 litros de água e 250g de NaCl.

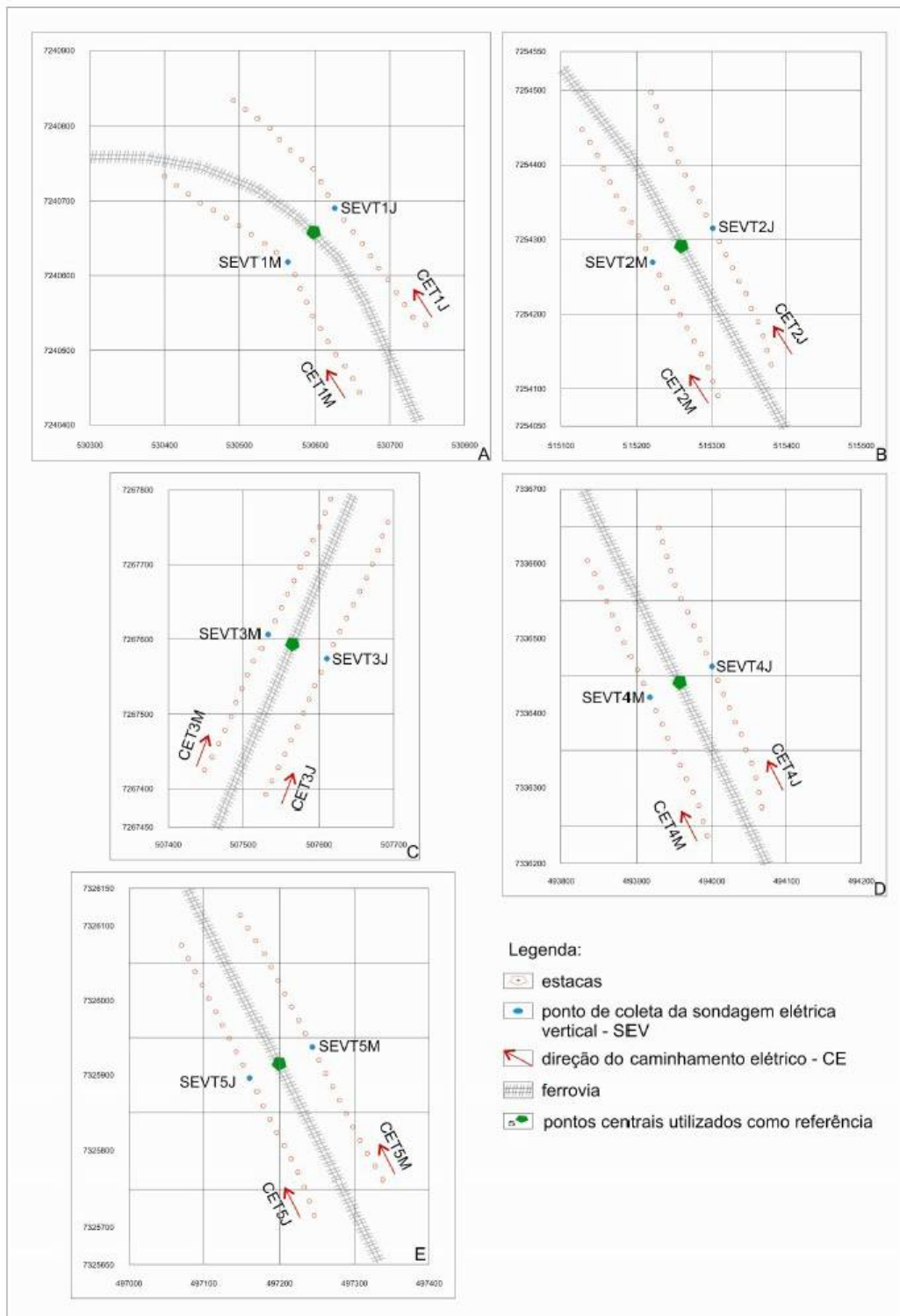


Figura 7: Posição em planta estacas para coleta de dados geoeletricos nos trechos estudados. SEV: sondagem elétrica vertical, CE: caminhamento elétrico, M: montante, J: jusante. A: Trecho 1; B: Trecho 2; C: Trecho 3; D: Trecho 4; E: Trecho 5.



Foto 8: Equipamentos utilizados para a coleta de resistividade aparente: à esquerda o aparelho receptor VR250 que mede a resistividade aparente, à direita o aparelho transmissor VT250 que injeta corrente alternada no substrato.

2.1.3 Processamento dos dados geológicos

O processamento das informações geológicas gerou colunas estratigráficas além de mapas geológicos das imediações de cada trecho na escala 1:2.500. Os mapas foram confeccionados a partir de interpretação das informações geológicas e fotografias aéreas na escala 1:25.000 (ITC, 1980), e desenhados sobre mapas topográficos na escala 1:10.000 (Comissão da EFCP, 1973) exibindo curvas de nível com eqüidistância de 1m. Colunas estratigráficas e mapas geológicos foram posteriormente digitalizados com programa de computador *Corel DRAW 12®* (*Microsoft® Visual Basic® for Applications – VBA*, 2004).

As medidas de estruturas tectônicas (falhas e fraturas) foram organizadas em planilhas no programa *Microsoft Office Excell* (*Windows XP*, 2003) e processadas com uso do programa *Stereonet 3.2*, que gerou diagramas circulares de distribuição daqueles dados.

Ilustrações foram desenhadas no programa *Corel DRAW 12®* (*Microsoft® Visual Basic® for Applications – VBA*, 2004) e as fotografias editadas no programa *Photoshop CS2* (*Adobe® Photoshop® CS2*, 2005).

2.1.4 Processamento dos dados geofísicos

Colunas e seções de resistividade aparente do substrato do maciço rochoso foram obtidas com uso dos programas de computador *IPI2Win* e *Zonze 2D for Interactive™ IP* (Geosoft/ Interpex) respectivamente no LPGA/UFPR e rediagramados com o programa de computador *Corel DRAW 12®* (*Microsoft® Visual Basic® for Applications – VBA*, 2004).

Para o processamento dos dados de resistividade aparente medidos com a técnica da sondagem elétrica vertical utilizou-se o programa de computador que faz a inversão de dados de eletroresistividade: *IPI2Win* (Geosoft/ Oasis Montaj™) no Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR). O programa ajusta de modo automático os dados de campo a partir de um modelo teórico, e gera um gráfico bilogarítmico de profundidade em metros ($AB/2$) no eixo das abscissas x resistividade (Ohm.m) no eixo das ordenadas. Foram melhorados visualmente do programa *Corel DRAW 12®* (*Microsoft® Visual Basic® for Applications – VBA*, 2004).

O modelo escolhido foi o de camadas tabulares horizontais porque afloram nas subsuperfícies dos pontos de coleta das SEVs rochas sedimentares com estratificação horizontal.

As informações de resistividade aparente obtidas pela técnica dipolo-dipolo de caminhamento elétrico foram primeiro apresentadas em pseudoseções. Elas permitem observar a distribuição espacial dos valores medidos da resistividade aparente.

Em seguida efetuou-se a inversão dos dados com o programa de computador *Zonze 2D for Interactive™ IP* (Geosoft/ Interpex) no Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR), fornecendo seções bidimensionais (2D) de resistividade real dos trechos pesquisados. Os perfis foram desenhados no programa Geosoft no Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada. Posteriormente as figuras foram rediagramadas com o programa *Corel DRAW 12®* (*Microsoft® Visual Basic® for Applications – VBA*, 2004).

2.1.5 Interpretação dos dados

A interpretação dos dados foi feita a partir da integração das informações geológicas, da descrição das rochas e de estruturas tectônicas, associadas aos dados de resistividade verdadeira (colunas e perfis geoeletricos). Essa integração permitiu compreender as causas geológicas do problema, identificar os trechos para tomada de medidas corretivas, assim como sugerir um método de estudo para buscar soluções tecnológicas em trechos ferroviários construídos sobre rochas sedimentares ou seu regolito que apresentem problemas de movimentação de finos para o interior do lastro.

2.2 Método eletroresistivimétrico

O agente de remoção de pelitos para o interior do lastro da ferrovia é a água subterrânea sob carga que surge na plataforma ferroviária. A constatação foi feita com observações de surgências de água na lateral da ferrovia ou mesmo logo abaixo da camada de lastro. Para caracterização do problema foi necessário compreender o comportamento do fluxo hidrogeológico e a caracterização litológica e estrutural no interior do maciço rochoso. Alguns métodos geofísicos, como os eletroresistivimétricos, fornecem dados muito consistentes nestes casos (Souza *et al.* 1998)

As técnicas selecionadas foram sondagem elétrica vertical (SEV – 1D) e caminhamento elétrico (CE – 2D). A combinação de duas técnicas permite uma melhor definição dos materiais e estruturas em subsuperfície por aferição dos dados. Neste caso foi possível associar as camadas sedimentares interpretadas com maior detalhe na SEV, com estruturas verticais, horizontais e circulares interpretadas “regionalmente” com a técnica de caminhamento elétrico.

O método da eletroresistividade é utilizado com injeção de corrente elétrica no terreno através de uma fonte artificial para medição da resistividade aparente da camada de subsuperfície e seu respectivo modelo de profundidade obtido por inversão. Este método baseia-se na medição do potencial elétrico na superfície do terreno para determinar no subsolo estruturas geológicas ou

caracterizar corpos litológicos a partir da interpretação dos dados obtidos (Telford *et al.*, 1990).

A injeção da corrente elétrica pelo transmissor é feita de modo alternado, em baixa frequência, por meio de dois eletrodos de corrente AB - hastes metálicas ligadas por cabos elétricos à fonte geradora de eletricidade. Os eletrodos são cravados no substrato umedecidos com uma solução eletrolítica (água + NaCl) para aumentar o contato galvânico entre eletrodo e solo ou rocha, e facilitar a condução da corrente (Figura 8). A leitura das medidas é feita no receptor no qual os eletrodos de potencial MN - hastes metálicas cravadas no subsolo também umedecidas com solução eletrolítica estão conectados por meio de cabos elétricos.

O fluxo da corrente elétrica entre os eletrodos AB forma um circuito eletrodo-solo que possibilita a leitura da diferença de potencial (ΔV) nos eletrodos MN de recepção, a partir da qual pode-se determinar a resistividade aparente do substrato rochoso.

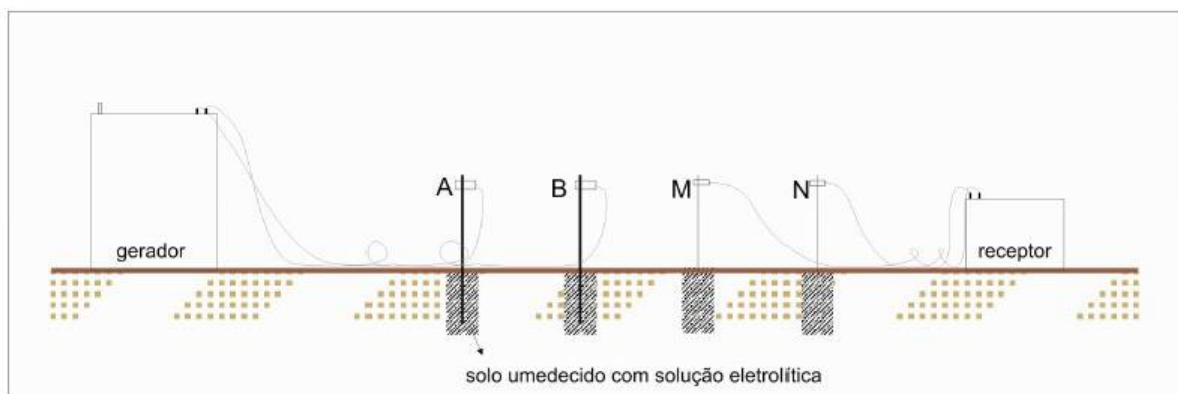


Figura 8: Esquema da organização de equipamentos para medida de resistividade elétrica.

Na verdade, se consegue transmitir corrente elétrica porque na maioria das vezes poros e fraturas das rochas são preenchidos por fluidos, geralmente água com sais, o que torna as rochas, que são naturalmente muito resistentes segundo Telford *et. al* (1990), um pouco mais condutoras. Essa condução é eletrolítica e se processa pelos íons dissolvidos na água.

O método eletroresistivimétrico resulta em medidas bastante precisas que podem refletir valores de resistividade de dois ou mais litotipos ou estruturas diferentes. Portanto a ambigüidade, em geofísica, significa que o problema não tem solução única, ou seja, vários modelos podem satisfazer os

dados medidos. Para minimizar este problema na interpretação os dados de subsuperfície coletados pela geofísica foram comparados com o mapeamento dos taludes até o nível da plataforma o que possibilitou inferir com maior precisão a classificação das rochas no interior do maciço rochoso.

2.2.1 Resistividade

A resistividade é a propriedade que um material possui de dificultar a passagem de corrente elétrica. A Tabela 3 abaixo mostra a variação de alguns materiais e rochas:

Tabela 3: Resistividade de alguns materiais e litotipos. Fonte: Telford *et al.* (1990).

ROCHA OU MATERIAIS	RESISTIVIDADE (variação ou valor médio em Ohm.m)
basalto	$10 - 1,3 \times 10^7$
arenito	$1 - 6,4 \times 10^8$
conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$
argila consolidada	$20 - 2 \times 10^3$
argila inconsolidada úmida	20
água superficial	10 - 100

2.2.2 Fundamentos teóricos da resistividade aparente

A equação utilizada para obter a resistividade aparente de rochas e/ou solos nos anisotrópicos é deduzida com base em um modelo ideal, isotrópico e homogêneo.

Em campo mede-se a corrente **I** entre dois eletrodos, e a diferença de potencial (ΔV) entre outros dois eletrodos (MN) chamados de potencial. A resistividade calculada a partir desses dados é um valor aparente que reflete a resistividade de cada ponto do semi-espço, a geometria elétrica do terreno e o arranjo dos eletrodos. Para determinar a resistividade verdadeira é feita a inversão dos dados por meio de programas de computador.

Ao injetar uma corrente de intensidade **I** no substrato por meio de um par de eletrodos **AB**, é possível medir a diferença de potencial entre os eletrodos

MN (ΔV) no equipamento receptor. A resistividade aparente (ρ_a) é então obtida a partir da equação:

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

onde k é um coeficiente que depende das distâncias e arranjo dos eletrodos **AMNB** definido pela equação geral 2:

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (2)$$

em que **AM**, **AN**, **BM**, **BN** são as distâncias entre os eletrodos.

Para a sondagem elétrica vertical com o arranjo Schlumberger a equação geral de k é:

$$k = \pi (AM \cdot AN) / MN \quad (3)$$

Para o caminhamento elétrico com arranjo dipolo dipolo a equação geral de k é apresentada abaixo:

$$k = 2\pi Gx \quad (4)$$

$$\text{Sendo } G = \frac{1}{(1/n) - (2/n+1) + (1/n+2)} \quad (5)$$

onde x = espaçamento dos dipolos AB e MN adotado e n = nível de investigação correspondente.

2.2.3 Técnicas geoeletricas

2.2.3.1 Sondagem Elétrica Vertical – SEV

A sondagem elétrica vertical é uma técnica efetuada na superfície do terreno de medição de resistividade da subsuperfície. Fornece a distribuição vertical pontual em profundidade da resistividade elétrica aparente e resulta em um modelo unidimensional – 1D – de níveis ou camadas. Não discrimina variações laterais e produz uma representação aproximadamente fiel à realidade da profundidade e espessura das camadas e das variações

resistivimétricas (Telford *et al.*, 1990). É uma técnica indicada para analisar estruturas horizontais, como camadas sedimentares e nível do aquífero freático.

O arranjo utilizado foi o Schlumberger (figura 9 – leitura 1). Visto que sob os pontos de coleta o substrato era constituído por litotipos estratificados horizontalmente como arenitos, siltitos e/ou sills de basalto, com diques de basalto subverticais. Essa técnica é mais indicada neste caso porque é menos suscetível a erros interpretativos devido às heterogeneidades laterais da geologia dos locais estudados (Braga, 1997).

Os eletrodos de potencial **M** e **N** (recepção) inicialmente são mantidos fixos com separação de Y_m , enquanto a distância entre os eletrodos de corrente **A** e **B** (emissão) é aumentada, em linha, até atingir o limite da diferença de potencial (ΔV muito baixo), quando se altera a relação $MN \leq AB/5$. Neste momento se faz uma leitura de repetição (“embreagem” – que aumenta o valor de ΔV) (ver leitura 4 na figura 9), onde os eletrodos de corrente **AB** permanecem fixos e a distância Y_m entre os eletrodos de potencial **MN** é aumentada para $2Y_m$ (ver figura 9, leitura 2 e 3). Segue-se aumentando a distância entre **A** e **B** até atingir o limite máximo **AB** estipulado na pesquisa, ou o limite de precisão do sistema (ver leitura 5 na figura 9).

As distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial para os cinco locais de pesquisa foram estabelecidas segundo a tabela 4. A ampliação da distância entre os eletrodos de emissão (**AB**) permite fazer medidas de resistividade aparente em profundidades cada vez maiores, estudando a distribuição vertical abaixo do espaço em que **MN** está situado (Telford *et al.*, 1990).

Tabela 4: Abertura em metros dos eletrodos de eletricidade AB e potencial MN para a sondagem elétrica vertical.

MN/2	AB/2	metros
0,25	1	
0,25	1,5	
0,25	2	
0,25	3	
1	3	
1	5	
1	7	
1	10	
2,5	10	
2,5	15	
2,5	20	
2,5	30	
2,5	40	
2,5	50	
10	50	
10	70	
10	100	
10	150	
10	200	

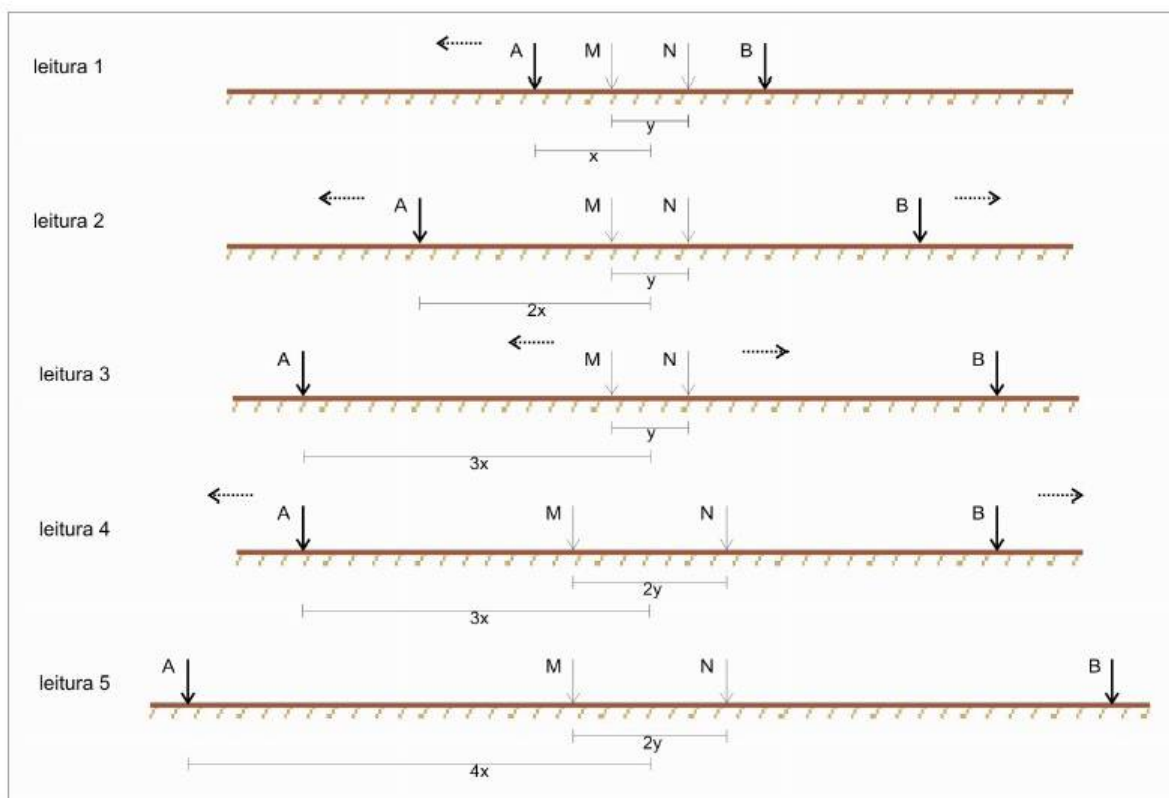


Figura 9: Esquema do posicionamento sucessivo dos eletrodos de corrente – AB e de potencial – MN para o arranjo Schlumberger na sondagem elétrica vertical.

2.2.3.2 Caminhamento elétrico - CE

A técnica do caminhamento elétrico foi escolhida por fornecer dados bidimensionais. Esta técnica considera a distribuição horizontal e vertical da resistividade a uma ou várias profundidades ao longo de perfis. Possibilita analisar estruturas verticais, como zonas fraturadas, e contornos de estruturas horizontais, dependendo do arranjo de eletrodos utilizado (Telford *et al.*, 1990).

No caminhamento elétrico foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo (figura 10 – leitura 1). A distância entre os eletrodos permaneceu fixa, e todo o arranjo alinhado e deslocado simultaneamente depois de efetuado a leitura (figura 10 – leituras 2 e 3). Quanto maior a distância entre os dipolos, maior a profundidade de investigação.

A distância entre os eletrodos para a medição foi de 20m, com a análise de 6 níveis simultaneamente (M, N, O, P, Q e R).

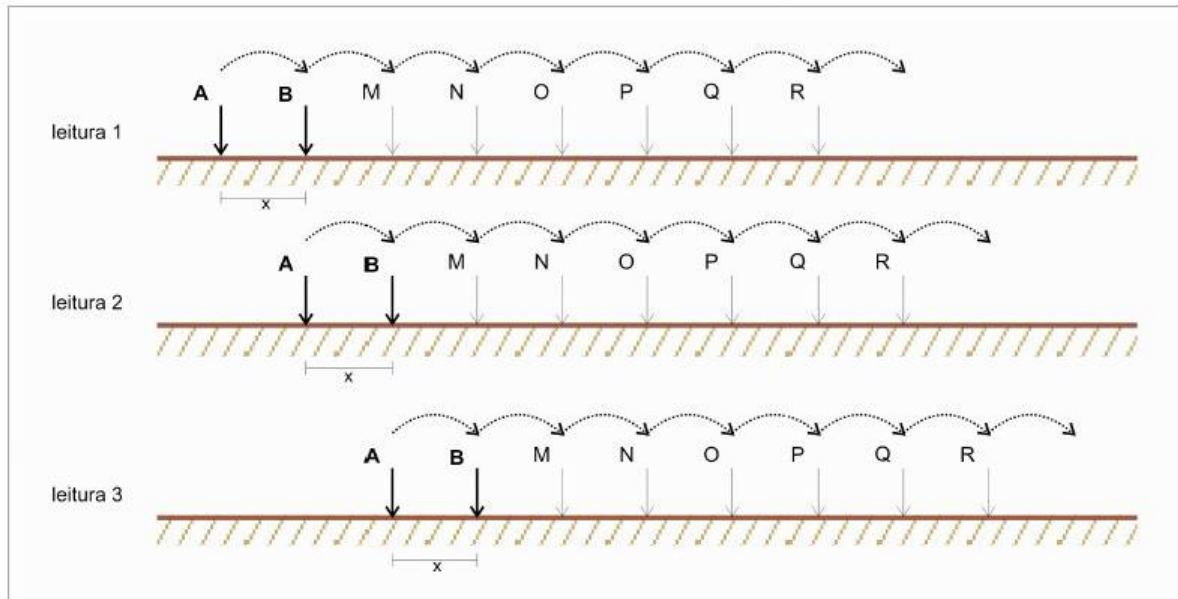


Figura 10: Esquema da disposição sucessiva dos eletrodos para uma medição com o arranjo dipolo-dipolo no caminhamento elétrico.

3. Resultados

3.1 Descrição dos trechos

Cada trecho estudado está inserido num contexto geológico da Bacia do Paraná, onde ocorrem diferentes unidades litoestratigráficas. Dada a escala de abordagem, neste capítulo são apresentados aspectos geológicos locais (litotipos, estruturas sedimentares e tectônicas) de interesse, assim como observações da estrutura da ferrovia.

3.1.1 Trecho 1

Corte em rocha com aproximadamente 200m de extensão e 10m de largura, num trecho em curva. Os taludes são subverticais com 20m de altura máxima e duas bancadas. A plataforma ferroviária possui 1° de inclinação para sudeste.

Neste local afloram rochas sedimentares do Grupo Itararé em estratos horizontais e um dique de microgabro da Formação Serra Geral (figura 11).

Na base a seção apresenta um estrato de arenito muito fino cinza claro, com matriz argilosa e lentes de argila de 1cm de comprimento, medianamente alterado (A2) e medianamente coerente (C2). Apresenta ainda granodecrescência ascendente para siltito de cor cinza escuro, maciço, praticamente são (A1) e coerente (C1). Em direção ao topo segue-se uma camada de siltito amarelo com laminação plano-paralela (figura 12) com 20cm de espessura medianamente alterado (A2) e pouco coerente (C3). Possui contato erosivo no topo (foto 9 e figura 12) com arenito grosso de cor rosa e estratificação cruzada tangencial na base. É um estrato com grãos bem selecionados de constituição quartzosa, subangulosos, que passa bruscamente para um arenito fino com estratificação cruzada tabular, com grãos arredondados e bem selecionados. A aproximadamente 2 metros da base da seção a camada de arenito fino possui estratificação plano-paralela (figura 12). Este estrato arenoso apresenta-se medianamente alterado (A2) e incoerente (C4).

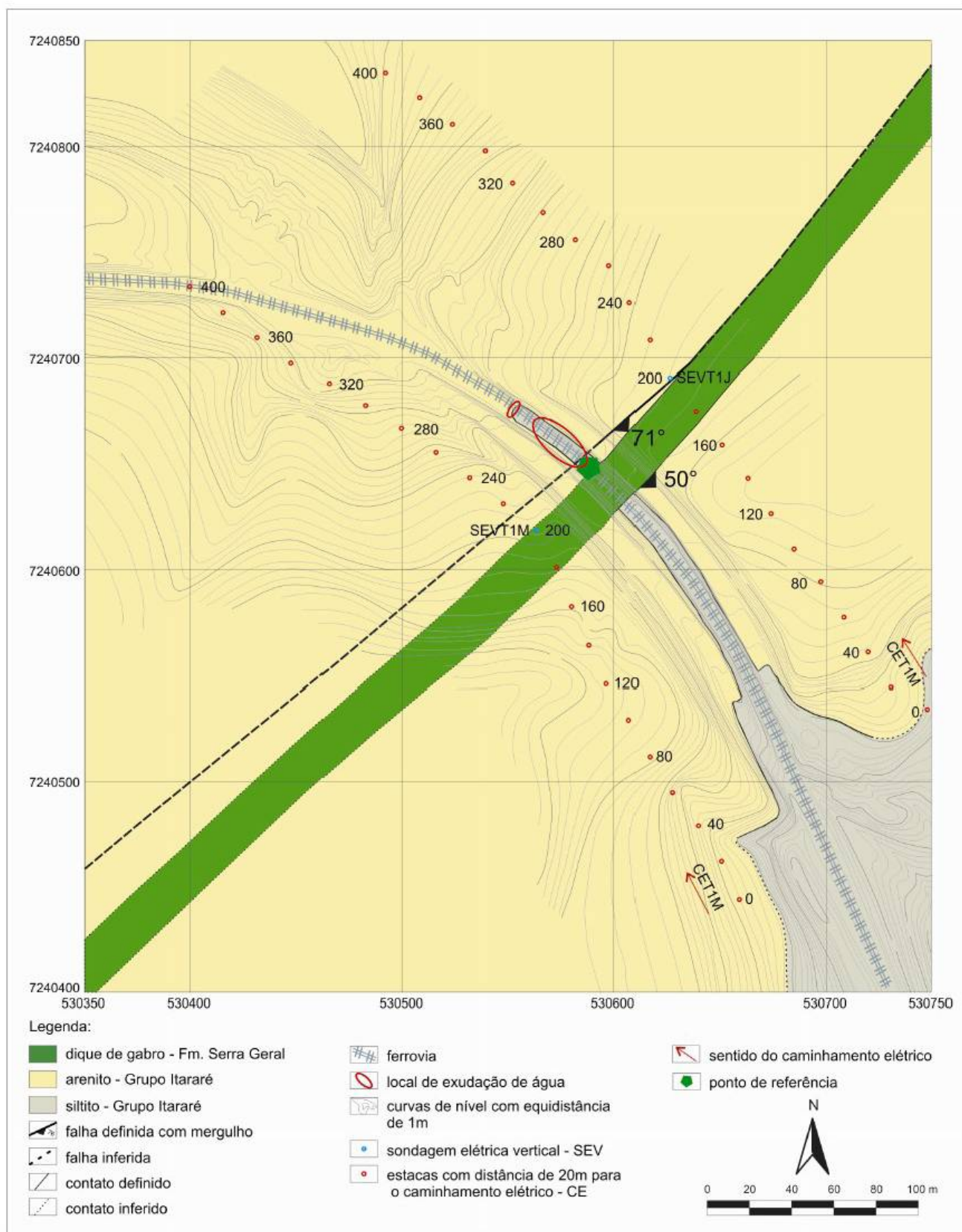


Figura 11: Mapa geológico das imediações do trecho 1.



Foto 9: Siltito em contato erosivo no topo com o arenito. Trecho 1, talude NW.

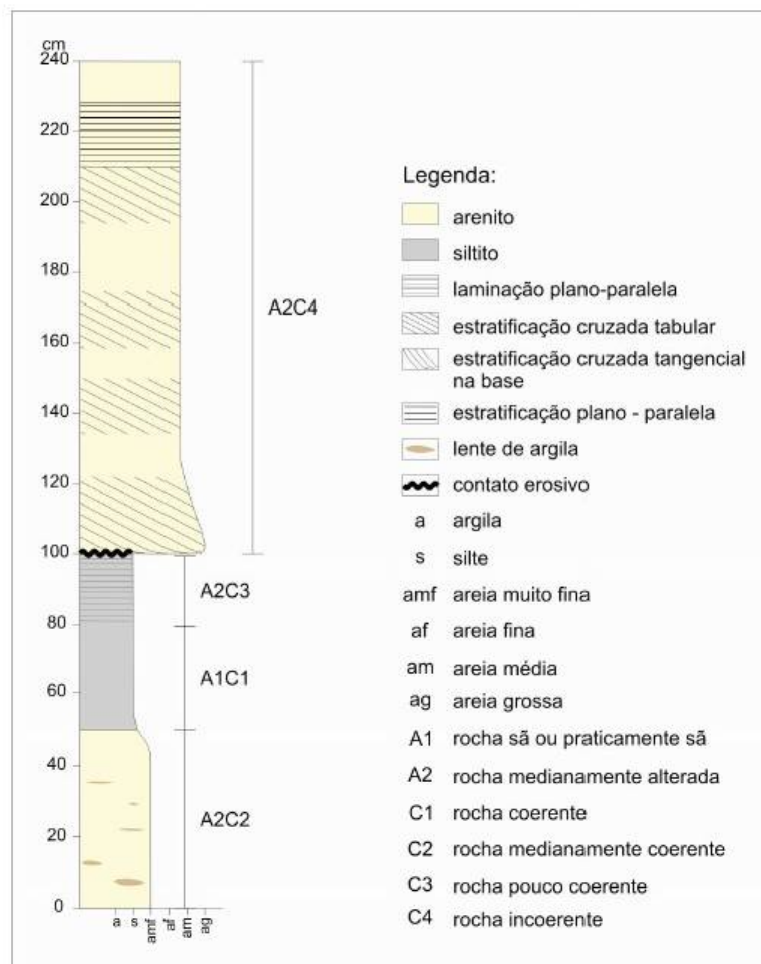


Figura 12: Seção colunar para o trecho 1.

A sudeste deste local aflora um dique de gabro (figura 11) com 25m de largura e atitude N45E/50SE, medianamente alterado (A2) e coerente (C1). Apresenta minerais anédricos a subédricos, constituído por labradorita, piroxênio, opacos, com textura inequigranular e estrutura maciça (foto 10).



Foto 10: Gabro que constitui o dique no trecho 1. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

Os litotipos sedimentares da base (siltito e arenito muito fino) apresentam fraturas interrompidas e pouco penetrativas, principalmente no contato erosivo com arenito médio do topo do estrato. Foram medidas duas estruturas tectônicas importantes próximas ao dique: uma falha de atitude N50E/71SE (figura 11) com brecha de falha de 2cm de espessura (foto 11) e uma fratura com atitude N24E/90°, fechada, contínua no estrato inferior e interrompida no contato erosivo com o estrato superior.

No contato erosivo entre o siltito com o arenito a água aflora constantemente, com volume suficiente para escorrer na superfície dos dois taludes do local (foto 12) (a SE – montante, e a NW – jusante). Esta exudação ocorre numa extensão de 4m a noroeste do dique de microgabro, assinalado com o círculo maior em vermelho na figura 11.

O problema de bombeamento e recalque acontece com mais intensidade no local onde o contato entre o siltito amarelo e o arenito médio está no nível da plataforma, assinalado com um círculo vermelho pequeno na figura 11, e também no ponto onde há exudação de água no talude descrito acima.



Foto 11: Detalhe da falha observada no talude do trecho 1, de atitude N50E/71SE; Foto 12: Imagem do siltito no talude SE – montante, onde se verifica escoamento superficial constante de água.

Nas laterais dos taludes não há obras de drenagem, e o lastro está assentado diretamente sobre o estrato de siltitos e arenitos muito finos e seu regolito - materiais constituintes do sublastro. O escoamento da água ocorre naturalmente devido à inclinação da plataforma no mesmo nível da superestrutura.

3.1.2 Trecho 2

Corte em rocha com 200m de extensão e 7m de largura, onde a linha férrea é retilínea e horizontal. Apresenta taludes com 45° a 60° de inclinação com a horizontal e 10 m de altura máxima em uma bancada.

São rochas sedimentares com estratificação plano-paralela da Formação Serra Alta seccionadas por um dique de basalto, e um *sill* de basalto, ambos da Formação Serra Geral (figura 13).

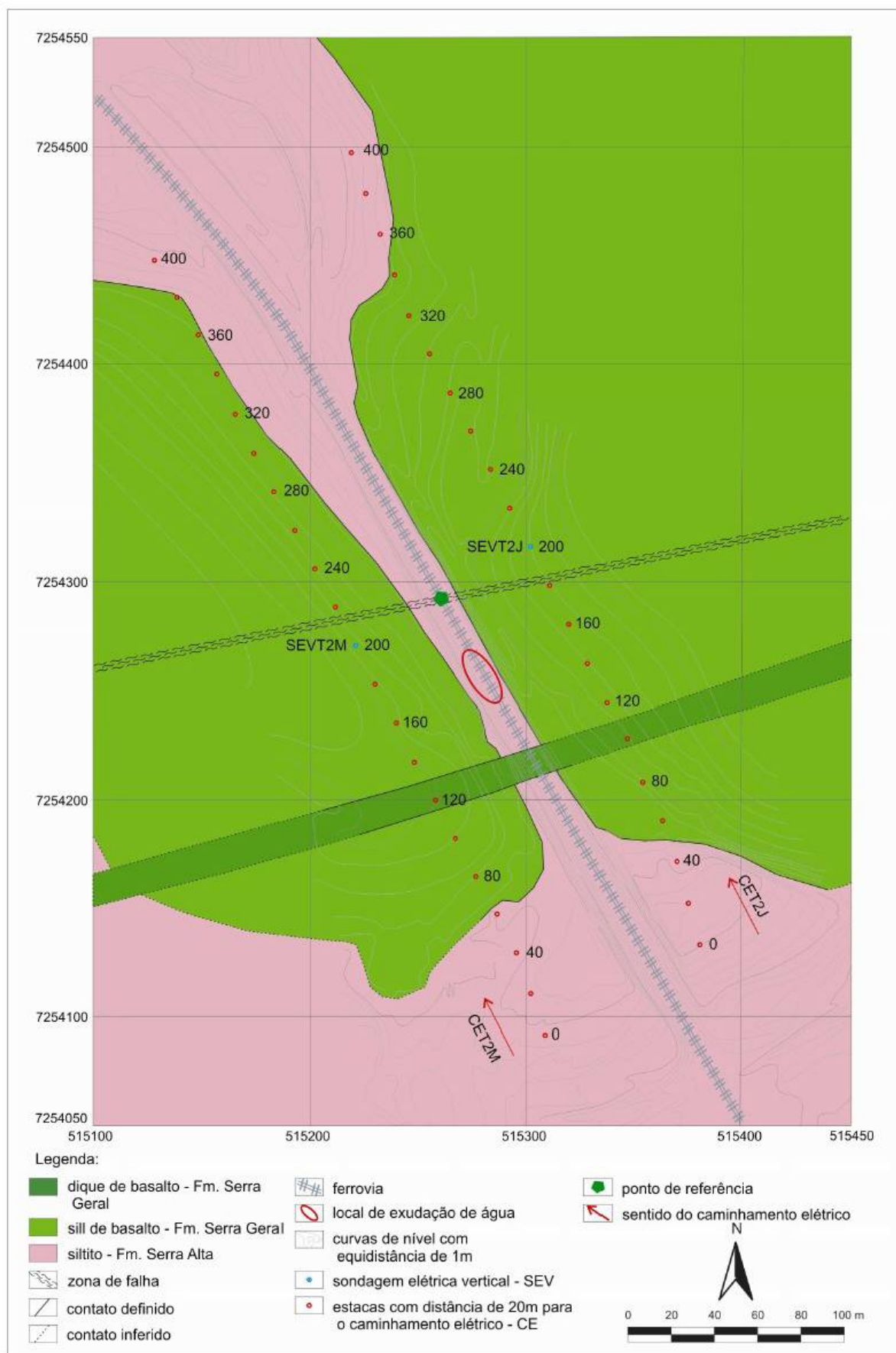


Figura 13: Mapa geológico da área adjacente do trecho 2.

A coluna estratigráfica do trecho é composta por argilitos de cor rosa com laminação plano-paralela. Eventualmente apresenta camadas milimétricas anastomosadas de óxido de ferro ou manganês (figura 14). Os litotipos apresentam-se muito alterados (A3) e incoerentes (C4).

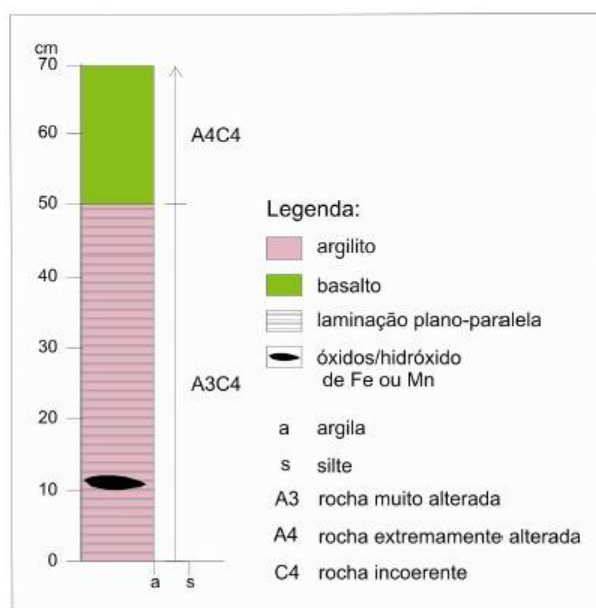


Figura 14: Seção colunar do trecho 2 à esquerda.

O dique de basalto tem aproximadamente 10m de espessura e direção N70E, e não se pode averiguar o mergulho devido à baixa qualidade de exposição. Está extremamente alterado (A4), muito poroso e incoerente (C4). O *sill*, no topo do talude também está extremamente alterado (A4) e incoerente (C4)(figura 13).

A persistência das fraturas no argilito próximo ao dique é alta (espaçamento de 2cm), e diminui de forma gradativa com o aumento da distância ao dique. Essas fraturas são contínuas e a grande maioria apresenta-se fechadas ou com preenchimento de argila branca. São separadas duas famílias principais, uma com atitudes entre N80W a N80E com mergulhos entre 80SW a 90°, e outra N25E com mergulho de 80SE a 90° (figura 15). No mapa geológico está marcado como uma zona de falha com direção N82E/90° (figura 13).

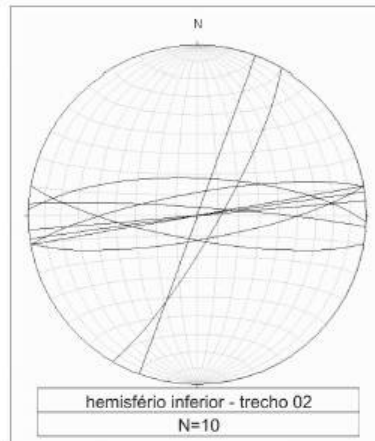


Figura 15: Diagrama Schimidt-Lambert de atitudes de planos de 10 fraturas do trecho 2. Podem-se separar duas famílias principais, uma N80W a N80E e uma N25W à direita.

Há uma zona de exudação de água na plataforma logo abaixo do lastro de volume muito pequeno (figura 13), e o dique de basalto encontra-se úmido. O problema de desnivelamento ocorre com mais gravidade nas imediações da exudação da água e sobre o dique.

As obras de drenagem paralelas à ferrovia estão em bom estado, mas em alguns intervalos as laterais da drenagem estão quebradas, sendo possível observar o perfil da infra e superestrutura. O lastro está assentado sobre o argilito (foto 13), não apresentando material selecionado no sublastro.



Foto 13: Perfil da infraestrutura no trecho 2. Observa-se que não há material selecionado nem sublastro.

3.1.3 Trecho 3

Corte em trecho ferroviário retilíneo com aproximadamente 500m de comprimento. Possui 6m de largura e 7m de altura média em cada lateral, com plataforma inclinada 1° para sudeste.

Neste local afloram somente rochas sedimentares da Formação Teresina em estratos horizontais (figura 16). Na seção colunar (figura 17) é possível observar camadas de arenito muito finos, siltosos, cor bege a amarelo claro, com estratificação plano-paralela incipiente, medianamente alterados (A2) e pouco coerentes (C3). A estas se intercalam camadas de siltitos de cor cinza a verde, que alteram para amarelo claro em pastilhas de 1 a 2 cm de diâmetro, com estratificação plano-paralela milimétricas e gretas de contração de 1mm de diâmetro em média. A rocha está medianamente alterada (A2) e medianamente coerente (C2). No topo do estrato apresenta lentes de areia fina com espessura mm e 1 a 2 cm de comprimento, e gradacionam para um estrato com cimentação carbonática intensa medianamente alterado (A2) e coerente (C1).

Em lâmina foi possível observar com mais detalhe o arenito muito fino, representado por níveis mais arenosos intercalados a níveis mais argilosos (foto 14). O arenito é moderadamente selecionado com grãos subangulosos a subaredondados, constituído de quartzo. O contato entre os níveis é abrupto.

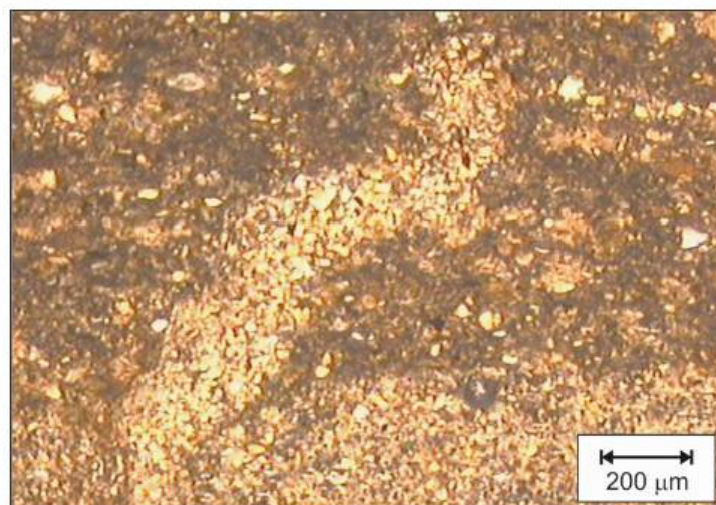


Foto 14: Arenito muito fino do trecho 3. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

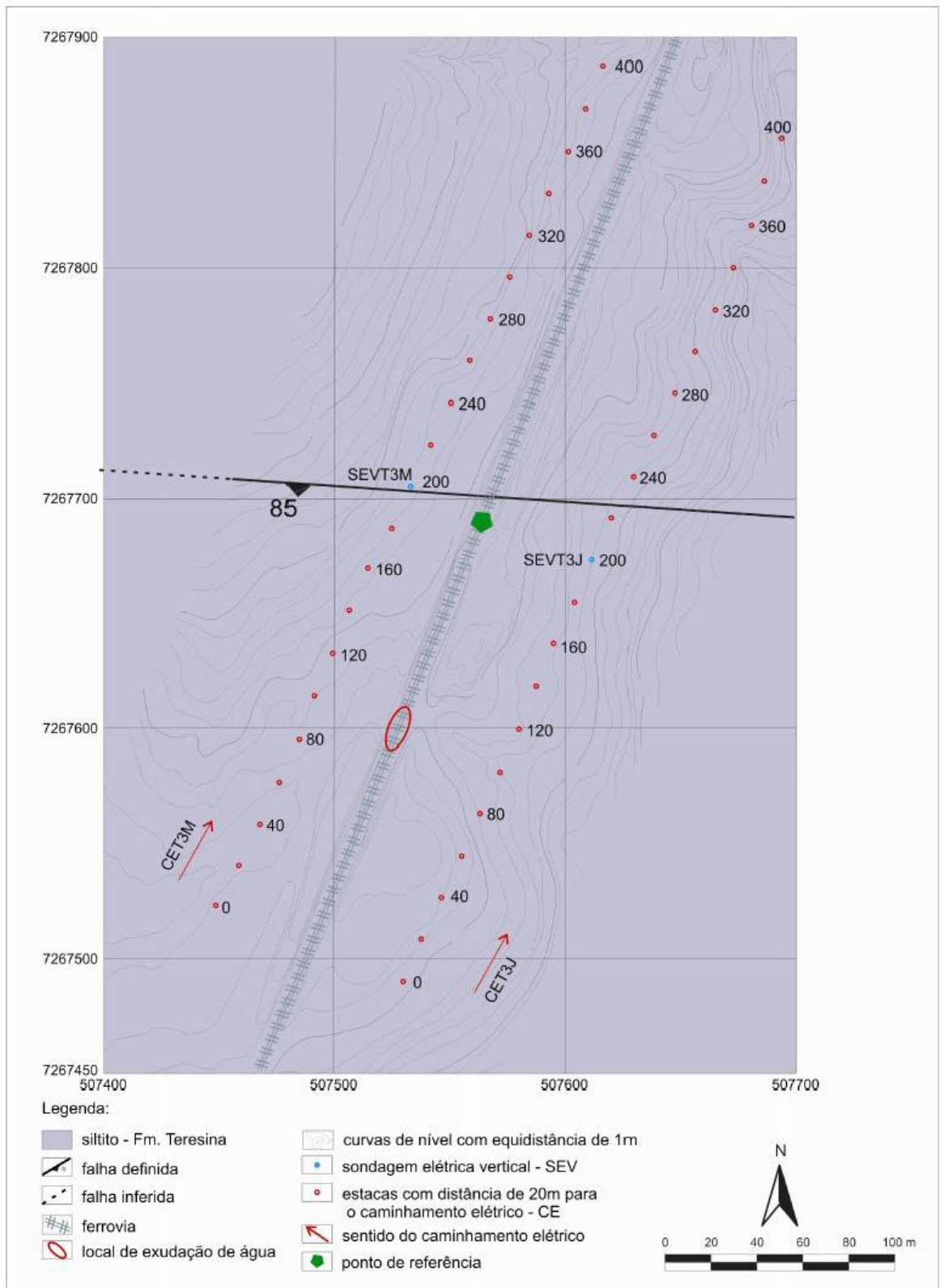


Figura 16: Mapa geológico das imediações do trecho 3.

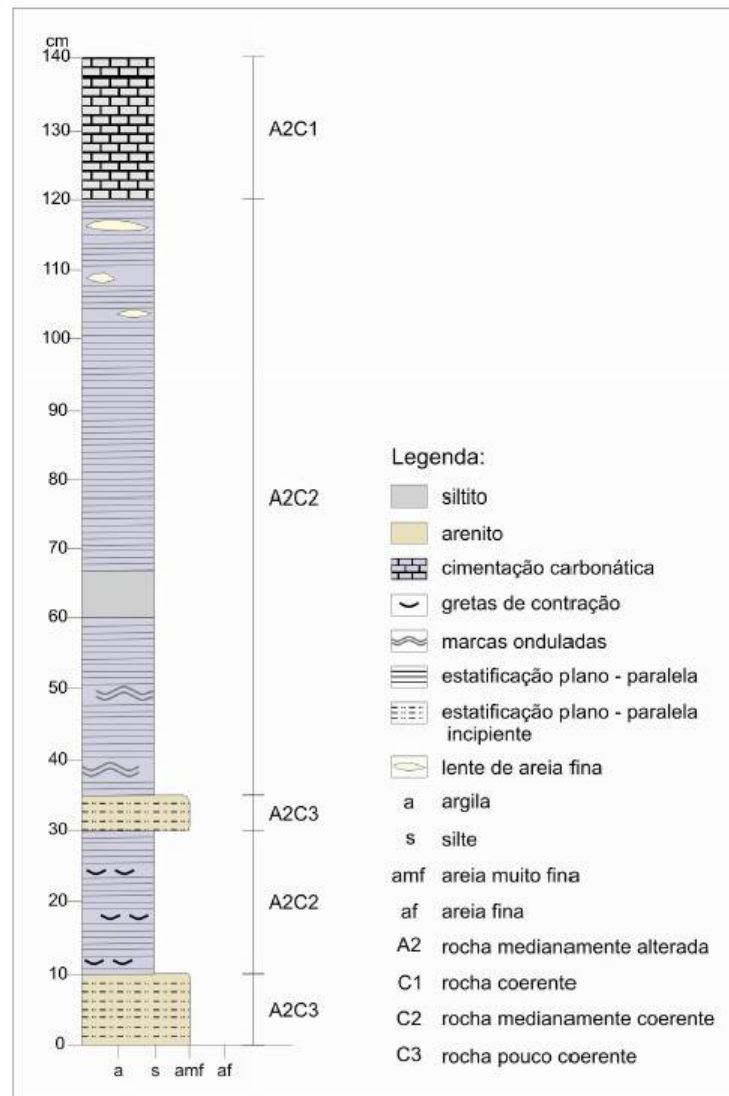


Figura 17: Seção colunar para o trecho 3.

As rochas sedimentares deste trecho apresentam fraturas penetrativas, com 10 a 20cm de distância, contínuas e fechadas. Algumas são interrompidas nos planos do estrato da rocha sedimentar. As fraturas estão representadas na figura 18, onde distinguem-se três grupos: um com direção entre N40E a N70E, mergulhado 70 a 80SE, outro entre N30W a N50W com mergulho de 80SW, e outro E-W subvertical. Também foi observada uma dobra no talude sudoeste (foto 15) com eixo N286/05, próxima a uma fratura aberta com atitude N86W/85SW (figura 16).

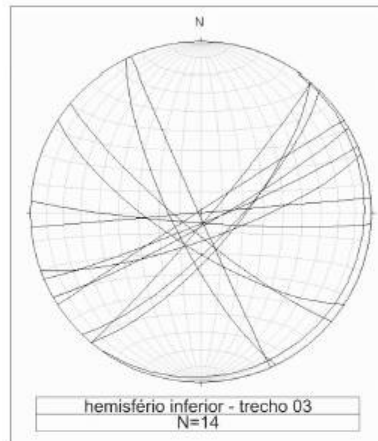


Figura 18: Diagrama Schimidt-Lambert de atitudes de planos de 14 fraturas do trecho 3. Podem-se separar três famílias principais: uma com direção entre N40E a N70E, outra entre N20W a N60W, e outra E-W.



Foto 15: Dobra com atitude do eixo N286/05 observada no talude sudoeste do trecho 3.

A plataforma permanece úmida em alguns trechos mesmo após longo período de seca, marcado em vermelho na figura 16, mas não há exudação de água. O problema de mobilização de sedimentos finos acontece em vários pontos da ferrovia ao longo do trecho estudado.

O trecho apresenta as valetas de drenagem em bom estado, mas estão preenchidas por seixos do lastro e argila, o que impede o escoamento da água. Não foi possível observar a existência ou não de sublastro neste local.

3.1.4 Trecho 4

Trecho retilíneo com 800m de comprimento. Taludes com 80° a 90° de inclinação, duas bancadas de 20m de altura cada a montante (SW) e uma de 5m de altura a jusante (NE), com largura da plataforma de 10m.

O corte expõe intercalações de arenitos finos e siltitos dispostos em estratos horizontais da Formação Rio do Rasto, seccionado por dois diques de basalto da Formação Serra Geral, um paralelo à estrada de ferro e outro perpendicular a ela (figura 19).

As rochas sedimentares são representadas por intercalações de arenitos finos a muito finos, intensamente cimentados por carbonato de cálcio moderadamente alterados (A2) e coerentes (C1), com estratificação plano-paralela que gradaciona para maciça, com siltitos amarelos apresentando estratificação plano-paralela, por vezes lentes de argila milimétricas, medianamente alterados (A2) e medianamente coerentes (C2), que se alteram em pastilhas de diâmetro centimétrico (figura 20).

Em lâmina foi possível observar que o arenito muito fino constitui-se por grãos com contatos pontuais e planares, sem orientação, constituídos por quartzos subarredondados a subangulosos, com cimentação carbonática (foto 16).

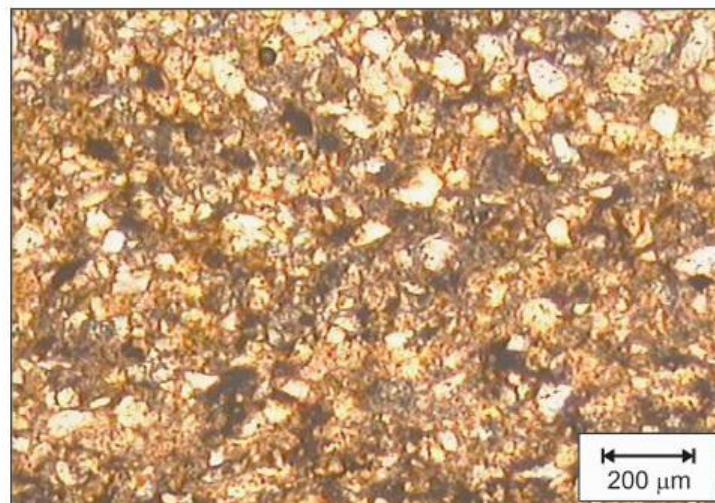


Foto 16: Arenito muito fino do trecho 4. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

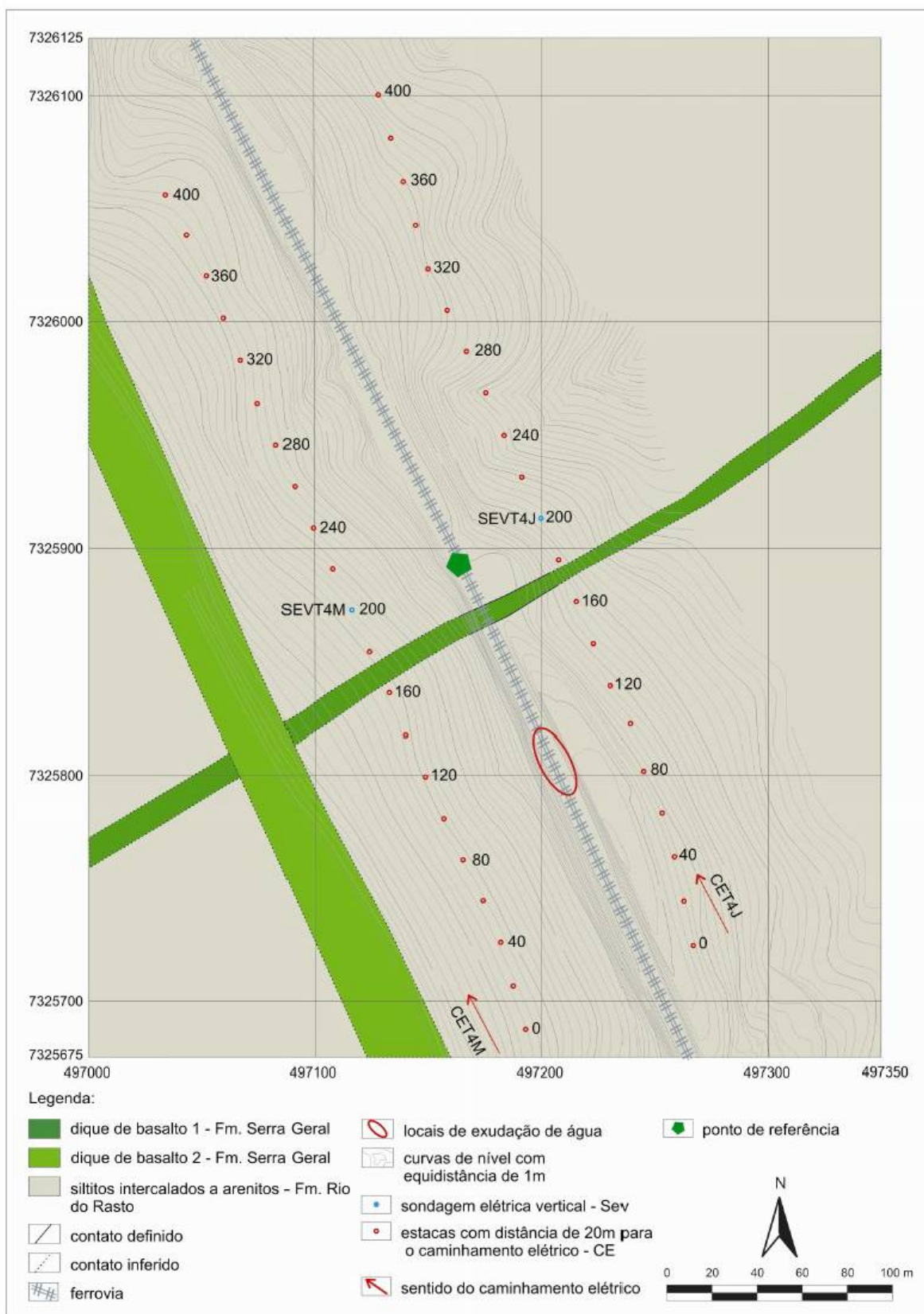


Figura 19: Mapa geológico do trecho 4.

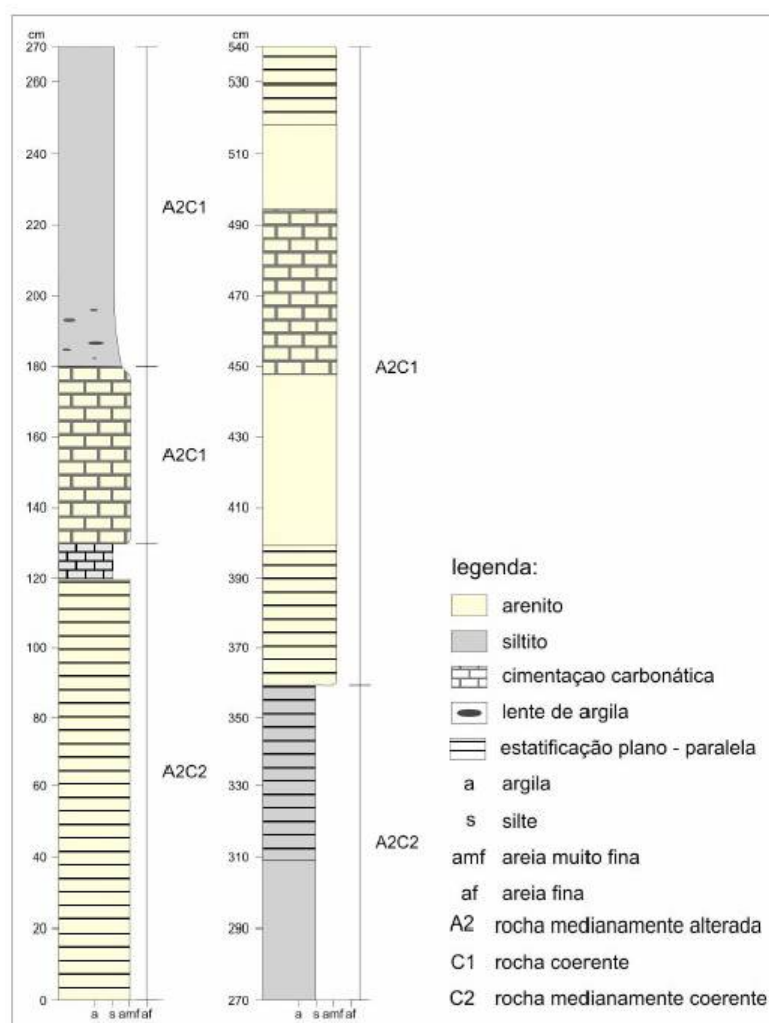


Figura 20: Seção colunar para o trecho 4.

O dique de basalto perpendicular à ferrovia (figura 19) possui atitude N70E/85SE com 90cm de largura. No contato com as rochas sedimentares encaixantes apresenta auréola termometamórfica com 5 cm de espessura (foto 17). A rocha apresenta-se extremamente alterada (A4), muito porosa e incoerente (C4). O dique de basalto paralelo à ferrovia tem 50m de largura, direção N45W (figura 19) e apresenta-se praticamente são (A1) e coerente (C1).

As rochas sedimentares apresentam-se intensamente fraturadas, com persistência alta (5cm de espaçamento), mas pouco contínuas, interrompidas aleatoriamente nos planos da estratificação da rocha. A maioria é fechada, com preenchimento de argila ou carbonato de cálcio. Na figura 21 observam-se as fraturas representadas no diagrama de Schmidt-Lambert, sendo uma família

com direção geral entre N80E e N80W, com mergulho subvertical, e outra família N05E a N05W com mergulho variando entre 70SW a 80NE.



Foto 17: Contato do dique de basalto com as rochas sedimentares encaixantes no trecho 4. Observar o metamorfismo de contato na cor laranja.

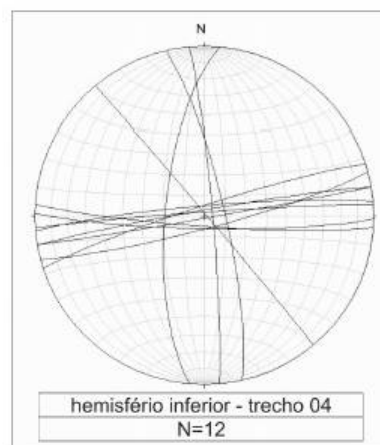


Figura 21: Diagrama Schmidt-Lambert de atitudes de planos de 14 fraturas do trecho 3. Podem-se separar três famílias principais: uma com direção entre N40E a N70E, outra entre N20W a N 60W, e outra E-W.

No piso da plataforma, constituída por rocha sedimentar, foi possível observar uma pequena zona de cisalhamento em planta (foto 18 e figura 19) com movimentação sinistral e 1,5cm de rejeito, com as direções Fr1-N20W/90 e Fr2-N10E/50SW.

Há uma saída localizada de água no contato entre uma camada de arenito muito fino e siltito, e em forma de bica (foto 196) no talude a montante (SW) (figura 16).



Foto 18: Zona de cisalhamento observada em planta do trecho 4. Fr1-N20W/90 e Fr2-N10E/50SW.



Foto 19: Exudação localizada de água no talude a montante (SW), no trecho 4.

Também há água na plataforma nos locais em que ocorre bombeamento de lama, marcado com um círculo vermelho na figura 19. Este trecho não

apresenta valetas de drenagem e a água permanece represada até atingir a altura da tubulação de drenagem perpendicular à ferrovia. A plataforma é constituída por um arenito muito fino, intensamente cimentado por carbonato de cálcio, formando um piso muito rígido, já que não existe material selecionado nem sublastro no trecho.

3.1.5 Trecho 5

Trecho retilíneo com 400m de extensão e plataforma com 5m de largura. As duas laterais apresentam taludes sub-verticais, com duas bancadas de 10m de altura. A plataforma tem 1° de inclinação para sudeste.

Neste local afloram siltitos intercalados a arenitos com estratificação plano-paralela da Formação Rio do Rasto (figura 22), mergulhando 2° para nordeste.

Os siltitos apresentam estratificação plano-paralela, medianamente alterados (A2) e medianamente coerentes (C2) que alteram em pastilhas centimétricas, com alternância de bandas de cor vermelho arroxeadas e verdes no topo, medianamente alterados (A2) e coerentes (C1) (foto 20). Alguns estratos apresentam marcas onduladas simétricas de 2mm de amplitude e 8cm de comprimento. Na base as camadas de siltito se intercalam a camadas com estrutura plano-paralela de arenitos finos com cimentação carbonática medianamente alterados (A2) e coerentes (C1). Na seção colunar (figura 23) é possível observar a intercalação dos litotipos e as estruturas sedimentares.

Em lâmina é possível observar que o arenito da camada entre 60 e 100 cm na figura 23 apresenta constituição quartzosa dos grãos, bem selecionados, subangulosos a subarredondados e cimentação carbonática (foto 21).

As rochas apresentam fraturas descontínuas e pouco persistente com espaçamento métrico. Há uma fratura contínua com atitude N77W/76SW preenchida por carbonato, a norte do trecho (figura 22). As fraturas são representadas na figura 24, e formam dois grupos com direções entre N40E e N65E subverticais e outro entre N50W e N80W com mergulhos entre 75° a 85 SW (figura 24).

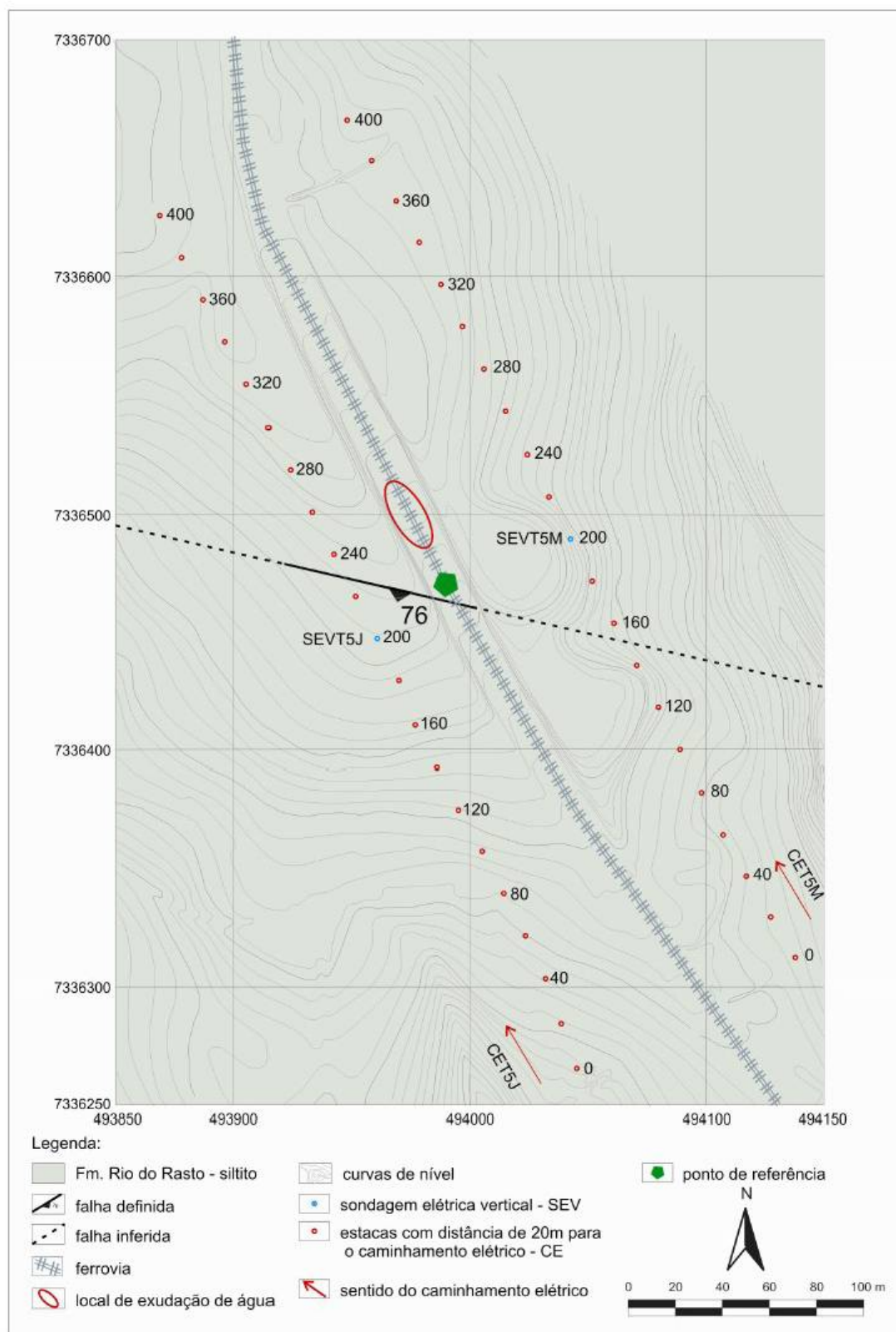


Figura 22: Mapa geológico do trecho 5.

O afloramento apresenta alguns pontos de exudação de água (figura 22) no contato superior do arenito muito fino com o siltito, marcados em vermelho na figura 22. A percolação da água lixiviou o carbonato de cálcio que se depositou sobre a rocha, formando uma película superficial de carbonato de cálcio.



Foto 20: Siltitos com estratificação plano paralela no trecho 5.



Foto 21: Arenito muito fino do trecho 5. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

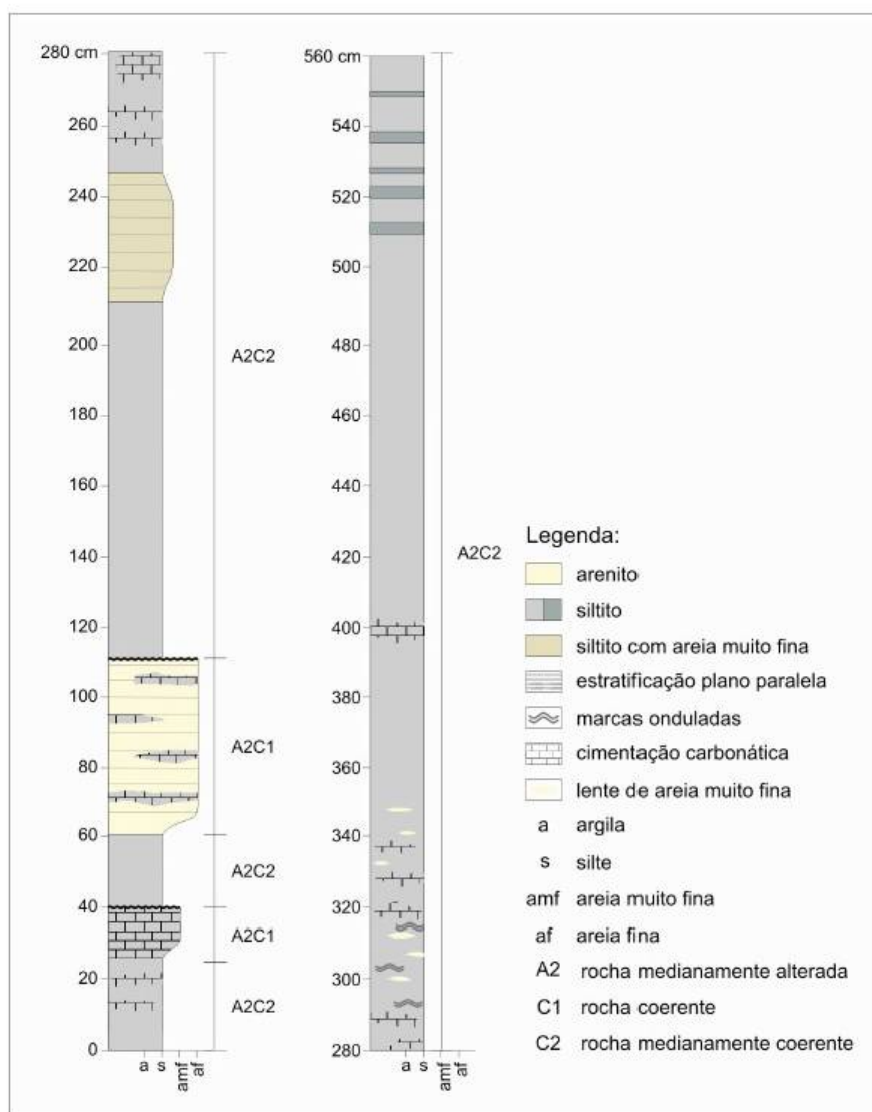


Figura 23: Seção colunar do trecho 5.

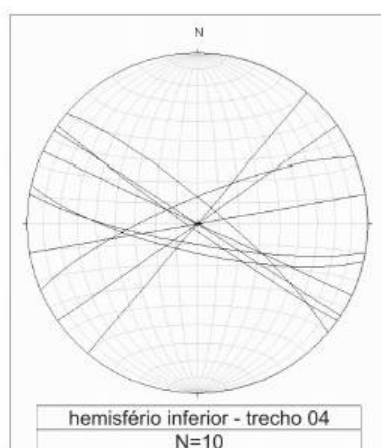


Figura 24: Diagrama Schimidt-Lambert de planos de 10 fraturas do trecho 5. Podem-se separar duas famílias principais: uma com direção entre N40E a N65E, outra entre N50W a N 80W.

3.2 Processamento dos dados geofísicos

3.2.1 Sondagem elétrica vertical

O processamento dos dados geoeletricos da sondagem elétrica vertical possibilitou gerar os gráficos de resistividade (Ohm.m) X profundidade (AB/2 m) (figuras 25 SEV A, B, C, D e E). A partir da inversão dos dados foram gerados os modelos de profundidade (colunas geoeletricas) com as camadas geoeletricas respresentativas de cada intervalo de resistividade em profundidade (figura 25 A, B, C, D e E – colunas geoeletricas).

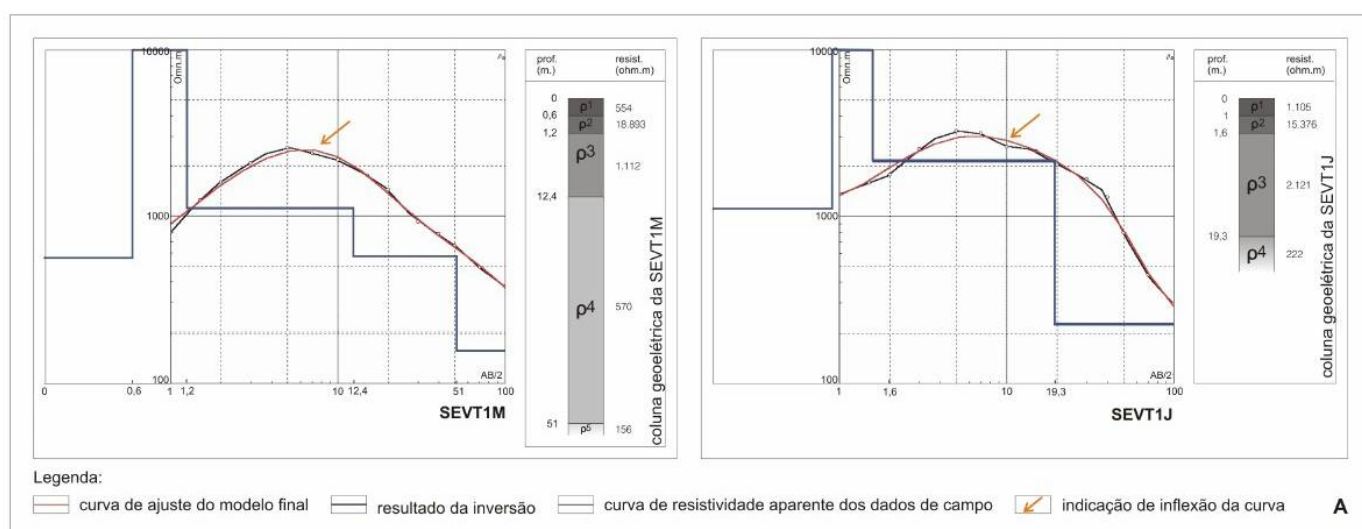


Figura 25 A: Curvas de resistividade campo (preto) e de resistividade de aparente (vermelho) e modelo de profundidade em forma de colunas das SEVs do trecho 1 (SEVT1M: montante, SEVT1J: jusante).

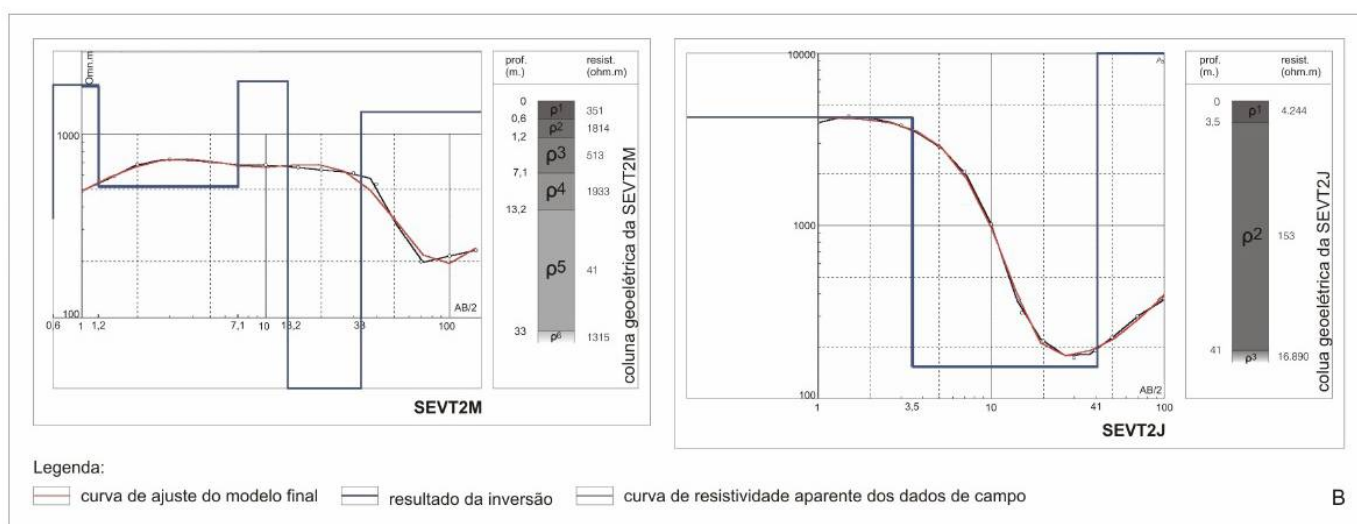


Figura 25 **B**: Curvas de resistividade aparente (vermelho) e de resistividade verdadeira (preto) e o modelo de profundidade correspondente das SEVs do trecho 2 (SEVT2M: montante, SEVT2J: jusante).

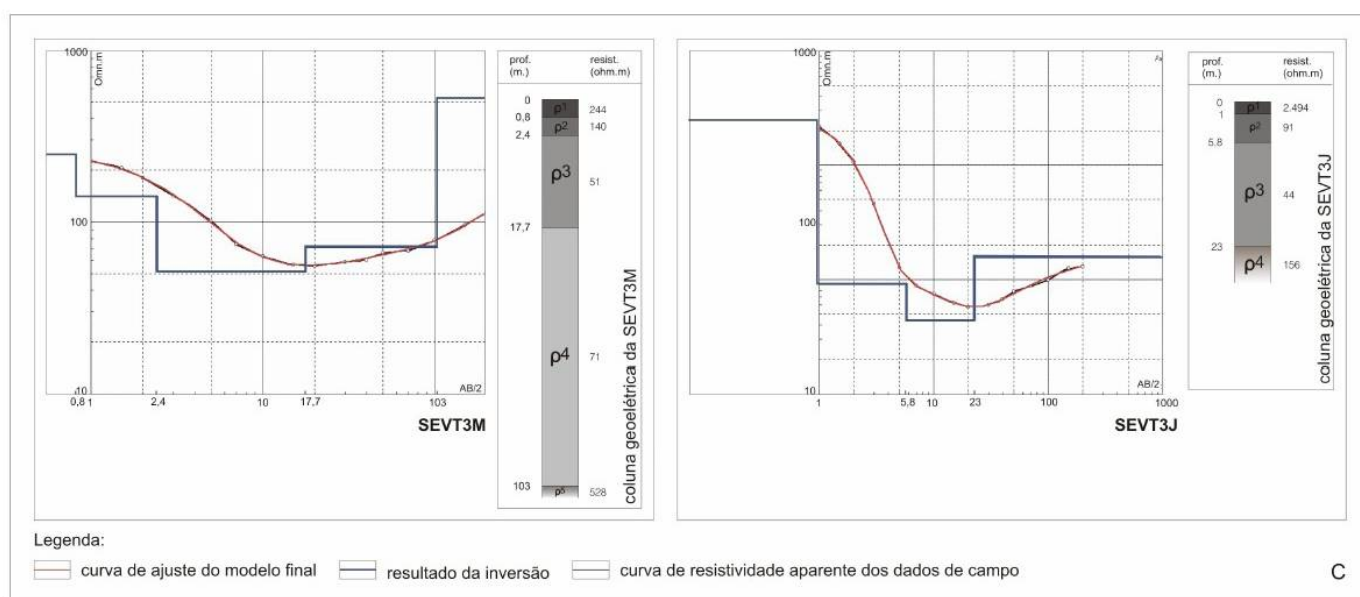


Figura 25 **C**: Curvas de resistividade aparente (vermelho) e de resistividade verdadeira (preto) e o modelo de profundidade correspondente das SEVs do trecho 3 (SEVT3M: montante, SEVT3J: jusante).

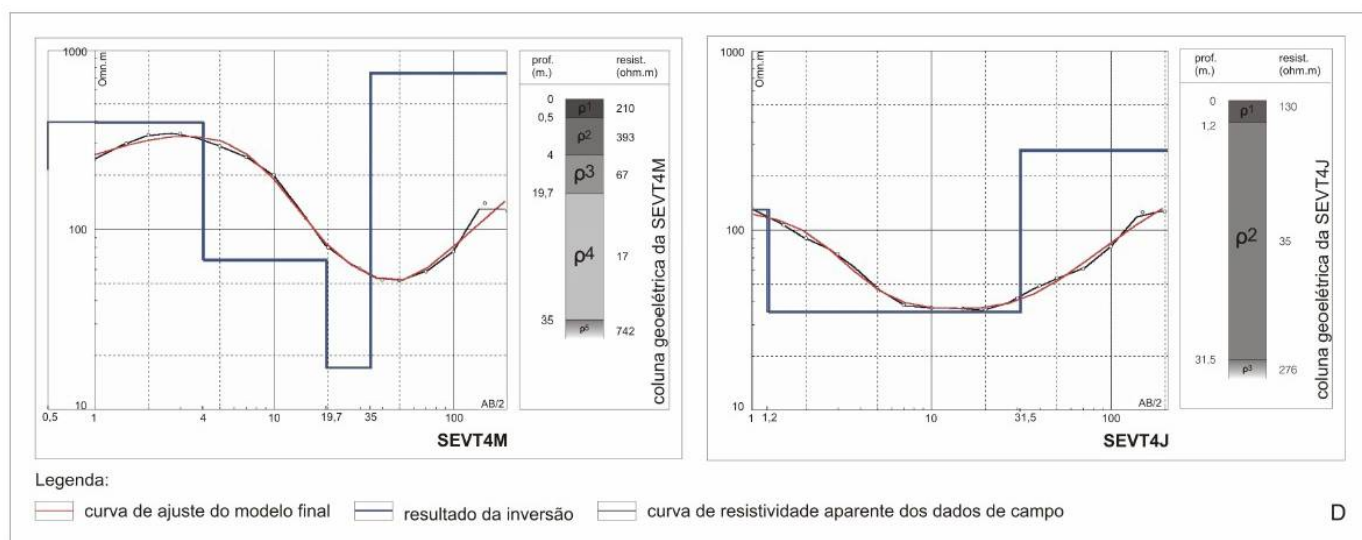


Figura 25 **D**: Curvas de resistividade aparente (vermelho) e de resistividade verdadeira (preto) e o modelo de profundidade correspondente das SEVs do trecho 4 (SEVT4M: montante, SEVT4J: jusante).

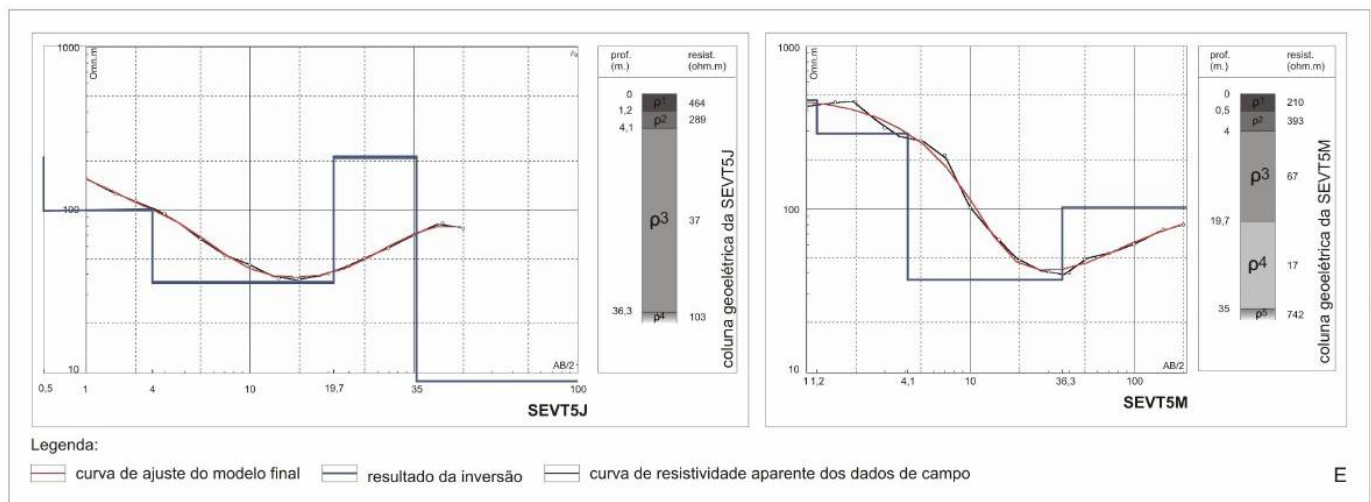


Figura 25 **E**: Curvas de resistividade aparente (vermelho) e de resistividade verdadeira (preto) e o modelo de profundidade correspondente das SEVs do trecho 5 (SEVT5M: montante, SEVT5J: jusante).

3.2.2 Caminhamento elétrico

A seguir são apresentadas as pseudo-seções dos dados de caminhamento elétrico em seis níveis de análise (figuras 26 A, B, C, D e E – pseudoseções de resistividade aparente do talude). A partir da inversão desses dados foram geradas as seções de resistividade real de cada trecho tanto a montante como a jusante (figuras 26 A, B, C, D e E – seções de resistividade real).

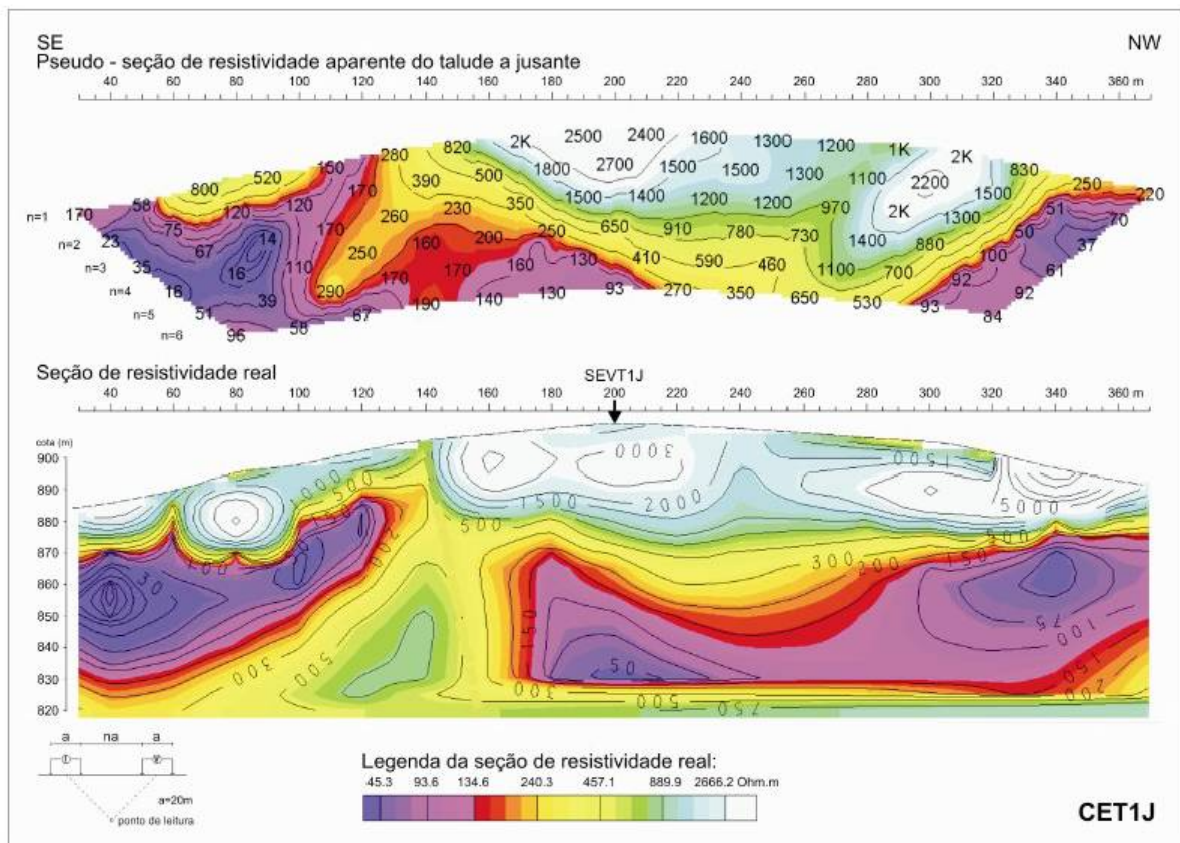
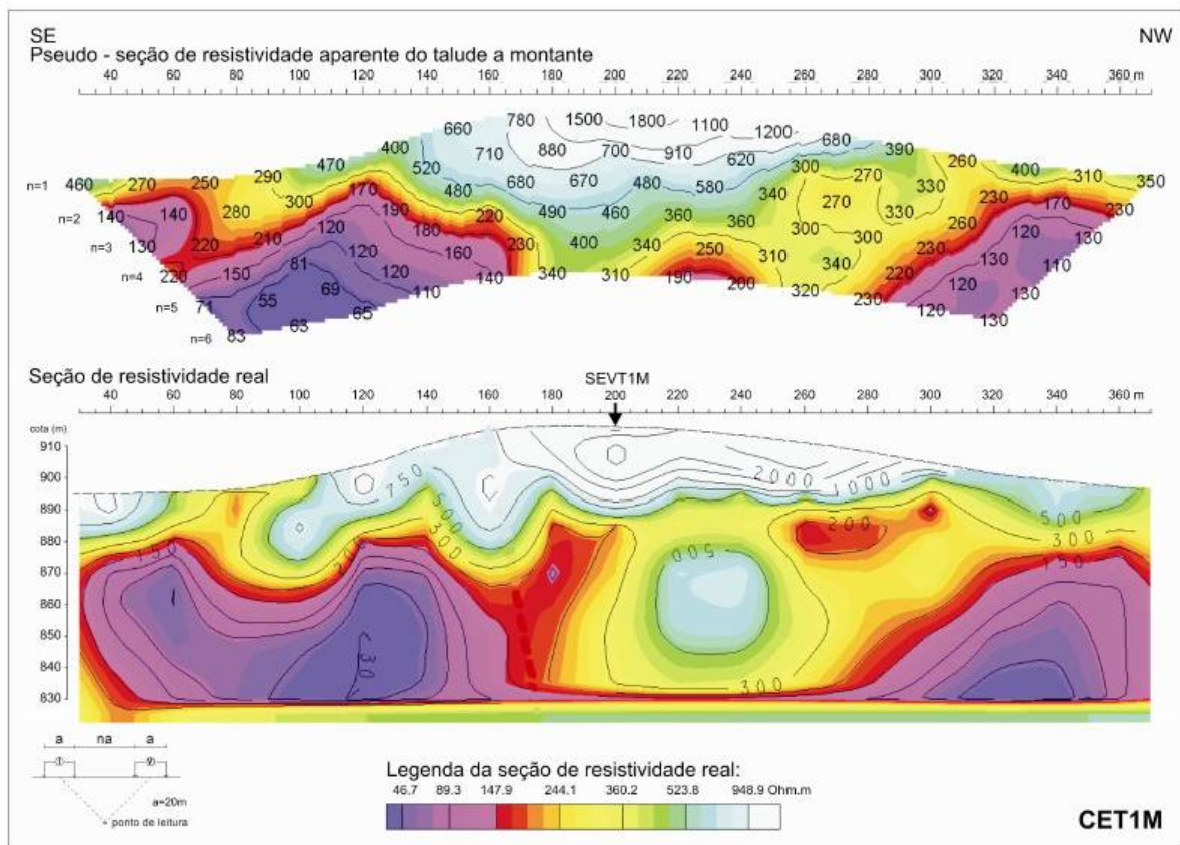


Figura 26 A: Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos. CET1M: trecho 1 – montante; CET1J: trecho 1 – jusante.

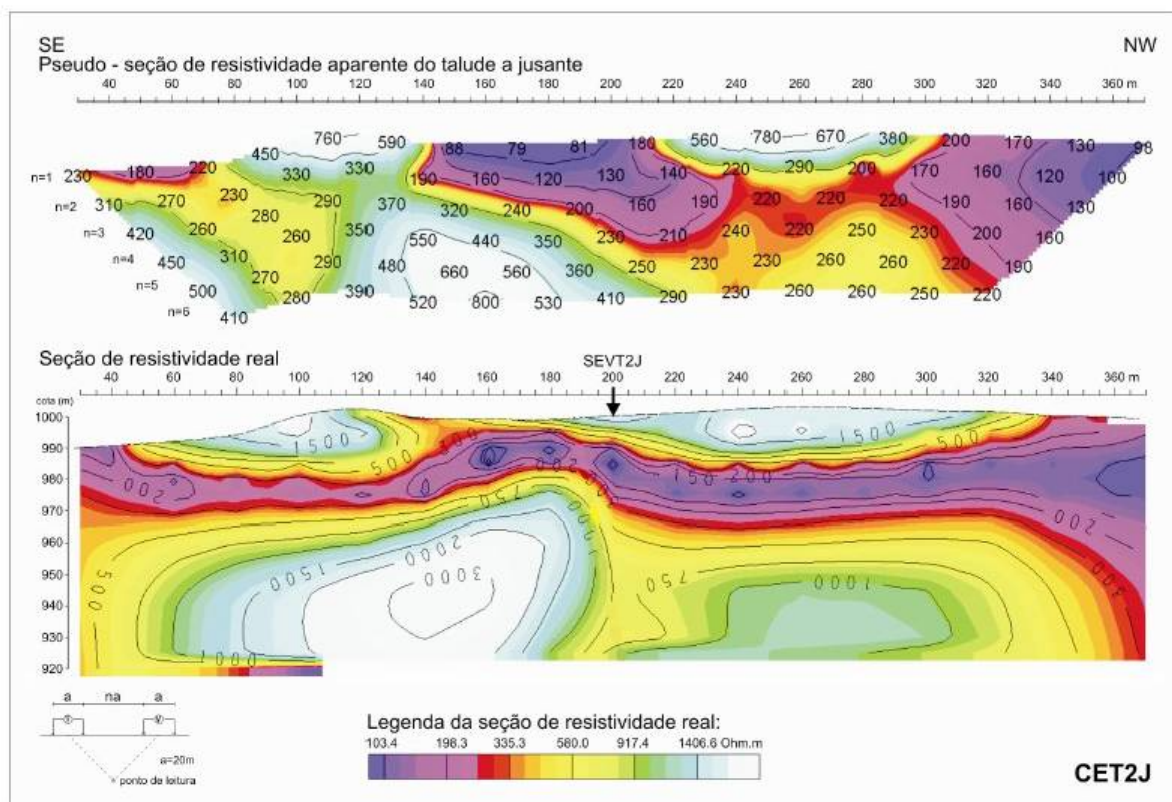
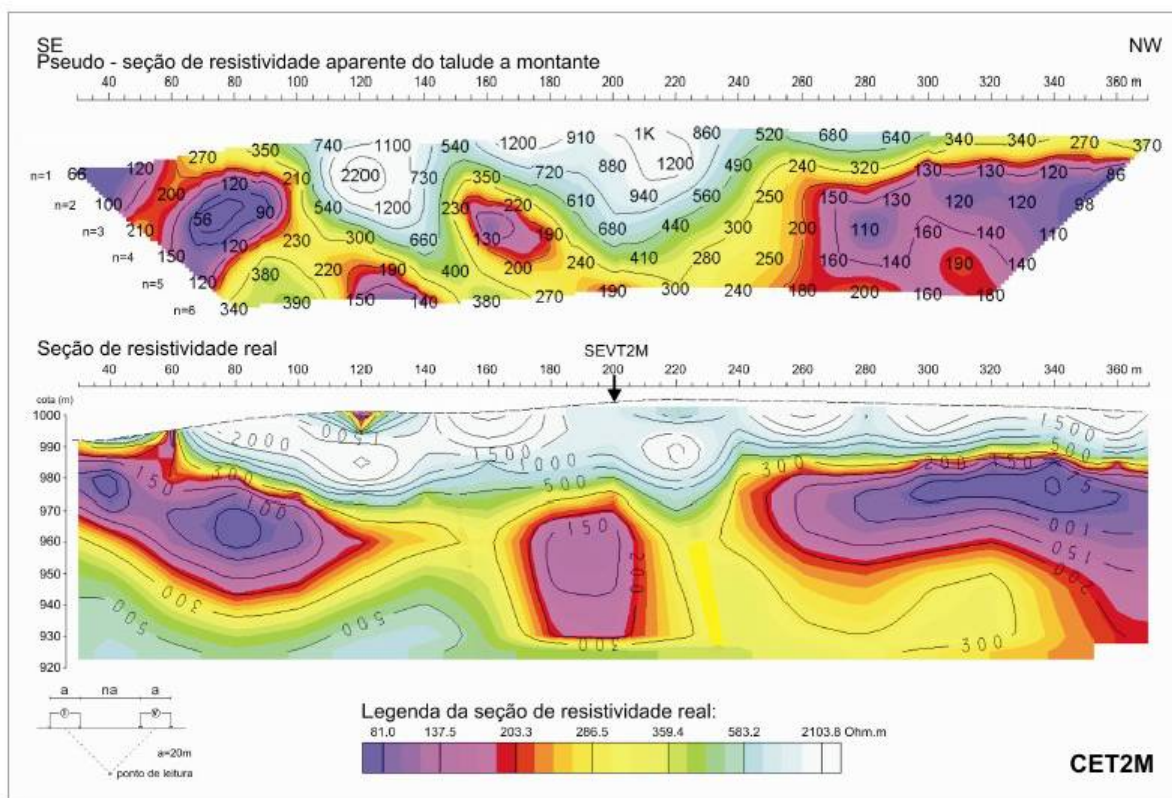


Figura 26 B: Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos. CET2M: trecho 2 – montante; CET2J: trecho 2 – jusante.

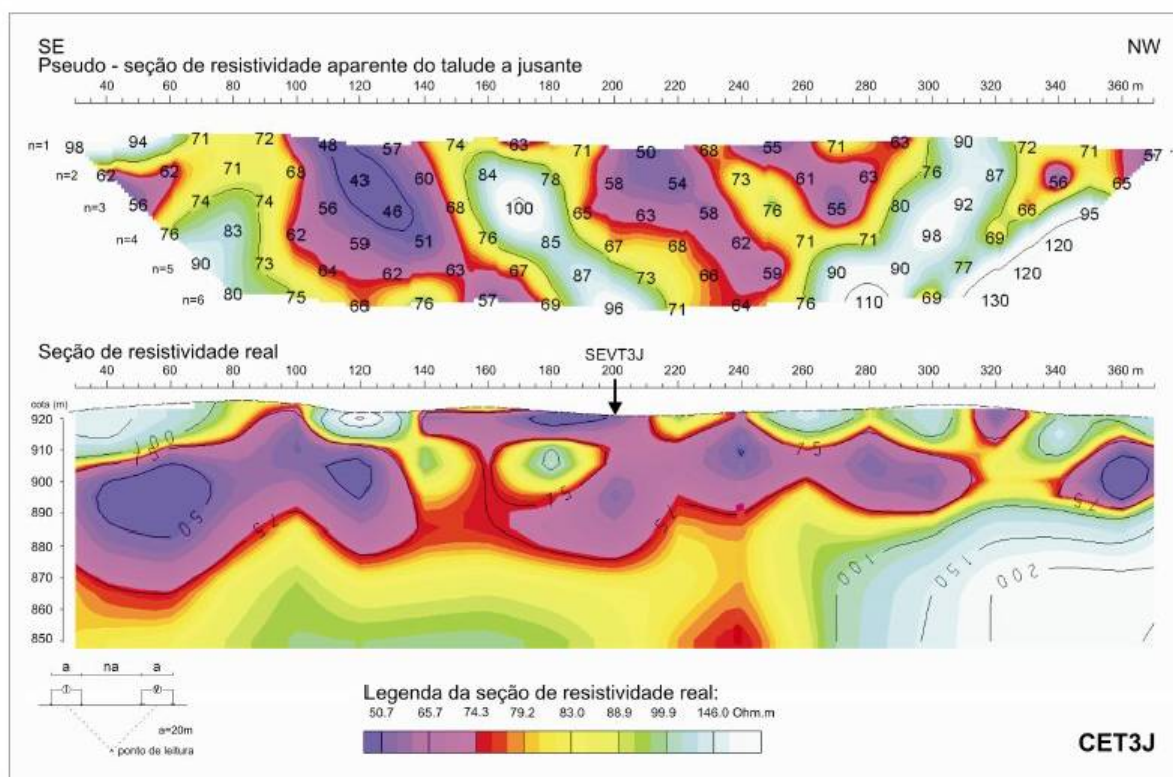
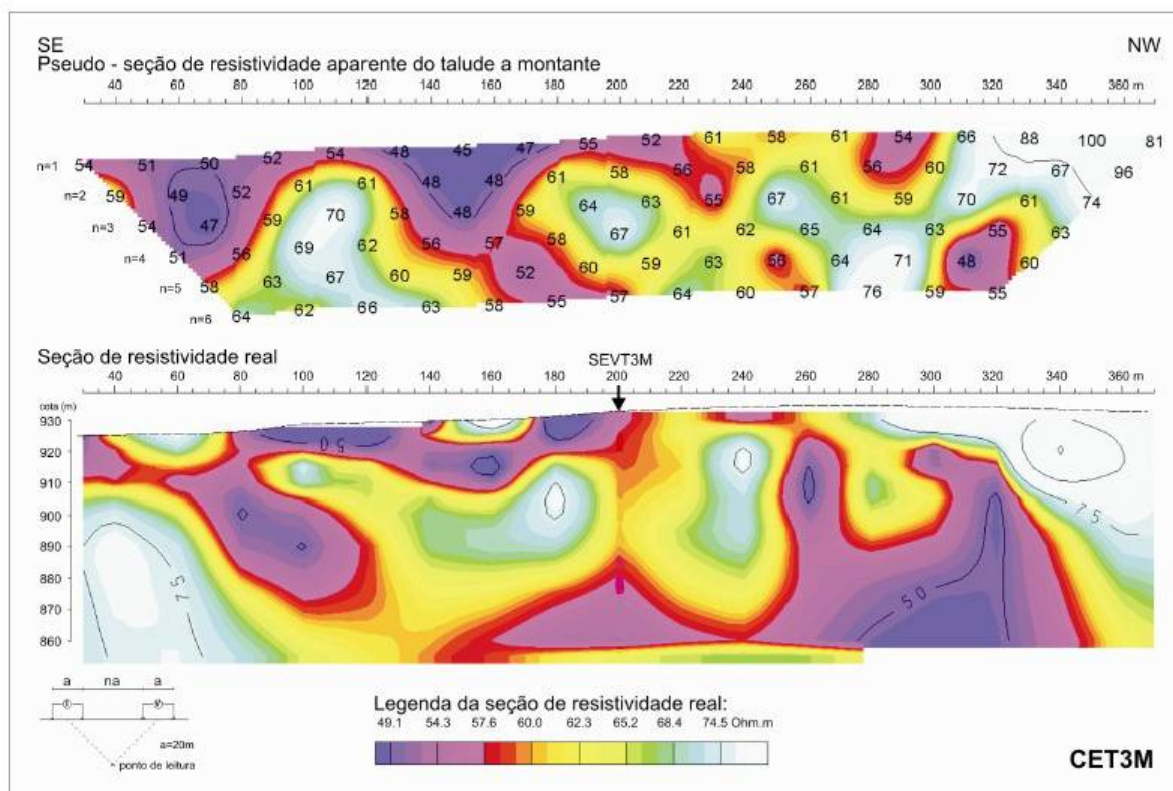


Figura 26 C: Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos. CET3M: trecho 3 – montante; CET3J: trecho 3 – jusante.

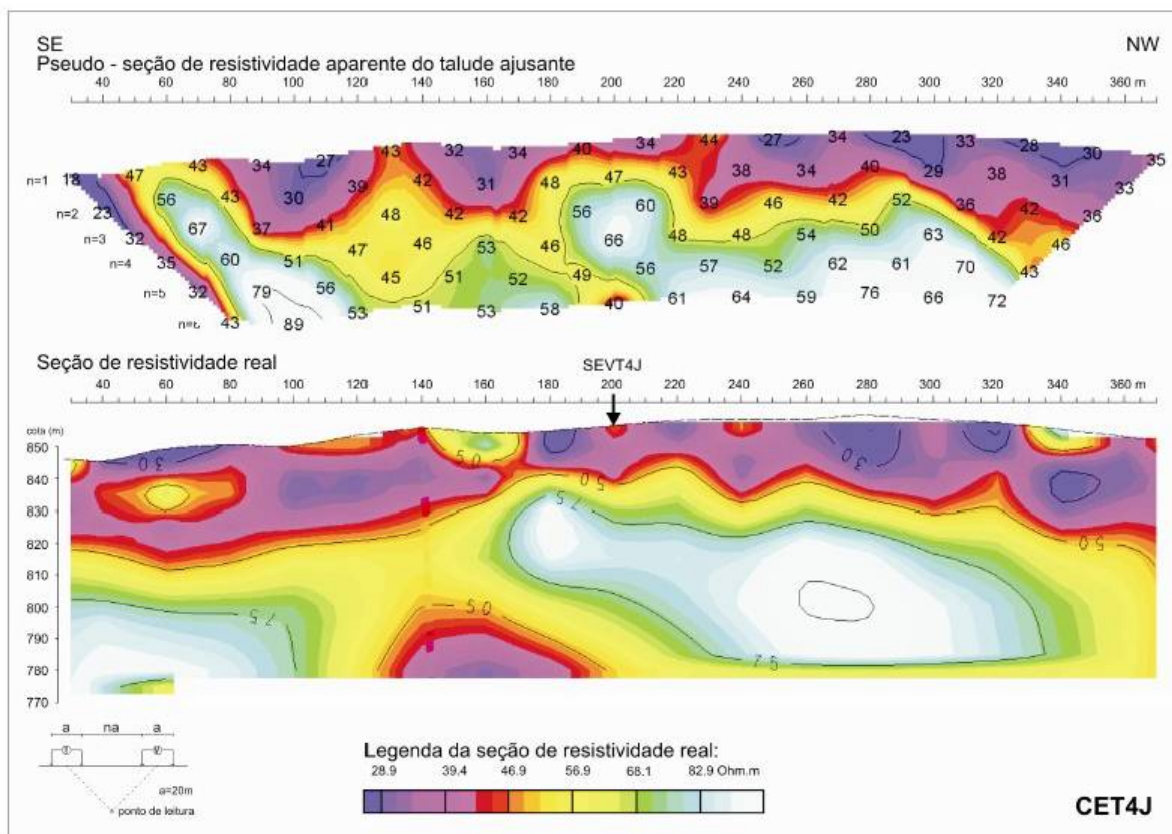
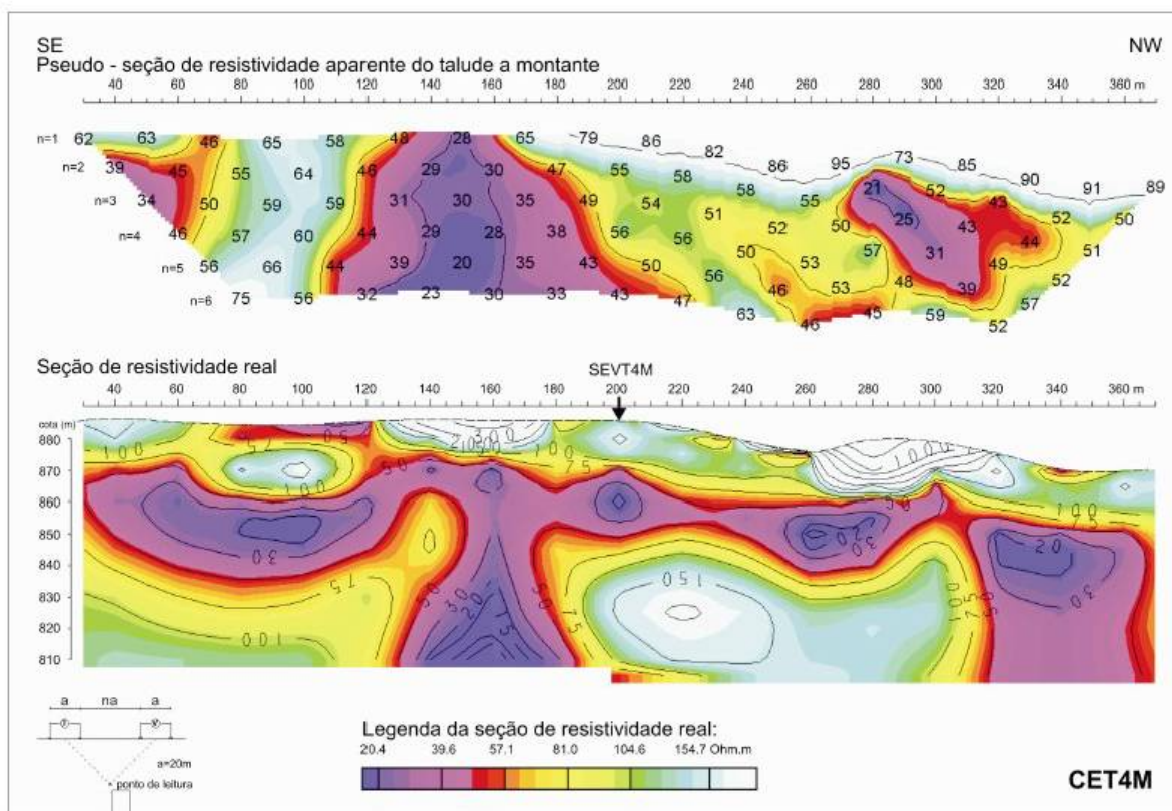


Figura 26 D: Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos. CET4M:trecho 4 – montante; CET4J: trecho 4 – jusante.

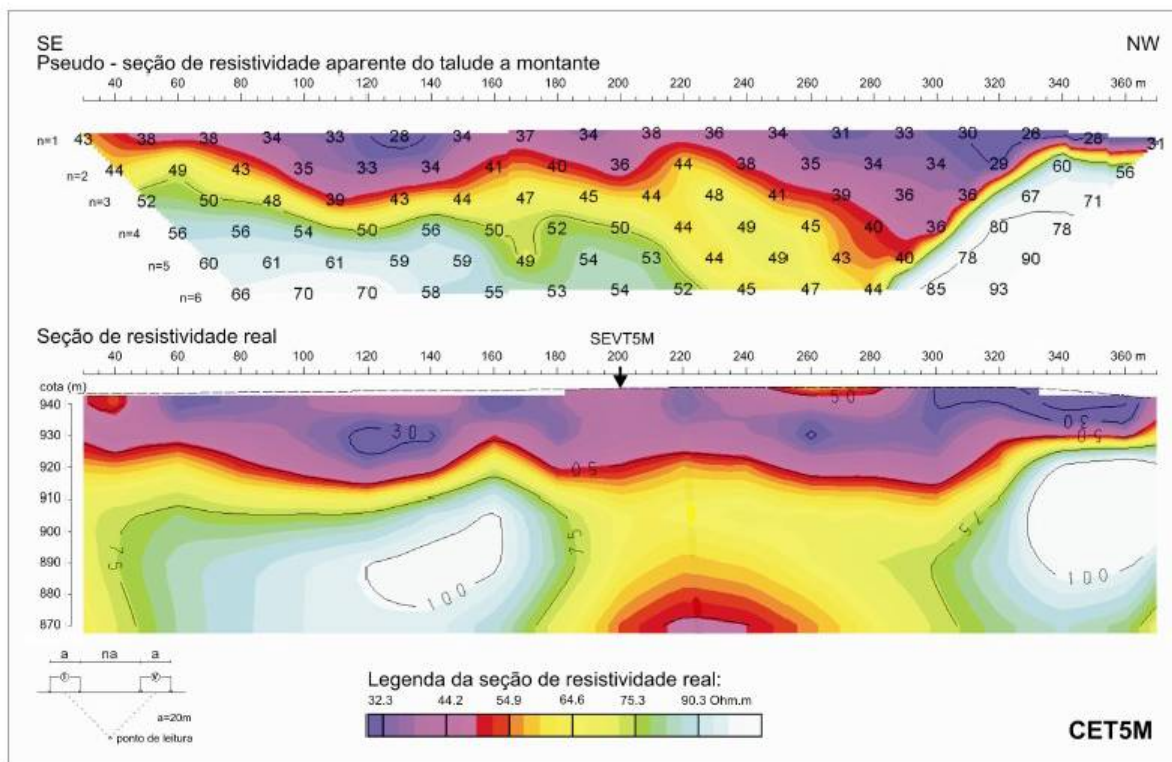
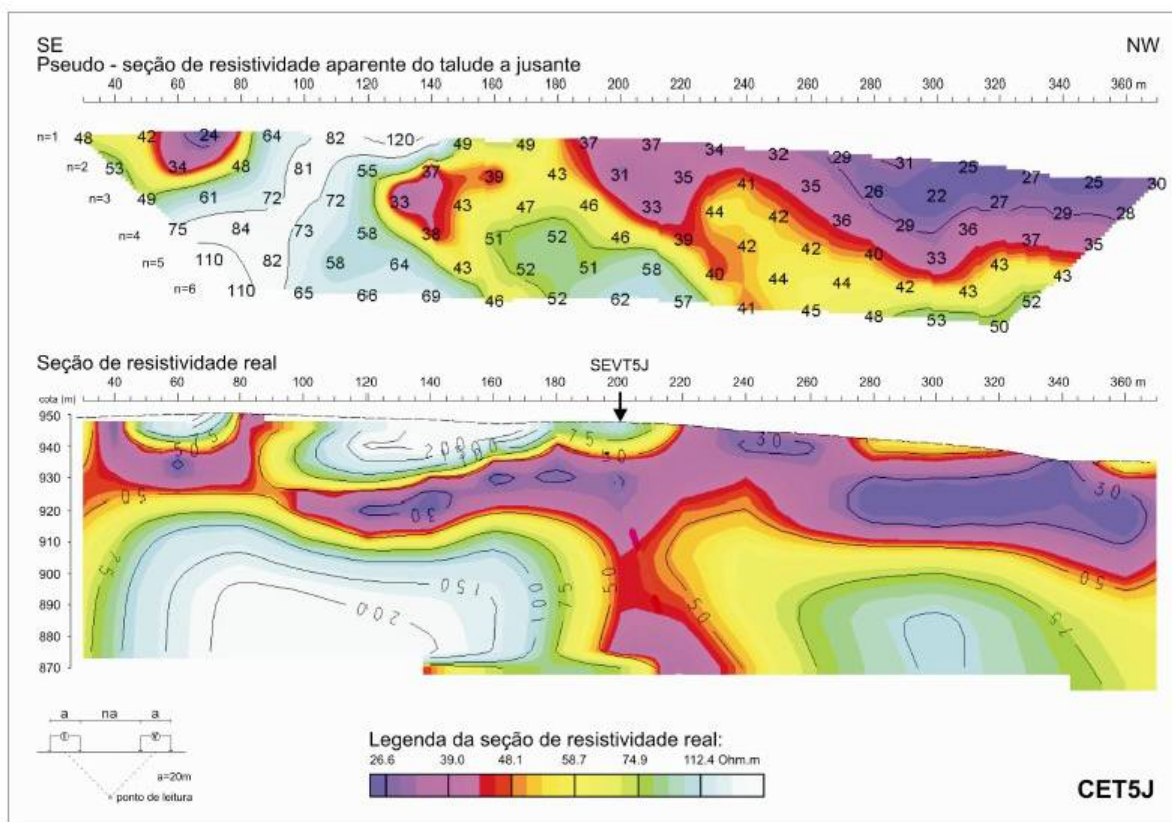


Figura 26 E: Pseudoseções de resistividade aparente e seções de resistividade real dos trechos. CET5J: trecho 5 – jusante; CET5M: trecho 5 – montante.

4. Análise e discussão

Depois de processados todos os dados dos ensaios geofísicos efetuaram-se correlações entre as colunas das sondagens elétricas verticais e os perfis geoeletricos do caminhamento dipolo-dipolo com os dados litológicos verificados em campo, das seções colunares e dados estruturais (fraturas, falhas).

O objetivo dessa atividade foi compreender a disposição dos litotipos no interior do maciço e como se dava a circulação da água subterrânea, se por meio das estruturas ou das camadas permeáveis, confinadas ou não, assim como entender sua relação com as zonas de bombeamento de pelitos. Posteriormente as várias manifestações do problema foram agrupadas em modelos conceituais da causa do problema.

4.1 Trechos

4.1.1 Trecho 1

A partir da interpretação das colunas geoeletricas geradas pelos gráficos da sondagem elétrica vertical (figura 25 A – página 48) foi possível fazer a correspondência com a coluna estratigráfica da área (figura 12 - página 28). Da superfície para a subsuperfície, tal correlação entre a resistividade do terreno e o perfil geológico indicou a seguinte estratigrafia local: solo arenoso com 0,6 a 1m de espessura; solo arenoso compacto (0,6m de espessura); arenito fino com 11,2 a 17,7m de espessura; o estrato de arenito muito fino e siltitos com 38,6m; e na base do perfil um estrato de um litotipo com alta resistividade que pode corresponder a siltito (figura 27 B).

Na curva de resistividade aparente dos dados de campo (cor preta na figura 25 A - página 48) é possível identificar uma feição não evidenciada pelo modelo de resistividade teórica. A 7m de profundidade na curva de montante (25 SEVT1M – página 48) e a 10m na curva de jusante (figura 25 SEVT1J – página 48) as curvas apresentam uma inflexão negativa representando uma resistividade mais baixa que corresponde à transição no estrato de arenitos finos de rocha seca para rocha saturada com água, representado por uma camada em azul na figura 27B.

Outro aspecto a ser considerado é que no gráfico da SEV de montante (figura 25 - SEVT1M) a transição do estrato de arenitos finos e siltitos para o estrato mais resistivo é gradativa, e no gráfico da SEV de jusante (figura 25 - SEVT1J) essa transição é abrupta, apresentando a curva de dados medidos em campo mais inclinada que a montante.

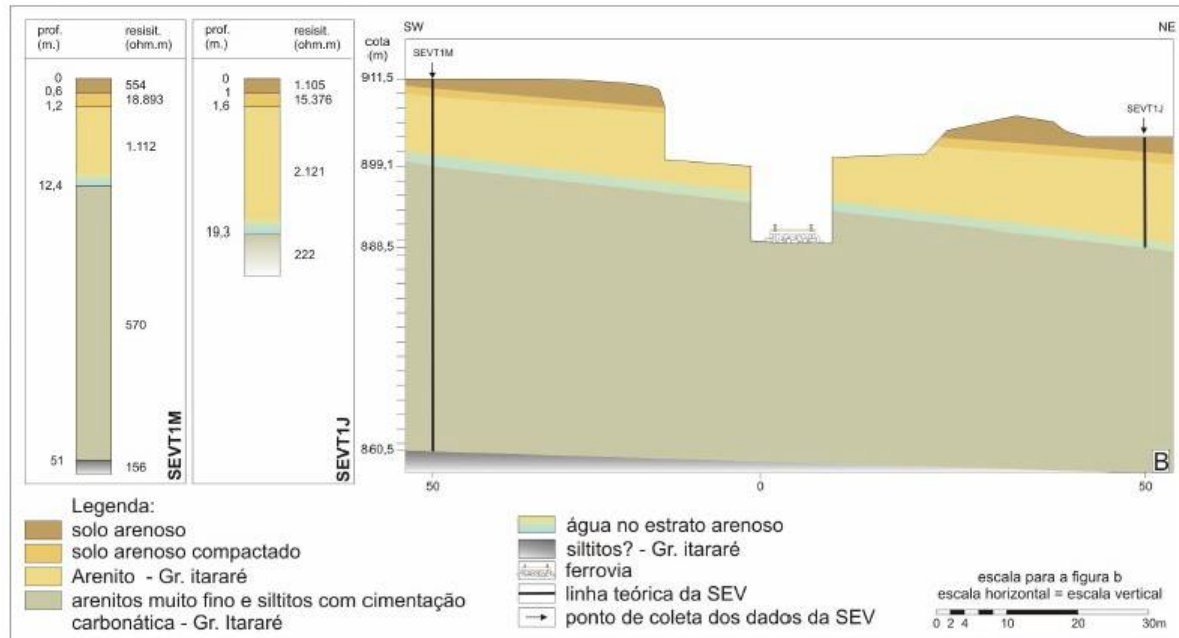


Figura 27: Colunas geoeletricas e interpretação geologica das colunas geoeletricas no trecho 1. SEVT1M: Coluna geoeletrica do corte a montante na a direita e SEVT1J: Coluna geoeletrica do corte a jusante na esquerda; B: Perfil geológico com a posição em cota dos dados geoeletricos do trecho 1.

As seções de resistividade real de montante (SW) (figura 28 CET1M) e jusante (figura 28 CET1J)(NE) indicam um núcleo resistivo profundo ladeado por zonas condutivas e uma camada horizontal no topo resistiva com 20m de espessura máxima.

Ao fazer a correspondência com os dados de campo foram elaborados os perfis geológicos do trecho (figura 28 A e B), nos quais o núcleo central com resistividade superior a 500 Ohm.m corresponde ao dique de gabro, o estrato superior, com resistividade superior a 1.000 Ohm.m, ao estrato de arenito fino, e a camada inferior com resistividade inferior a 150 Ohm.m aos arenitos muito finos e siltitos condutivos da base da seção.

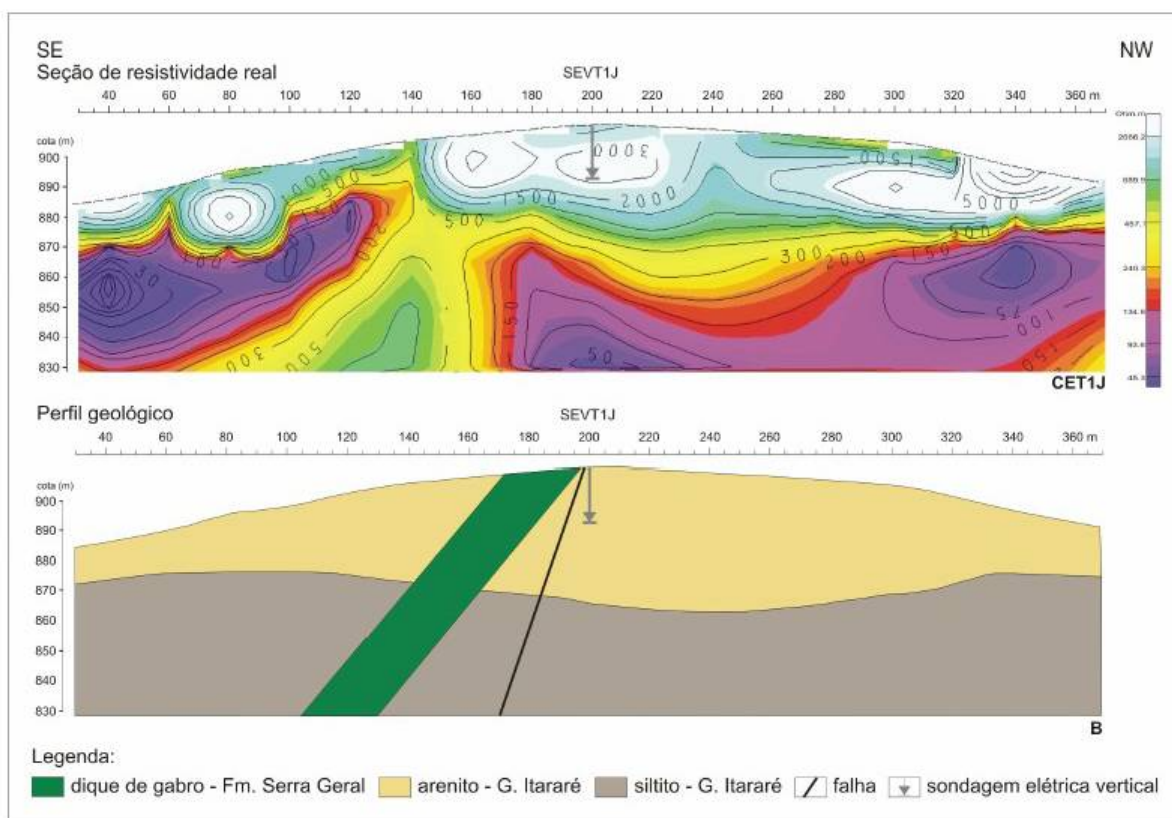
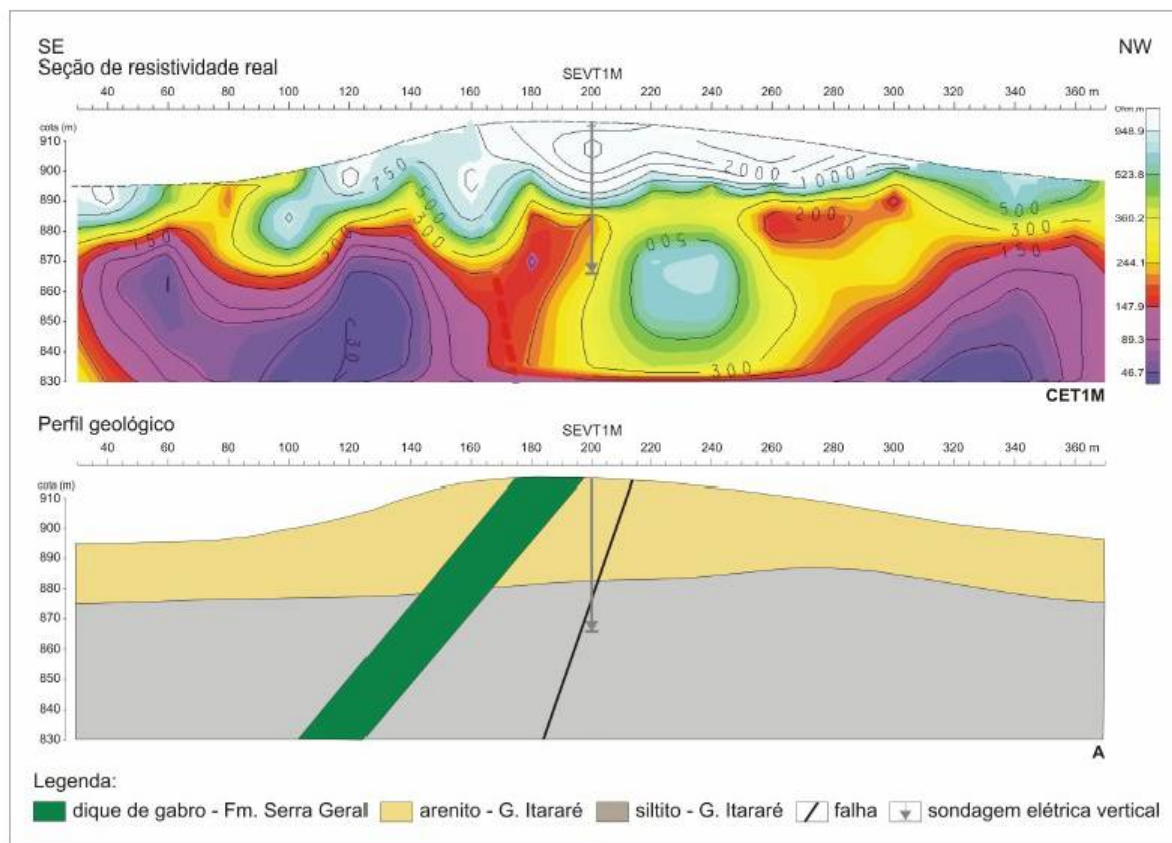


Figura 28: Correlação da resistividade com as informações litológicas e estruturais*. CET1M e CET1J: Seções de resistividade invertida a montante e a jusante respectivamente; A e B: Correspondência litoestrutural com a resistividade a montante e a jusante respectivamente.

Observam-se alguns pequenos núcleos assinalados em preto na camada superior correspondente ao arenito fino indicados na figura 29. Tais feições foram (ou são) correlacionadas às saídas localizadas de água no corte do talude observado em campo e representam zonas de maior circulação de água no local. Apresentam resistividade superior a 1.000 Ohm.m e são áreas mais resistivas do terreno, dentro do estrato de arenito fino, tendo sido interpretadas como “dutos” ou zonas preferenciais de percolação de água com alta porosidade. Anomalias geofísicas semelhantes também foram (ou são) identificadas em outros pontos no perfil sob a ferrovia, na cor cinza e provavelmente tratam-se de condutos ou zonas de maior porosidade e permeabilidade efetiva com percolação de água correspondentes aos locais de maior problema de recalque na estrutura ferroviária com resistividade maior que 1000 Ohm.m.

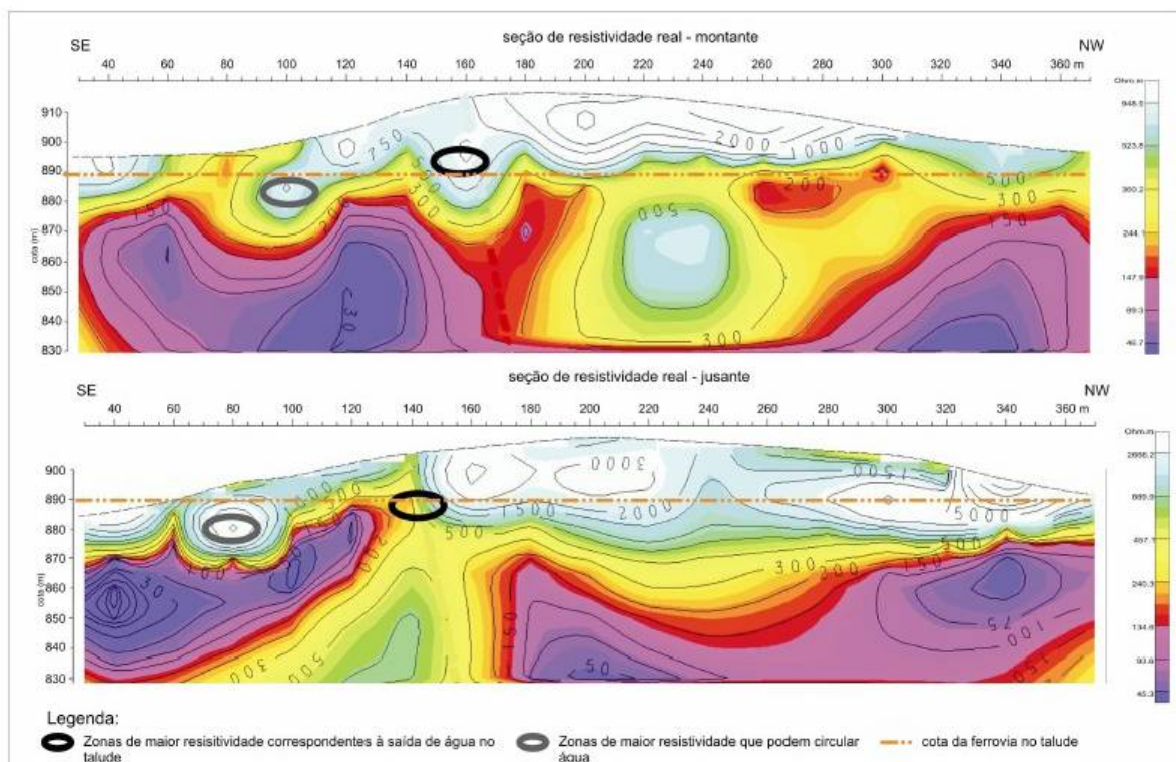


Figura 29: Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 1.

4.1.2 Trecho 2

A coluna geoeletrica de montante (corte SE) (figura 30 SEVT2M) corresponde a uma sucessão de camadas interpretadas de acordo com os dados de campo da superfície para a subsuperfície como: solo de alteração no topo, com espessura de 0,6m, *sill* de basalto bastante resistivo com 0,6m de espessura, estrato de argilito com 5,9m de espessura, uma camada que não aflora no talude com 6,1m de espessura e pode ser um arenito, um estrato de argilito com 20m de espessura média e um estrato mais resistivo em subsuperfície pode corresponder a um arenito (figura 30B). À jusante (corte NW) (figura 30 SEVT2J) a correlação evidencia o *sill* de basalto no topo com 3,5m de espessura, o argilito na base com e 37,5m de espessura (figura 14 – página 31) e um estrato muito resistivo não mapeado na sub-superfície do terreno (figura 30 SEVT2J e B), que corresponde a uma camada de altíssima resistividade média (16.890 Ohm.m).

De acordo com os gráficos de resistividade (figura 25 B – página 48) observa-se que tanto a montante como a jusante as rochas tem o mesmo comportamento resistivo, onde a curva de resistividade aparente sofre uma inflexão negativa e aumenta de valor, mas a profundidades diferentes: 30m a montante e 40m a jusante.

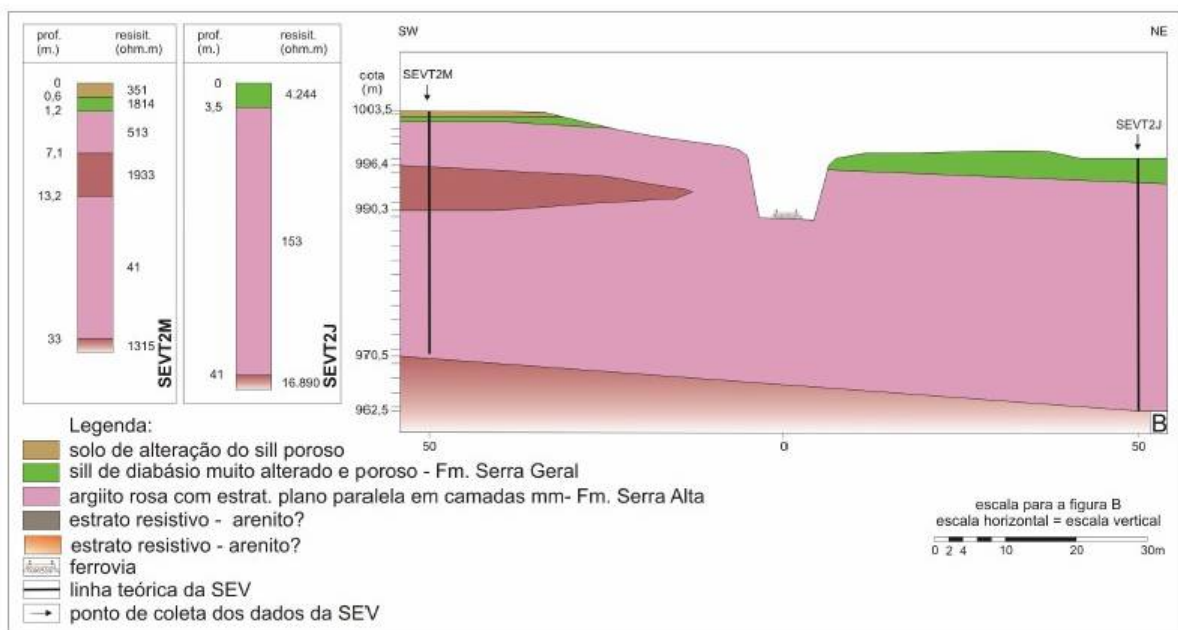


Figura 30: Colunas geoeletricas e interpretação geológica das colunas no trecho 2. SEVT2M: Coluna geoeletrica do corte a montante na direita; SEVT2J: Coluna geoeletrica do corte a jusante na esquerda; B: Perfil geológico com posição em cota dos dados geoeletricos.

A seção de resistividade calculada de montante (SW) (figura 31 CET2M) mostra que a zona condutiva em subsuperfície é interrompida por dois segmentos mais resistivos interpretadas como um dique de basalto a SE, correspondente ao dique da Formação Serra Geral e à zona de falha a NW subvertical com direção N82E/90° (figura 13 - página 30).

A seção de resistividade real de jusante (figura 31 CET2J) revelou uma interferência inclinada mais resistiva a SE correspondente ao dique de basalto, e a existência de um segmento subvertical resistivo a NW que foi interpretado como a zona de falha N82E/90°.

Foram delimitadas uma camada superficial resistiva superior a 500 Ohm.m, que corresponde ao *sill* de basalto alterado tanto a montante como a jusante; uma camada que corresponde ao estrato de argilito com 20m de espessura média e resistividade inferior a 300 Ohm.m; e uma camada resistiva na base, com 500 a 1.000 Ohm.m, que corresponde a uma camada provavelmente mais porosa que não aflora no talude, portanto não identificada.

Na seção de montante pode-se definir dois núcleos mais resistivos que correspondem às zonas mais porosas com percolação pontual de água e resistividade acima de 2.000 Ohm.m observadas em campo, marcada em preto na figura 32 a montante e a jusante.

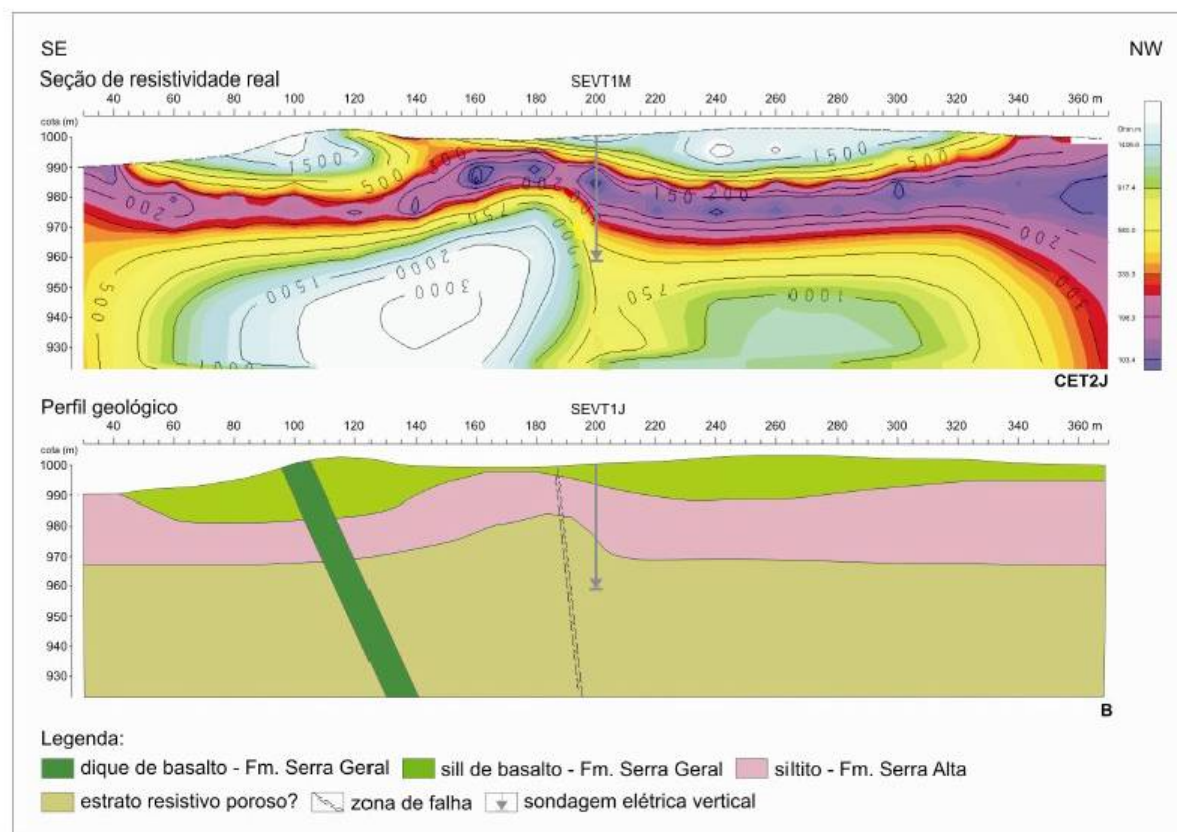
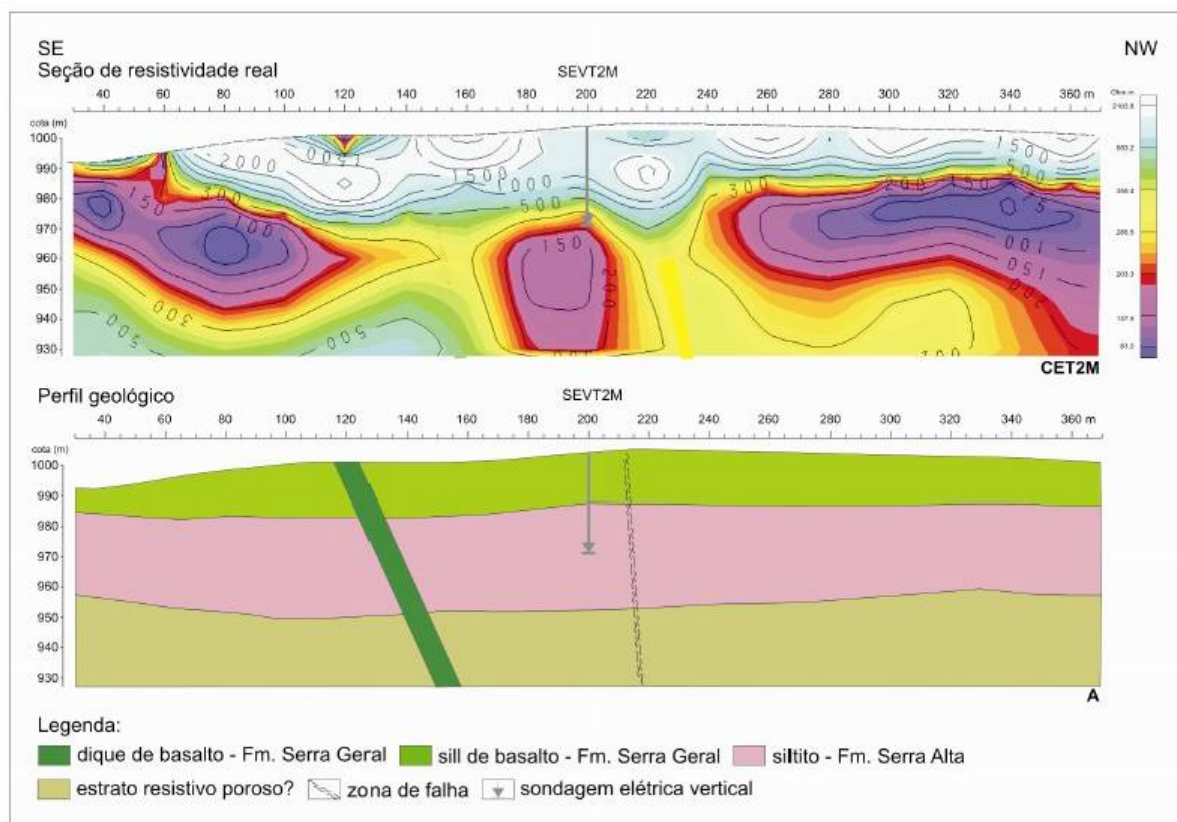


Figura 31: Correlação da resistividade com as informações litológicas e estruturais*. CET2M e CET2J: Seções de resistividade invertida a montante e a jusante respectivamente; A e B: Correspondência litoestrutural com a resistividade a montante e a jusante respectivamente.

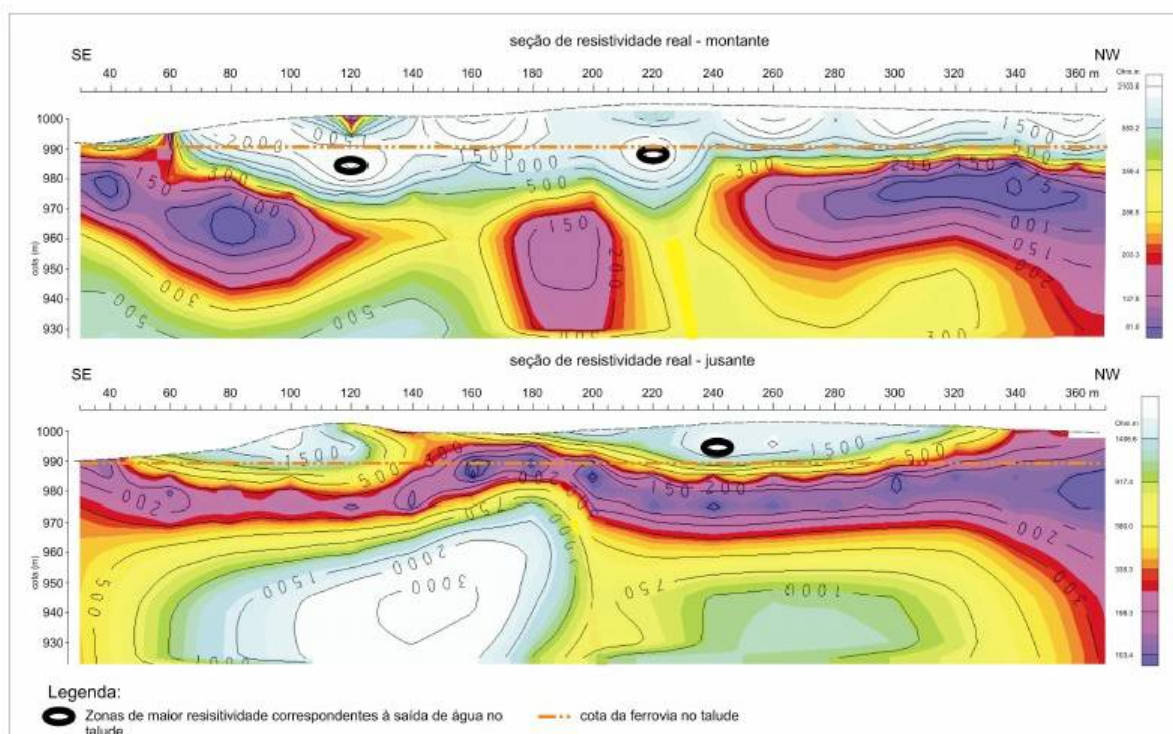


Figura 32: Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 2.

4.1.3 Trecho 3

A interpretação das colunas geolétricas do trecho representam um perfil, da superfície para a subsuperfície, de: solo argiloso no topo com 0,8 a 1m de espessura, muito resistivo devido a existência de espessa cobertura vegetal na linha de coleta; um estrato de siltito com 1,6 a 4,8m de espessura; um estrato de siltito com cimentação carbonática, com 15,3 a 17,8m de espessura, mais espesso à montante do que a jusante; e um estrato a montante com 85,3m de espessura, que deve corresponder à camada de siltito inferior à cota de 23m na coluna geolétrica de jusante (figura 33 SEVT3M e SEVT3J). Na coluna geolétrica da montante do corte a cerca de 103m de profundidade a resistividade aumenta para 528 Ohm.m e pode corresponder a uma camada mais poroso (figura 33 SEVT3M).

Os dois gráficos de resistividade aparente (figura 25 SEVT3M e SEVT3J) apresentam o mesmo comportamento resistivo.

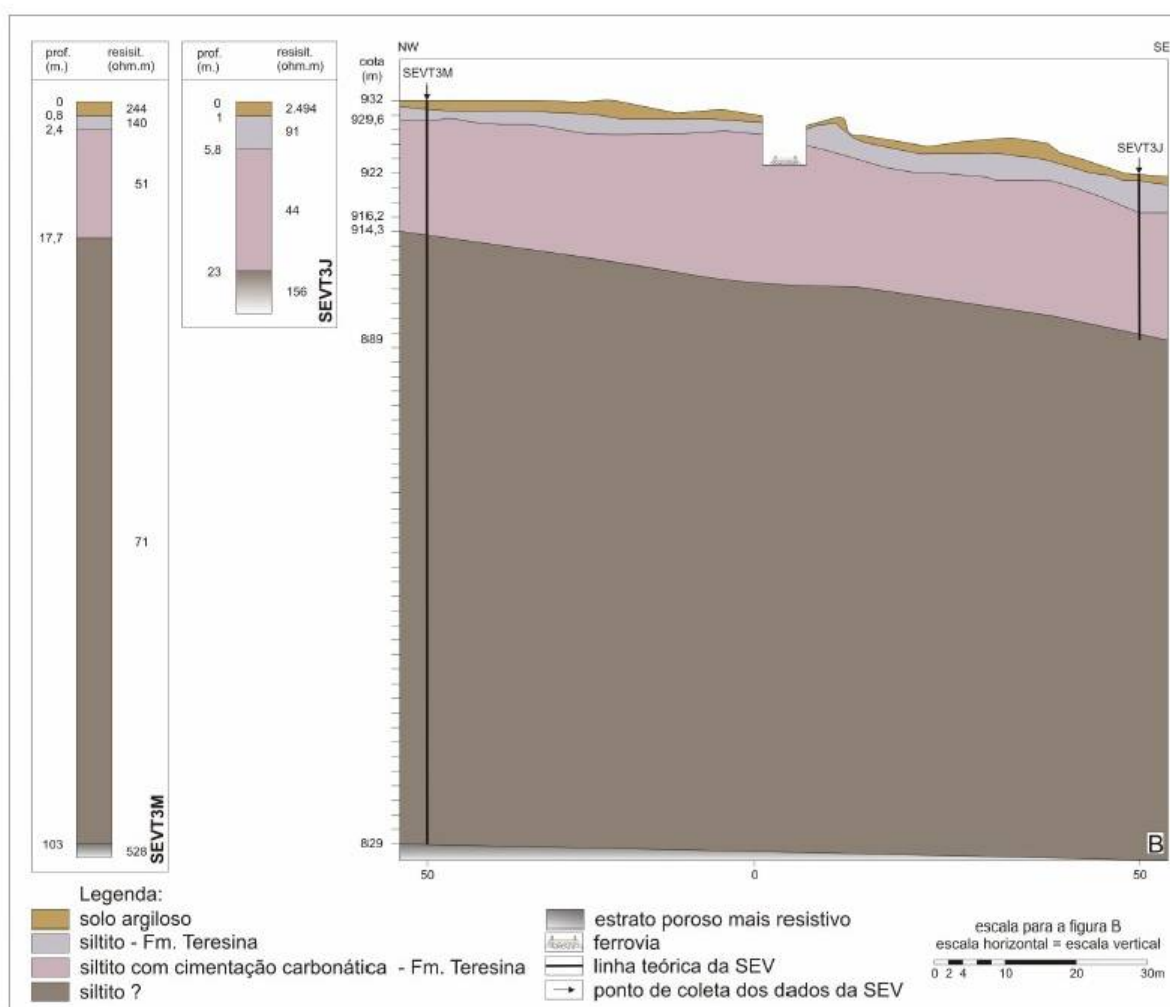


Figura 33: Colunas geoeletricas e interpretação geológica das colunas geoeletricas no trecho 3. A SEVT3M: Coluna geoeletrica do corte a montante na a direita e SEVT3J: Coluna geoeletrica do corte a jusante na esquerda; B: Perfil geológico com a posição em cota dos dados geoeletricos do trecho 3.

A seção de montante do caminhamento elétrico (NW) apresenta-se muito descontínua (figura 34 CET3M) devido ao alto número de fraturas observadas em campo no talude. São interpretadas várias estruturas subverticais retilíneas como fraturas (Fr1, Fr2 e Fr3) e a falha observada em campo com direção N86W/85SW, esta bastante contínua. A condutividade é alta, com valores entre 50 a 75 Ohm.m, correspondentes ao estrato de siltito (figura 34 A). A jusante (SE) a camada condutiva com resistividade inferior a 75 Ohm.m é contínua (figura 34 CET3J) e também corresponde ao estrato de siltito fraturado (figura 34 B). São interpretados também neste estrato as estruturas retilíneas: fraturas correspondentes às de montante (Fr1, Fr2 e Fr3) e a falha N86W/85SW. Na base da seção a jusante também se observa uma camada horizontal pouco mais resistiva (acima de 75 Ohm.m em média) que pode

corresponder a uma transição para um estrato mais poroso, mas que não aflora na região (figura 34 CET3J e B).

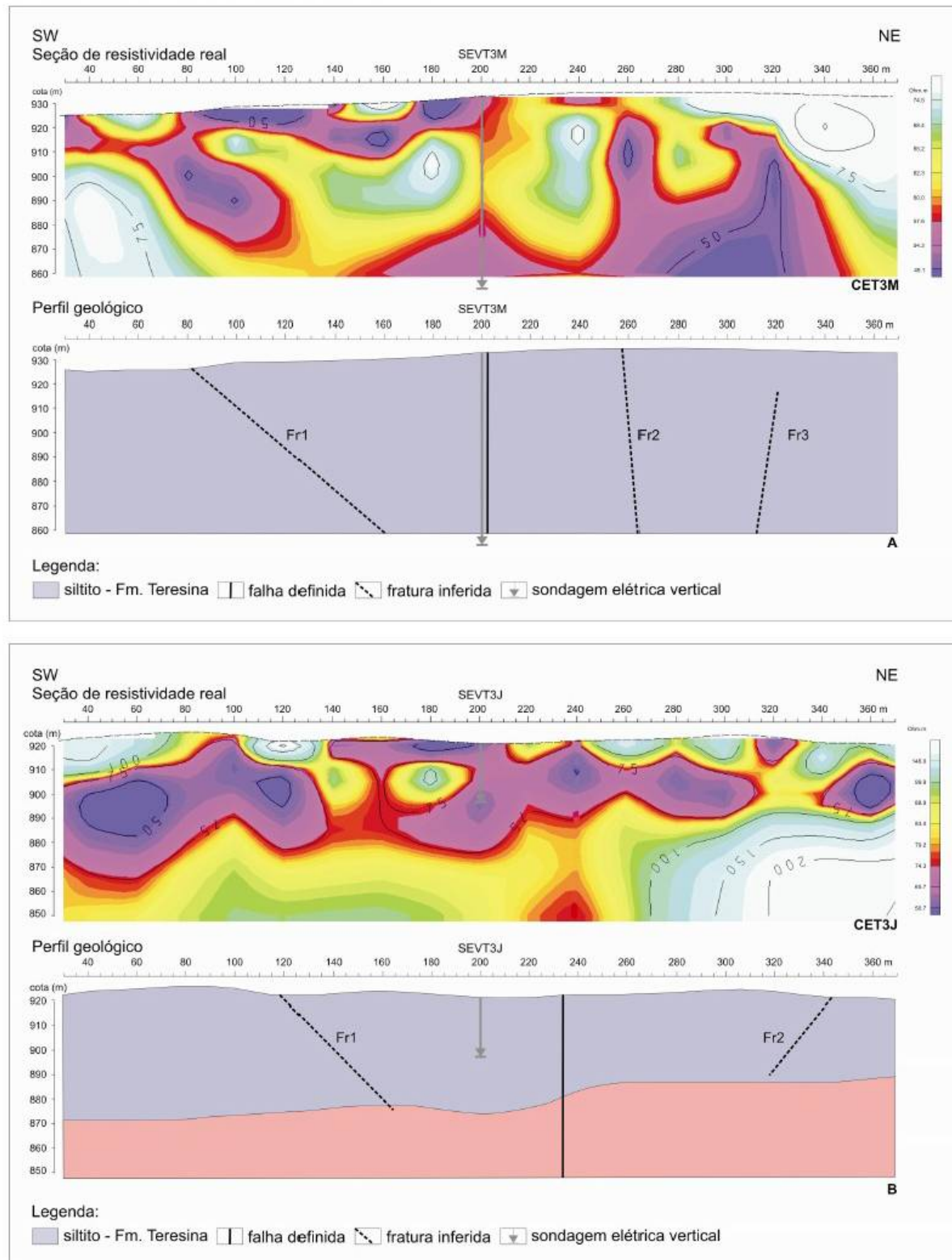


Figura 34: Correlação da resistividade com as informações litológicas e estruturais*. CET3M e CET3J: Seções de resistividade invertida a montante e a jusante respectivamente; A e B: Correspondência litoestrutural com a resistividade a montante e a jusante respectivamente.

Destacam-se a existência de vários núcleos resistivos, acima de 100 Ohm.m, que devem corresponder a fraturas abertas que podem circular água assinalados em cinza na figura 35.

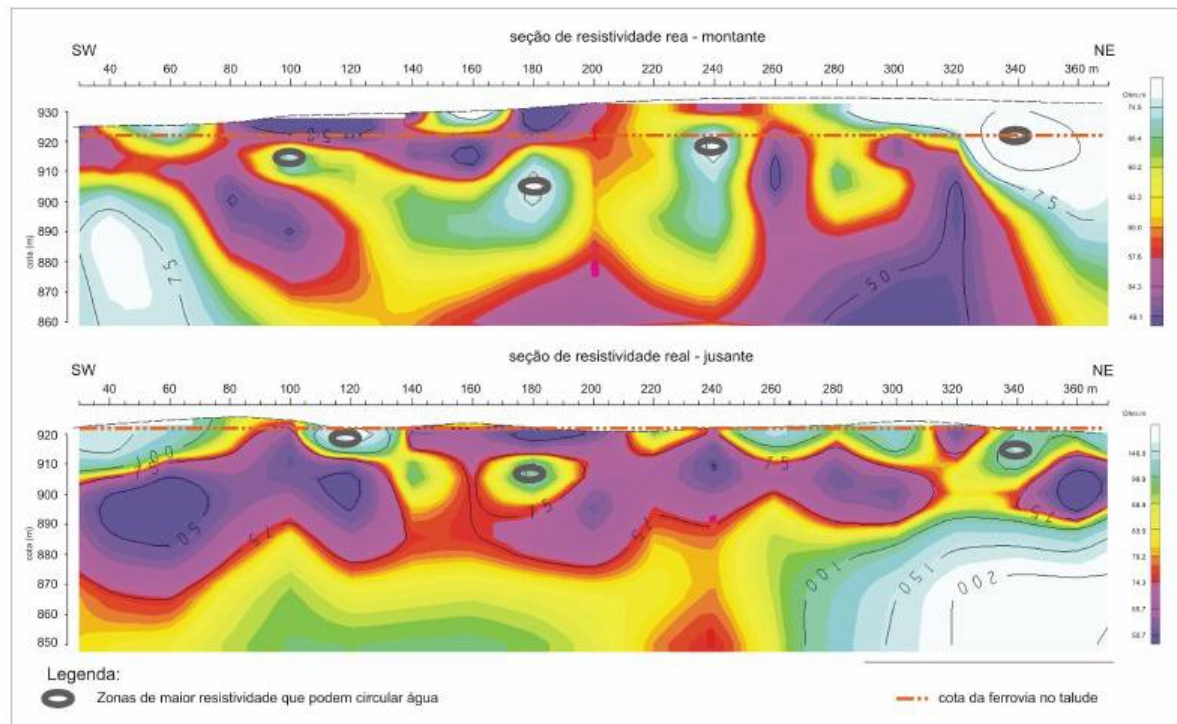


Figura 35: Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 2.

4.1.4 Trecho 4

A coluna geolétrica de montante (corte a SW) (figura 36 SEVT4M) reflete a disposição em camadas da superfície para a subsuperfície de: solo de alteração do dique (regolito) com 0,5m de espessura; solo de alteração do siltito com 3,5m de espessura; e camadas pouco resistivas, que correspondem a estratos de siltitos e siltitos com cimentação carbonática com 15,7m e 25,3m de espessura respectivamente (figura 36 SEVT4M e B). No corte de jusante (figura 36 SEVT4J) a coluna geolétrica revela em perfil a seguinte estratigrafia: solo de alteração do siltito com 1,2m de espessura no topo, e uma camada de siltito com que apresenta cimentação carbonática na base com 30,3m de espessura. Ambas as sondagens elétricas verticais mostram na base um estrato mais resistivo que pode corresponder a um litotipo mais poroso.

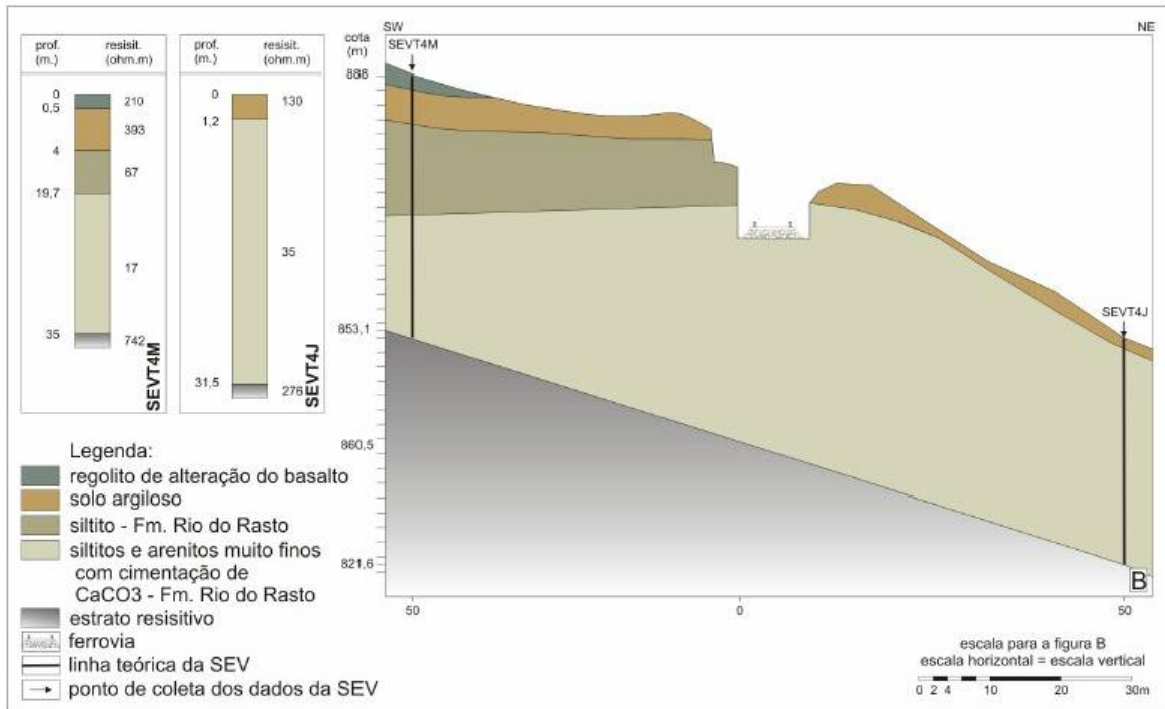


Figura 36: Colunas geolétricas e interpretação geológica das colunas geolétricas no trecho 4. SEVT4M: Coluna geolétrica do corte a montante na a direita e SEVT4J: Coluna geolétrica do corte a jusante na esquerda; B: Perfil geológico com a posição em cota dos dados geolétricos do trecho 4.

Nas seções de resistividade real de montante (SW) e jusante (NE) (figura 37 CET4M e CET4J) é possível interpretar estratos horizontais e feições tabulares verticais. Ao fazer a correspondência com os dados de campo definiu-se que a montante o estrato superior resistivo com 100 a 1.000 Ohm.m em média correspondente à camada regolito do dique de montante a SW observado na figura 19 (figura 37 CET4M e A). Tanto a montante como a jusante há um estrato condutivo com resistividade abaixo de 30 Ohm.m, que é a seqüência sedimentar de siltitos e arenitos muito finos com cimentação carbonática na base mapeado em campo (fig 20). Na base em subsuperfície há um estrato resistivo que pode ser um estrato arenoso, mas não aflorante em campo (figura 37 A e B). A estrutura tabular vertical resistiva a montante e a jusante (menos claro) corresponde ao dique de basalto com 30 a 50 Ohm.m (figura 37 A e B).

Há uma zona a montante com resistividade acima de 100 Ohm.m (figura 38), assinalado em preto, que corresponde à saída de água à montante no talude (foto 19, página 41). A circulação da água que causa o problema na plataforma se dá pelo dique de basalto a montante, posto que a rocha se encontra muito alterada e porosa. Tanto a montante como a jusante existem zonas de circulação de água não observadas na superfície.

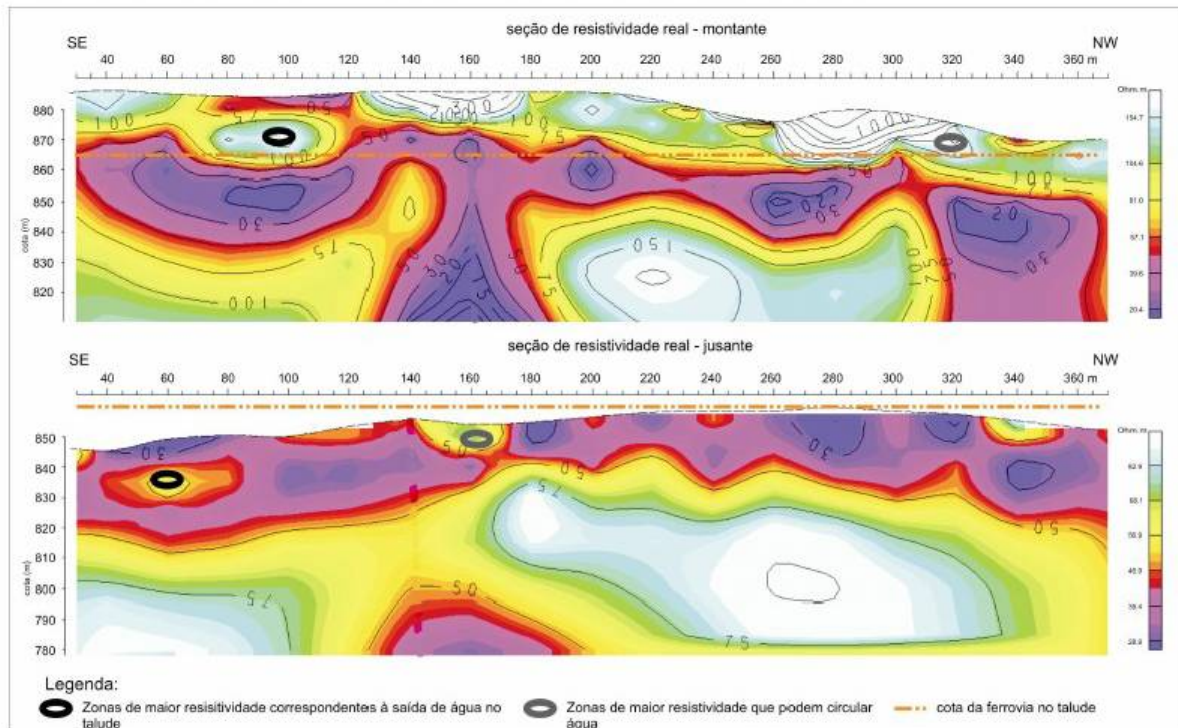


Figura 38: Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 2.

4.1.5 Trecho 5

Nas colunas geoelétricas deste trecho identificam-se camadas correspondentes a siltitos, como pode ser observado na figura 39B. À jusante e a montante afloram, em perfil, da superfície para a subsuperfície: uma camada de solo com 1,2 a 0,5m de espessura, uma camada de siltito com cimentação carbonática com 2,9 a 3,5m de espessura, um estrato de siltito com 32,2 a 19,3 m de espessura, e na base uma camada mais resistiva. Na coluna de montante também se identificou um estrato com 15,7m de espessura que não aflora no talude e pode corresponder a siltitos um pouco mais resistivos.

Nos gráficos (figura 25 SEVt5J e SEVT5M) a curva de resistividade de dados de campo de jusante e montante discrimina esses estratos com as inflexões bem evidentes e correspondem em campo a estratos com cimentação carbonática as camadas mais condutivas e a estratos de siltitos não cimentados as camadas mais resistivas (figura 39 SEVT5J, SEVT5M e B).

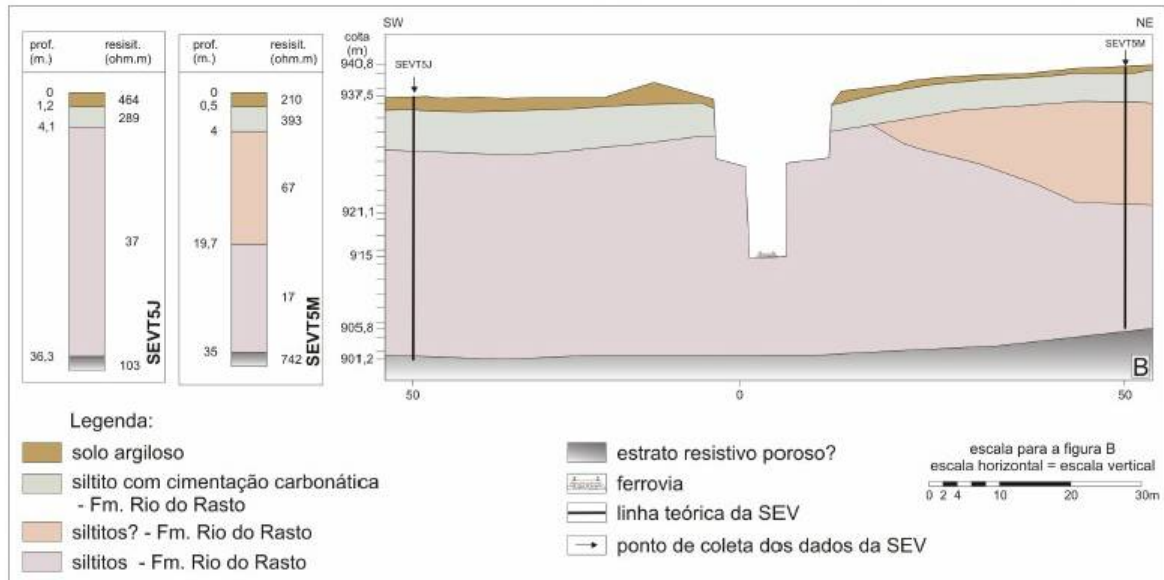


Figura 39: Colunas geolétricas e interpretação geológica das colunas geolétricas no trecho 5. SEVT5J: Coluna geolétrica do corte a jusante na esquerda e SEVT5M: Coluna geolétrica do corte a montante na a direita; B: Perfil geológico com a posição em cota dos dados geolétricos do trecho 5.

Nas seções de resistividade real de jusante e montante é possível supor a existência de duas camadas horizontais, uma no topo condutiva, com resistividade abaixo de 50 Ohm.m, que corresponde em campo a estratos de siltitos (figura 23 – página 46) e outra na base resistiva com valores acima de 500 Ohm.m, em subsuperfície (figura 40 CET5J e CET5M). Também é possível definir uma estrutura subvertical retilínea que corresponde à fratura subvertical tanto a montante como a jusante, que corresponde à fratura N77W/76SW, bem evidente no talude de montante, mas não à jusante (figura A e B).

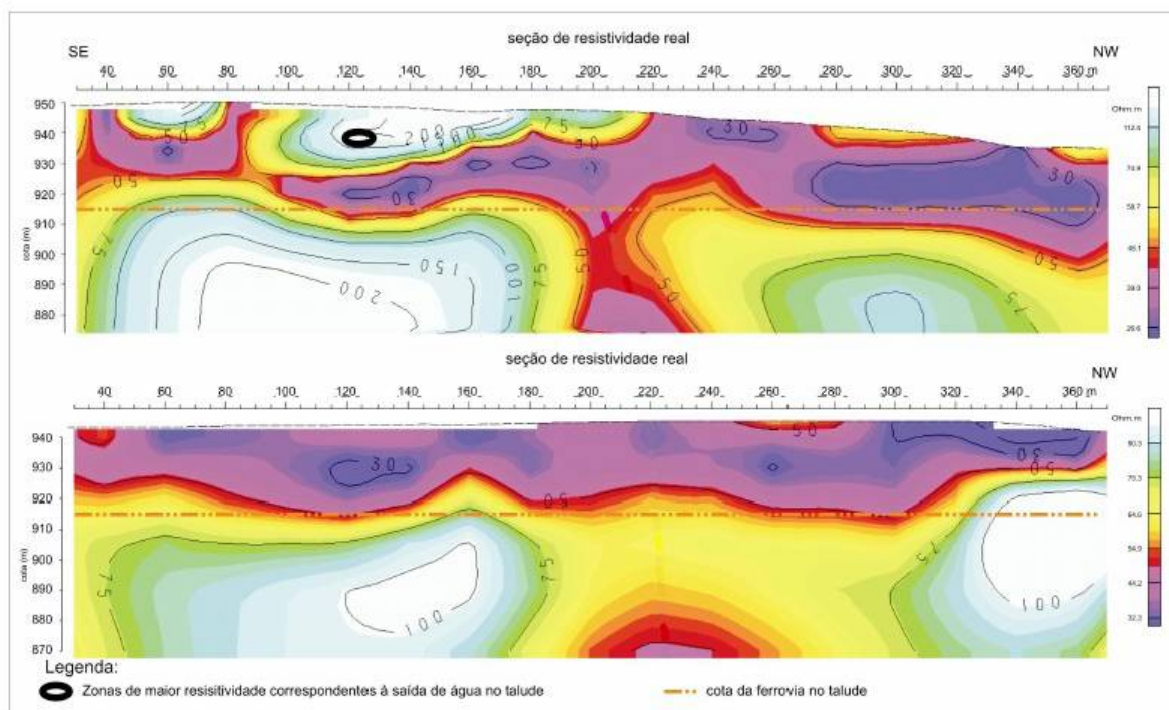


Figura 41: Correlação da resistividade com locais de saída ou circulação de água no trecho 2.

4.2 Modelos conceituais

A partir do confronto dos dados geológicos e observações de saídas localizadas de água ou umidade constante no talude com interpretação das sondagens elétricas verticais e perfis geoeletricos foi possível agrupar os modos principais de circulação da água em três modelos apresentados a seguir. Neste capítulo também é descrito o processo de circulação da água em cada trecho, a partir da análise dos dados da pesquisa.

4.2.1 Modelo 1: contato entre estrato altamente permeável e pouco permeável

Neste tipo a água percola num estrato altamente permeável, confinado na base por um estrato pouco permeável e verticalmente por um litotipo de baixa permeabilidade. Este modelo tem como representante o trecho 1.

Neste trecho a água flui pela base do estrato arenoso (figura 12). Seu fluxo descensional é impedido pela camada de siltito com estratificação plano-paralela do topo do estrato inferior (figura 12). A água circula na base do estrato, no arenito grosso, até atingir a superfície de corte do talude (figuras

27B e 42 A), e escorre pela parede como observado na foto 11. O arenito é moderadamente alterado, mas incoerente, com pouca matriz argilosa. Apresenta permeabilidade muito maior do que a do siltito, que é medianamente alterado e pouco coerente, o que induz a circulação de água pelo estrato arenoso. O dique de microgabro, moderadamente alterado, coerente e impermeável, constitui outra barreira vertical ao movimento da água, o que explica o volume muito grande exudando próximo a ele na porção noroeste do corte.

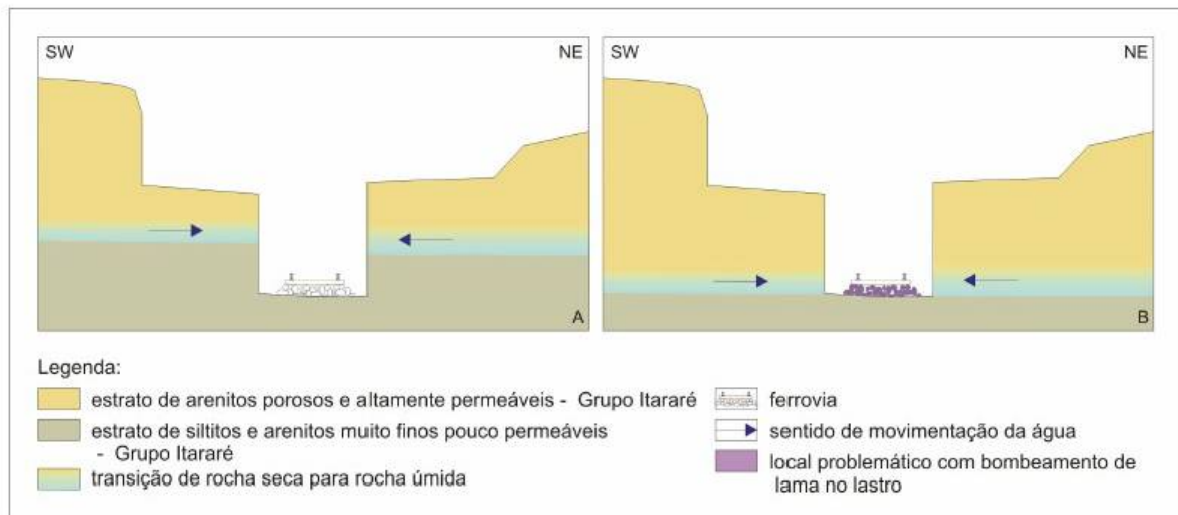


Figura 42: Modelos de circulação da água em estratos altamente permeáveis barrados por litotipos muito pouco permeáveis ou impermeáveis. Visualização em perfil perpendicular à ferrovia. A: Exudação de água no talude da plataforma; B: Exudação da água no nível da plataforma. Caso típico no trecho 1.

No caso do trecho 1 o problema é agravado porque a inclinação de 1° da ferrovia para sudeste favoreceu a construção da plataforma no nível do contato entre o siltito da base e o arenito do topo (figura 42B). O resultado é que a água aflora também no nível da plataforma e escoia constantemente em direção a sudoeste sobre o siltito. Isto favorece o desenvolvimento do processo de cimentação do lastro devido à alteração acelerada da rocha pelítica e produção de finos que constituem a lama que é movimentada para o lastro, como descrito no item 1.2.3.

4.2.2 Modelo 2: confinamento de camadas permeáveis e compartimentação estrutural

Neste modelo a água percola em camadas permeáveis confinadas por estratos com permeabilidade menor, e seccionadas por estruturas verticais que servem de condutos preferenciais de água. Enquadram-se neste modelo os trechos 2, 3 e 4.

No trecho 2 a água aflora no dique de basalto subvertical que se encontra extremamente alterado e incoerente, com maior permeabilidade em relação aos argilitos nos quais está inserido. Também aflora próximo à zona de cisalhamento N82E/90 (figura 13). Esta falha e o dique compartimentam um bloco a montante, como observado na figura 31 A2, e a água que flui nos estratos horizontais porosos em subsuperfície exuda por essas estruturas do maciço SW até aflorar na superfície do talude (figura 43). É entre essas duas estruturas que o problema de bombeamento de finos é mais grave.

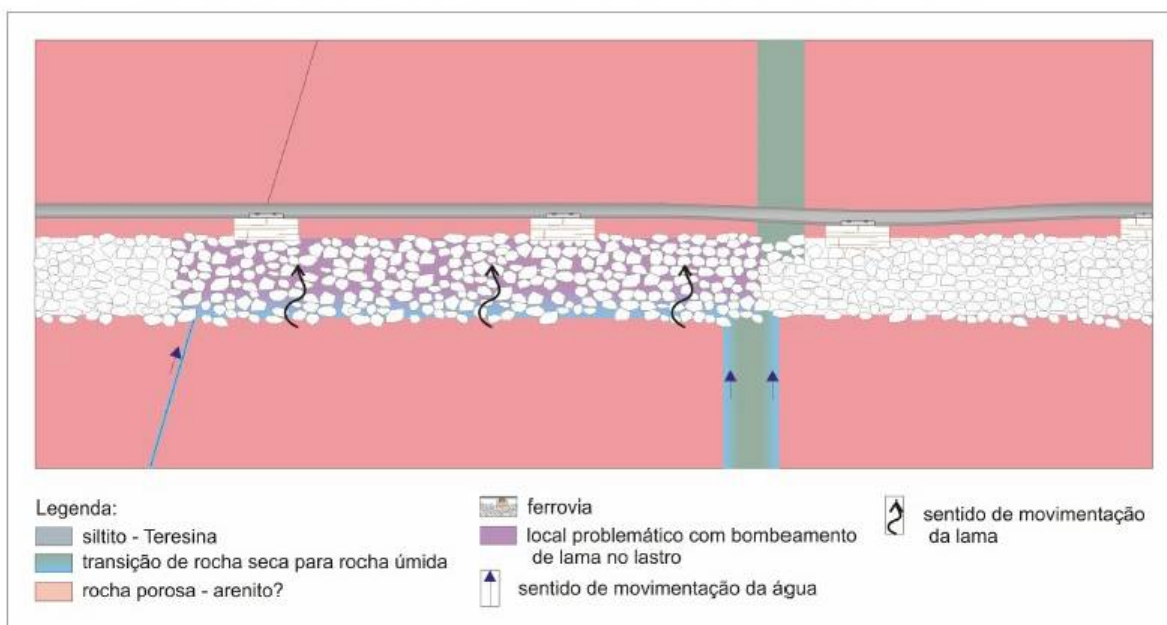


Figura 43: Modelo de circulação de água por meio de camadas permeáveis confinadas por camadas pouco permeáveis, seccionadas por estruturas verticais que compartimentam estruturalmente o maciço e servem de condutos da água. Perfil paralelo à ferrovia, trecho 2.

No trecho 3 a água flui para a superfície entre a fratura N86W/85SW (Fr1 na figura 34 A2 e B2) e a fratura 2 indicada pelo método geoeletrico dipolo-dipolo (Fr2 na figura 34 A2 e B2). A água não exuda a ponto de escorrer pelos taludes, mas vários locais na plataforma apresentam umidade permanente

mesmo em épocas em que não há precipitação pluviométrica por longos períodos. As fraturas compartmentam um bloco, o que favorece a circulação da água dentro de uma zona, e o resultado é o agravamento do processo de bombeamento sobre este local (figura 44). A água se movimenta nas camadas arenosas em subsuperfície pouco coerentes confinadas por estratos siltosos coerentes com permeabilidade mais baixa, e atinge a superfície quando são seccionadas por fraturas abertas que servem de condutos preferenciais da água.

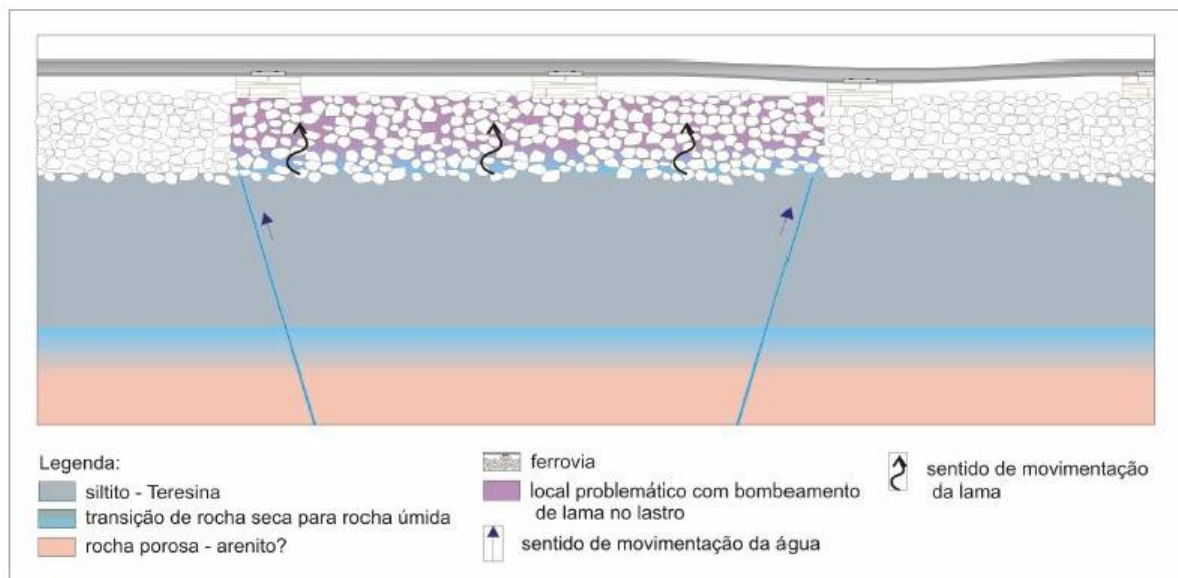


Figura 44: Modelo de circulação de água por meio de camadas permeáveis confinadas por camadas pouco permeáveis seccionadas por fraturas abertas que servem de condutos preferenciais da água. Caso típico no trecho 3.

No trecho 4 ocorre o mesmo processo, no qual a zona de comunicação entre as camadas é o dique de basalto extremamente alterado e poroso (figura 45 A) perpendicular à ferrovia, que serve de conduto preferencial da água para a superfície.

O dique de basalto de 50m de espessura não alterado também é um importante condicionante hidrogeológico no local, funcionando como uma barragem hidráulica vertical. A água que circula pelo arenito da base, ao encontrar o basalto, tende a circular no contato arenito/basalto de forma ascendente até encontrar um estrato mais poroso, como outros estratos arenosos (figura 45B). É o que acontece com o afloramento de água no talude apresentado na foto 16.

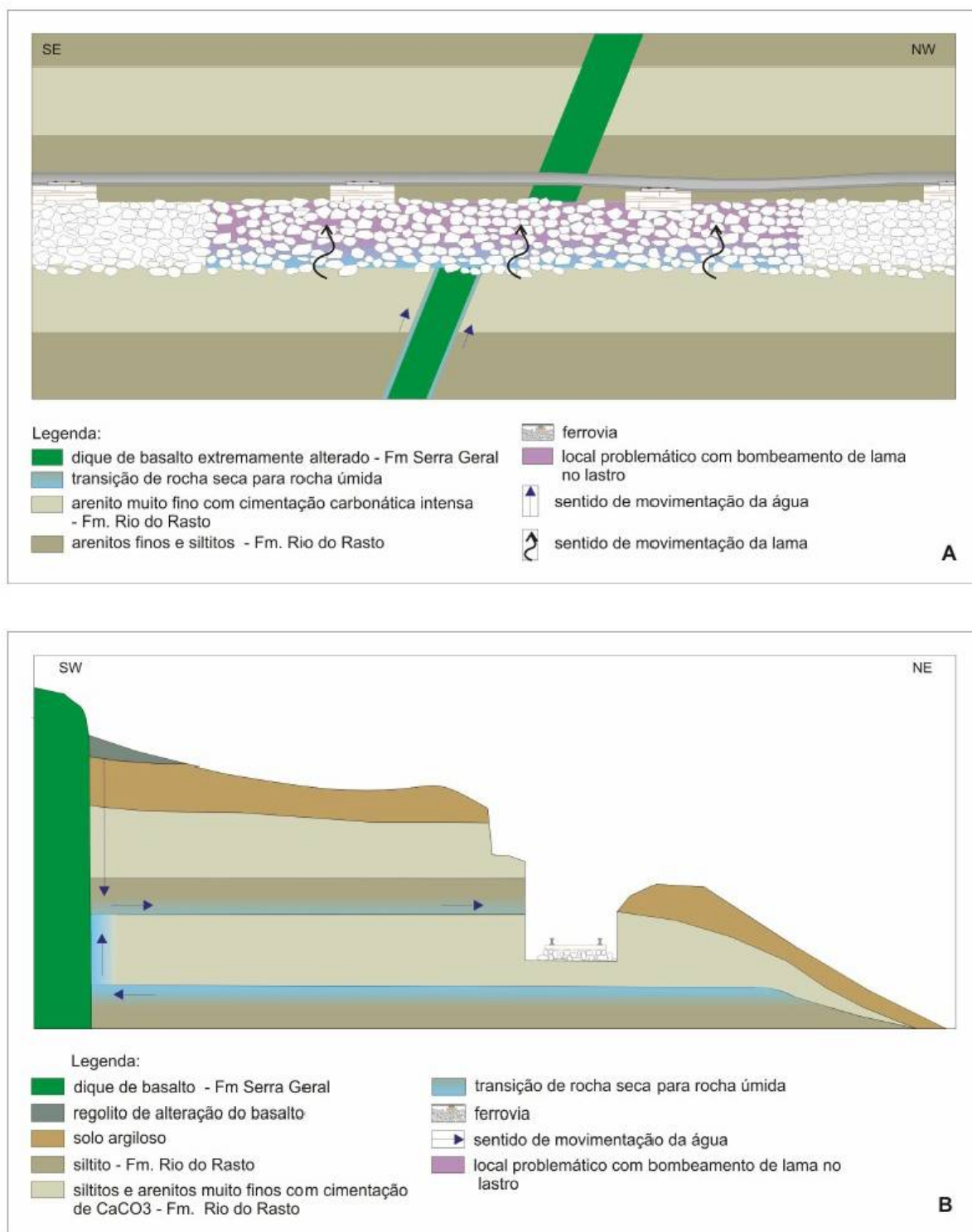


Figura 45: Modelo de circulação de água por meio de camadas permeáveis confinadas por camadas pouco permeáveis, seccionadas por estruturas verticais condutoras. A: Circulação da água em camadas arenosas confinadas por camadas cimentadas com carbonato de cálcio e seccionadas por um dique de basalto extremamente alterado; B: Circulação da água em camadas arenosas confinadas por camadas cimentadas com carbonato de cálcio e compartimentadas por um dique de basalto de 50m de espessura. Caso típico no trecho 4.

4.2.3 Modelo 3: confinamento de camadas porosas e permeáveis

Neste modelo a água circula por camadas porosas e permeáveis tabulares subhorizontais confinadas por estratos com porosidade e permeabilidade menor. Enquadra-se neste modelo o trecho 5.

No trecho 5 ocorre compartimentação de um estrato permeável por estratos impermeáveis, com cimentação carbonática intensa. O corte do talude seccionou a camada confinada e favoreceu a exudação da água no talude pouco acima do nível da plataforma e no nível da plataforma (figura 45). O problema de bombeamento ocorre porque a plataforma encontra-se constantemente úmida.

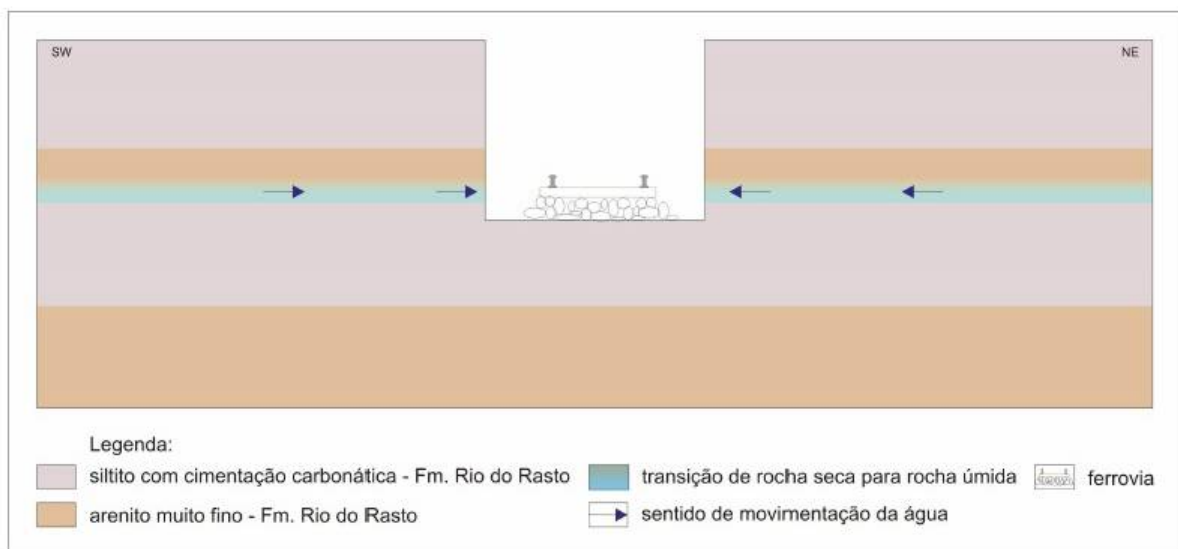


Figura 46: Modelo de circulação de água por meio de camadas permeáveis confinadas por camadas pouco permeáveis.

4.3 Recomendações

As providências preventivas e resolutivas sugeridas para cada trecho pesquisado são as seguintes:

4.3.1 Trecho 1

- instalação de dois drenos horizontais profundos, um a montante e outro a jusante, próximo ao dique de microgabro;
- retirada da grade ferroviária e do lastro no local onde o contato do arenito com o siltito está no nível da plataforma, para implantação de um dreno perpendicular à ferrovia constituído por material granular com granodecrescência das laterais para o centro, construção de drenos laterais para escoar a água para fora do corte, implantação de uma camada de material argiloso não expansivo de forma compactada para selar o contato da água com o lastro. Introdução de uma camada de material compactado para exercer a função de sublastro, e reconstrução do lastro e grade ferroviária.

4.3.2 Trecho 2

- implantação de um dreno horizontal profundo no dique no talude a montante;
- estudo detalhado da geologia estrutural da área para injeção de solo-cimento nos locais com maior persistência das fraturas no nível da plataforma; ou
- retirada da grade ferroviária e lastro para implantação de uma camada compactada de argila não expansiva para selar o contato da água com o lastro e implantação de uma camada com a função de sublastro;

4.3.3 Trecho 3

- estudo detalhado da geologia estrutural para injeção de solo-cimento nos locais mais graves;
- retirada da grade ferroviária e lastro para implantação de uma camada compactada de argila não expansiva para selar o contato da água com o lastro e implantação de uma camada com a função de sublastro;

4.3.4 Trecho 4

- construção de um dreno na plataforma, na lateral a montante da ferrovia, para escoar a água parada;
- implantação de um dreno perpendicular à ferrovia sobre o dique de basalto perpendicular a ferrovia, constituído por material granular com granodecrescência das laterais para o centro, implantação de uma camada de material argiloso não expansivo de forma compactada para selar o contato da água com o lastro. Introdução de uma camada de material compactado para exercer a função de sublastro, e reconstrução do lastro e grade ferroviária;
- implantação de dois drenos horizontais verticais na camada de arenito muito fino confinada por camadas de arenitos e siltitos com intensa cimentação carbonática.

4.3.5 Trecho 5

- implantação de dois drenos horizontais profundos na camada de arenito fino da base que exuda água;
- construção de drenos superficiais nas laterais da ferrovia;

- implantação de uma camada de material argiloso não expansivo e de uma camada de sublastro em no terço inicial do trecho.

5. Conclusões

A análise dos litotipos, feições estruturais e locais de saída de água com dados de resistividade elétrica (colunas da sondagem elétrica vertical e perfis do caminhamento elétrica) permitiu fazer considerações e orientar a respeito da circulação subterrânea da água, principal causadora do problema de bombeamento de lama e conseqüente recalque da ferrovia.

A água surge no subleito por aumento da circulação natural devido ao corte do talude em locais onde secciona condutos preferenciais da água. A umidade constante somada à pressão hidráulica causada pelo movimento vertical da grade ferroviária no momento da passagem de trens sobre locais de surgências estabelece um processo de bombeamento da água com lama removida da rocha ou regolito e colmatação do lastro.

Em contato permanente com a rocha, a água altera e gera o material fino que colmata o lastro. Também é a água que se comporta como meio de transporte do material fino da plataforma para o lastro. Portanto, a administração adequada da circulação do aquífero freático no local é de suma importância para evitar o desenvolvimento e agravamento do problema e até estancar e estabilizar a via férrea.

Os meios de circulação da água foram agrupados em três modelos: 1 – circulação em meio poroso impedida por litotipos impermeáveis; 2 – confinamento de camadas permeáveis e compartimentação estrutural; e 3 – confinamento de camadas permeáveis.

O trecho 1 enquadra-se no modelo 1, no qual a água circula na base do estrato arenoso em contato com a camada de siltito, muito menos poroso e permeável que o arenito do topo. O dique de microgabro funciona como uma barreira vertical à água, favorecendo a maior vazão de afloramento de água próximo a ele.

Os trechos 2, 3 e 4 enquadram-se no modelo 2, no qual há um confinamento de camadas permeáveis por camadas muito menos permeáveis, e compartimentação estrutural que conecta os estratos e se comporta como conduto para exudação da água na superfície.

O trecho 5 enquadra-se no modelo 3, no qual há um confinamento de camadas permeáveis por camadas pouco permeáveis.

6. Referências bibliográficas

ALL 2003 Projeto ALL – arquivos arcview shape file, CD ALL 2, inédito.

Braga, A. C. O. 1997 Métodos geoeletricos aplicados. Módulo: hidrogeologia. UNESP – campus Rio Claro. Material didático INÉDITO. 91p.

Brina H. L. 1979 Estradas de Ferro. Rio de Janeiro: livros técnicos e científicos, voll, 149p.

Carlstron Filho C. & Salomão F.X. de T. 1976 Experiência acumulada em estudo geológico-geotécnicos de estabilidade de taludes em dois trechos ferroviários no Rio Grande do Sul. 1º CBGE, vol 1, p:293 – 304.

Comissão da Estrada de Ferro Central do Paraná. 1973 Levantamento aerofotogramétrico na escala 1:10000. Consórcio Transcon Amurada. Governo do Estado do Paraná – Secretaria de Transportes.

CorelDRAW® Graphics Suite (2004) *Corel Draw 12®* Microsoft® Visual Basic® for Applications (VBA).

França A. B. & Potter P. E. 1998 Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permo – Carbonífero), Bacia do Paraná. B. Geci. PETROBRAS 8(1): 1-16.

Geological software - *StereoNet 3.2*

Geosoft/ Interpex 2006 *IP12Win*

Geosoft/ Interpex 2006 *Zonze 2D for Interactive™ IP*

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas - SP 1978 Identificação dos cortes, aterros e túneis com problemas de estabilidade na Estrada de Ferro Central do Paraná (Ponta Grossa – Apucarana). Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Rede Ferroviária Federal – S A , Superintendência Regional, Ctba. Relat. n° 10893. vol I e II.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - SP 1984. Estudos geológicos – geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens) São Paulo, IPT – Relat. n° 19569.

ITC – Instituto de Terras e Cartografia 1980 Fotografias aéreas na escala 1:25000 n°s 20568 e 20569, 21375 e 21376, 21468 e 21469, 21570 e 21571 e 24106, 24107 e 24108.

Milani E. J. 1997 Evolução tecno-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 255p.

Milani E. J., França A. B. & Schneider R. L. 1994 Bacia do Paraná. B. Geoci. PETROBRAS, 8 (1): 69 – 82.

Milani E. J. & Ramos V. A. 1988 Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. Ver. Bras. Geoci. 28 (4): 473 – 484.

MINEROPAR 2005 Mapa geológico do Estado do Paraná na escala 1:250000.

MINEROPAR 2001 Mapa geológico do Estado do Paraná na escala 1:650000.

Mioto J.A. e Carlstron Filho C. 1976 Experiência acumulada em estudos geológico geotécnicos para estabilização de taludes ao longo do trecho ferroviário Gal. Luz (RS) – Ponta Grossa (PR). 2ª parte: rochas dos grupos Paraná, Tubarão e Passa Dois. 1ºCBGE voll, p:332-349.

Adobe ® Photoshop ® CS2 2005 *Photoshop CS2*

RFFSA 1985 Projeto de obras de restauração, vol 3: cadastro da infra-estrutura ferroviária da Estrada Ferroviária Central do Paraná.

Serra Junior, E. e Ojima L.M. 1998 Caracterização e classificação de maciços rochosos. Cap. 13 In: Oliveira A. M. S. e Brito S. N. A. Geologia de engenharia. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia. Pag 211 – 226.

Souza L. A. P., Silva R. F. da e Iyomasa W. S. 1998 Métodos de investigação. Cap. 11. In: Oliveira A. M. S. e Brito S. N. A. Geologia de engenharia. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia. Pag 163 – 196.

Stopatto S. 1987 Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações. T. A. Queiroz: editora da Universidade de São Paulo, 251p.

Telford, W. M. Geldart, L. P. & Sheriff R. E. 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press, 770 p.

Zalán P.V., Wolff S., Conceição J.C.J., Marques A., Astolfi M.A.M., Vieira I.S., Appi V.T. Zanotto O. A. 1990 Bacia do Paraná. In: De Raja Gabaglia G.P. e Milani E.J. (coords) 1990 Origem e evolução de bacias sedimentares. PETROBRAS, RJ.

Windows XP 2003 *Microsoft Office Excell.*