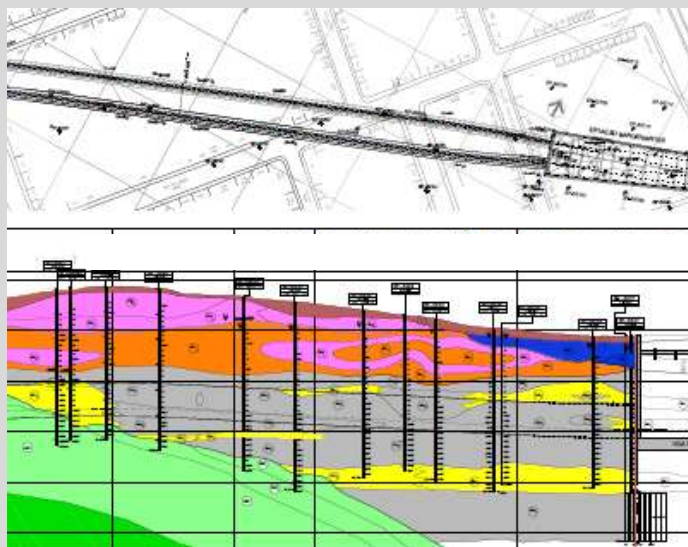


Da investigação geológico-geotécnica à obra: a geologia aplicada à construção de túneis na Região Metropolitana de São Paulo



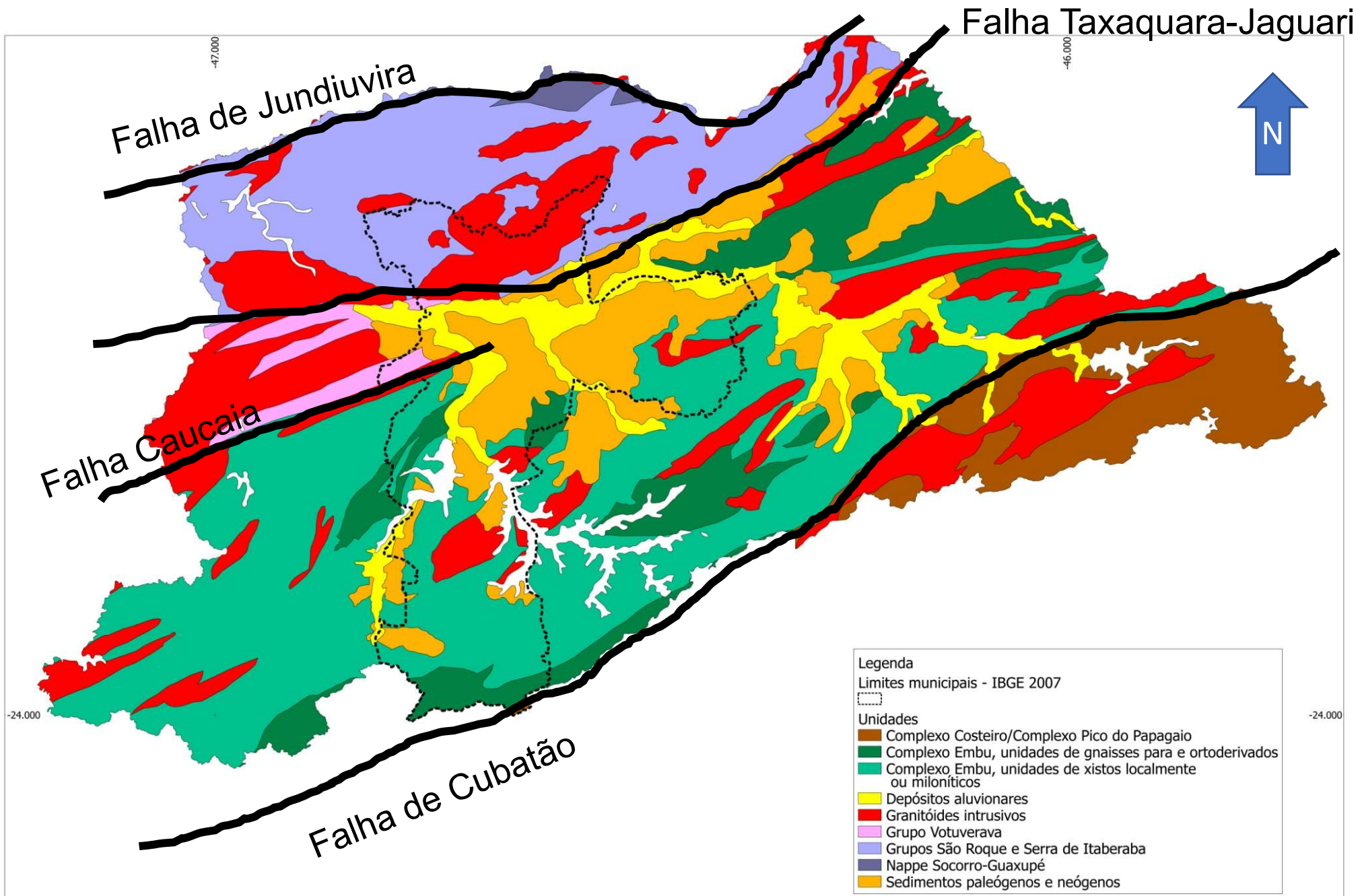
Geólº Marcelo Denser Monteiro, MSc

Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ

Coordenadoria de Dados Básicos e Geotecnia - CDG

Tópicos a serem abordados:

- 1) Variedade dos materiais geológicos em SP;
- 2) Métodos construtivos – Conceitos Gerais;
- 3) Importância da geologia na construção de túneis;
- 4) Investigações geológico-geotécnicas;
- 5) Implicações de condicionantes geológicos.

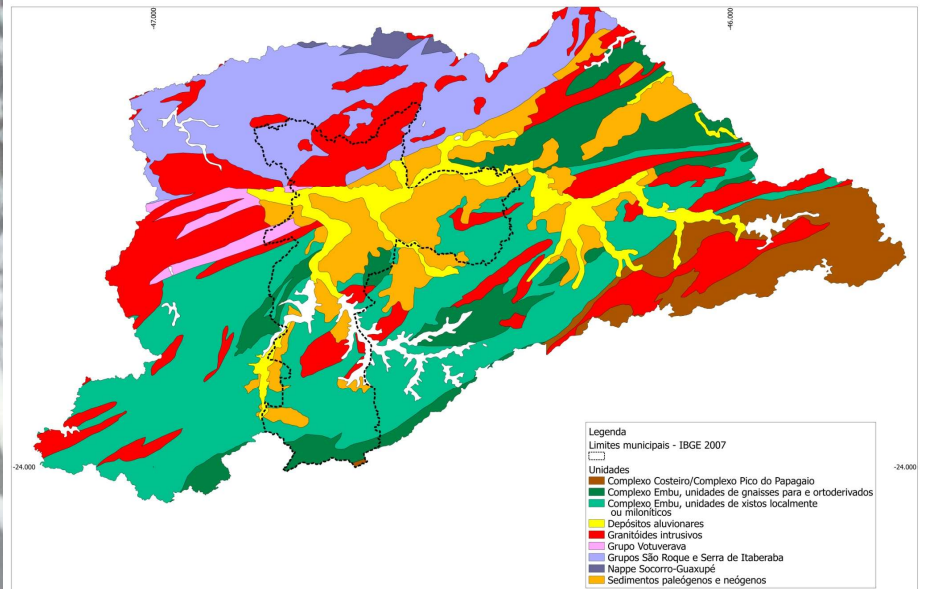


MAPA GEOLÓGICO:
REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

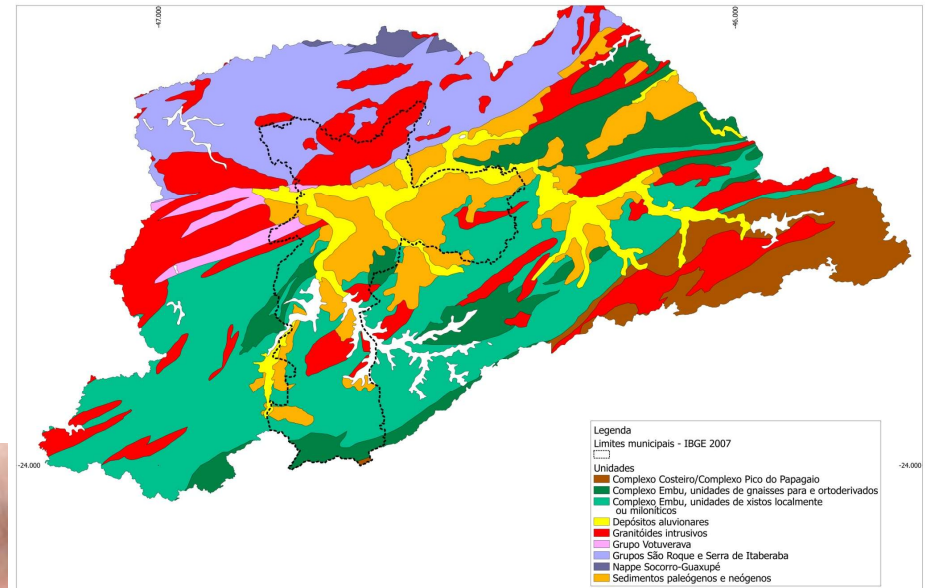
Argila Arenosa
4Ag2

Areia fina pouco siltosa
"4Ar1"

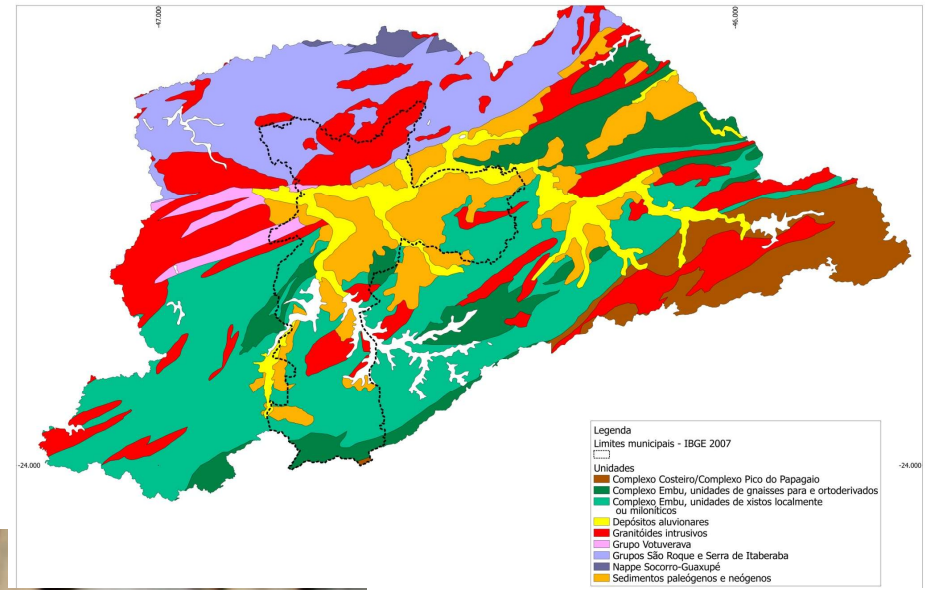
Areia média siltosa
4Ar2



Túnel de Ligação
Estacionamento de Trens Servidor
Linha 5 - Lilás

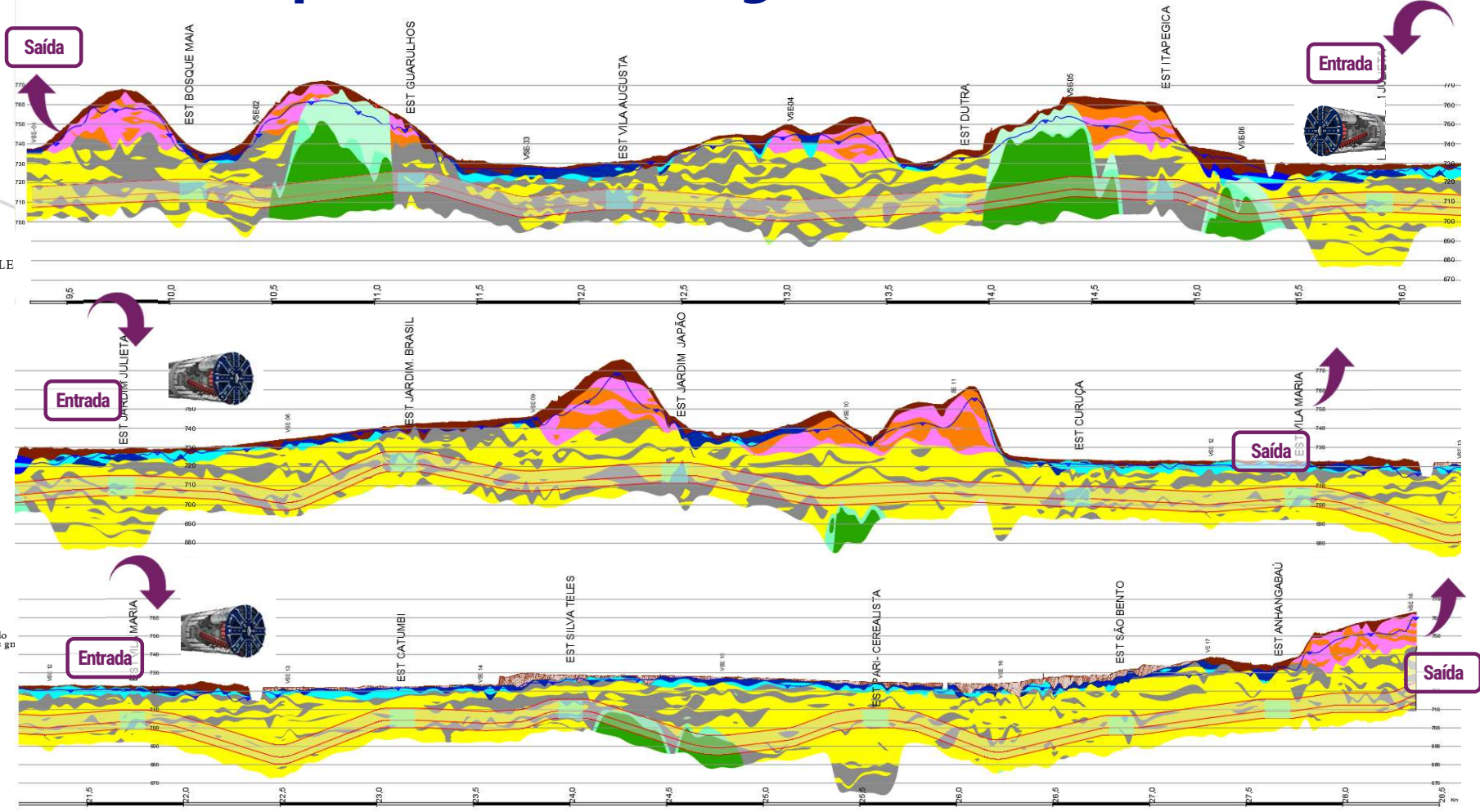


**Granito
Cantareira**



Gnaisse
 Linha 5
 Av. Santo Amaro
 (Campo Belo)

Linha 19 – Bosque Maia- Anhangabaú



SEÇÃO GEOLÓGICA PRELIMINAR
PRELIMINARY GEOLOGICAL PROFILE

- | Legenda | Convention | Geologia | Geology |
|--|--|---|---------|
| | Aterro | Backfill | |
| | Aluvião - Quaternário | Alluvial - Quaternary Sediments | |
| | Argila orgânica e areia siltosa | Organic clay and silty sand | |
| | Areia siltosa | Silty sand | |
| Sedimentos Terciários - Formação São Paulo | | | |
| Tertiary Sediments - São Paulo Formation | | | |
| | Argila arenosa variegada/vermelha | Sandy clay mottled/red | |
| | Areia argilosa variegada | Clayed sand mottled | |
| Sedimentos Terciários - Formação Resende | | | |
| Tertiary Sediments - Resende Formation | | | |
| | Argila siltosa cinza | Gray silty clay | |
| | Areia siltosa cinza e amarela | Gray and yellow silty sand | |
| Embasamento Cristalino - Pré-Cambriano | | | |
| Bed Rock - Pre-Cambrian | | | |
| | Saprolito de gnaiss | Gneiss residual soil | |
| | Saprolito de gnaiss | Gneiss saprolite | |
| | Gnaiss granítico medianamente alterado | Moderately slightly weathered granitic gn | |
| 750 | Cota | Elevation | |
| | Nível d'água | Water table | |
| | Estação | Station | |
| | Kilometragem | Kilometers | |



Opção por obras subterrâneas

- Menor impacto ambiental;
- Menor interferência com a superfície;
- Formas inteligentes de utilização:
 - Transporte público;
 - Infra-estrutura urbana (redes de água; esgoto; drenagem; energia; telefonia; TV a cabo; etc...);
 - Facilitadores urbanos (estacionamentos; shoppings centers; parques de diversão; hospitais; teatros; etc...);
 - Estratégico (riquezas minerais; reservatórios de alimentos, água e produtos industrializados; pesquisas; etc...);
 - Integração de povos e culturas (conexões mais rápidas entre lugares);

Métodos Construtivos

Os métodos construtivos mais utilizados em túneis urbanos:

- **VCA** (Vala a céu aberto), também conhecido como “*cut and cover*”
- “**NATM**” (*New Austrian Tunneling Method*), método observacional baseado no alívio de tensões do maciço.

Grande influência da geologia durante a construção

- **Túnel Mecanizado**, executado com uso de máquina tuneladora, equipamento de escavação mecanizada com couraça metálica de proteção;

Necessidade de precisos conhecimentos prévios da geologia

VCA

- Intervenção a partir da superfície
- Abertura de vala ou trincheira
- Execução das contenções
- Instalação da linha
- Execução de paredes, pilares e lajes definitivos
- Reaterro
- Devolução da ocupação à superfície



Construção da Linha 1 – Azul na década de 70

VCA

- Grande impacto durante a fase de obra (desvios de tráfego, remanejamento de redes de utilidades públicas, restrições de acesso, etc...);
- Há necessidade de desapropriação
- Contenções com tirantes ou estroncas metálicas poços em concreto projetado.

NATM

- utilizado com sucesso na construção de túneis e estações subterrâneas de grandes dimensões.
- consiste na escavação sequencial do maciço utilizando concreto projetado como suporte, associado a outros elementos como cambotas metálicas, chumbadores e fibras no concreto, em função da capacidade autoportante do maciço.
- a deformação do maciço adjacente é deliberadamente favorecida, adaptando-a ao contorno escavado, bem como redistribuindo e reduzindo as tensões máximas induzidas, evitando-se assim a desagregação do maciço

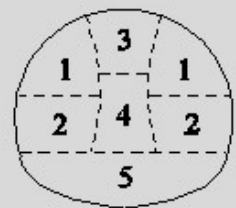
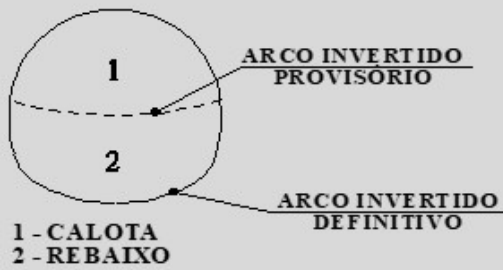


NATM

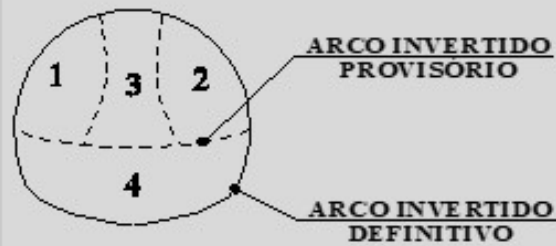
- Processo semi-mecanizado;
- Possibilidade de ajuste da forma geométrica da escavação;
- Parcialização da frente de escavação em função de condições geológicas;
- Produções médias da ordem de 1,0 a 2,0m/ dia por frente de escavação;
- Maiores riscos inerentes ao processo construtivo (deformações, estabilidades, consumo de materiais, etc);
- Necessidade de ampla e minuciosa investigação geológica e geotécnica.



Parcialização da escavação



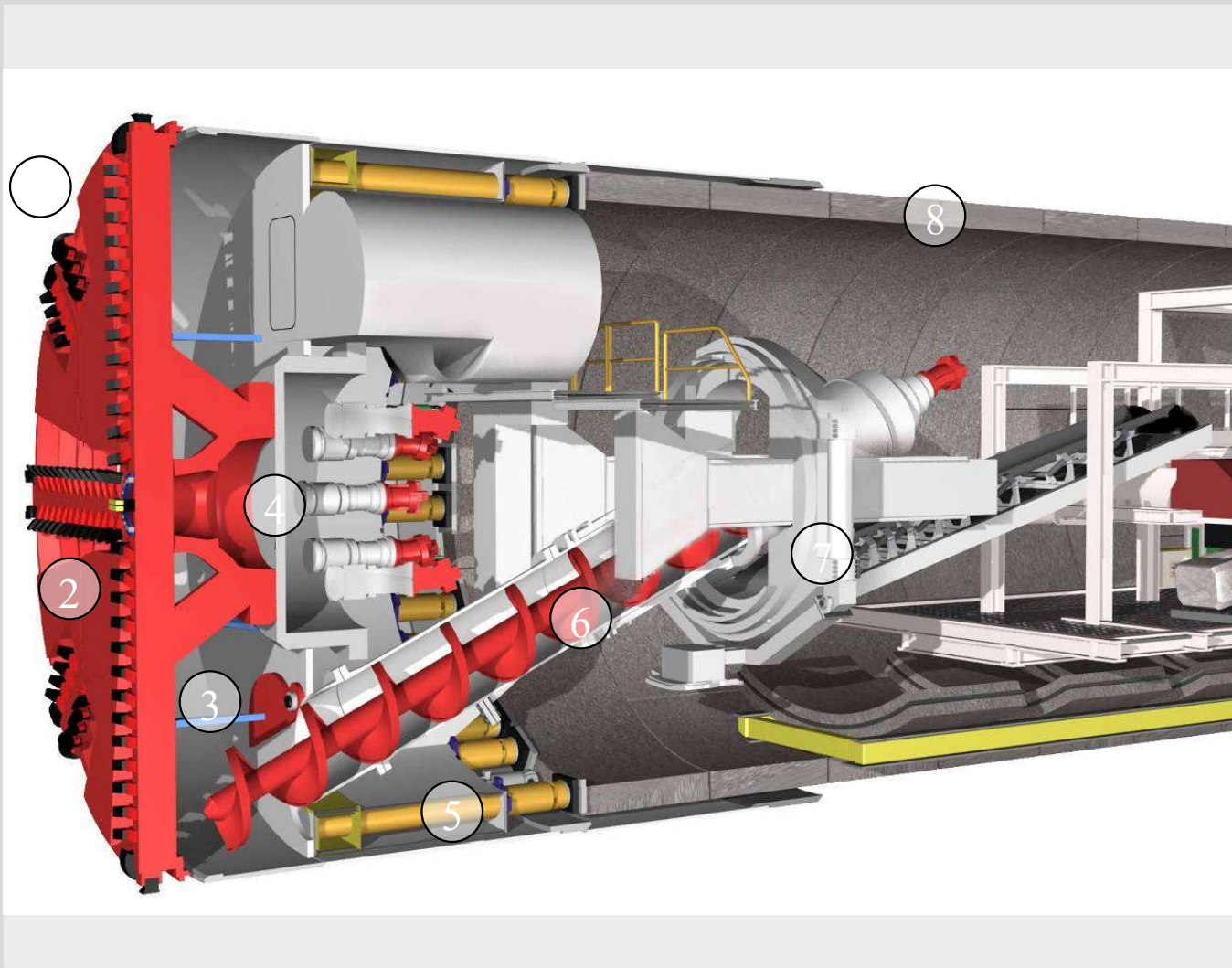
GALERIAS LATERAIS (1 e 2) E ALARGAMENTO DA CALOTA (3 e 4) EM DOIS ESTÁGIOS



1 e 2 - GALERIAS LATERAIS ("SIDE-DRIFT")
3 - ALARGAMENTO DA CALOTA
4 - REBAIXO

Túnel Mecanizado

- Máquinas Tunneladoras
 - Processo altamente mecanizado (fábrica de fazer túneis)
 - Necessidade de ampla infra-estruturas de apoio
 - Fábrica de anéis;
 - Logística operacional;
 - Armazenamento de insumos necessários à operação
 - Menores riscos inerentes (deformações, estabilidade);
 - Grandes produções (até 35m diários!);
 - Maior desembolso inicial.



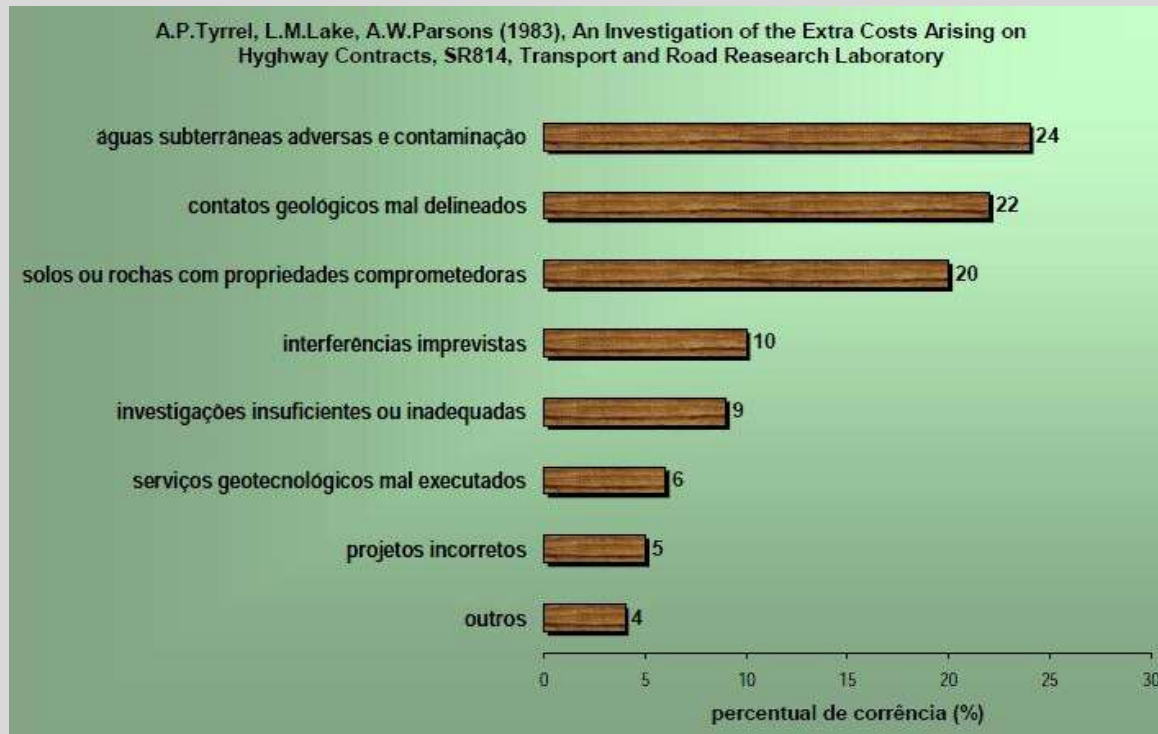
1. Frente de escavação
2. Cabeça de corte.
3. Câmara de escavação
4. Anteparo de pressão.
5. Cilindros de empuxo.
6. Parafuso transportador
7. Eretor.
8. Anel segmentado.

Túneis e geologia

Segundo *Harvey W. Parker (2004)*:

“A geologia influencia de sobremaneira aspectos relacionados à viabilidade, o comportamento e o custo de um túnel, sendo tão importante o conhecimento das características geotécnicas de um maciço e suas variações, quanto do concreto ou do aço utilizado na construção da estrutura do túnel.”

Importância do conhecimento geológico em grandes obras



Distribuição das causas de insucesso parcial em obras rodoviárias (Progeo, 2008), dados de Tyrrel *et al.* (1983).

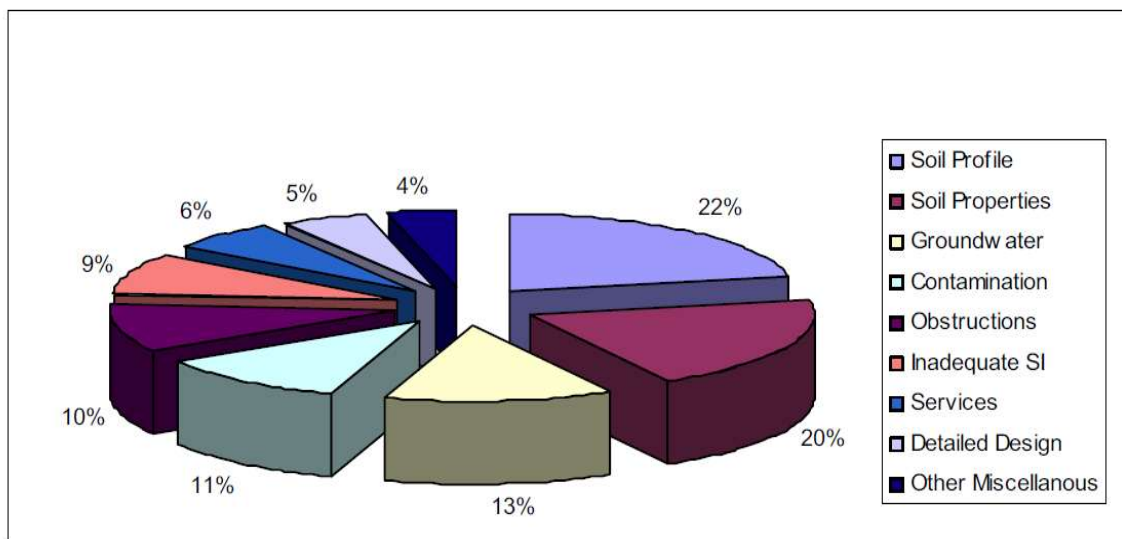


Figure 4. Geotechnical sources of construction problems (after Clayton et al, 2001)

Fase de Projeto: Investigação geológico-geotécnica

- O que se espera obter?
 1. Estratigrafia da Linha
 2. Identificar as unidades aquíferas (hidroestratigrafia)
 3. Identificar a presença de condicionantes associados a riscos geológicos
 4. Comportamento dos materiais (solos e rochas)

Condicionantes de Riscos Geológicos em obras civis

- Zonas de falhamentos
- Planos de foliação e acamamento
- Sistemas de juntas e fraturas
- Solos moles e compressíveis
- Rochas desagregáveis e friáveis
- Rochas de resistência elevada
- Irregularidade em topo rochoso
- Pressões e vazões elevadas de água subterrânea
- Solos e rochas com parâmetros geotécnicos anômalos ou comprometedores
- Áreas contaminadas e águas agressivas

Comportamento dos materiais (solos e rochas)

- **Propriedades**

Resistência

Deformabilidade

Expansão

Colapsibilidade

Permeabilidade

Alterabilidade

Desagregabilidade

Parâmetros
Geotécnicos



Subsidiar projetos

Serviços realizados nas investigações geológico-geotécnicas

- Mapeamento geológico de superfície, Análise estrutural
- Sondagens (percussão e rotativas)
- Piezômetros e INA's
- Estudos Geofísicos (Sísmica de reflexão de alta resolução, Cross-hole, Down-hole e Geoelétrica)
- Coleta de Amostras (bloco indeformado, amostradores dinâmicos – Denison, Shelby)
- Ensaio de laboratório (granulometria, limites de Atterberg, compressão uniaxial, compressão triaxial, compressão diametral, adensamento edométrico, compactação Proctor, petrografia, apreciação em lupa, abrasividade CERCHAR, etc.
- Ensaio in-situ (Pressiométricos, Perda d'água sob pressão, DMT, Vane-Test, CPTU, Televisamento, SHMT, Teste de Bombeamento)

Sondagens a percussão (com SPT manual e mecanizado)



Sondagens Rotativas

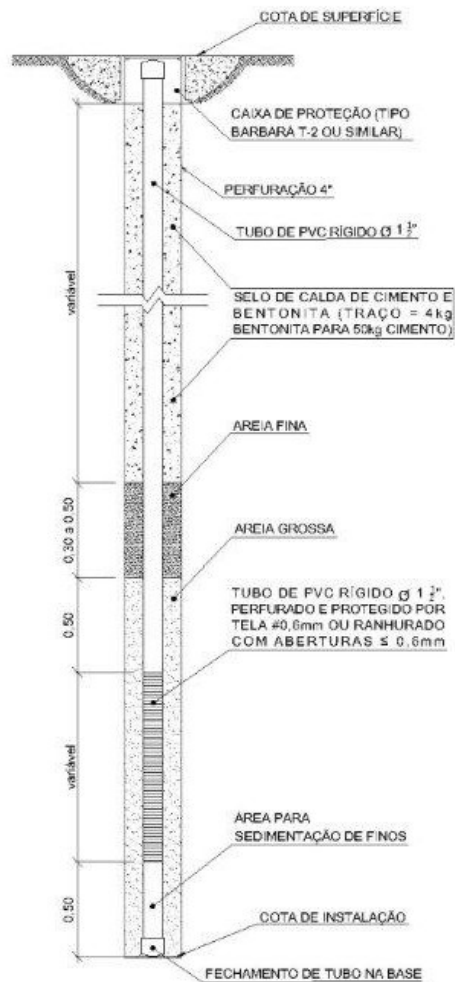
Testemunhos (amostras) de granito-gnaiss (Complexo Embu) – Linha 2 – Verde (Projeto Básico)



Testemunhos (amostras) do Granito Cantareira

Piezômetros e indicadores de nível d'água (INAs)

PIEZÔMETRO TIPO CASAGRANDE



Levantamentos geofísicos





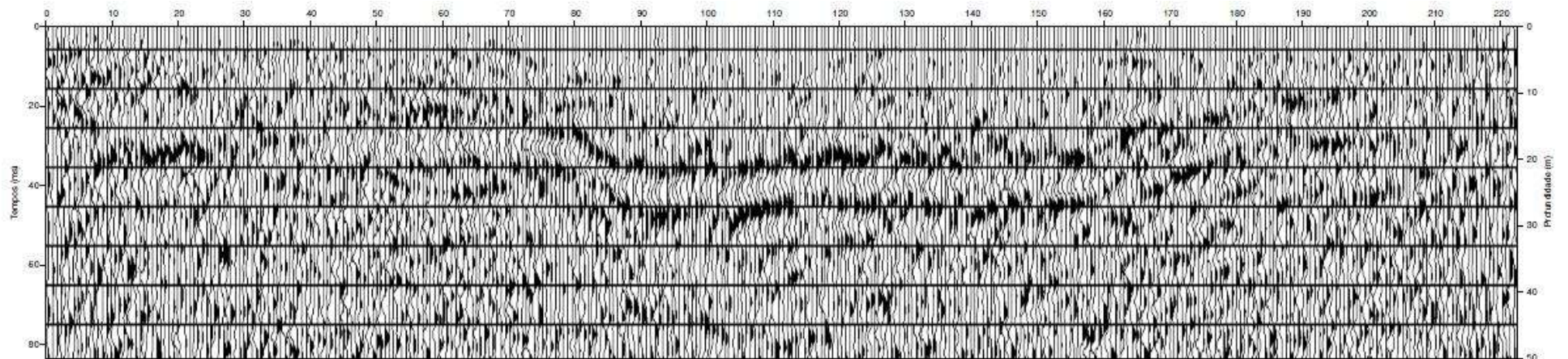
Fonte: Metrô-SP



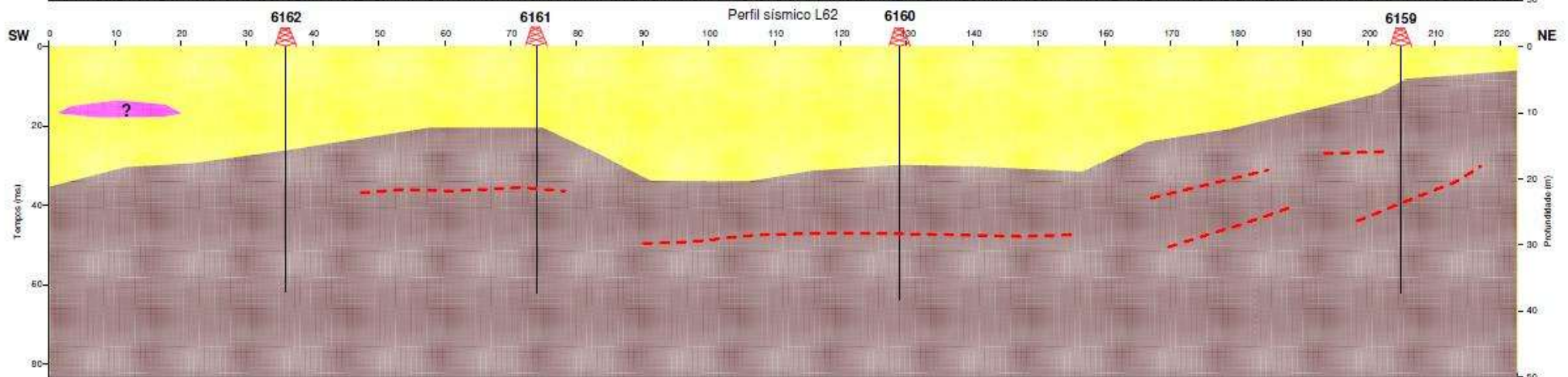
Fonte: Metrô-SP

Energização por impacto de martelo vs explosivos

Geofísica por sísmica



Perfil sísmico L62



Perfil sísmico L62

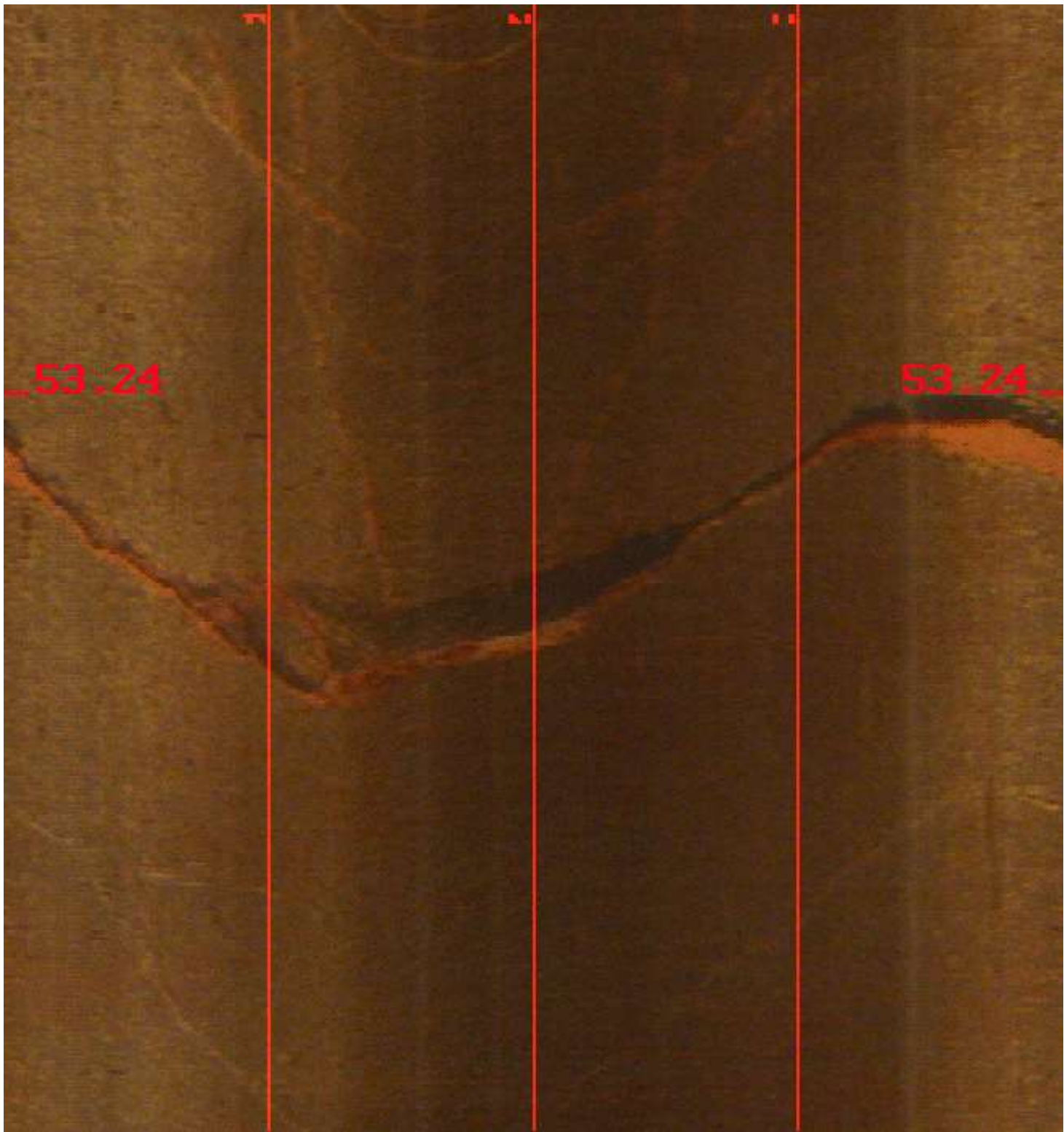
Fonte: Arquivo Técnico Metrô-SP

LEGENDA

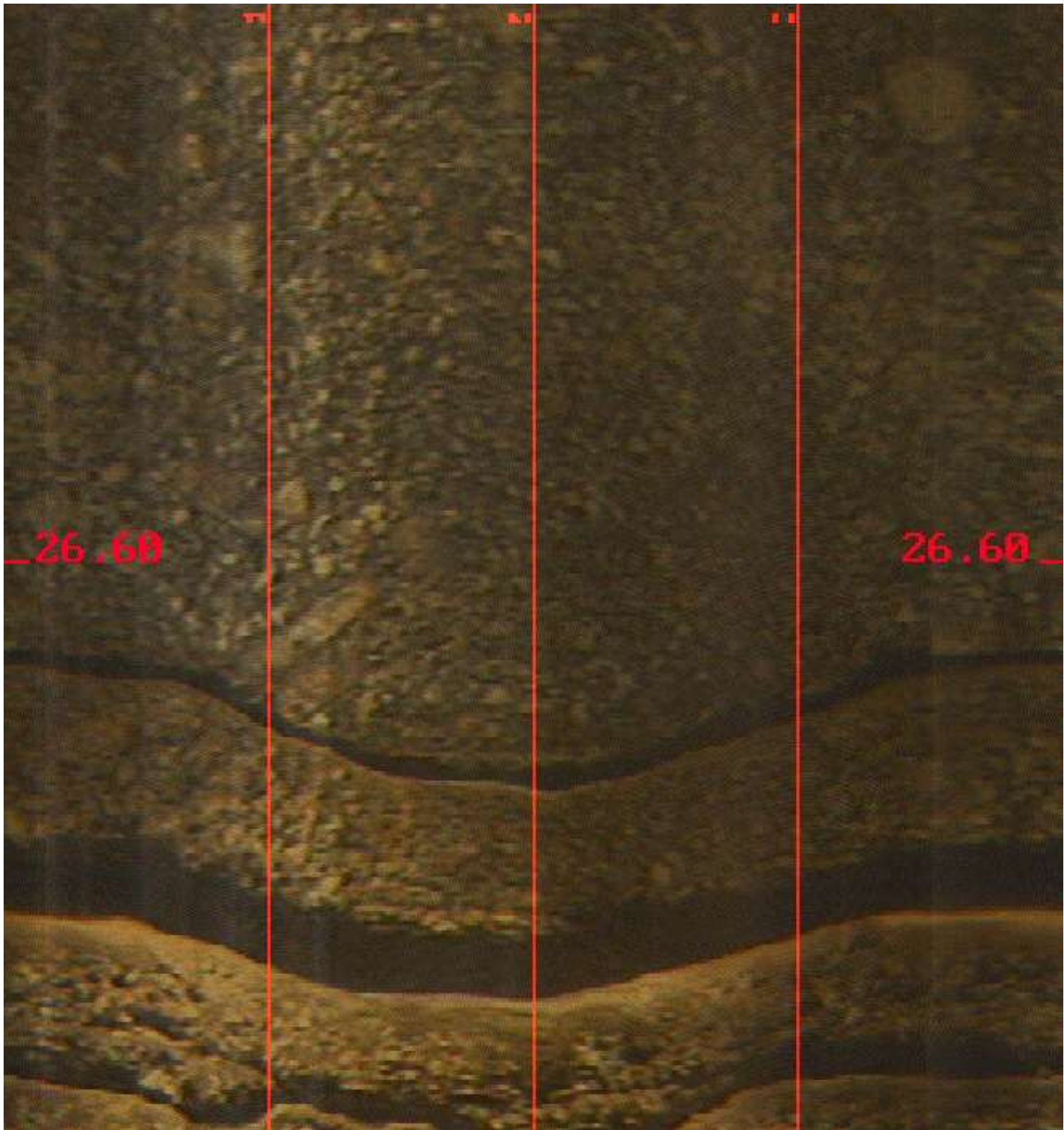
- Camada argilosa superficial
Aterro e solo de alteração
- Substrato rochoso
- Intercalação (lente) de material diferente
- 6161
Perfuração (sondagem mista)
- Anomalia sísmica não diferenciada (discontinuidades no substrato, material muito fraturado e/ou alterado, faixas miloníticas, veios e diques intrusivo, etc.)

Televisamento de Sondagem (perfilagem óptica)



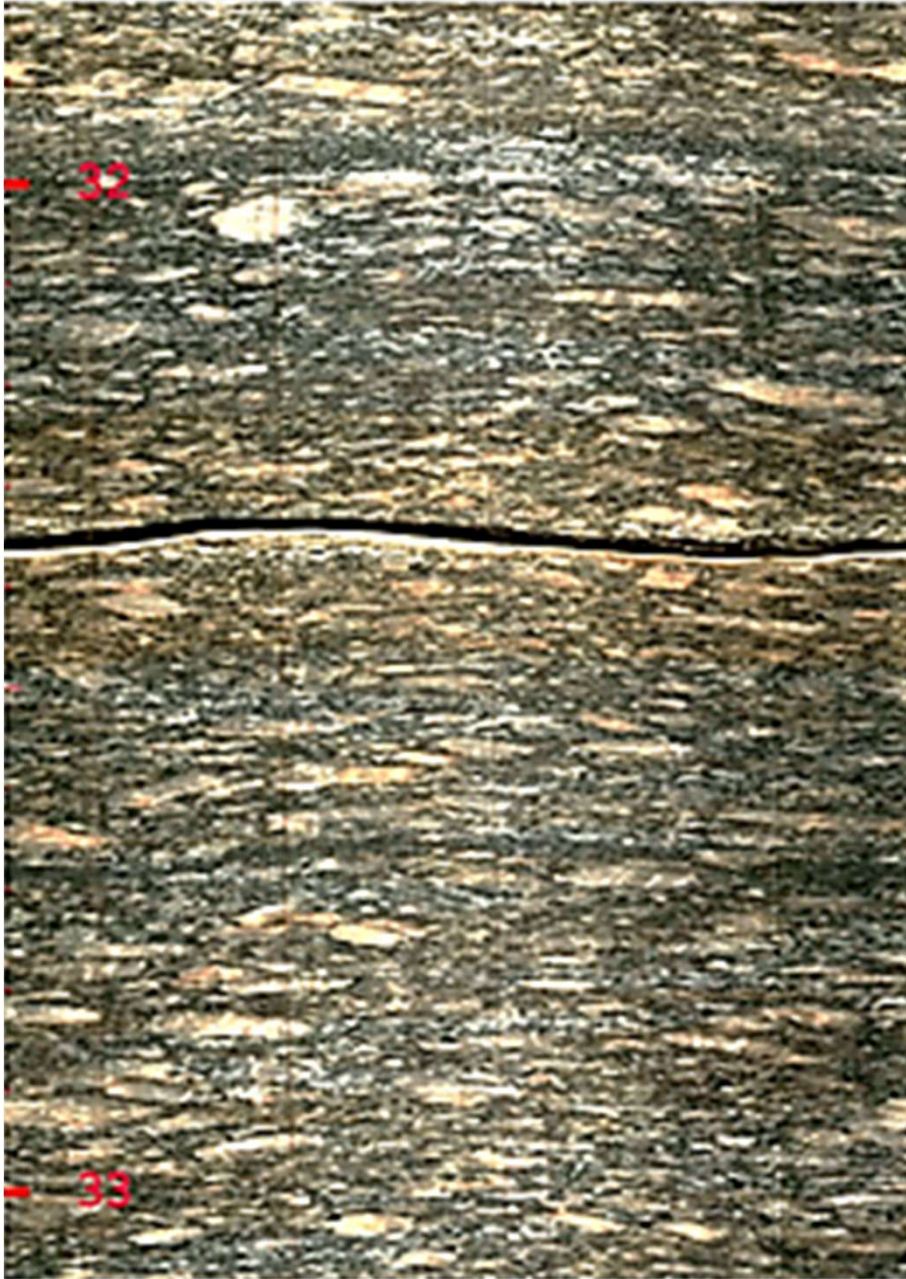


Fratura com abertura aparente

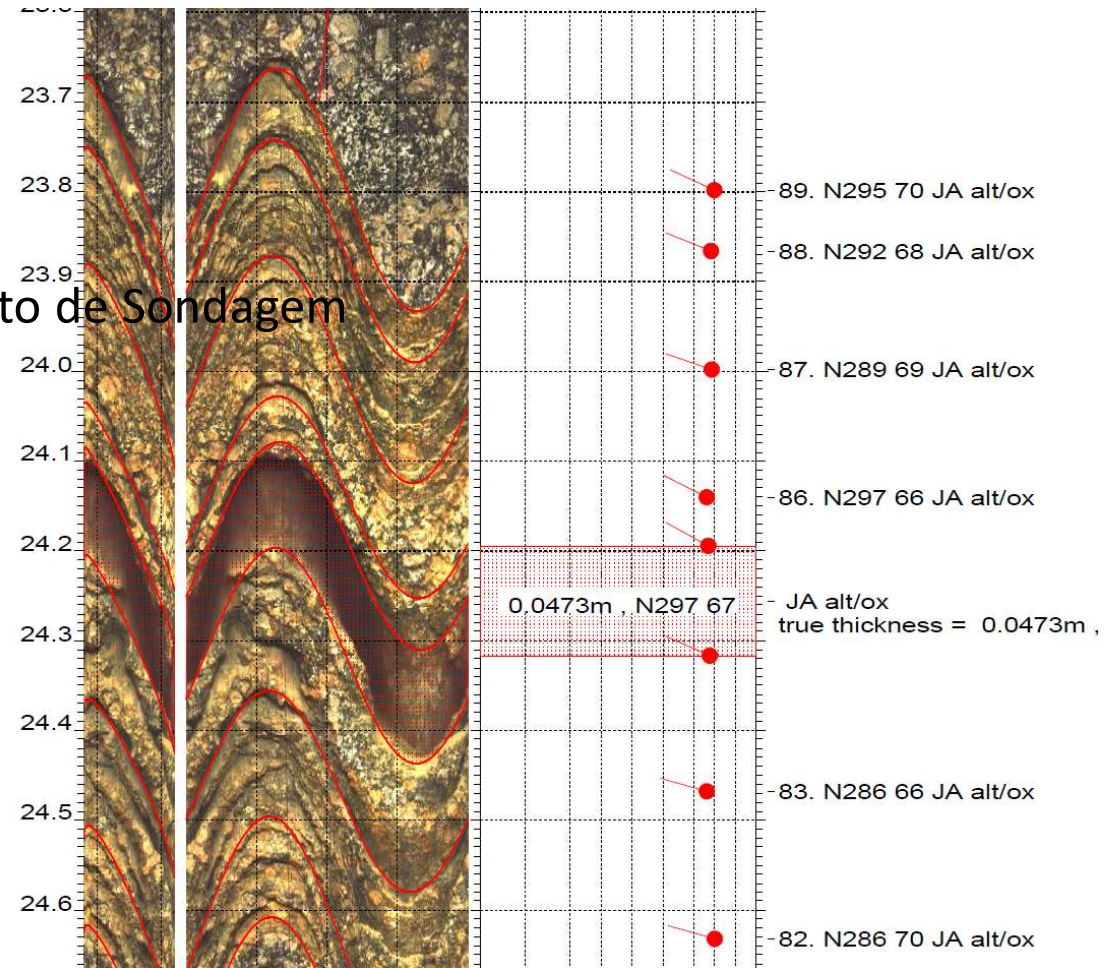
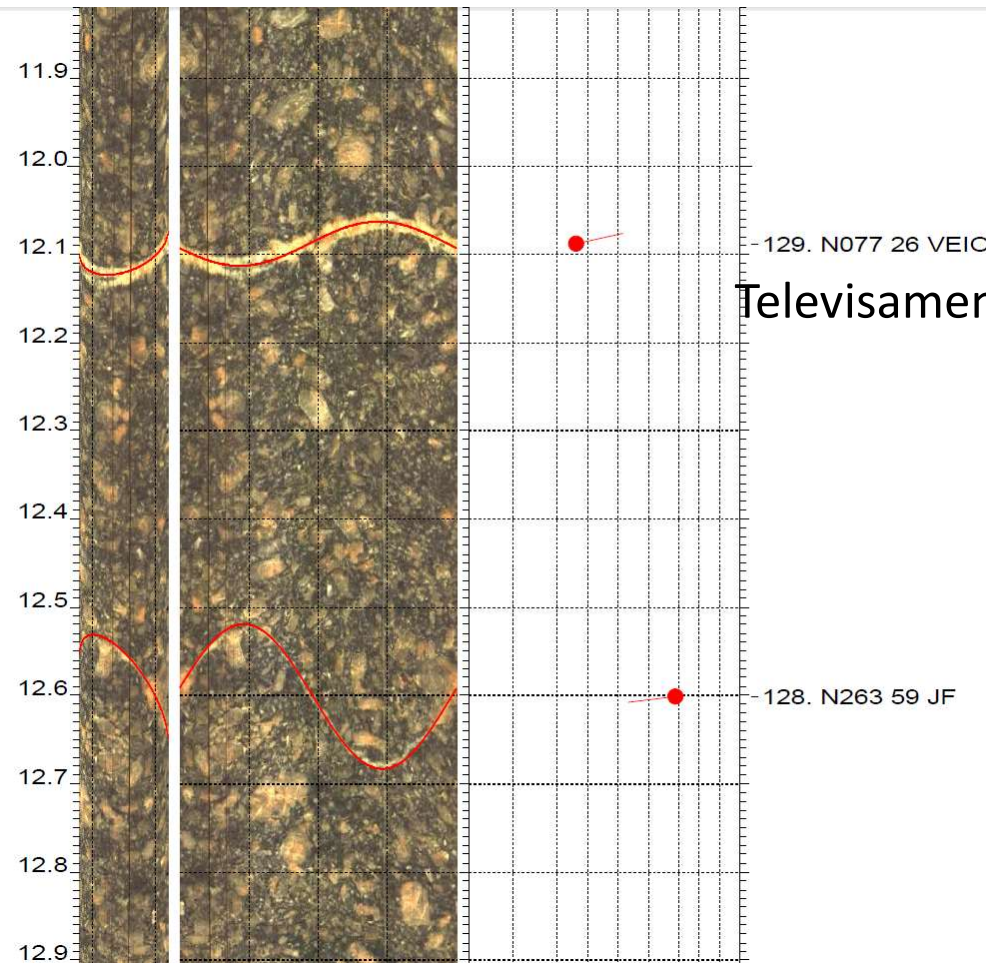


Fratura de baixo ângulo

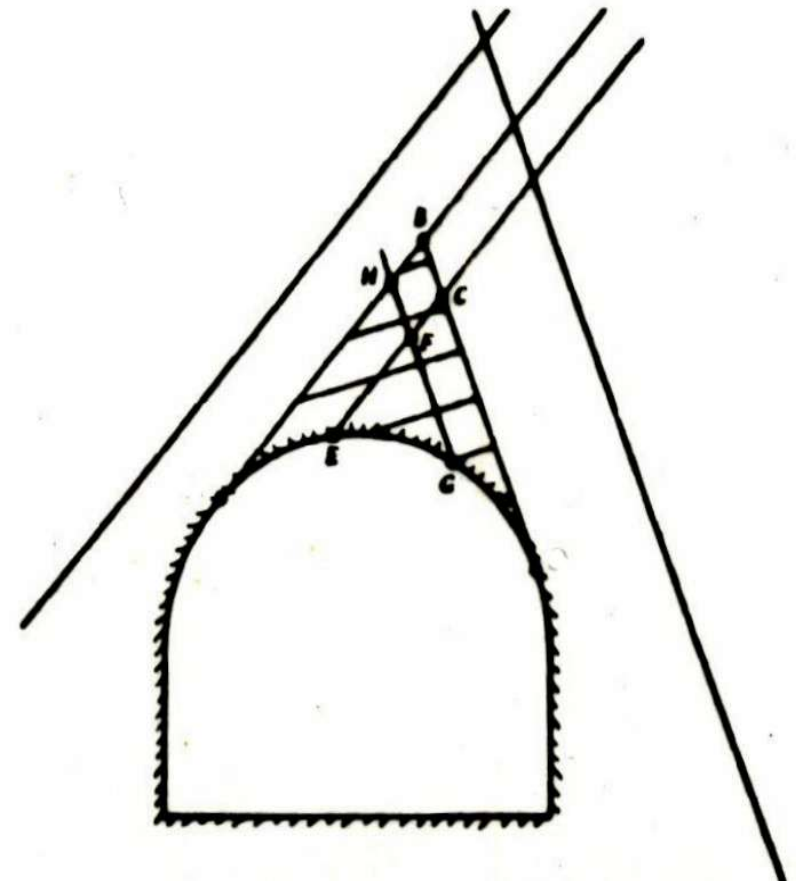
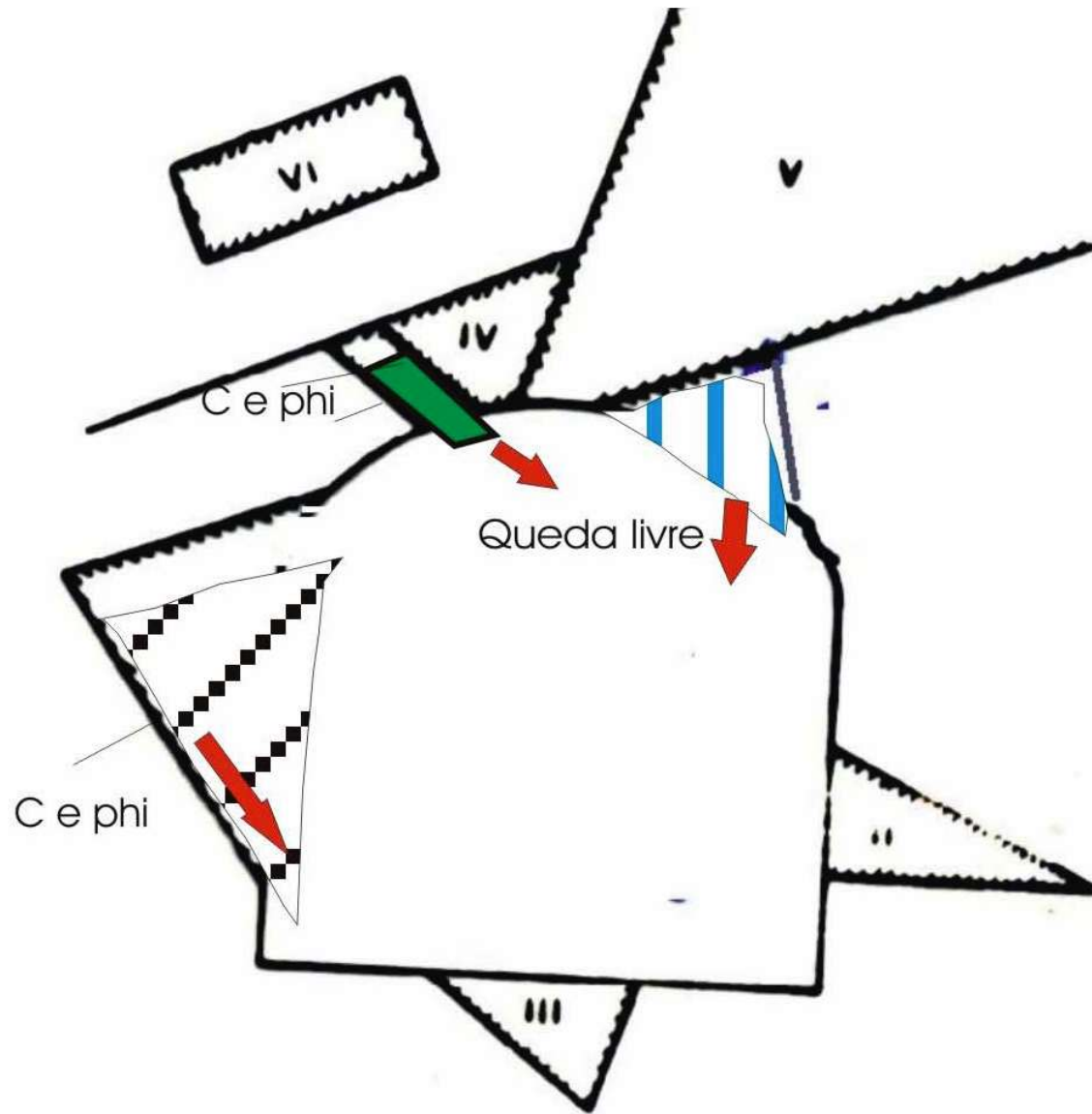
Perfilagem Óptica



Televisamento de Sondagem



Fraturas x Blocos x Estabilidade de Túneis



INFLUÊNCIA GEOTÉCNICA DE ASPECTOS GEOLÓGICOS

DESCONTINUIDADES



Gnaiss
Linha 5
Av. Santo Amaro
(Campo Belo)



**Linha 5
Lilás**

GNAISSE

Foliação propiciando a formação de planos de fraqueza.

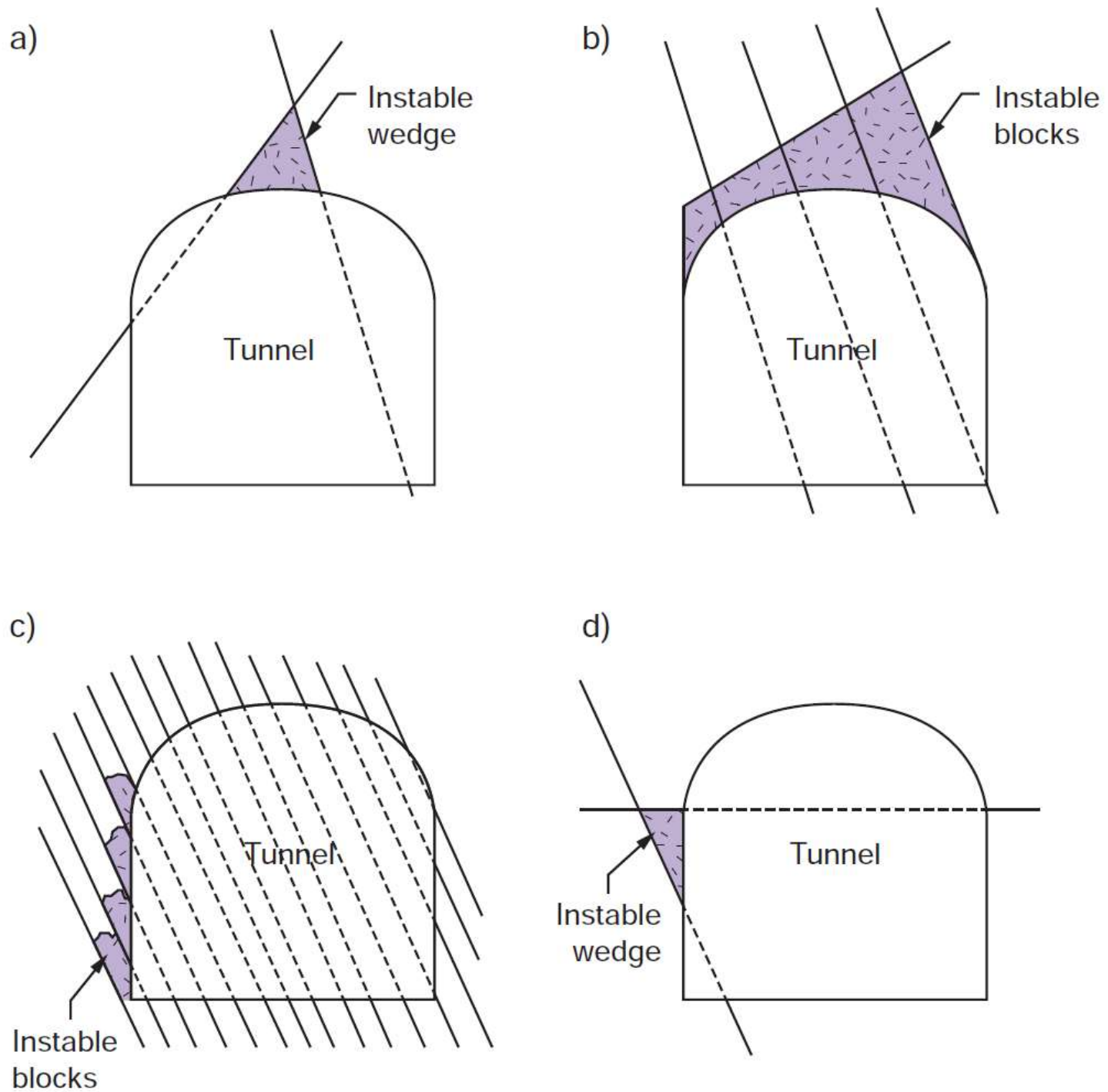
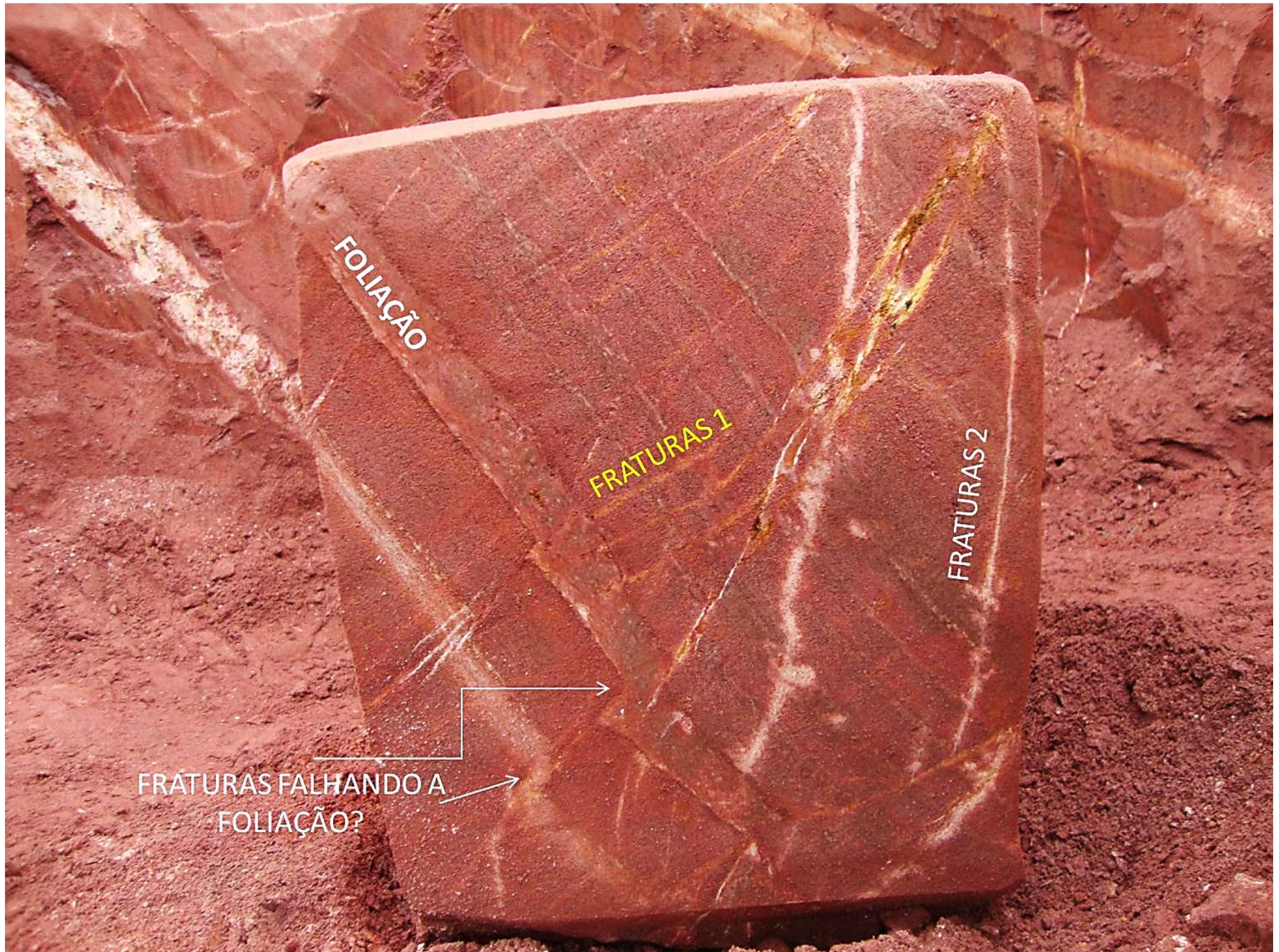
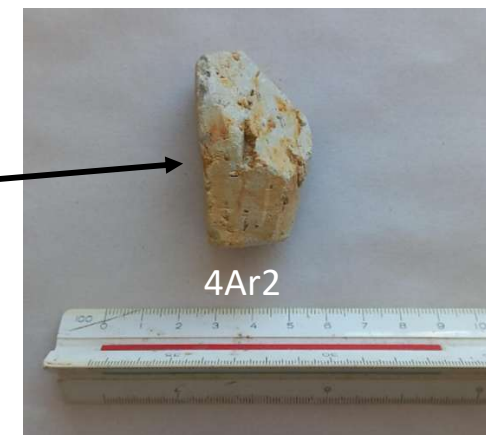
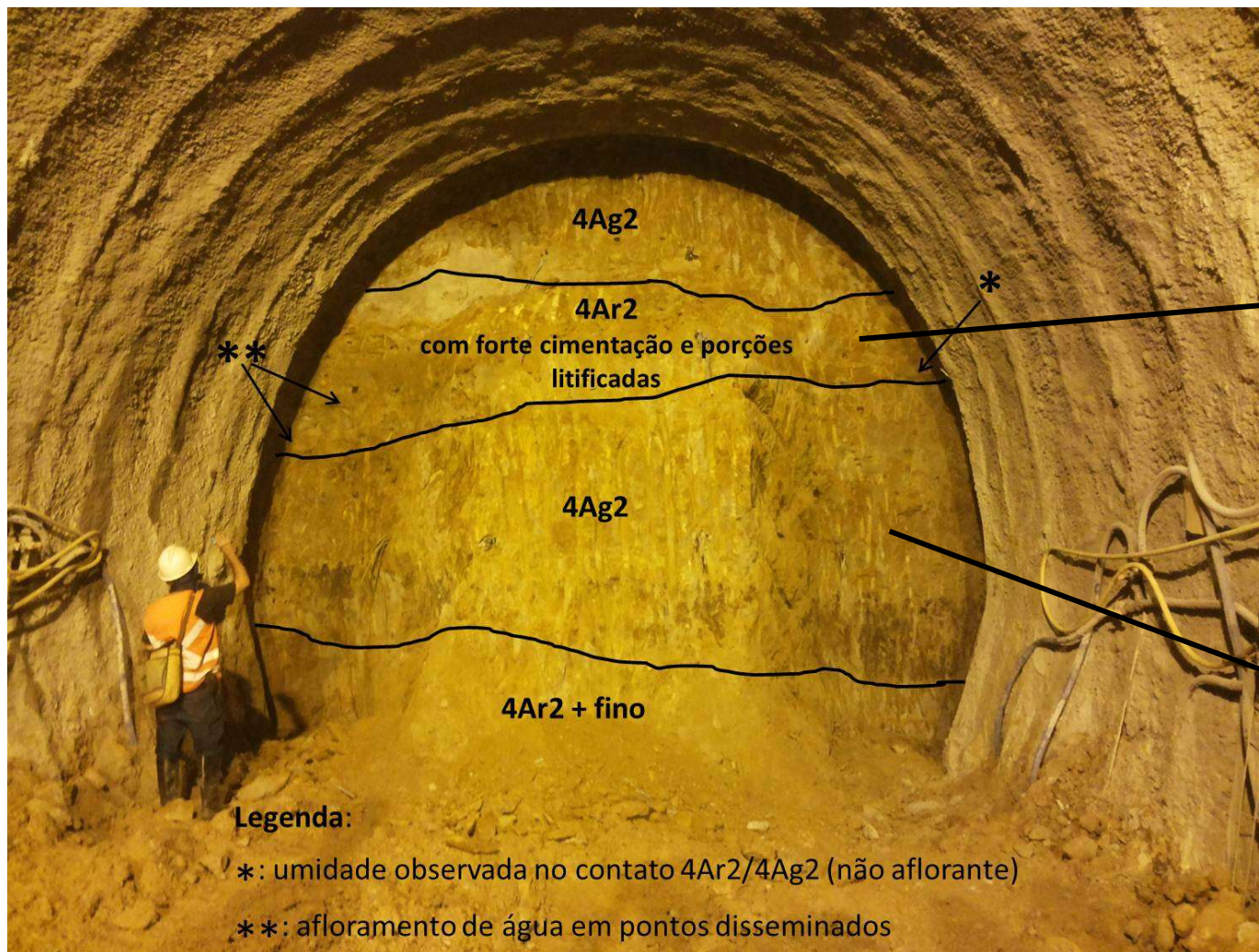


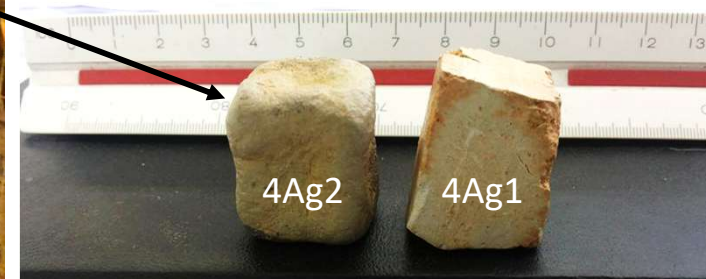
Figure 10 Stability problems caused by joints with unfavourable orientations.



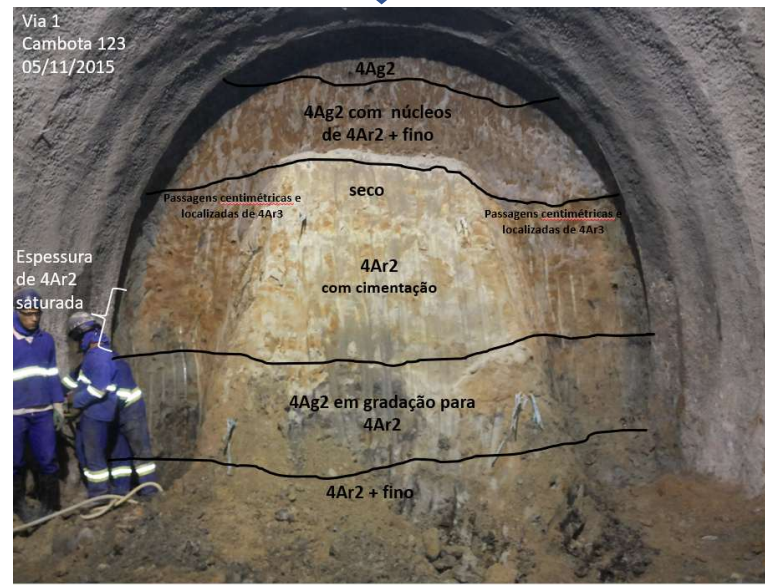
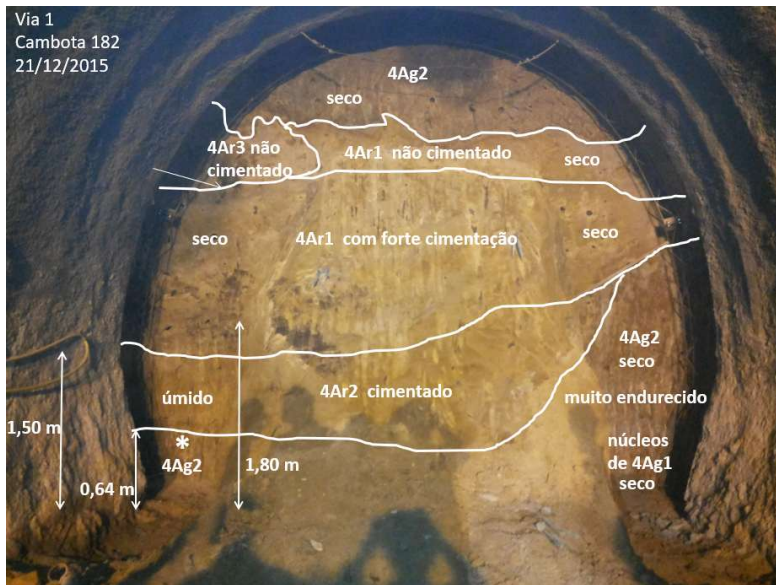
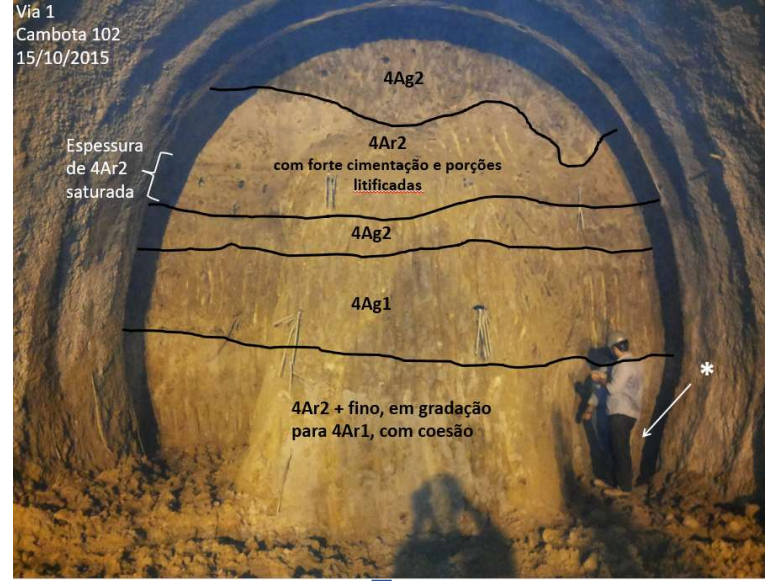
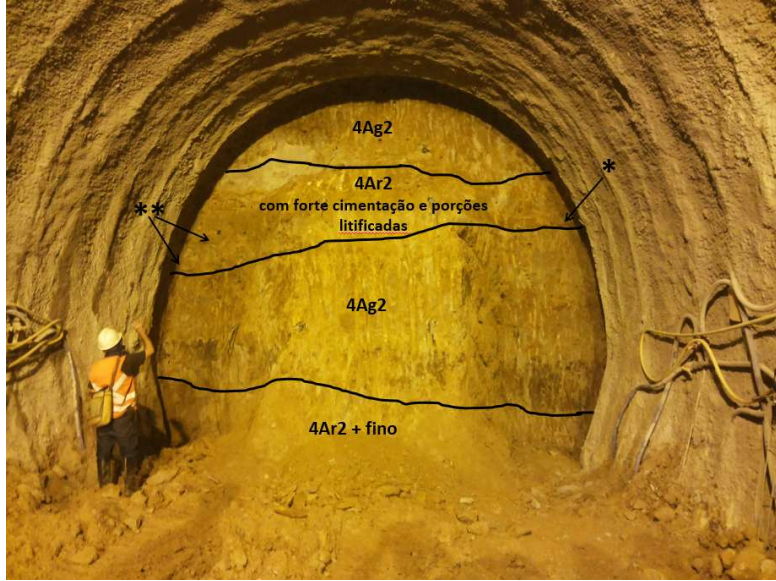




4Ar2 (Fm. Resende): areia silto-argilosa (fração areia média), cimentada, compacta a muito compacta, acinzentada.



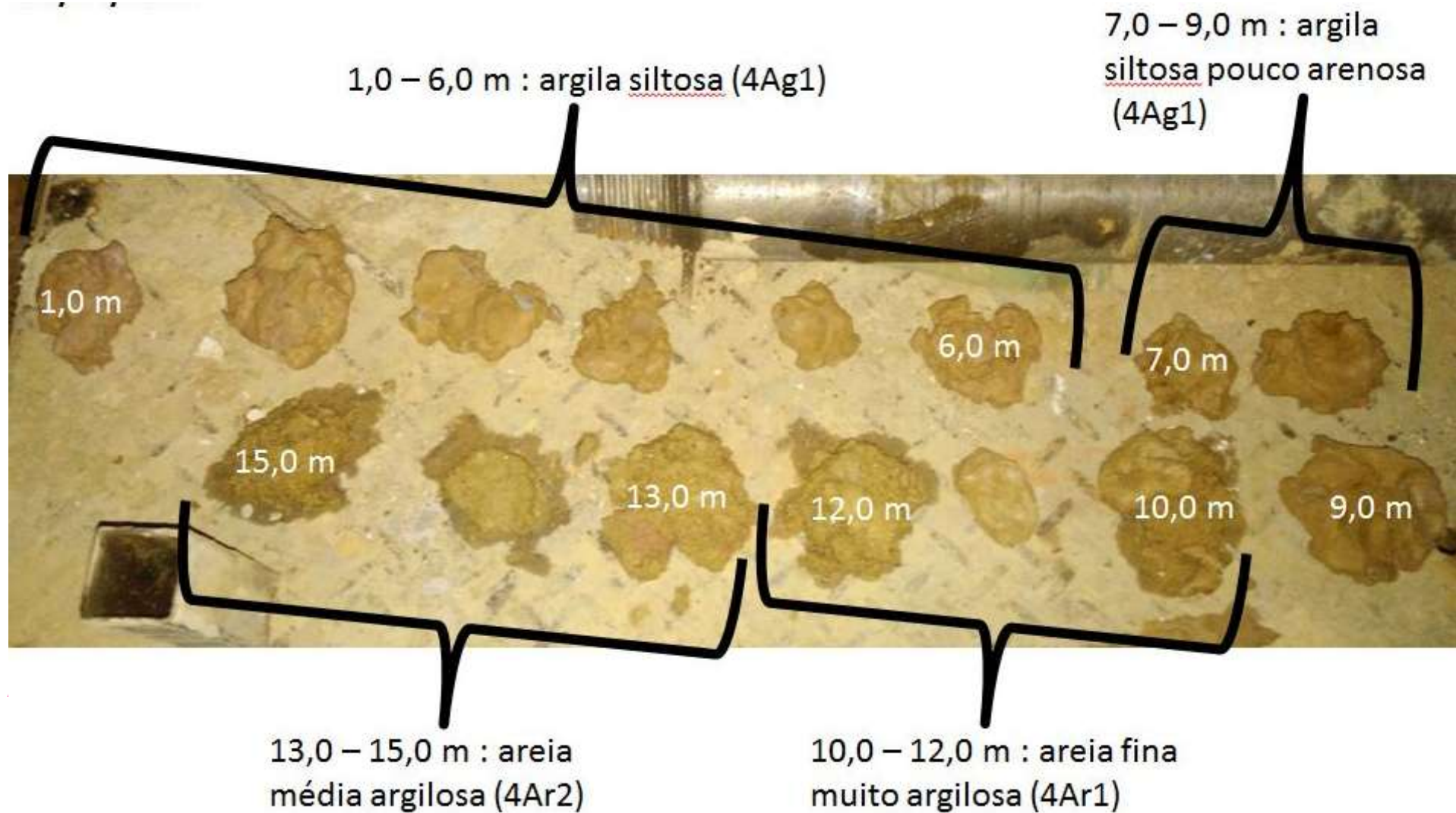
4Ag2 (Fm. Resende): argila arenosa (fração areia fina a média), rija a dura, acinzentada.



O mapeamento, cambota a cambota, foi consolidando o entendimento da estratigrafia local:

- Lente argilosa no centro da escavação foi fechando e dando lugar a uma frente predominantemente arenosa (não descuidar dos elementos de drenagem interna do maciço);
- As camadas arenosas se mostravam gradativamente com maior grau de litificação (aumento da capacidade autoportante do maciço);





Comprimento de perfuração	até 1 m	1 - 2 m	2 - 4 m	4 - 6 m	6 - 8 m	8 - 9 m
litologia	argila siltosa pouco arenosa, variegada	argila arenosa (fração areia fina), bege	areia média a grossa com pedregulhos	areia média a grossa argilosa, bege	areia média a grossa argilosa, bege	areia média a grossa com pedregulhos
mineralogia	argilominerais e óxidos	argilominerais, óxidos, quartzo	quartzo + feldspato + micas	qtzo, feldspato, micas, argilominerais	qtzo, feldspato, micas, argilominerais	quartzo + feldspato + micas
fração argila	lavada e com muitos torrões	lavada e com muitos torrões	pouca, apenas lavada	presente, lavada	presente, lavada	pouca, apenas lavada
tingimento da água de retorno	avermelhados	amarelado	amarelado	amarelo ocre	amarelo ocre	amarelado
teste do sujar as mãos	sim	sim	não	pouco	pouco	não
classificação geotécnica	4Ag1/4Ag2	4Ag2	4Ar3	4Ar2	4Ar2	4Ar3

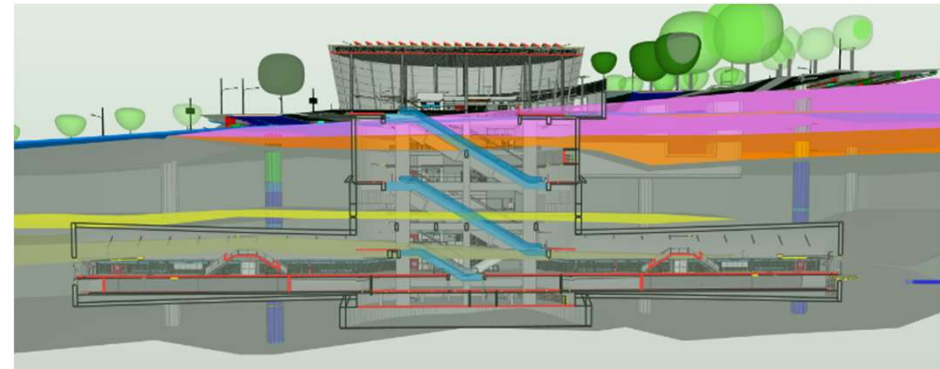
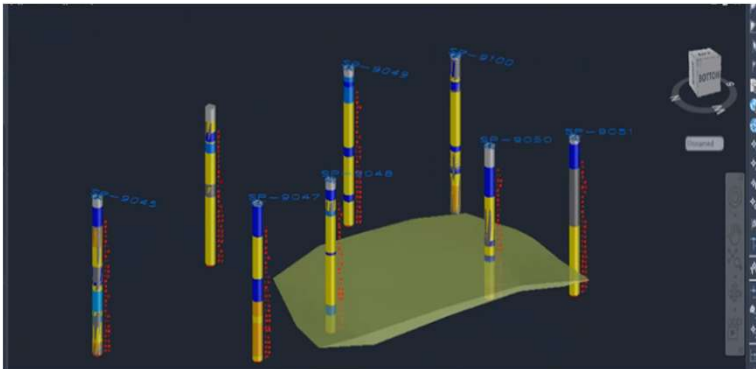
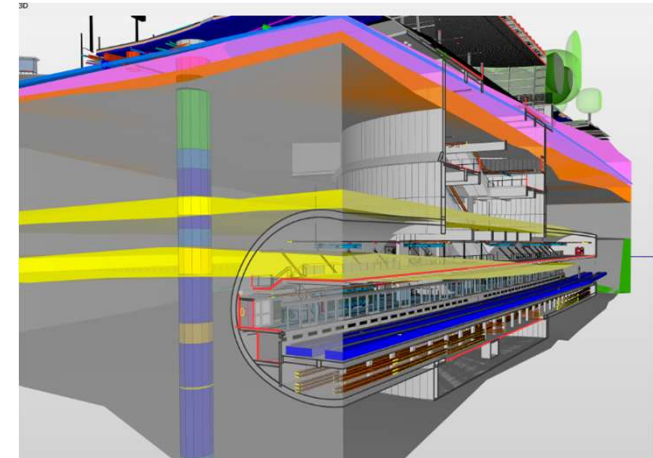
Acompanhamento das perfurações de tratamento

O conhecimento da geologia subsidia diversas soluções em projeto.

- Soluções de rebaixamento (aborda comunicação e isolamento de aquíferos, trata da permeabilidade das camadas);
- Soluções de condicionamento e tratamento de maciços (subsidia seleção de técnicas de acordo com o material geológico e os parâmetros geotécnicos);
- Fornece informações para dimensionamento e operação de tuneladoras (faixas granulométricas de desempenho, parâmetros relacionados a clogging, abrasividade de ferramentas de corte, etc);

Modelagem Geológica em ambiente BIM

- Inédita abordagem em todas as Estações da Linha 19-Celeste;
- Melhoria que representa **um diferencial na gestão de dados básicos** de investigações geológico-geotécnicas;
- Adotada **modelagem explícita**, integração de seções longitudinais e transversais, resultando em **sólidos tridimensionais que representam as camadas geológicas** em ambiente Civil 3D;
- Processo de **amadurecimento** junto a **fornecedores** de serviços de investigações e **projetistas**;





Obrigado!!!!

**Geólº Marcelo Denser Monteiro
mdmonteiro@metrosp.com.br**