

ESTUDO DE CASO: BARRAGENS DE REJEITO



Informações Básicas para a Construção de uma Barragem

- Caracterização do solo / rocha de fundação;
- Geologia local;
- Topografia local;
- Permeabilidade da fundação e dos materiais que compõe o corpo da barragem;
- Mapeamento do topo da zona saturada;
- Mapeamento das pressões d'água;
- Mapeamento de afloramentos e fraturamentos;
- ...

Informações Básicas para o Monitoramento da Segurança de uma Barragem

- Fluxo de água pelo corpo da barragem e pela fundação;
- Pressão interna;
- Recalques / marcos topográficos;
- Deformações / inclinometria;
- Nível d'água interno;
- Erosão / integridade dos taludes
- Batimetria do reservatório;
- ...

Principais Tipos de Barragem Utilizadas na Mineração

Barragem de Terra

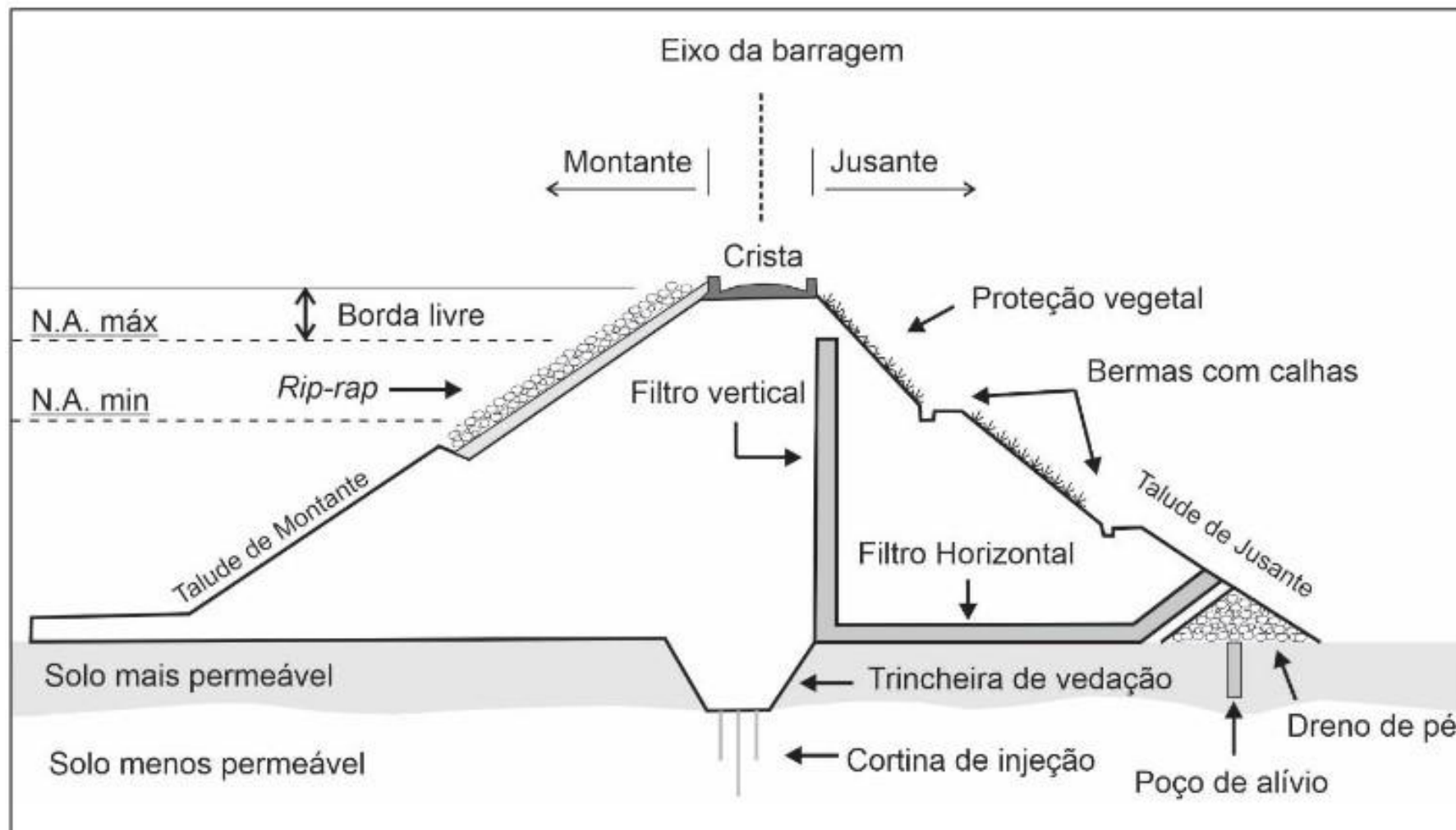
- Homogênea (corpo com material pouco permeável);
- Com núcleo impermeável (corpo com material permeável e núcleo com material pouco permeável);
- Necessário a presença de Filtros.

Barragem de Enrocamento

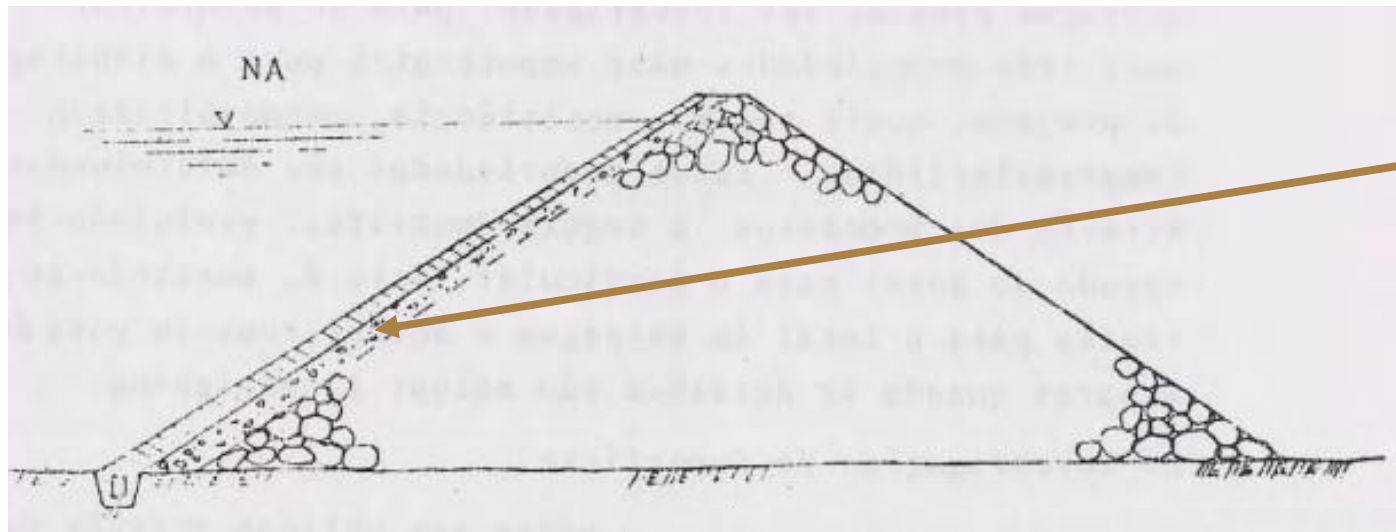
- Necessidade de barramento impermeável (normalmente feito de solo pouco permeável);
 - Barramento à montante;
 - Barragem com núcleo de terra.

- **Na prática, o corpo da barragem é composto do material mais disponível em suas proximidades, quando possível (alto custo de transporte)**

Elementos Básicos de uma Barragem de Terra



Elementos Básicos de uma Barragem de Enrocamento

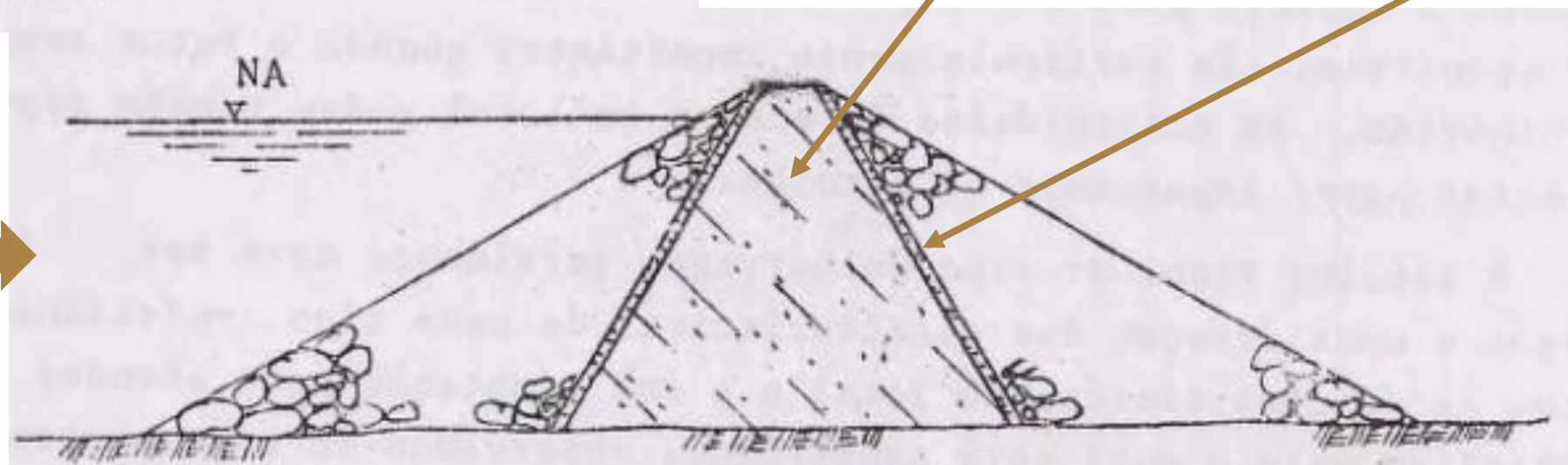


Barramento à montante

Núcleo Impermeável

Material de transição

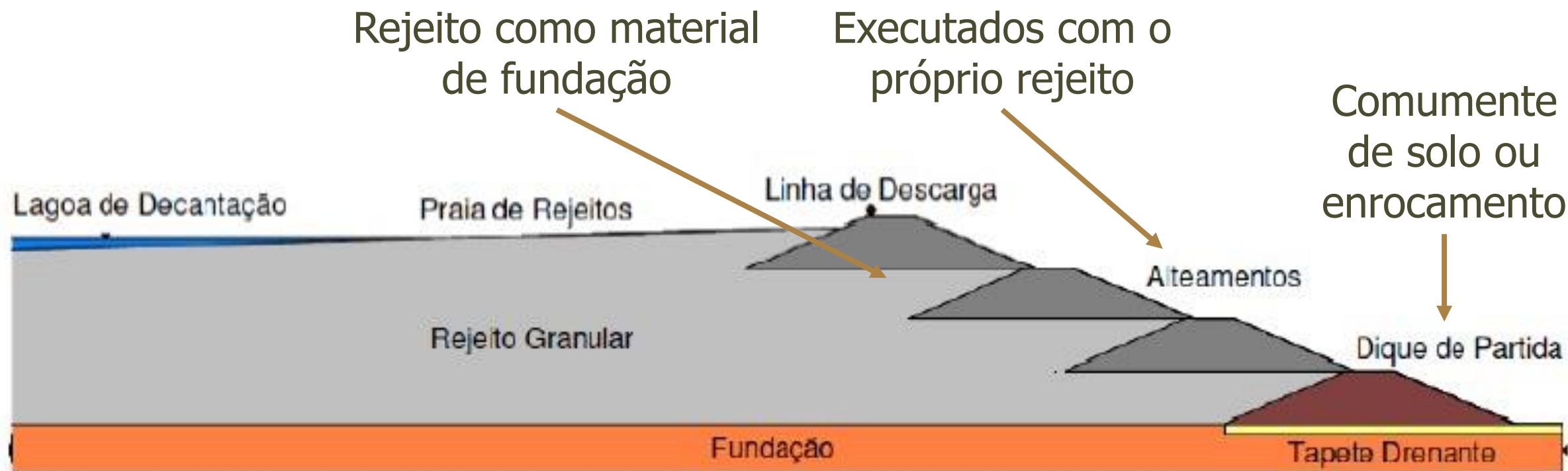
Conformação similar para barragens de solos mais permeáveis



Barragens de Rejeito – Métodos Construtivos

Alteamento à Montante (mais comum)

Necessidade de uma boa caracterização do rejeito



Barragens de Rejeito – Métodos Construtivos

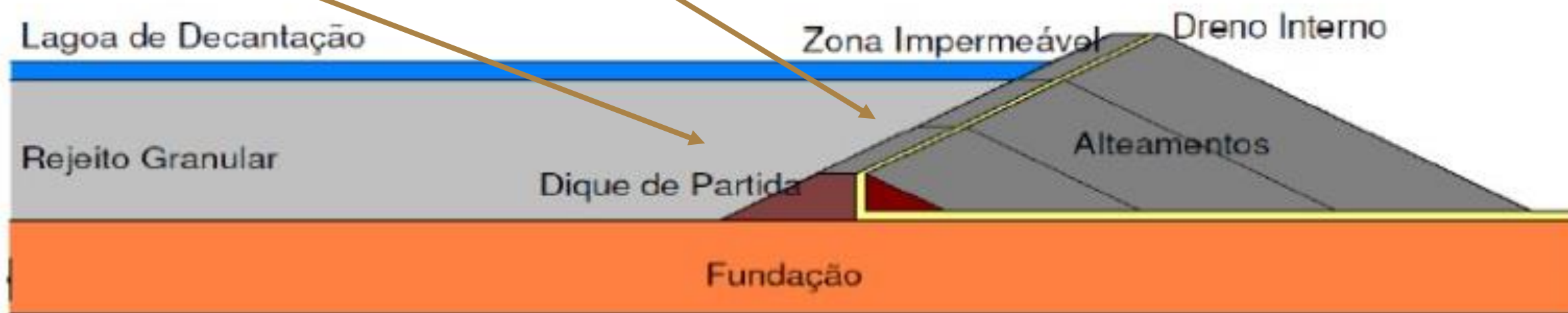
Alteamento à Jusante

Comumente
de solo ou
enrocamento

Executados com o
próprio rejeito

Necessita de mais espaço

Menos dependente das
características físicas do rejeito



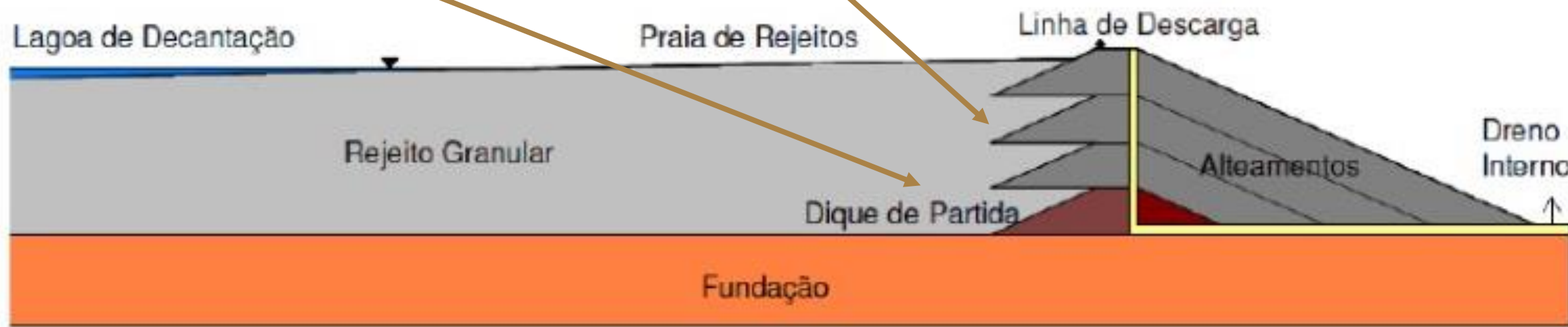
Barragens de Rejeito – Métodos Construtivos

Alteamento Central

Similar ao alteamento
à jusante

Comumente
de solo ou
enrocamento

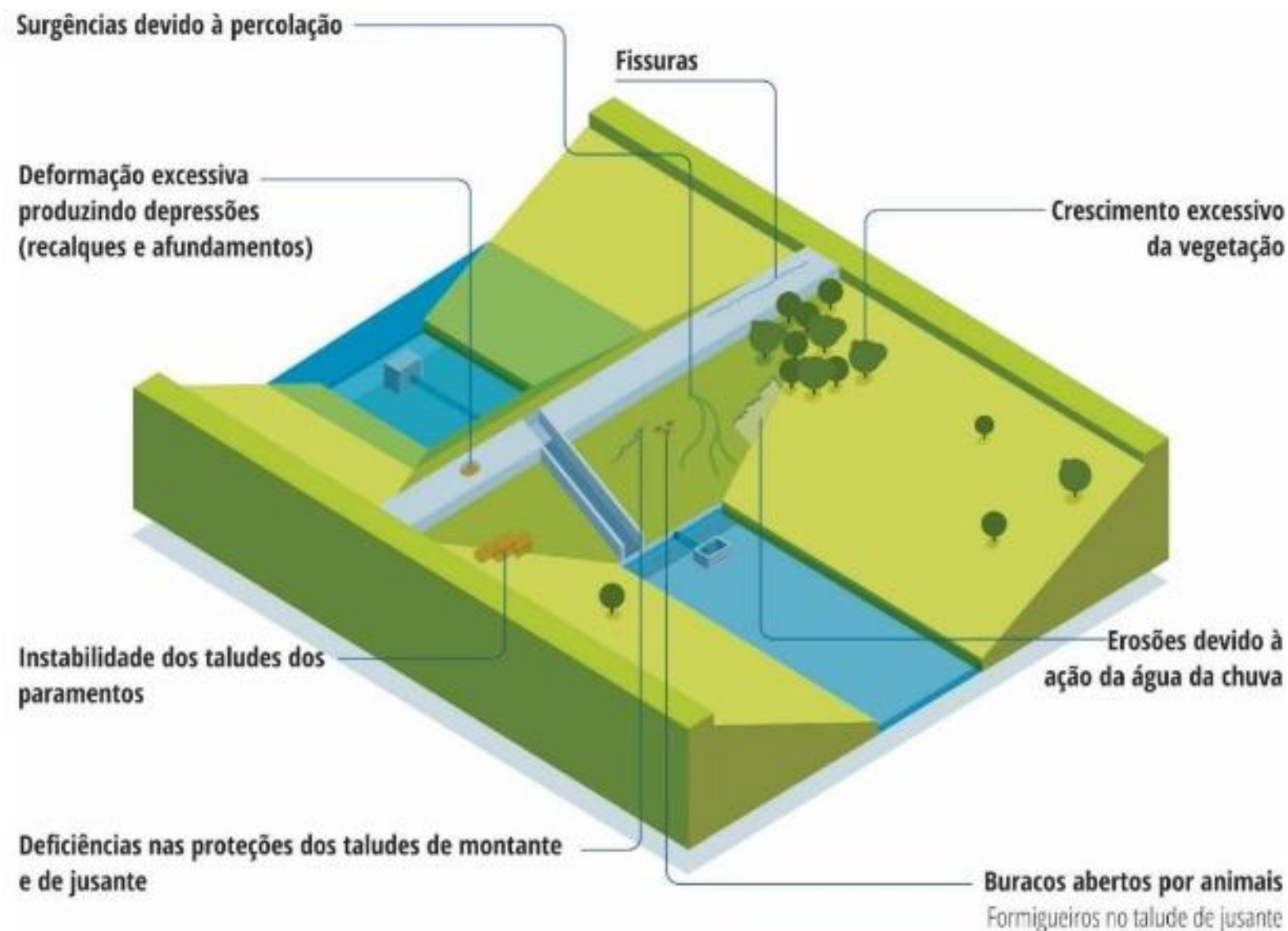
Executados com o
próprio rejeito



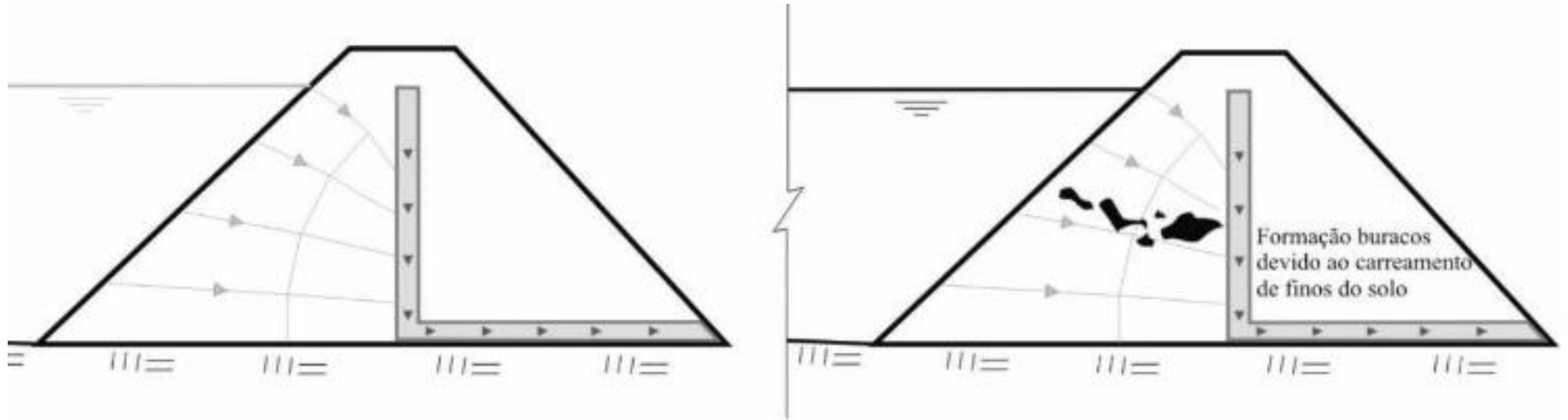
Problemas Estruturais Mais Comuns

- Deterioração da Fundação;
 - Aparecimento de fissuras na rocha, movimento de massa, ...;
- Deterioração dos Taludes;
- Erosão interna dos materiais;
- Recalques excessivos;
 - Exemplo: barragens de terra apoiadas sobre solos moles;
- Liquefação;
 - Em evidência após catástrofes recentes envolvendo barragens de rejeito;
 - Potencial de liquefação pode ser identificado com ensaios sísmicos;
- Galgamento;
- Piping.

Problemas Comuns em Barragens segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

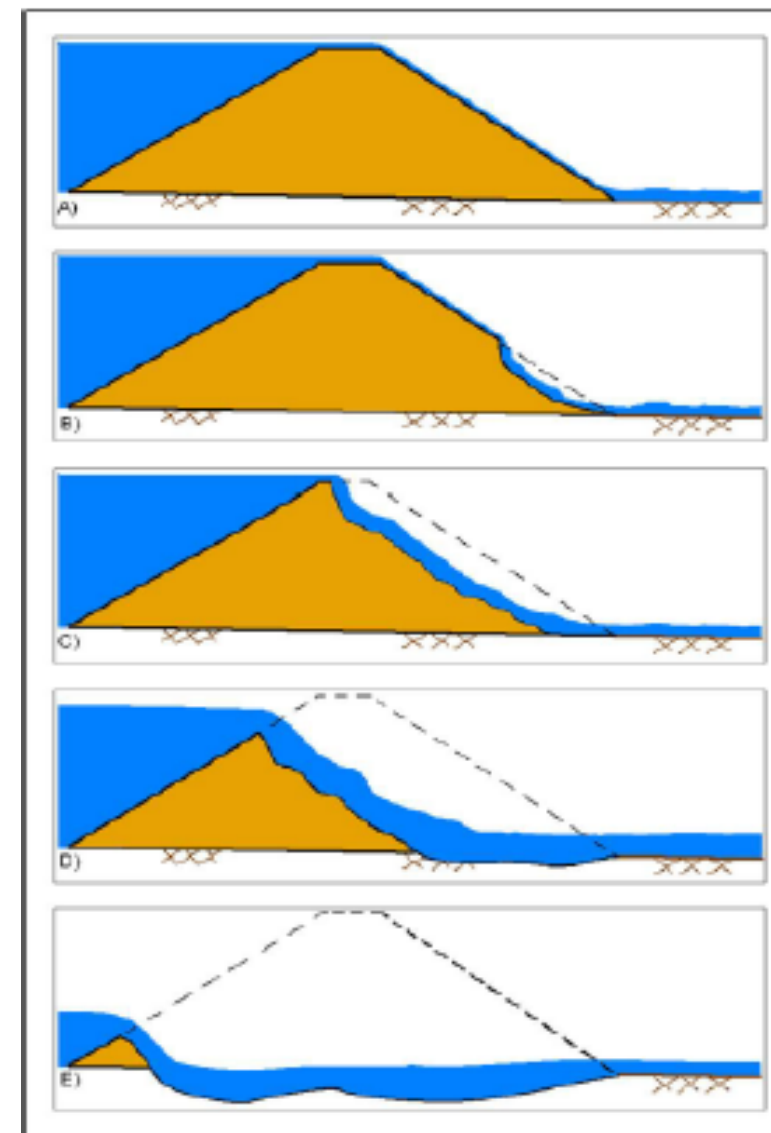


Erosão Interna dos Materiais



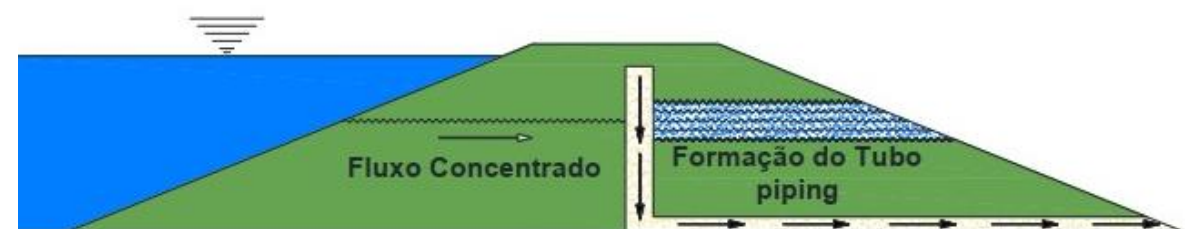
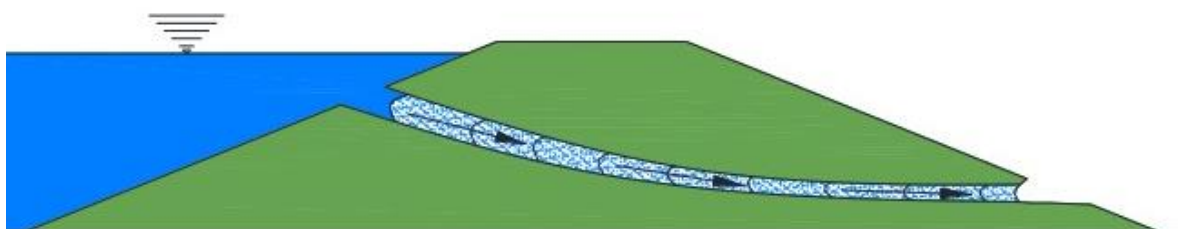
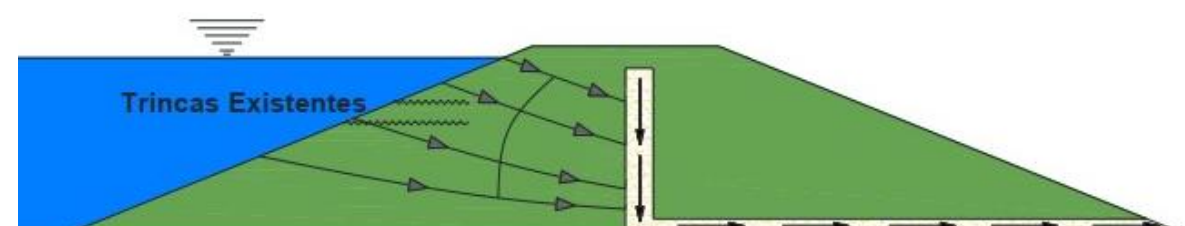
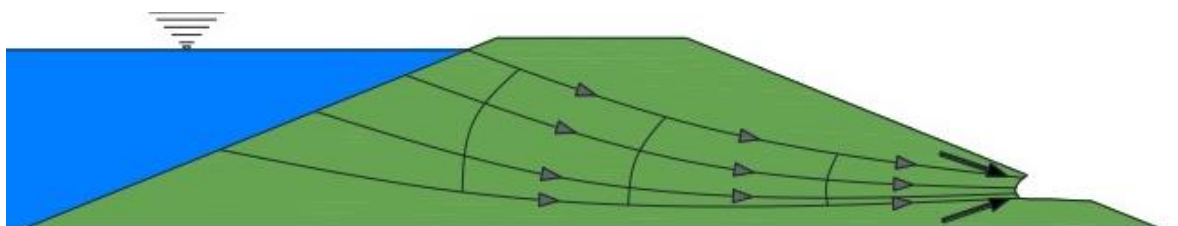
Galgamento

- Fluxo de materiais sobre a crista da barragem;
 - Superação da capacidade de armazenamento do reservatório;
- Mais comum em pequenas barragens onde não houve um dimensionamento adequado (áreas rurais).



Piping

- Causado por altas taxas de infiltração em um caminho preferencial de fluxo;
 - Carreamento de partículas de solo;
 - Aparecimento de canais subterrâneos.



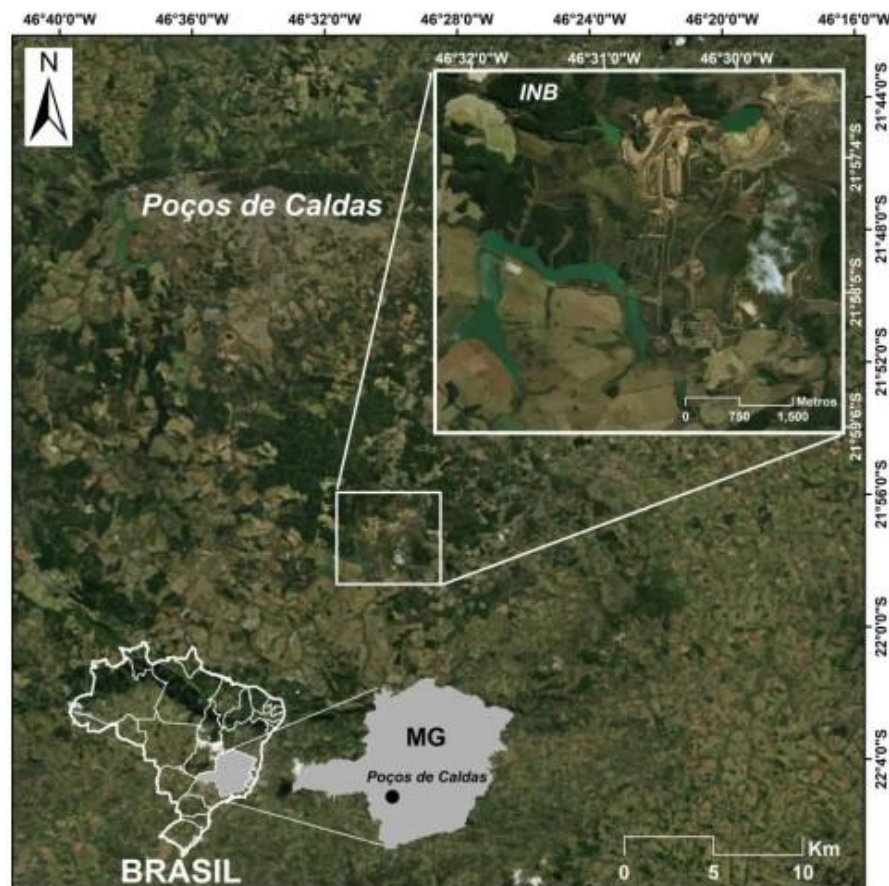
ESTUDO DE CASO 01: MINA OSAMU UTSUMI, POÇOS DE CALDAS - MG



Barragem de Poços de Caldas – Mina Osamu Utsumi

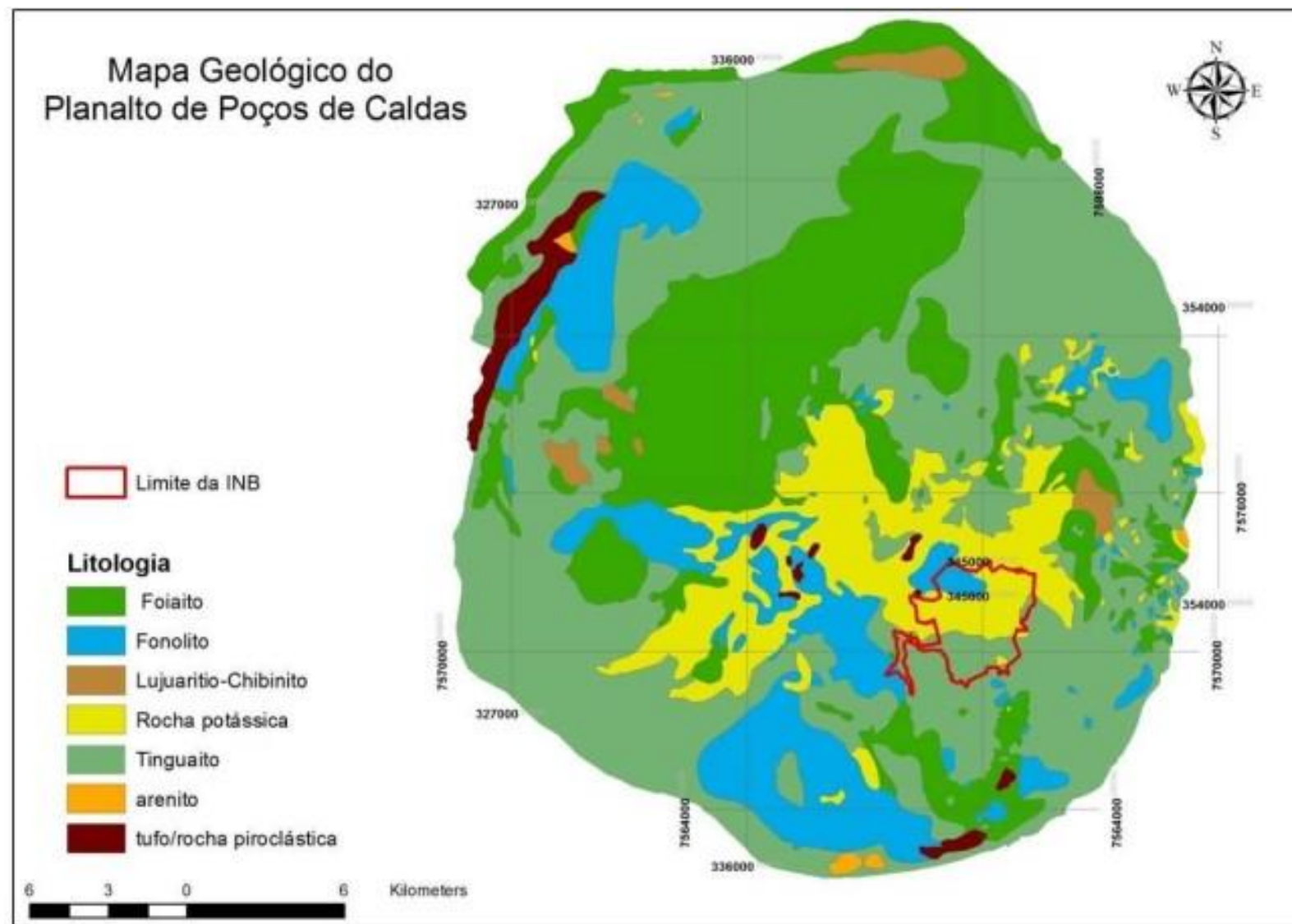
- Barragem de contenção de rejeitos de mineração de urânio;
- Responsabilidade: Indústria Nuclear do Brasil (INB);
- Estado atual: Desativada (1982 – 1995);
- Motivação da investigação: Diagnosticar a causa das surgências de água observadas numa área à jusante da ombreira direita da barragem;
 - Possibilidade de contaminação por efluentes não tratados;
- Data da investigação: 2020.

Vista Aérea



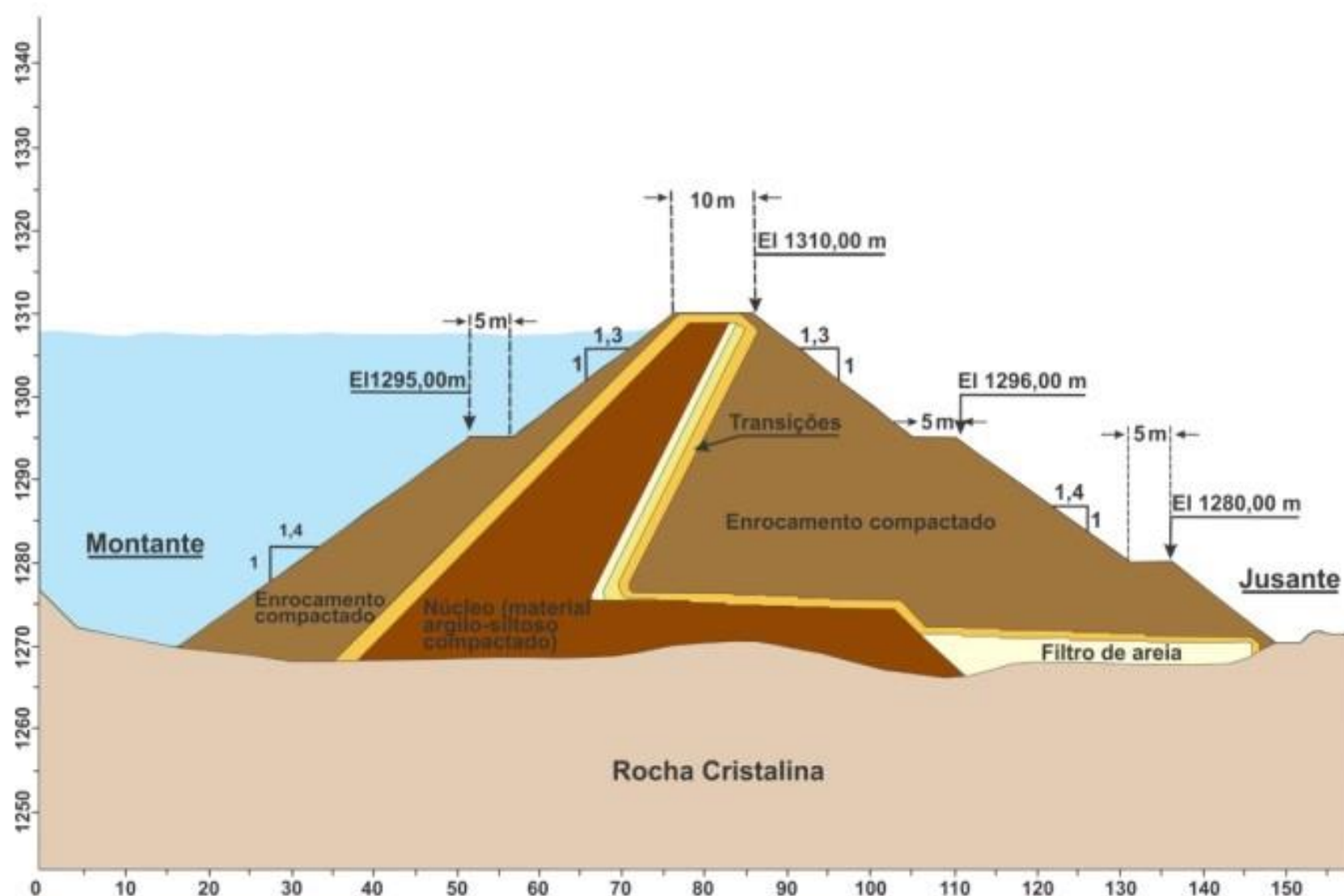
Geologia

- Entre a Bacia Sedimentar do Paraná e a Serra da Mantiqueira;
- Situada sobre o maciço alcalino de Poços de Caldas.

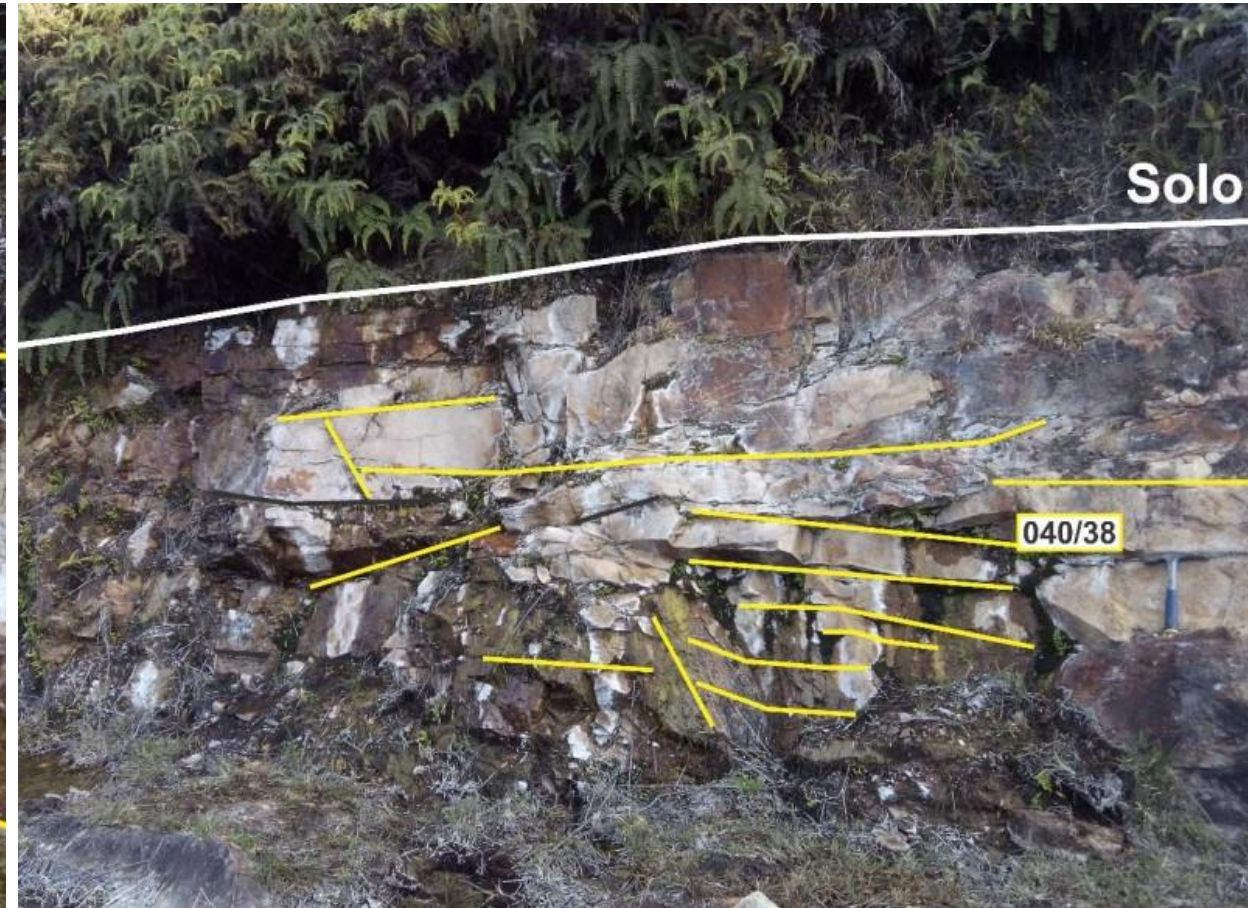


Conformação

- Barragem de enrocamento com núcleo de argila;
- Aproximadamente 30 metros de altura.



Anomalias Identificadas no Local

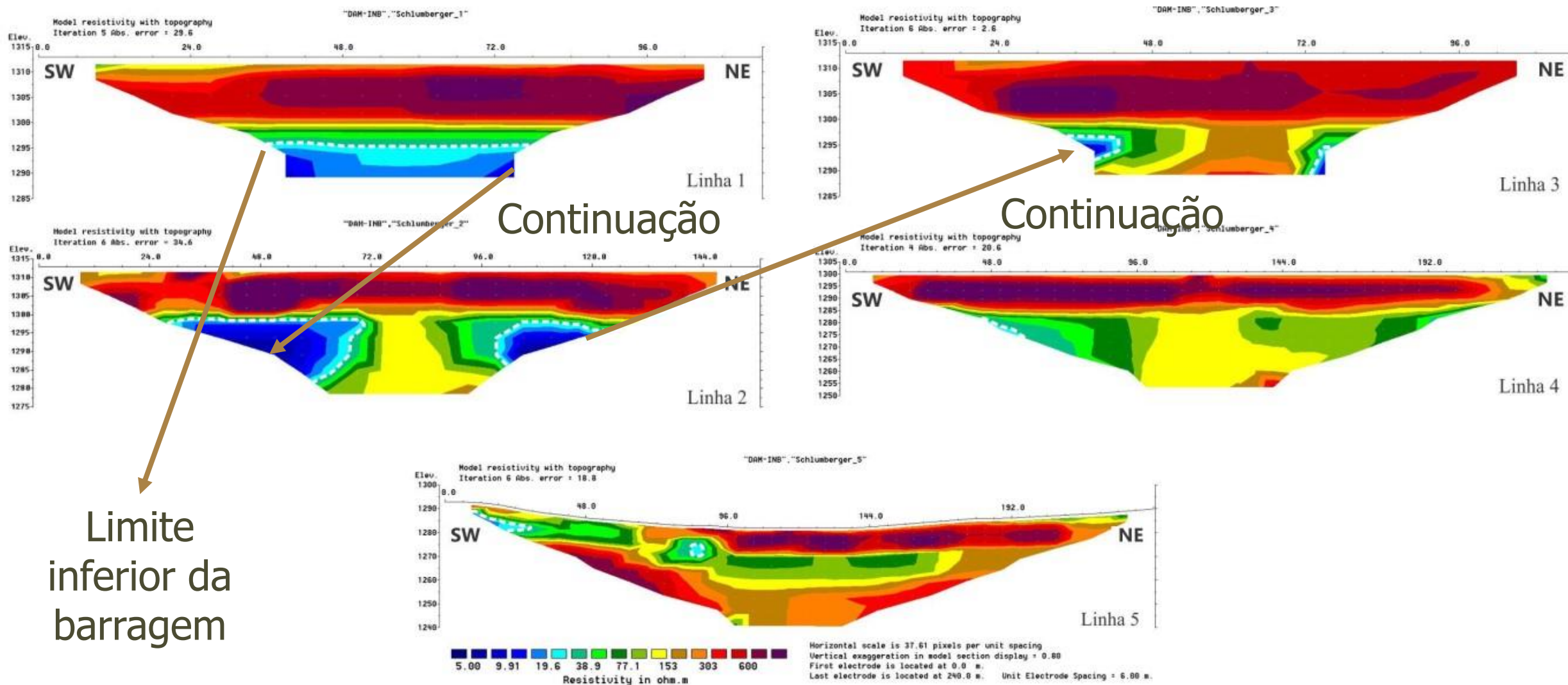


Ensaio Realizados na Investigação

- Caminhamento elétrico (eletrorresistividade);
 - 5 linhas geofísicas.

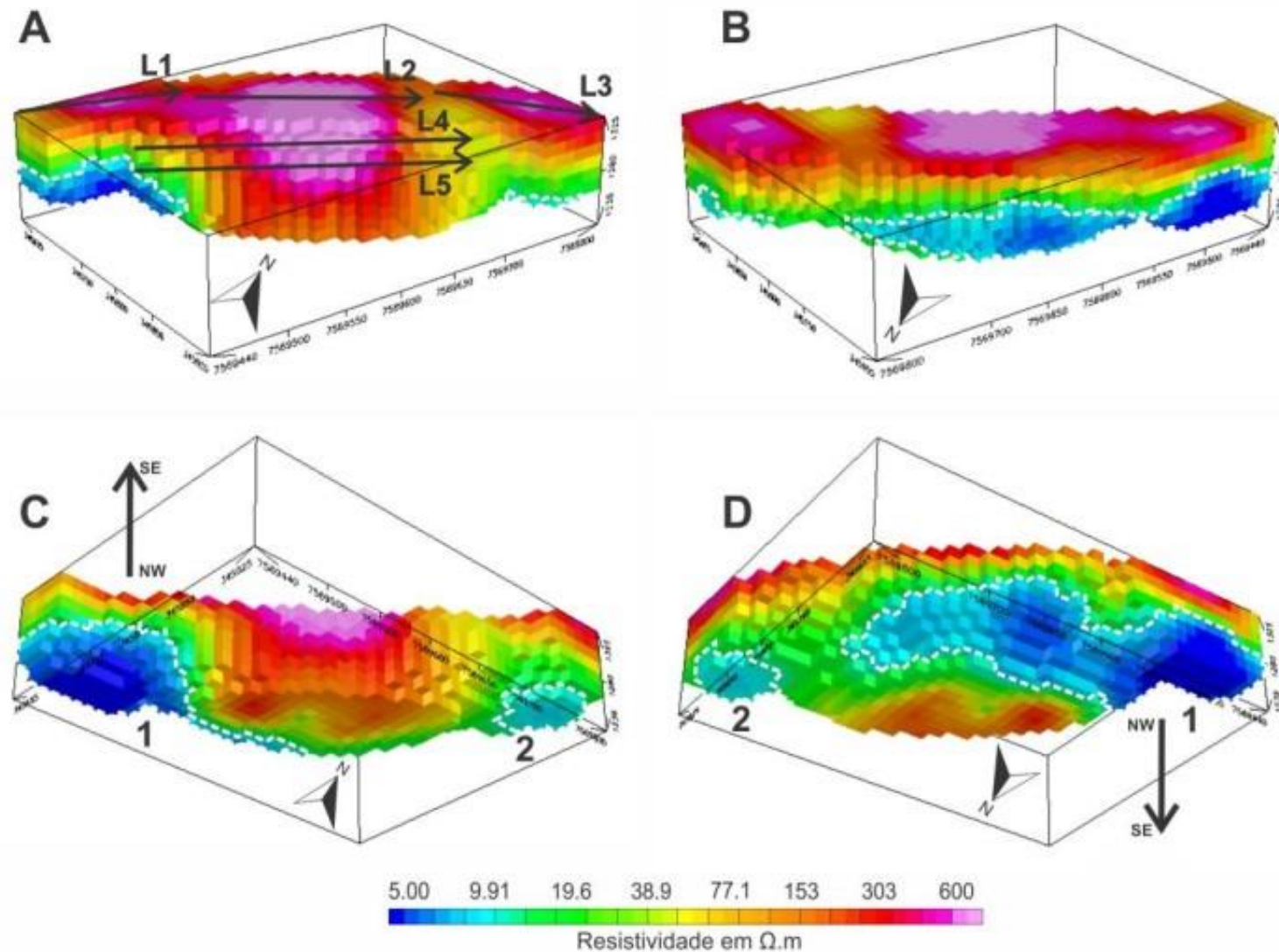
Linhas Geofísicas





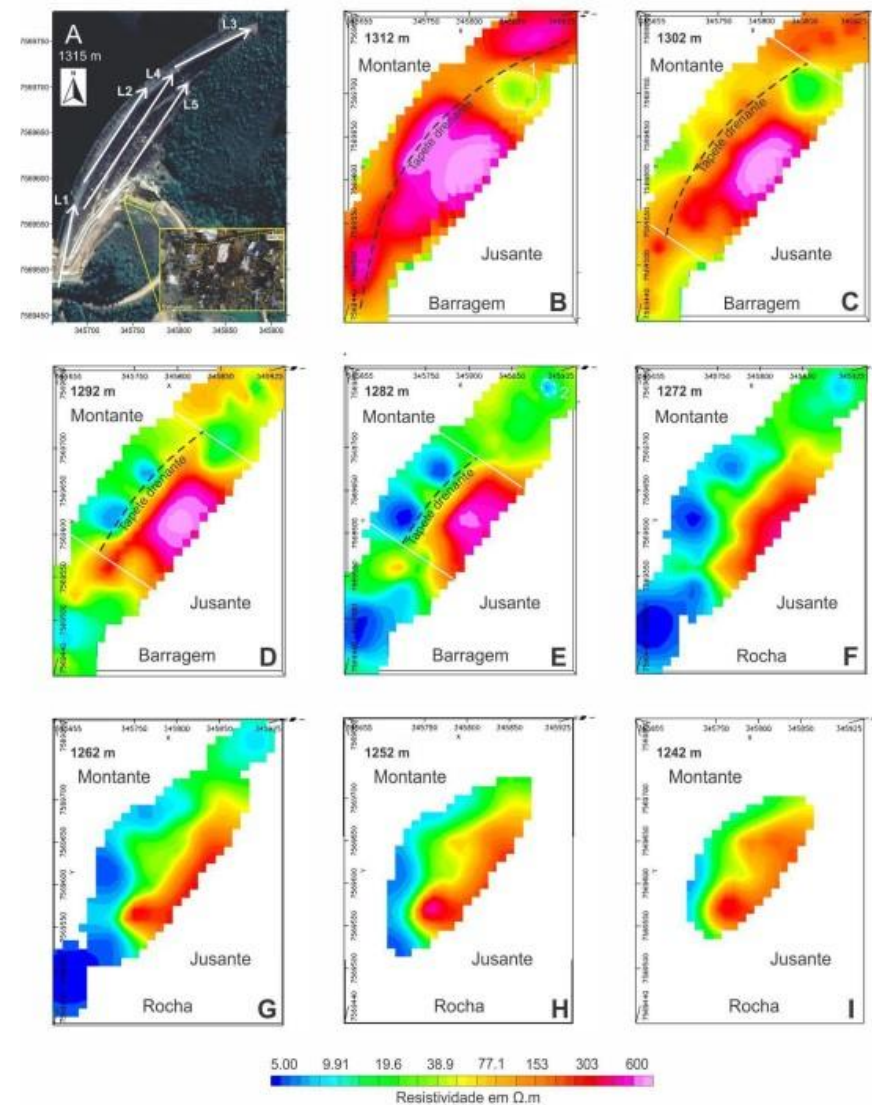
Caminhamento Elétrico em 3D

- Possibilidade de ver regiões com fluxo de água;
- Possibilidade de identificar o núcleo impermeável no centro da barragem;
- Possibilidade de identificar a direção do fluxo (NW a SE).



Caminhamento Elétrico em Diferentes Profundidades

- O fluxo de água se concentra na ombreira direita, local onde se observou as surgências de água;
- O fluxo ocorre por baixo do corpo da barragem (cerca de 30 metros de profundidade), conforme observado nas figuras E, F, G e H;
- O maciço rochoso utilizado como material de construção não era homogêneo (presença de diversos materiais com resistividades diferentes);
- As figuras D e E mostram que o tapete drenante está funcionando corretamente.



Conclusões

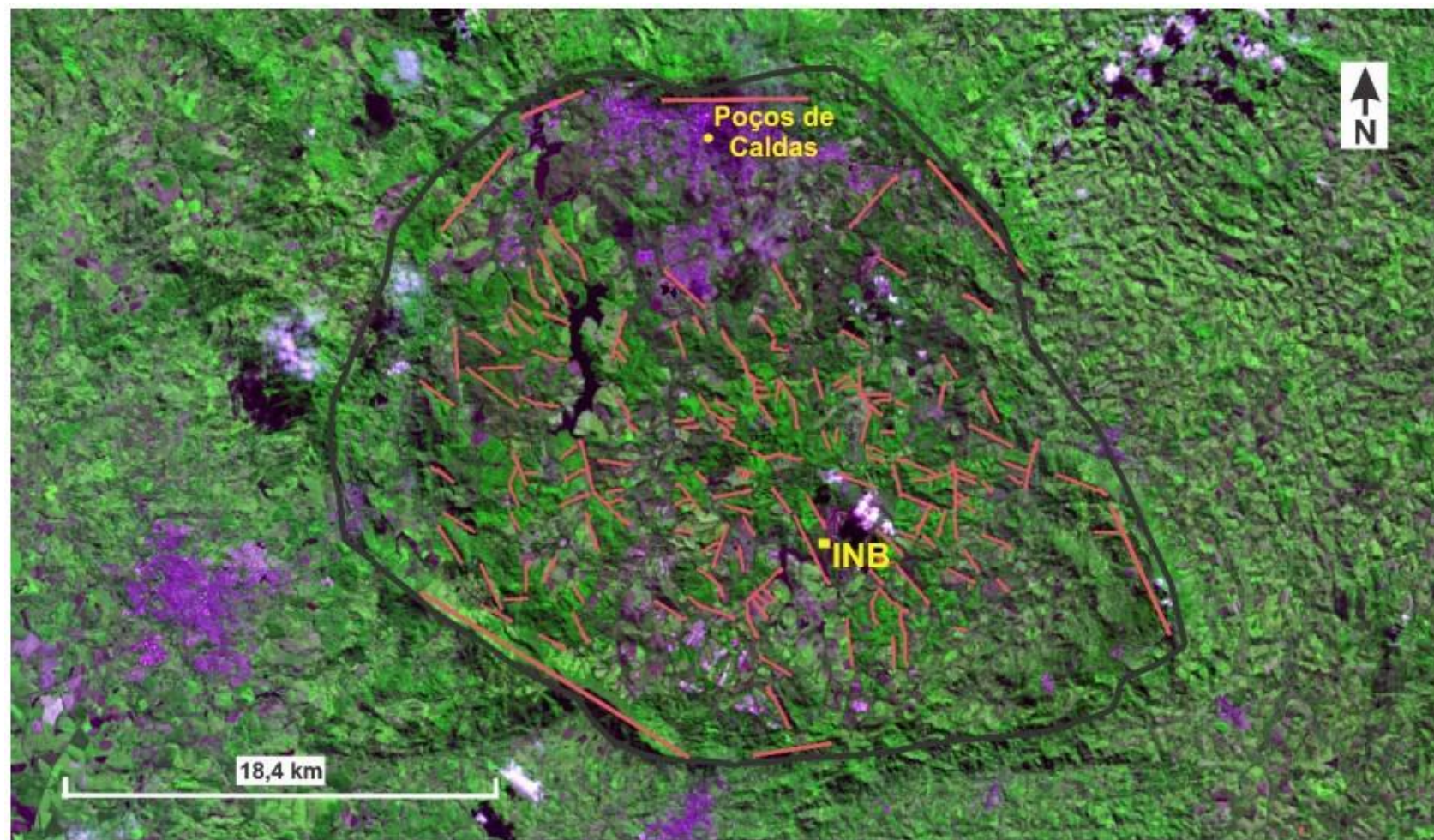
- O fluxo de água ocorre através da rocha de fundação (abaixo da cota 1290);
- Não há evidências de piping ocorrendo dentro do corpo da barragem.

Indícios

- Em campo observou-se que o sistema de fraturas da rocha de fundação possui a mesma direção que o fluxo de água.

Sistema de Fraturas Observado em Campo

- Direção principal: NW – SE. Mesma direção do fluxo de água.



— Maciço de Poços de Caldas
— Fraturas

● Poços de Caldas
■ INB

QUESTÕES

- 1) É possível observar todas as estruturas internas da barragem pelos resultados de eletrorresistividade? Quais estruturas podem ser identificadas?
- 2) Que ensaios poderiam ter sido realizados antes da execução da barragem para identificar características de campo que causaram a anomalia?

ESTUDO DE CASO 02: BARRAGEM G1, CAJATI - SP



Barragem B1 – Cajati

- Barragem de contenção de resíduos de lama calcária;
- Responsabilidade: Mosaic Fertilizantes;
- Estado atual: Ativa;
- Motivação da investigação: Elaboração do Relatório de Segurança de Barragem;
 - Relatório realizado rotineiramente em barragens de rejeito ativas;
- Data da investigação: 2019.

Vista Aérea

Instrumentação:



Geologia

- Construída sobre solo aluvionar mole.

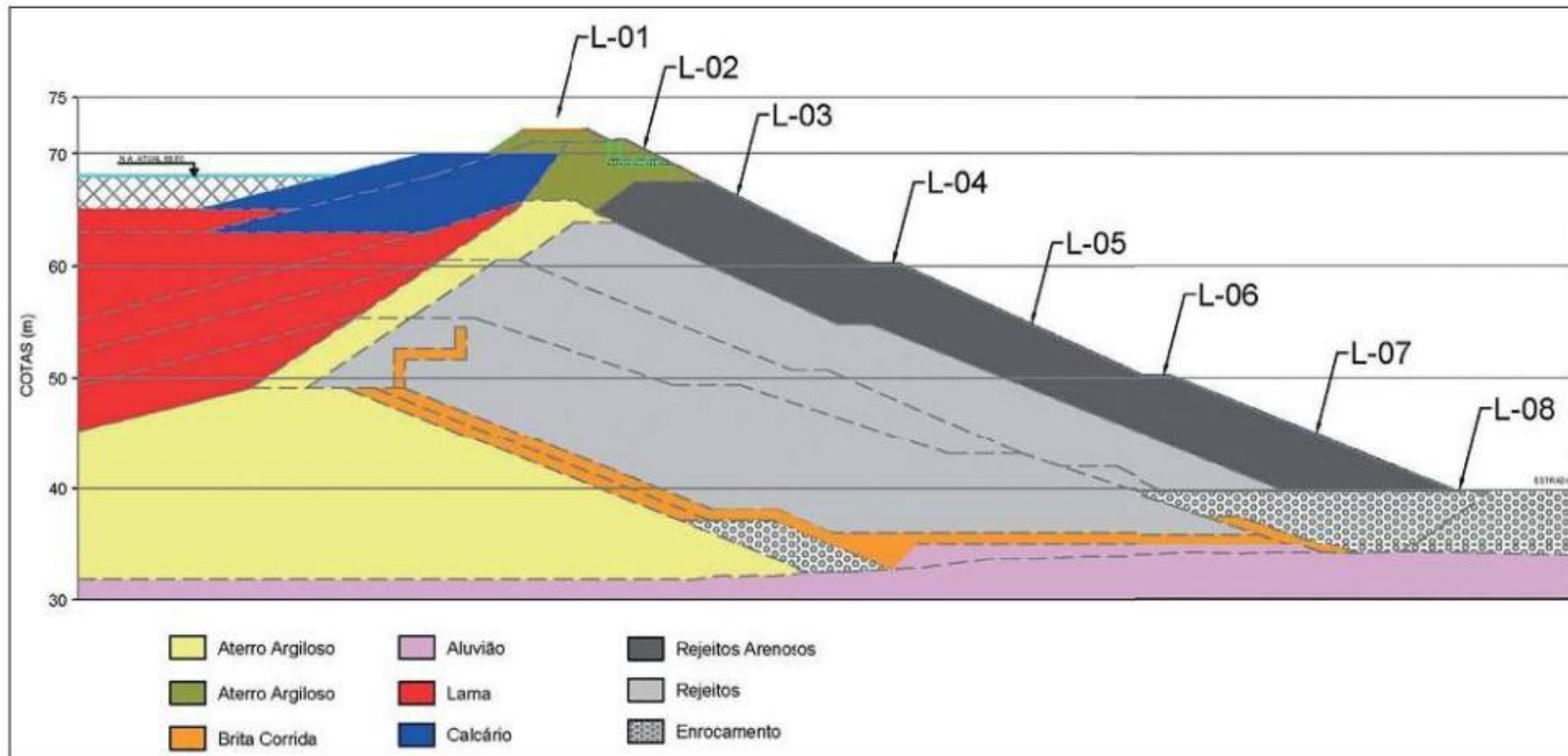
Alteamentos

- Possui 9 alteamentos sucessivos;
 - 6 alteamentos à jusante;
 - 3 alteamentos à montante;
- Dique de partida de solo homogêneo (argiloso) com enrocamento de pé à jusante.

Ano	Etapas	Cota (m)	Método
1973	Dique de partida	49,1	-
1992	1º Alteamento	52,1	Jusante
1995	2º Alteamento	55,5	Jusante
1999	3º Alteamento	60,5	Jusante
2003	4º Alteamento	65	Jusante
2008	5º Alteamento	66	Jusante
2009	6º Alteamento	71	Montante
2013	7º Alteamento	72	Montante
2015	8º Alteamento	73	Montante
Em andamento	9º Alteamento	75	Jusante

Conformação

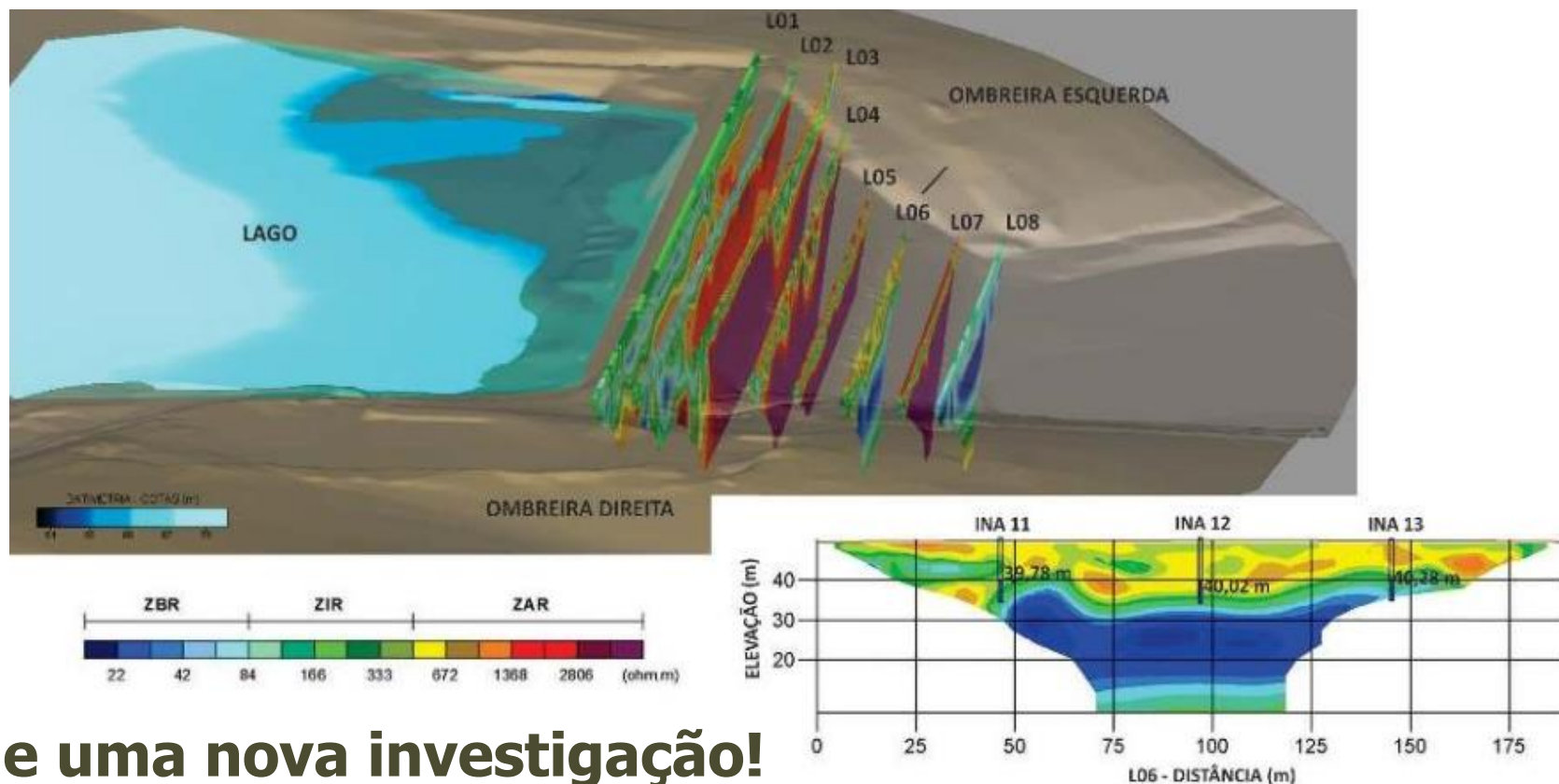
Alteamento misto: Alta complexidade



Ensaaios Realizados na Investigação

- Caminhamento elétrico (eletrorresistividade): 8 linhas geofísicas.

- Linhas 06 e 08 apresentam zonas de baixa resistividade abaixo da elevação 40 m;
- Linha 07 com resultado inconsistente com as linhas 06 e 08 (erro na aquisição?);
- Linhas 01 e 04 registraram regiões de baixa resistividade nas ombreiras;
 - Ombreiras não ensaiadas



→ **Necessidade de uma nova investigação!**

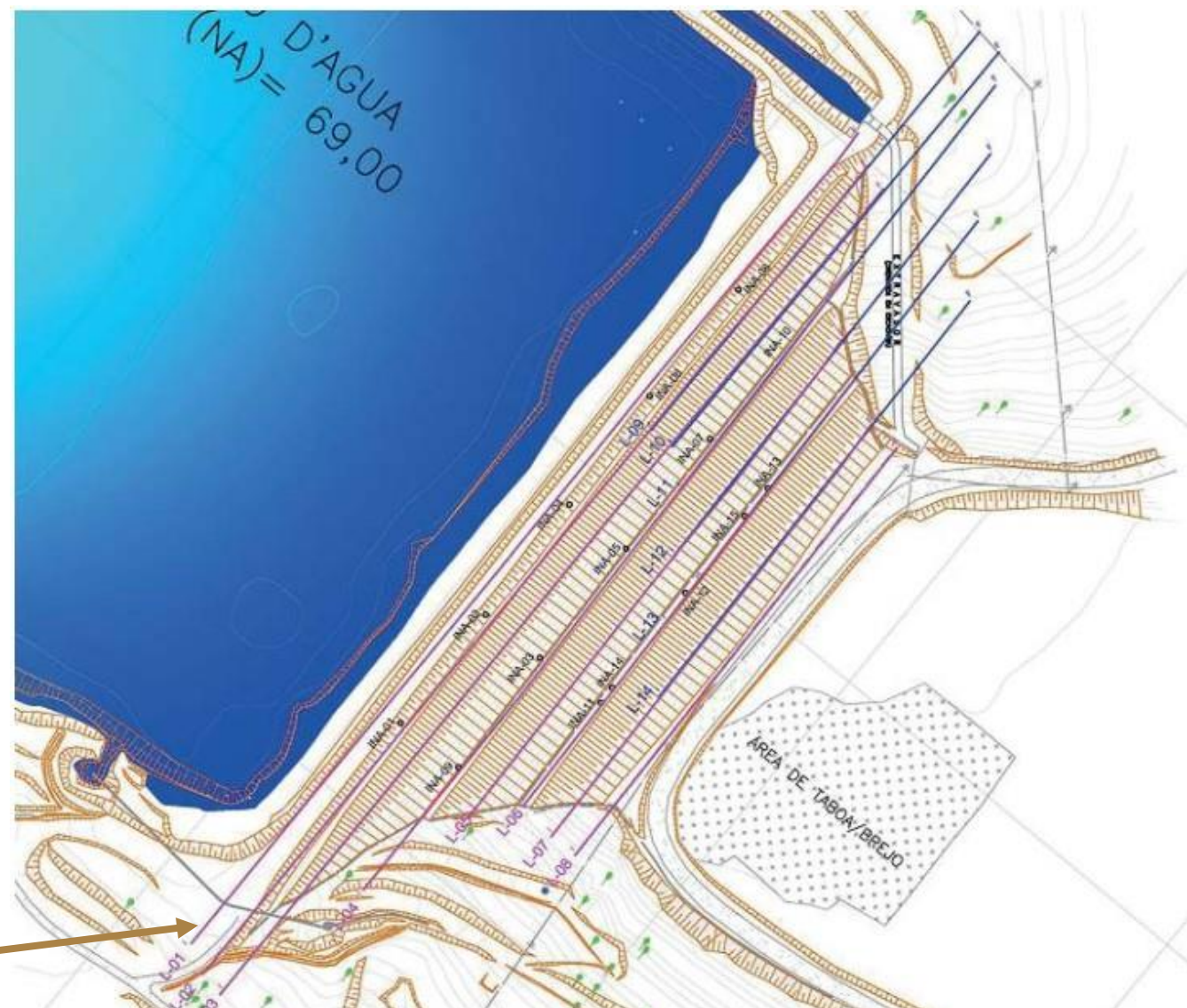
Campanha 02

- Caminhamento elétrico (eletrorresistividade);
 - 6 linhas geofísicas.

Objetivos

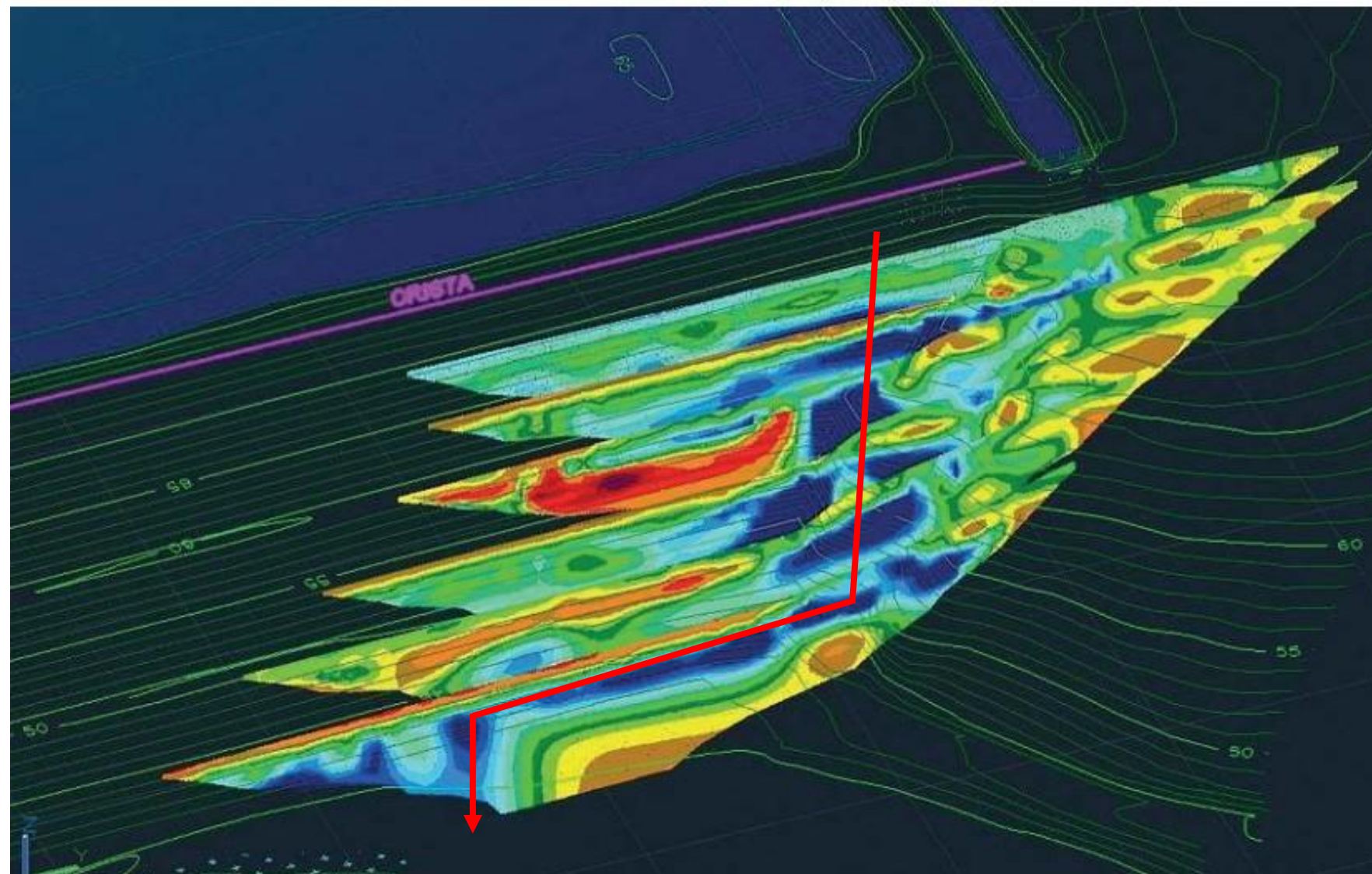
- Melhor caracterização das ombreiras;
- Possibilidade erros na Campanha 01 (inconsistência na linha 07).

Linhas Geofísicas



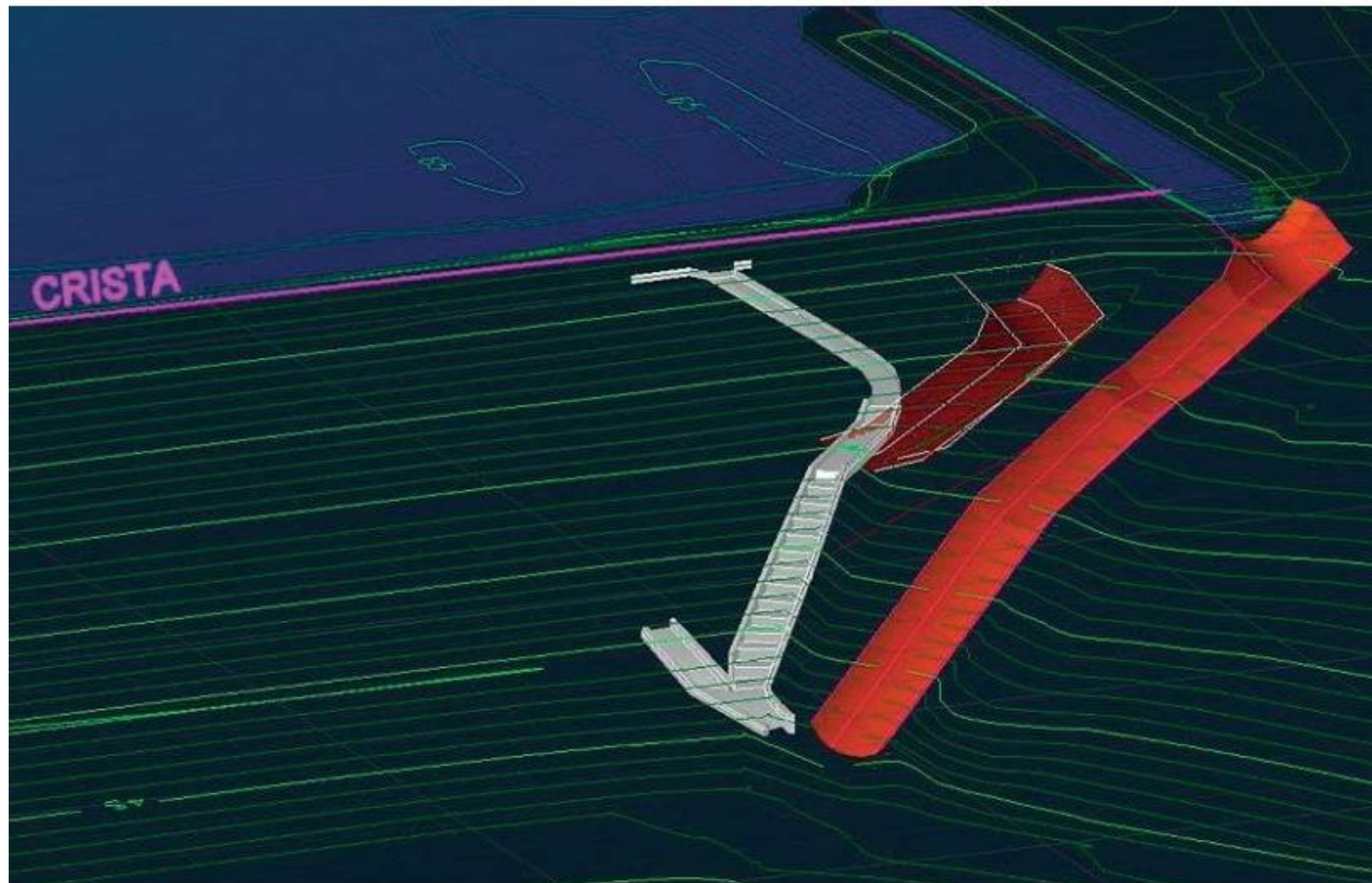
Resultados

- Detecção de um caminho preferencial de fluxo;
 - Piping?
- Busca pelos engenheiros responsáveis pela obra!

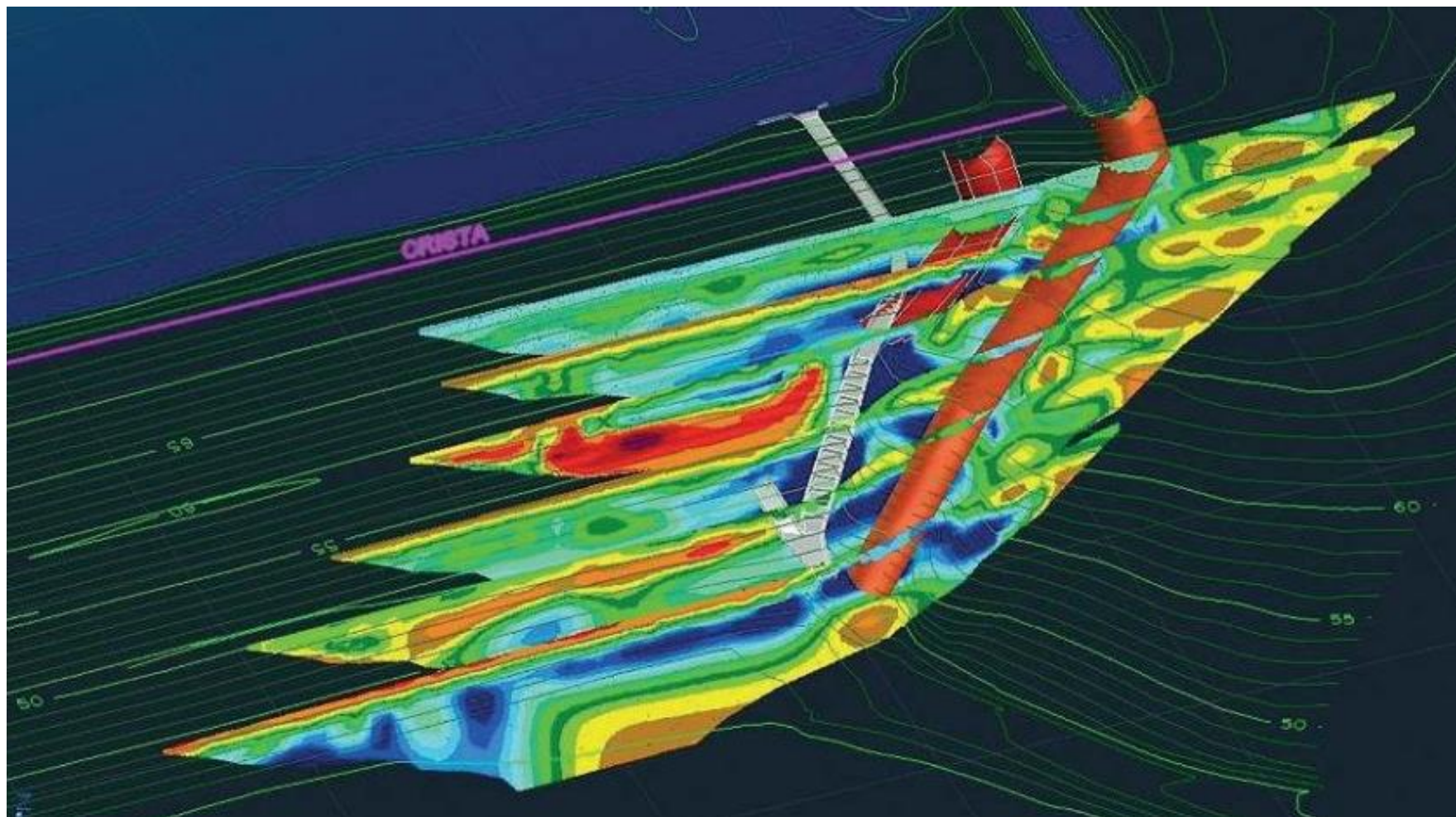


Histórico da Obra

- Presença de canais extravasores e descidas d'água na ombreira esquerda;
 - Encontram-se desativados;
 - Preenchidos com brita e areia;
 - Atualmente utilizados como drenos.



Sobreposição dos Ensaios de Resistividade com as Estruturas Desativadas



Conclusões

- O fluxo de água ocorre através das estruturas desativadas preenchidas com material permeável, hoje utilizadas como drenos;
- Como o fluxo ocorre confinado dentro das estruturas ele não prejudica a estabilidade interna da barragem.



QUESTÕES

- 1) Que outros ensaios geofísicos seriam capazes de identificar as estruturas inativas dentro do corpo da barragem?

Bibliografia

- Agência Nacional de Águas (2013). **Material Didático do Curso de Segurança de barragens.**
- Albuquerque, R. et al (2019). **Caracterização de Barragem de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. Vol. 42 – 1. UFRJ. Rio de Janeiro.
- Arcila, E. J. A. (2020). **Diagnóstico Geofísico para Identificação de Zonas de Fluxo em uma Barragem de Contenção de Rejeitos de Mineração de Urânio.** UNESP. Rio Claro.
- Camarero, P. L. (2016). **Análise de Integridade Física de Barragens de Terra a Partir da Integração do Método Geofísico da Eletrorresistividade com Ensaios geotécnicos.** UNESP. Rio Claro.
- Gaioto, N. (1980). **Barragens de Terra e de Enrocamento.** Departamento de Geotecnia. EESC. USP. São Carlos.
- Nascimento, M. M. P. (2019). **Análise Estrutural e Geofísica no Embasamento de Barragem de Rejeitos na Mina Osamu Utsumi, Poços de Caldas (MG).** UNESP. Rio Claro.
- Silveira, E. R. (2021). **Investigação geofísica Elétrica Aplicada ao Monitoramento de Barragens e Prevenção de Acidentes.** UFOP. Ouro Preto.