

Perícia de Engenharia Civil e Geologia no caso da Barragem do Fundão



**Superintendência Regional no Estado de Minas Gerais
Setor Técnico-Científico - SETEC**

Leonardo Mesquita de Souza - Perito Criminal Federal

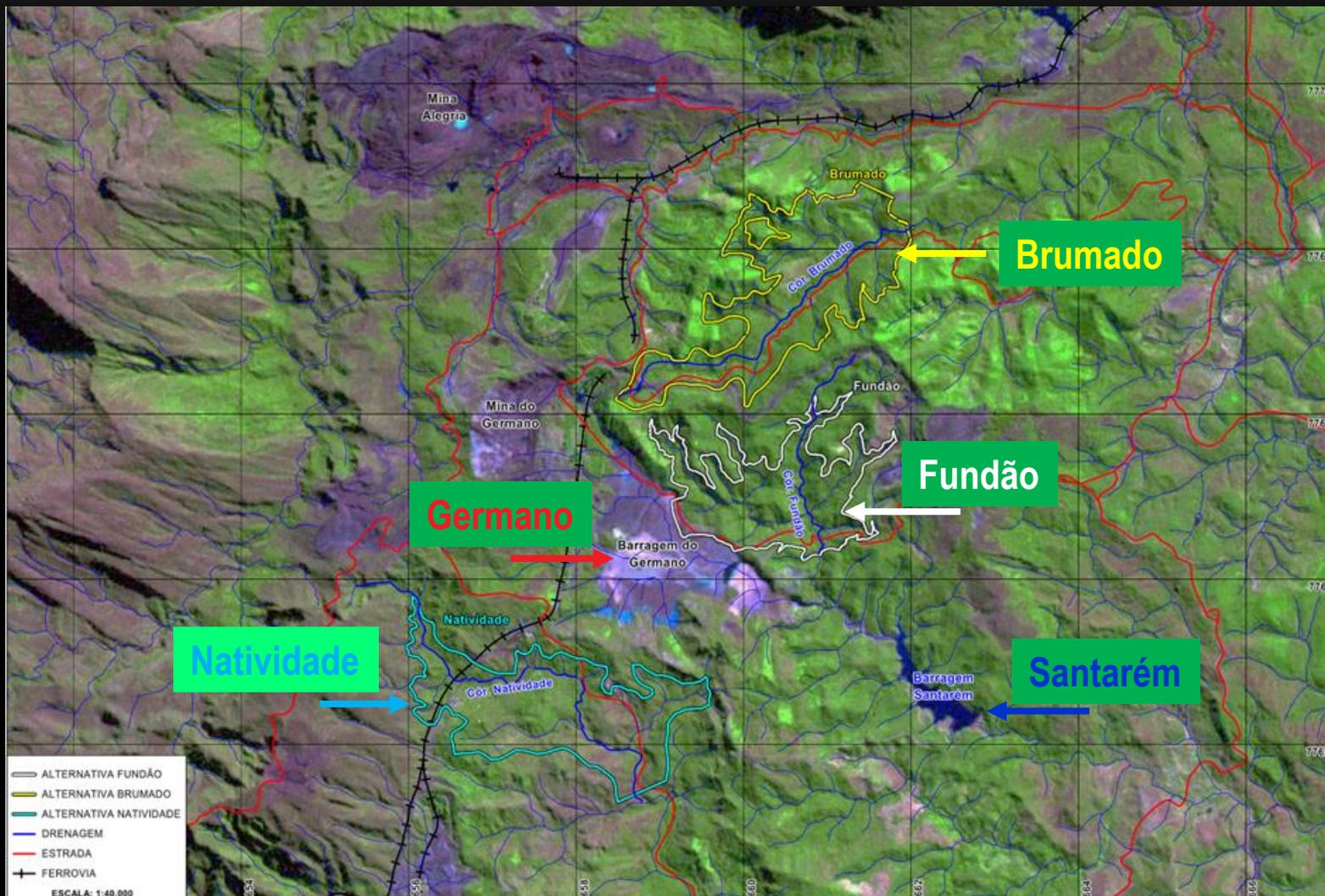


Exame Pericial elaborado por equipe multidisciplinar de Peritos Criminais Federais (PCF)

- ❑ GUSTAVO FERRAZ DE OLIVEIRA – GEÓLOGO – MG
- ❑ LEONARDO MESQUITA DE SOUZA – ENGº de FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO – MG
- ❑ MARCUS VINICIUS TAVARES DA SILVA – ENGº DE MINAS – MG
- ❑ PAULO CESAR VIEIRA DOS SANTOS – GEÓLOGO – INC/DF
- ❑ SIDNEY DE OLIVEIRA BARBOSA – ENGº CIVIL – PB
- ❑ THALLES EVANGELISTA F. DE SOUZA – ENGº de FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO – PI

Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005 (Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

□ Apresentação de 3 Alternativas Locacionais



Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005 (Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

- **Análise Preliminar de Risco – Operação da barragem**

“Ainda que resulte em um risco moderado por ser improvável, identificou-se um evento cujas conseqüências seriam catastróficas, que corresponde ao rompimento da barragem com efeito dominó sobre a barragem de Santarém. Para este evento, é recomendável o desenvolvimento de um estudo quantitativo, com modelagem do evento e identificação mais precisa de suas conseqüências, em especial sobre a comunidade de Bento Rodrigues.” Pág 217 do EIA

QUADRO 6.14 - Avaliação Preliminar de Perigos - Operação da barragem

ETAPA	PERIGO/ CENÁRIO ACIDENTAL	CAUSA	EFEITO	CATEGORIA DE RISCO	RECOMENDAÇÕES/ MEDIDAS DE PREVENÇÃO
Barragem de Rejeitos	- Vertimento excessivo de efluentes, com carreamento de sólidos em suspensão e/ou dissolvidos.	- Excesso de material assoreado; - Baixa capacidade de retenção; - Chuvas excepcionais.	- Alteração da qualidade das águas, limitada à barragem de Santarém.	Magnitude: III - Crítica Frequência: C - Provável Risco: III C - Elevado	- Monitoramento periódico da estabilidade e do assoreamento da barragem; - Manutenção do sistema de extravazão.
	- Ruptura de pequeno porte na barragem com deposição ou acúmulo excessivos de sólidos e lamas na rede de drenagem logo a jusante da mesma, a montante do reservatório de Santarém.	- Falha estrutural; - Manutenção inadequada; - Excesso de material assoreado; - Baixa capacidade de retenção; - Chuvas excepcionais.	- Carreamento de sólidos e lama no curso d'água, limitado ao setor a montante da Barragem de Santarém.	Magnitude: III - Crítica Frequência: B - Pouco provável Risco: III B - Moderado	
	- Grande rompimento da barragem com efeito dominó, com rompimento da barragem de Santarém.	- Falha estrutural; - Manutenção inadequada; - Excesso de material assoreado; - Baixa capacidade de retenção; - Chuvas excepcionais.	- Carreamento de sólidos e lama nos cursos d'água. - Danos a instalações; - Ferimento e morte na população a jusante	Magnitude: IV - Catastrófica Frequência: A - Improvável Risco: IIV A - Moderado	

Frequência de Sinistros em Barragens de Mineração

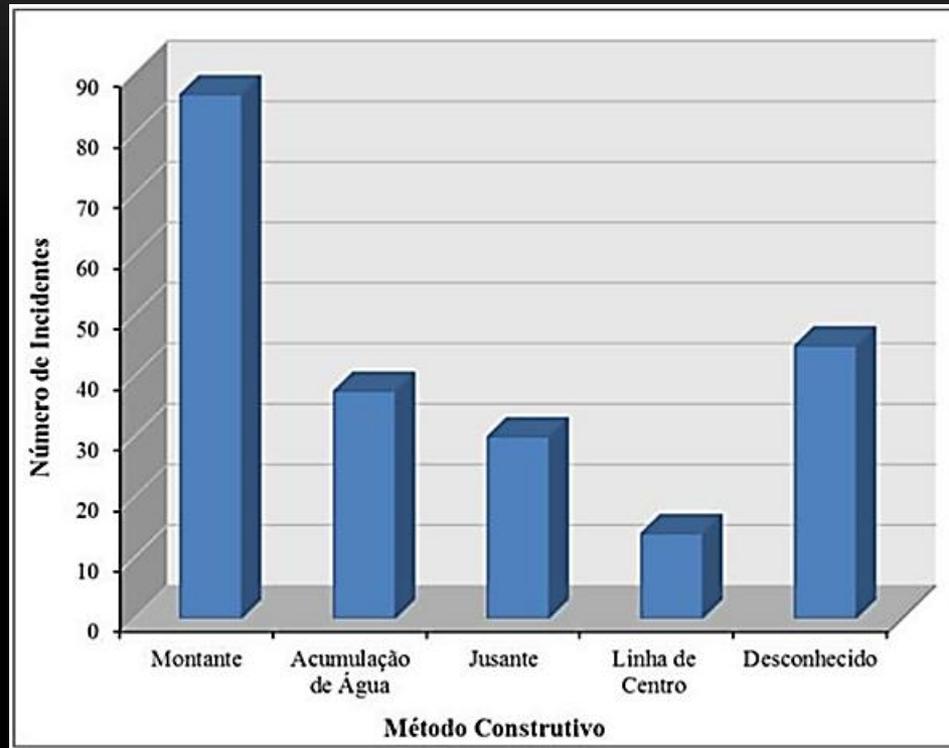


- ❑ 25/02/1999 na Mineração Mata Virgem em Gente Grande / MG
- MAIA NETO, Francisco. Análise Dinâmica de Rompimento em Barragem de Rejeitos.
- XIII COBREAP – Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias



- ❑ 22/06/2001 na Mineração Rio Verde em MG
- Lorena Romã Penna.
- Dissertação de Pós-Graduação pela UFOP – Setembro de 2008

Lições Aprendidas com Rupturas e Incidentes em Barragens De Rejeitos



- ❑ O INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD) publicou, em 2001, o boletim 121 intitulado:
 - *Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learned from Practical Experiences* (Risco de Ocorrências de Perigo em Barragens de Rejeito, Lições Aprendidas a partir de Experiências Práticas), onde é apresentada uma relação com 221 registros dos casos de falhas em barragens de rejeitos espalhados pelo mundo.
- ❑ As principais causas desses casos de falhas e de incidentes, apontados, foram:
 - falta de controle da construção;
 - falta de controle do equilíbrio hídrico e;
 - falta geral de entendimento sobre características que controlam a segurança das operações.

Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005 (Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

- Análise Preliminar de Risco – Operação da barragem

MATRIZ DE RISCO: Operação da barragem

SEVERIDADE	FREQÜÊNCIA			
	A Improvável	B Pouco Provável	C Provável	D frequente
IV Catastrófica	- Grande rompimento da barragem com efeito dominó, com rompimento da barragem de Santarém			
III Crítica		- Ruptura de pequeno porte na barragem com deposição ou acúmulo excessivos de sólidos e lamas na rede de drenagem	- Vertimento excessivo de efluentes, com carreamento de sólidos em suspensão e/ou dissolvidos. - Ruptura de taludes e da rede de drenagem - Incêndio na vegetação	
II Marginal				
I Desprezível				

 1 - Insignificante	 2 - Baixo	 3 - Moderado	 4 - Elevado	 5 - Muito Elevado
--	---	--	---	---

Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005

(Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

☐ Análise Preliminar de Risco – Operação da barragem

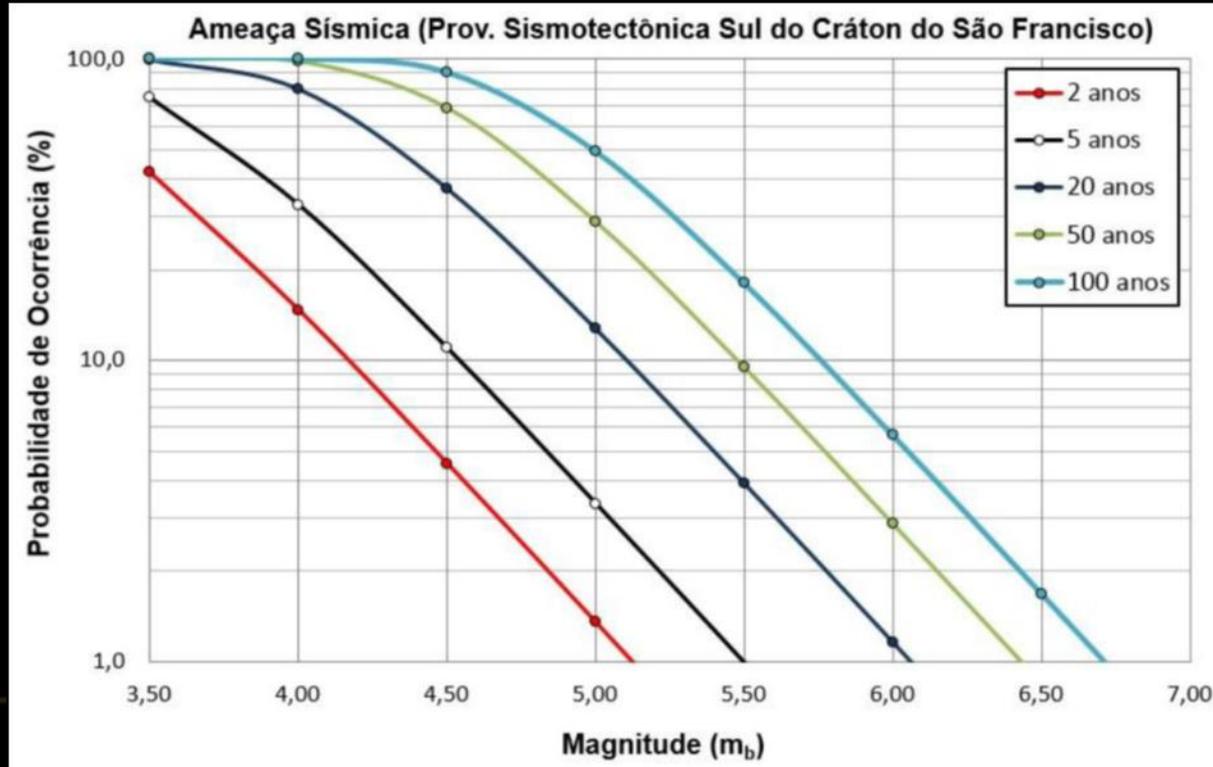
- Baseada em normas do International Finance Corporation / Banco Mundial (IFC/WB)
- “IFC/WB geralmente requer avaliação de riscos dos projetos que abrangam manuseio, armazenagem ou disposição de materiais e resíduos perigosos; a construção de represas, grandes obras de construção em locais vulneráveis a atividades sísmicas ou que possam danificar eventos naturais.” Pág 208 do EIA
- Apesar dessa informação, não foi considerada a possibilidade de atividades sísmicas na análise de riscos do EIA para o empreendimento do SRF.

Probabilidade Sísmica

- ❑ 2010 – ANGELA G. KÜPPER, PH.D da AMEC EARTH & ENVIRONMENTAL – EDMONTON, AB, CANADÁ
 - “A probabilistic analysis of the seismicity of the region developed by specialists with experience in the area is necessary to determine the appropriate seismic loading for each dam given its potential consequences of failure.”
- ❑ 2012 – Planilha “Estudo USP” encontrada no acervo de arquivos eletrônicos da SAMARCO, onde consta a localização de registros históricos de sismos na região, dentre os quais o registro de um tremor de 3,4mb distante cerca de 10 km da barragem, ocorrido no ano de 1989.
- ❑ 2013 e 2014 – Dois relatórios elaborados pela empresa Terratek, contratada pela SAMARCO.

Probabilidade Sísmica

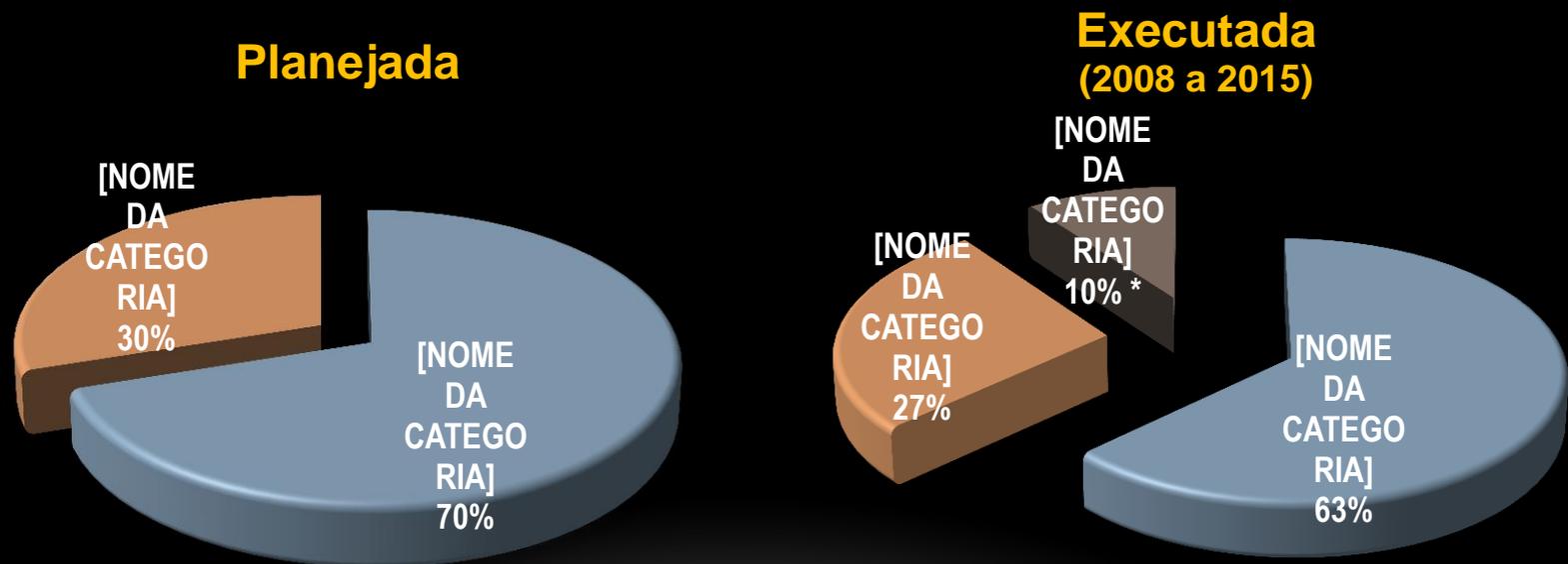
- Gráfico das curvas de probabilidade de ocorrência de sismos com magnitude na escala Richter (m_b), em cinco intervalos da vida útil da obra (2, 5, 20, 50 e 100 anos) – Relatório Terratek 2014.



Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005

(Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

□ Planejamento da Partição de rejeitos (Lama x Arenoso)



* Obs: Contribuição de lama da VALE equivale a 27% da lama total disposta.

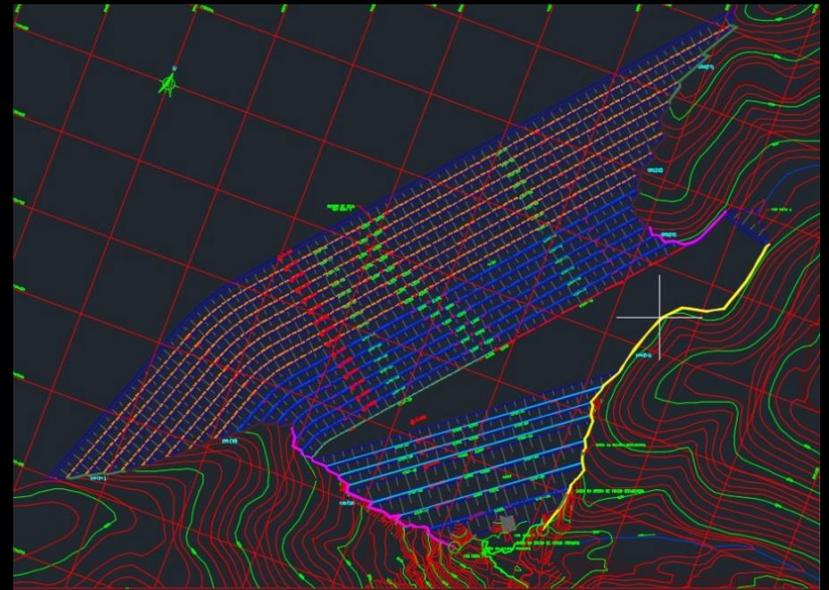
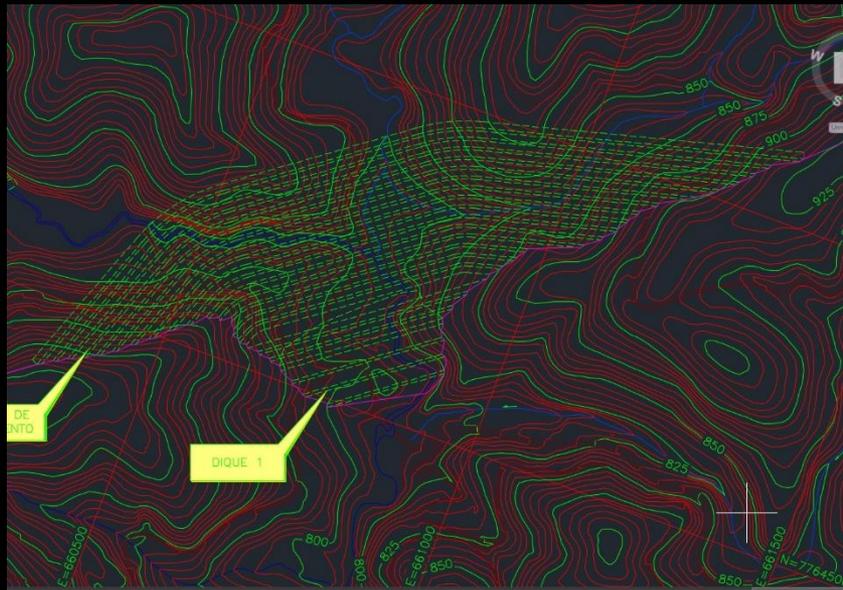
SAMARCO e VALE

- ❑ O EIA não menciona a contribuição de rejeitos da usina de Alegria de propriedade da VALE, mas o manual de operações de 2007 sim.
- “Ressalta-se que o projeto foi concebido para conter todo o rejeito a ser gerado na Usina de Beneficiamento de Germano e na Nova Planta de Beneficiamento de Alegria.” Pág 5/24 do Manual de Operação de 2007;
- ❑ “A SAMARCO é uma empresa de mineração cuja composição acionária está igualmente dividida entre a Cia Vale do Rio Doce (CVRD) e a BHP Billiton, e que iniciou suas atividades minerárias em 1977, para explorar minério itabirítico com baixo teor de ferro, e processar e produzir *pellets* de minério de ferro.” Pág 2 do EIA
- ❑ A elaboração do Manual de Operação está prevista no EIA:
- “Visando otimizar a operação do sistema de rejeitos, incorporar segurança, aumentar a eficiência e permitir redução de custos, será elaborado um Manual de Operação contendo todo o conjunto de procedimentos necessários à sua condução. Este manual estabelecerá as premissas do lançamento de rejeitos, do esgotamento dos lagos, do alteamento dos diques, da implantação da drenagem superficial, das inspeções e do monitoramento das estruturas.” Pág 57 do EIA

Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – Novembro de 2005 (Brandt Meio Ambiente / Pimenta de Ávila Consultoria / SAMARCO)

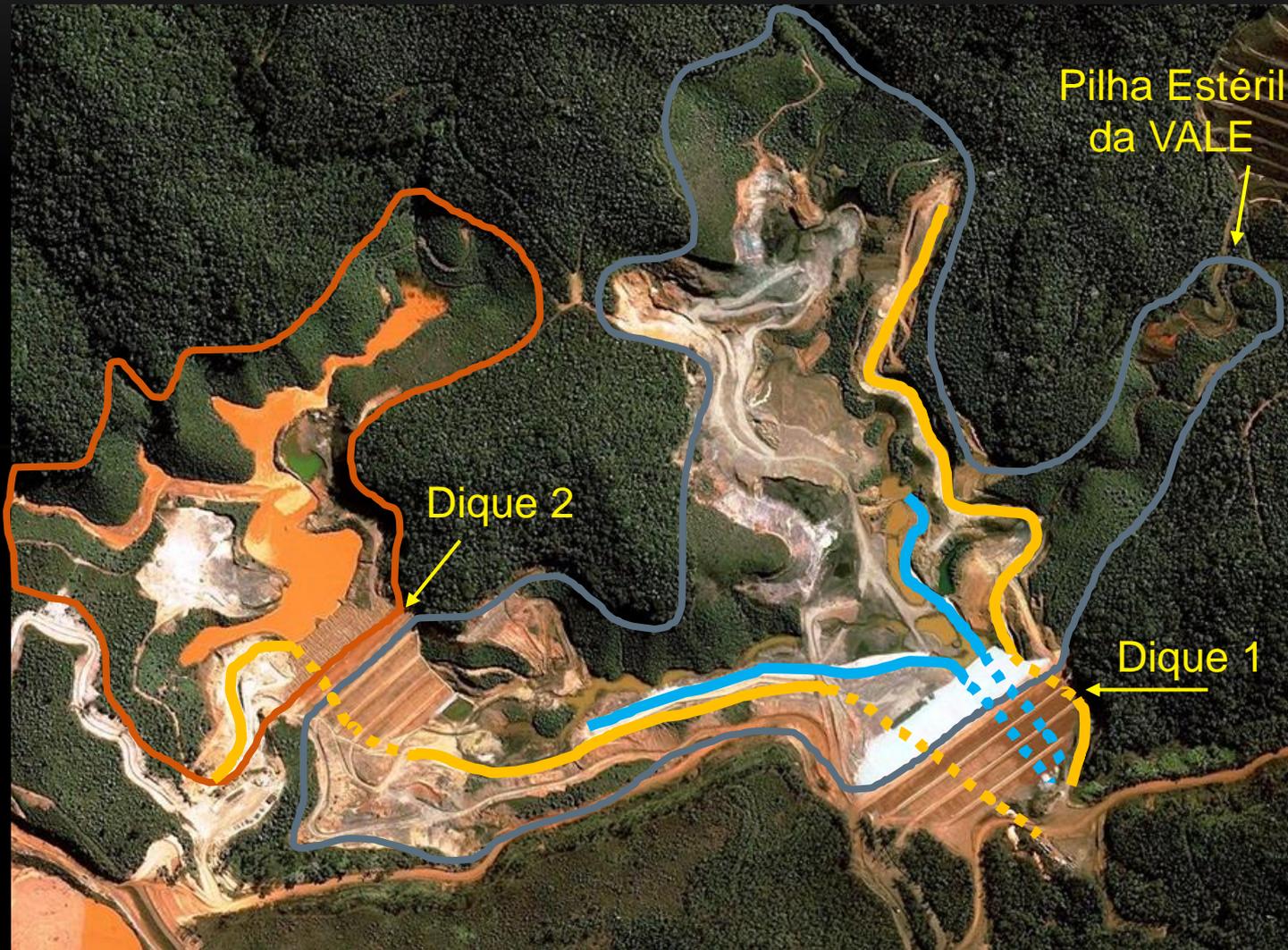
- Interferência com a *Grota da VALE*;
- “Nas cotas mais superiores, a partir da elevação 880 m, poderá haver interferência com o pé de uma pilha de estéril já implantada. Neste caso, a SAMARCO e a CVRD poderão decidir em conjunto qual alternativa deverá ser implantada para evitar a obstrução do sistema de drenagem de fundo dessa pilha. Para tanto, a SAMARCO poderá implantar um prolongamento do dreno de fundo da pilha sobre o talude de jusante dessa estrutura de modo que o dreno seja alteado conforme os alteamento do nível do rejeito, sem oferecer riscos para a estrutura existente.” Pág 59 do EIA

2 Alternativas para Geometria do Dique 1



Dezembro 2006

Implantação do Empreendimento do SRF



ESTRUTURAS DO SRF

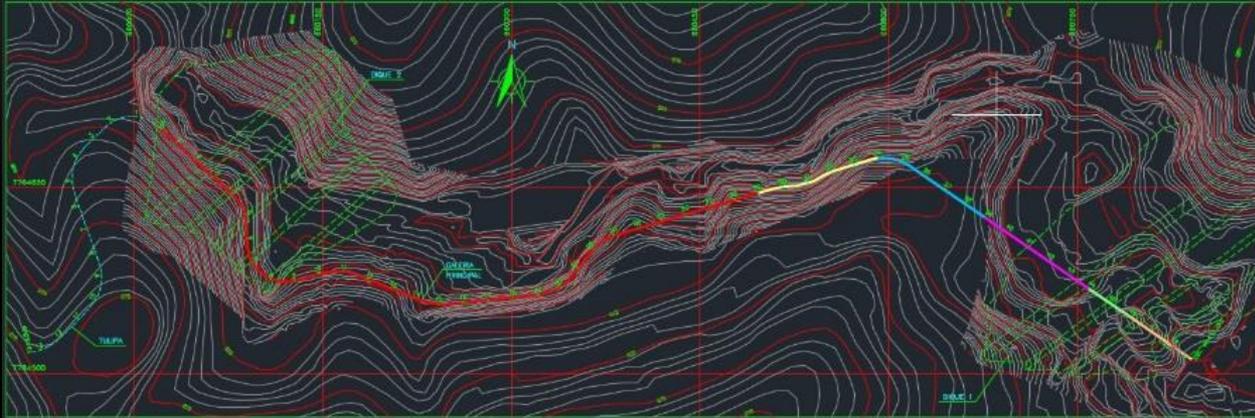


Dreno de Fundo Principal

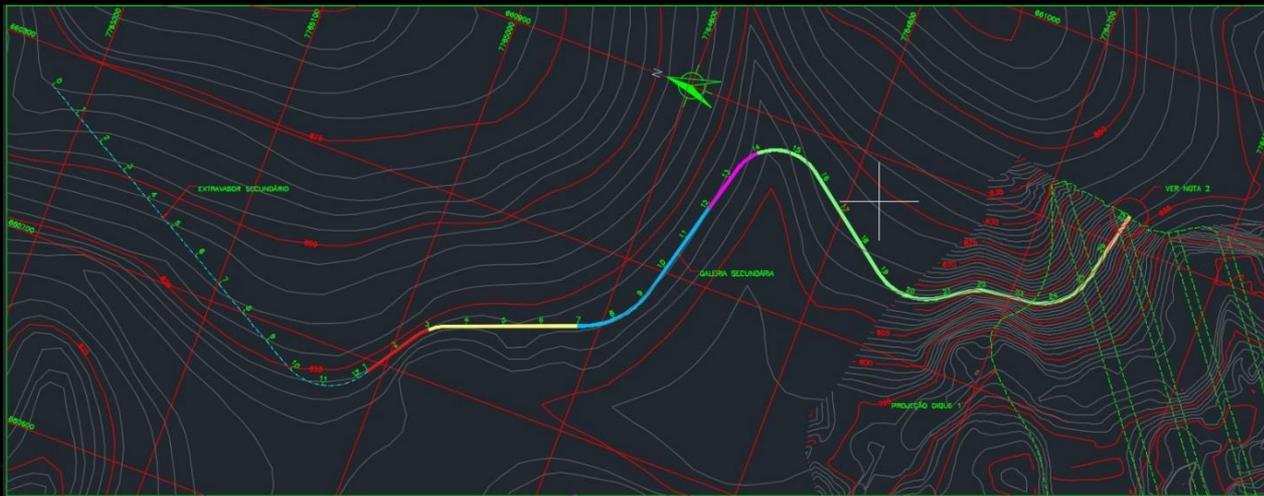


Galeria Secundária

Projetos das Galerias Extravasoras



Galeria Principal



Galeria Secundária

ESTRUTURAS DO SRF



Galeria Principal



Tulipas da Galeria Principal

ESTRUTURAS DO SRF



Desague da Galeria Principal



Desague da Galeria Secundária

ESTRUTURAS DO SRF



Tapete drenante de paramento
(talude de montante do Dique 1)

DIAGNÓSTICO DO DRENO DE FUNDO



Consultor Andrew Robertson – 01 Dezembro 2008

DIAGNÓSTICO DO DRENO DE FUNDO

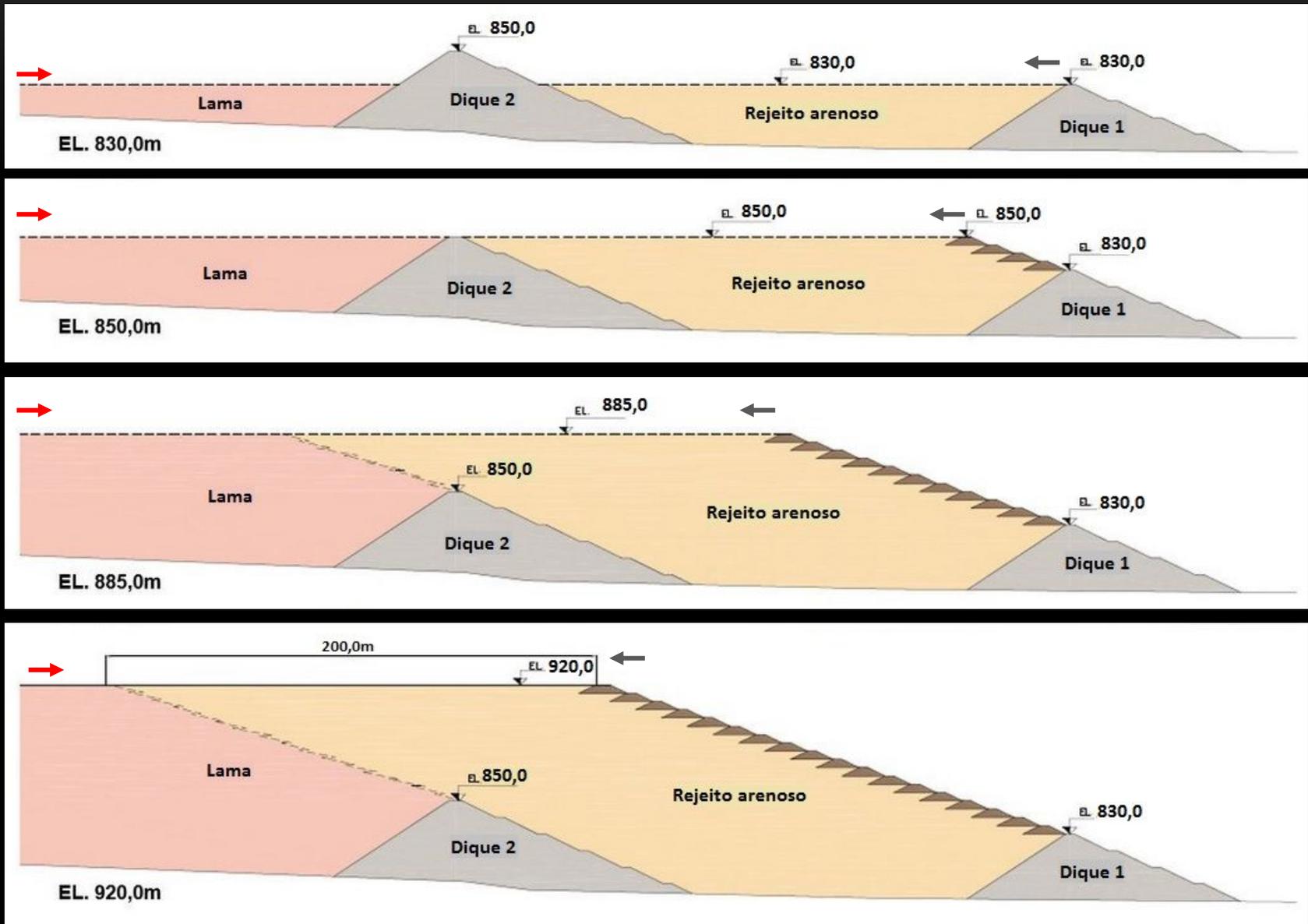


Consultor Andrew Robertson
01 Dezembro 2008

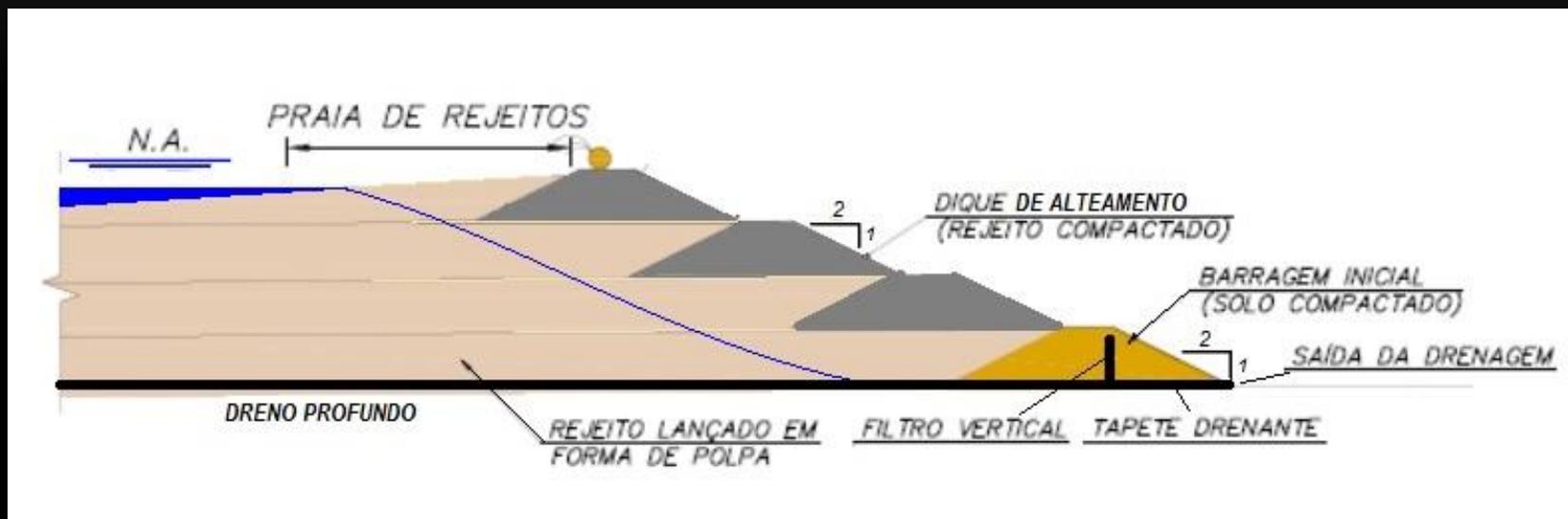


Consultor Pimenta de Ávila
29 janeiro 2009

Premissa de Projeto para Operação do SRF



Praia Mínima de Segurança de 200 metros



- 1º - Evitar a contaminação do rejeito arenoso pela lama em suspensão no lago.
- 2º - Manter a superfície freática afastada do paramento, evitando *surgências*.

Processo Erosivo com Carreamento de Material (Piping)



Abril 2009

ESCAVAÇÃO INVESTIGATÓRIA



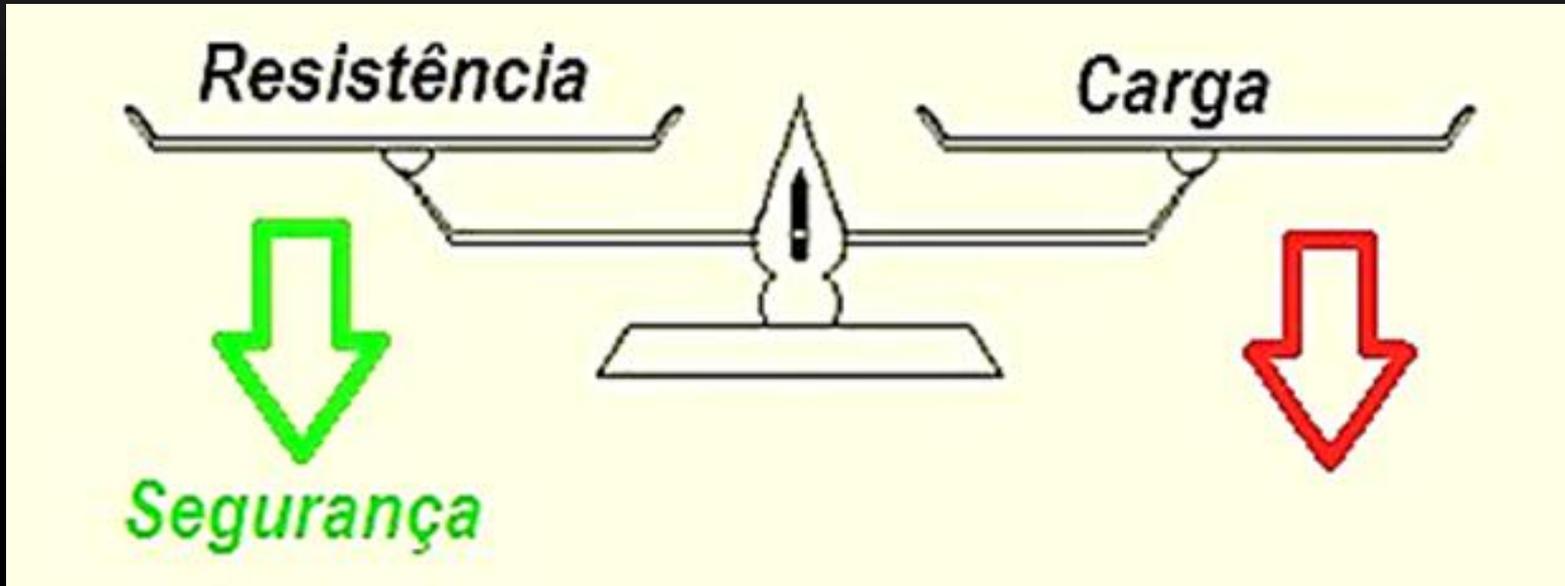
CONSTATAÇÕES



TAMPONAMENTO DOS DRENOS DE FUNDO



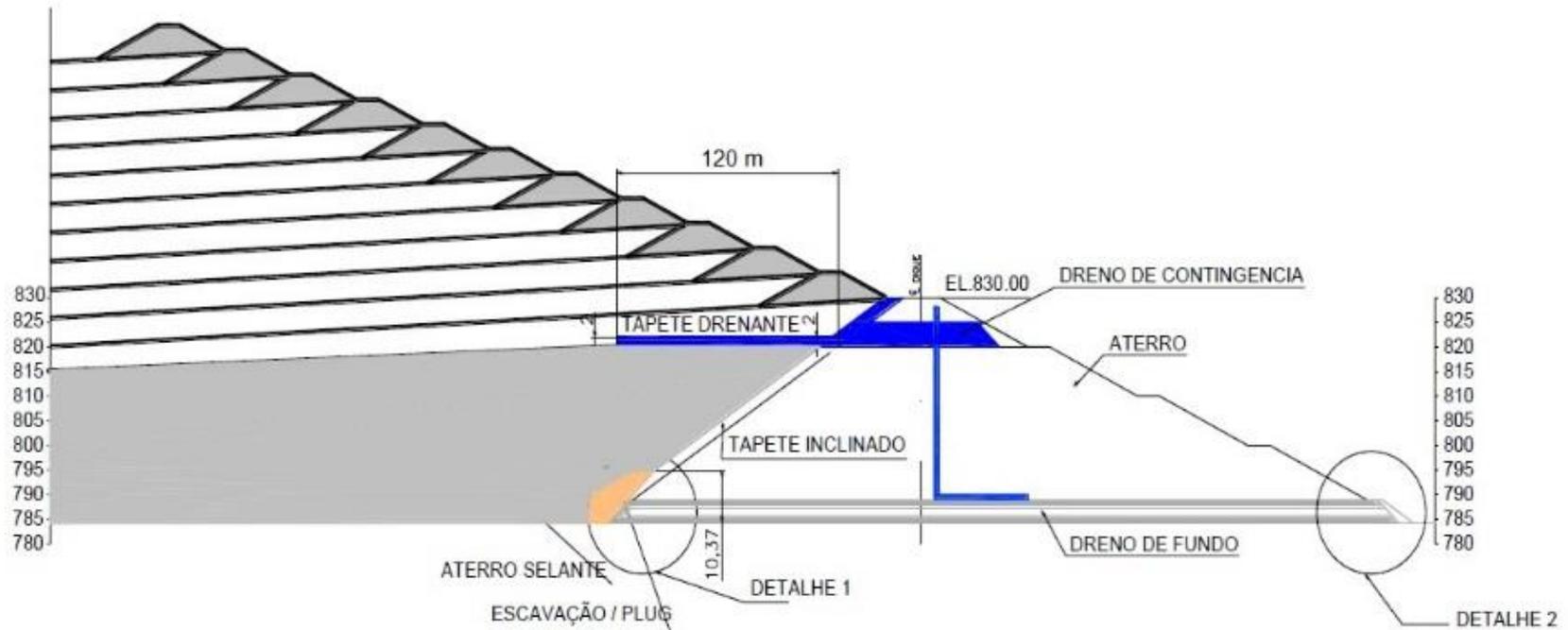
Conceito de Fator de Segurança - FS



Fator de Segurança (FS) = razão entre resistência e carregamento

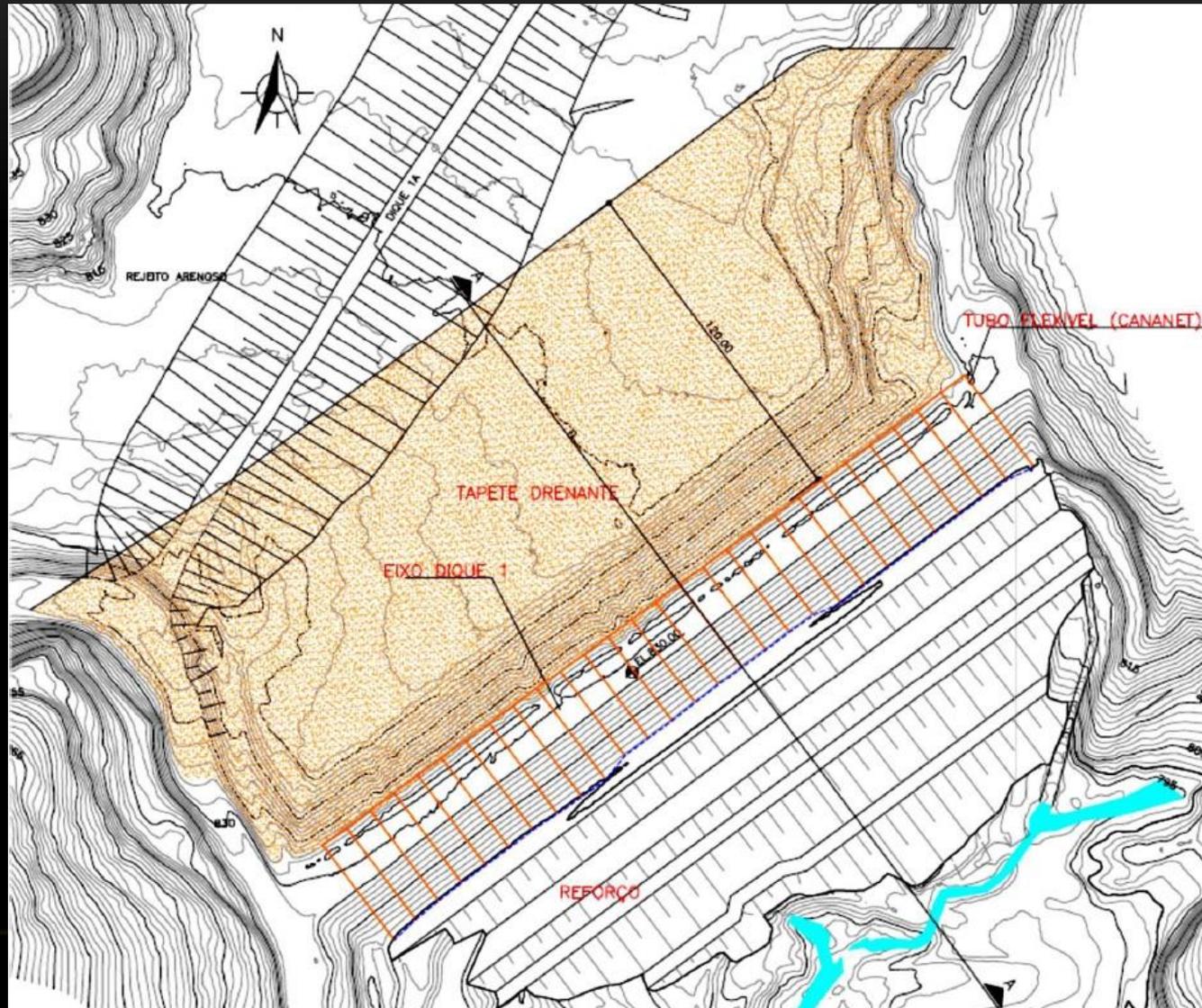
$$FS = \frac{\text{Resistência}}{\text{Carga}} \rightarrow \text{Faixas (ranges)} \left\{ \begin{array}{l} 1,3 \leq FS < 1,5 \Rightarrow \text{Atenção} \\ 1,15 \leq FS < 1,3 \Rightarrow \text{Alerta} \\ FS < 1,15 \Rightarrow \text{Emergência} \end{array} \right.$$

Nova Estrutura de Drenagem Interna



ESTUDO CONCEITUAL DE REPARO DO DIQUE 1

Tapete Drenante



Desague do Tapete Drenante

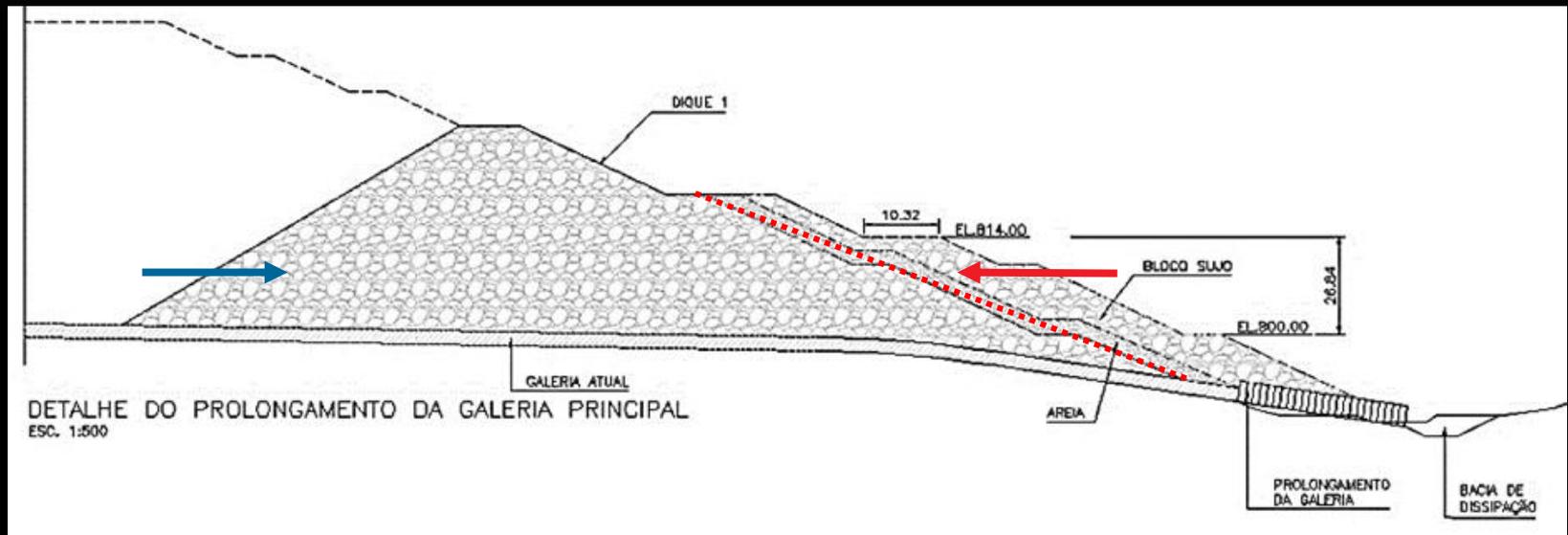


Abril 2010

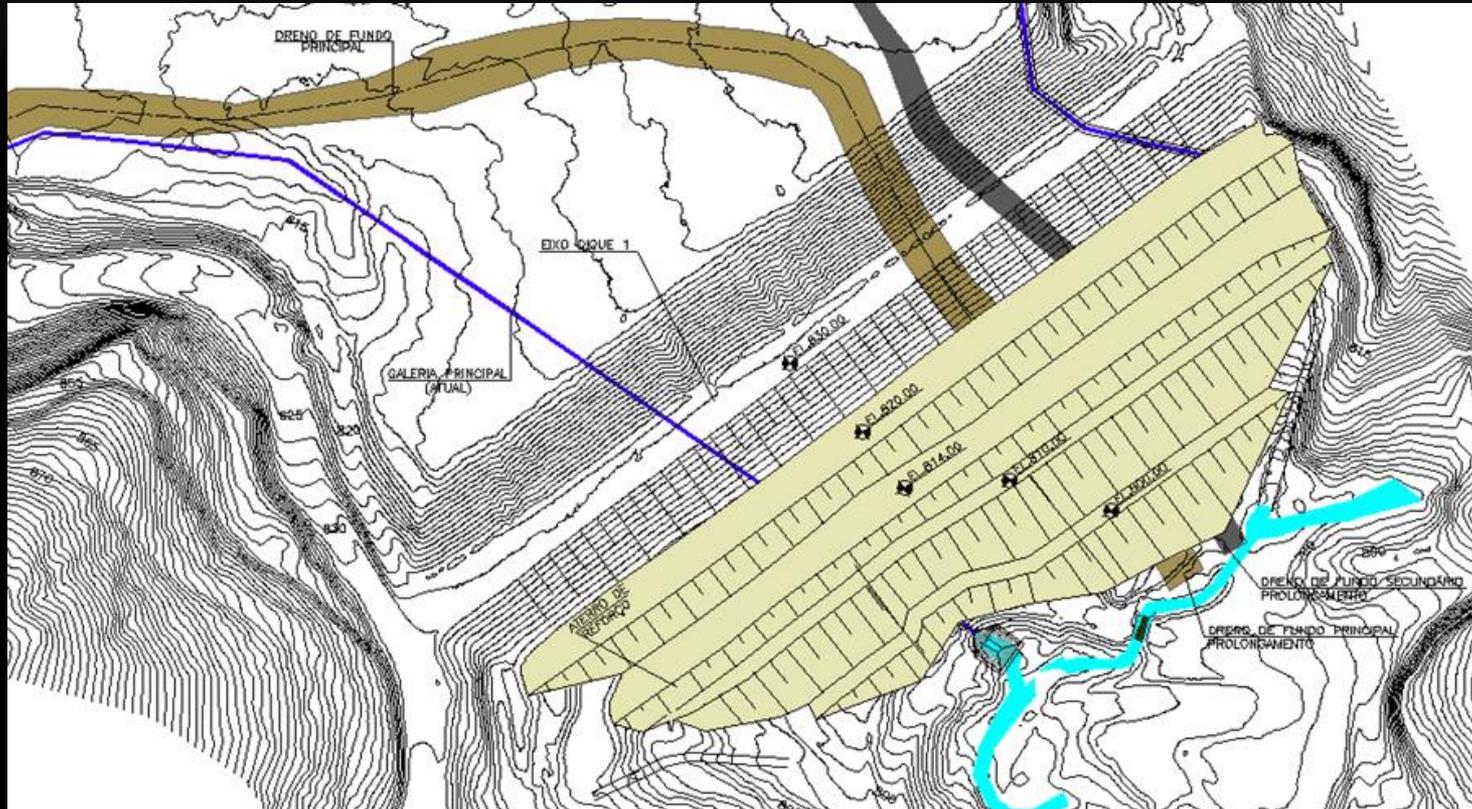


Abril 2014

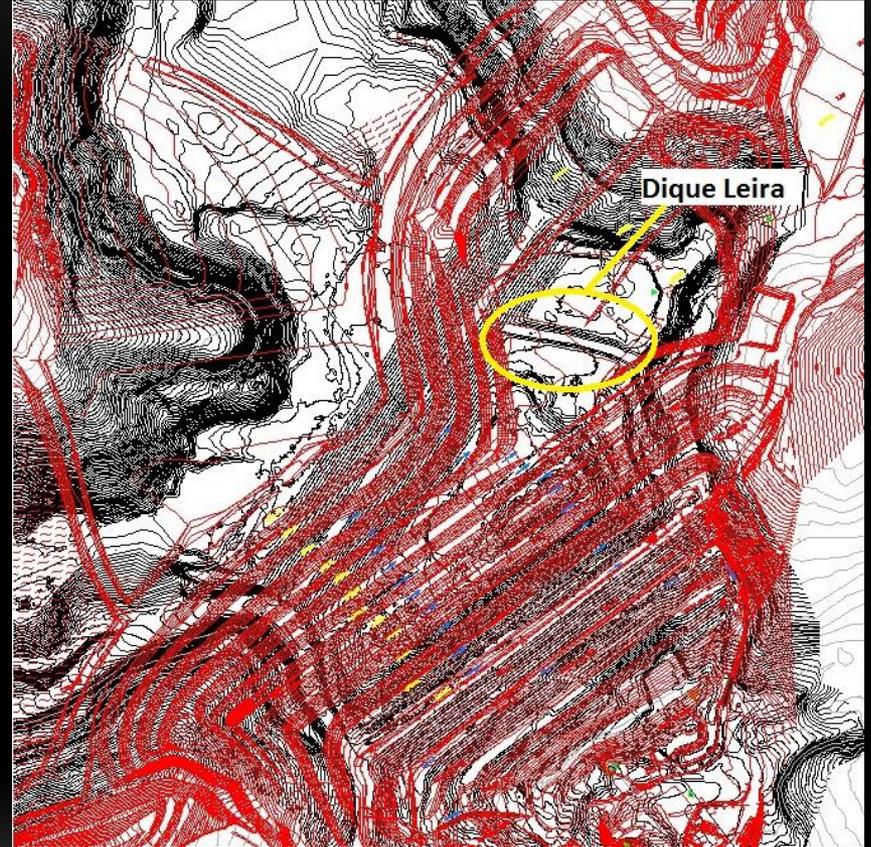
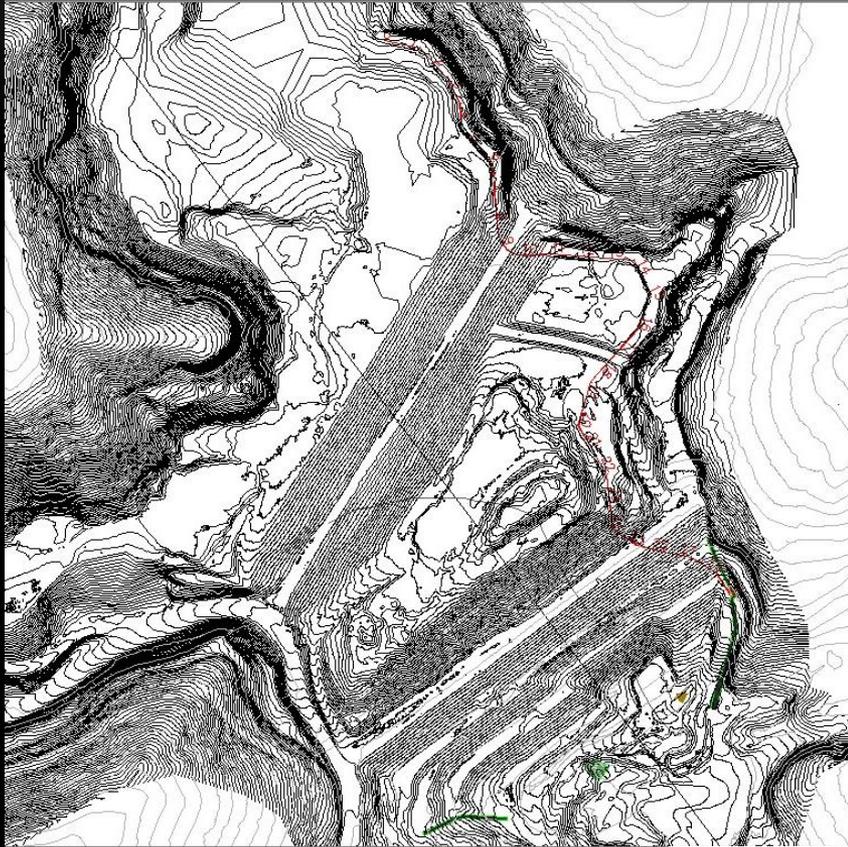
Berma Estabilizadora e Prolongamento da Galeria Principal



Berma Estabilizadora



Dique 1A e Dique Leira



Dique Leira

Dique 1A e Dique Leira

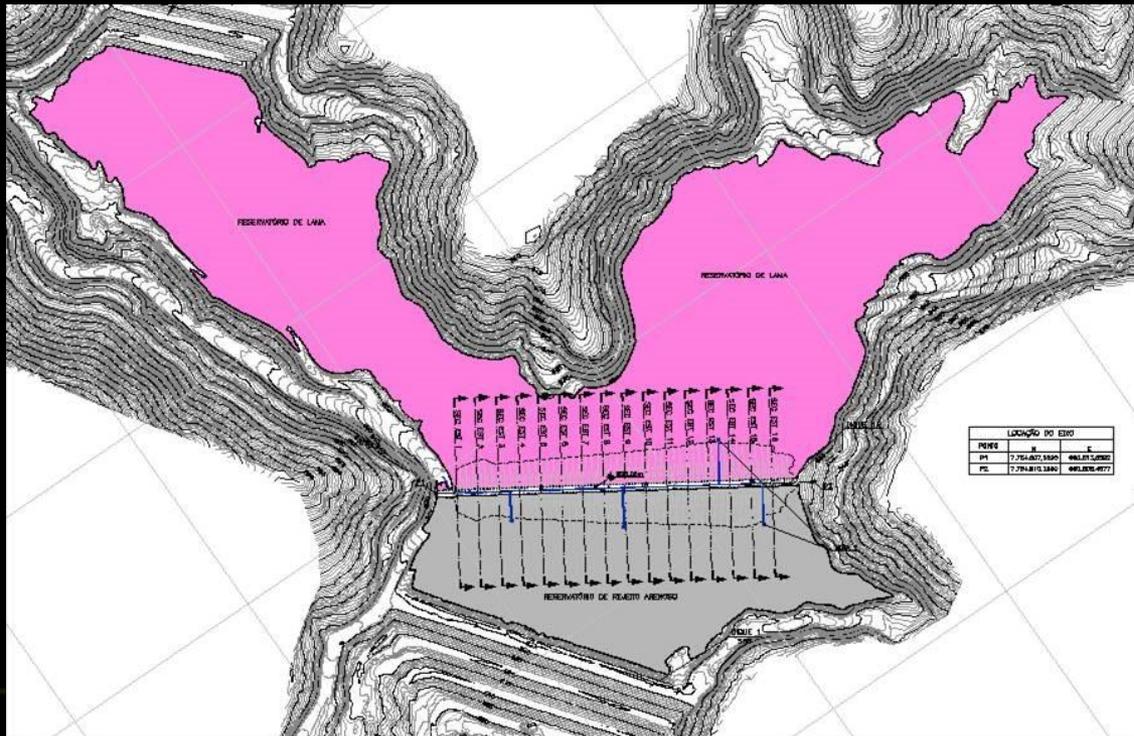
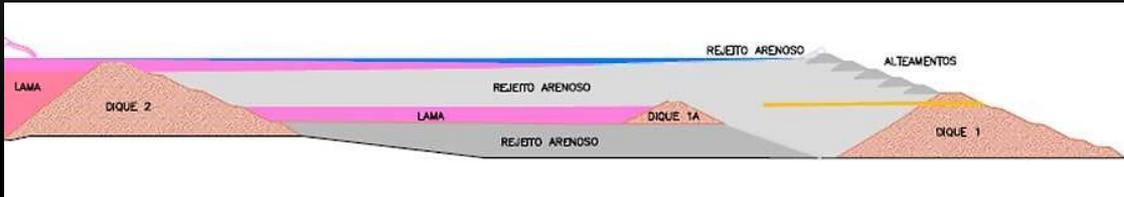


Interferência da Grota da VALE



Dezembro 2009

DIQUE 1A



DIQUE 1A



Falha de Fundação na Galeria Principal

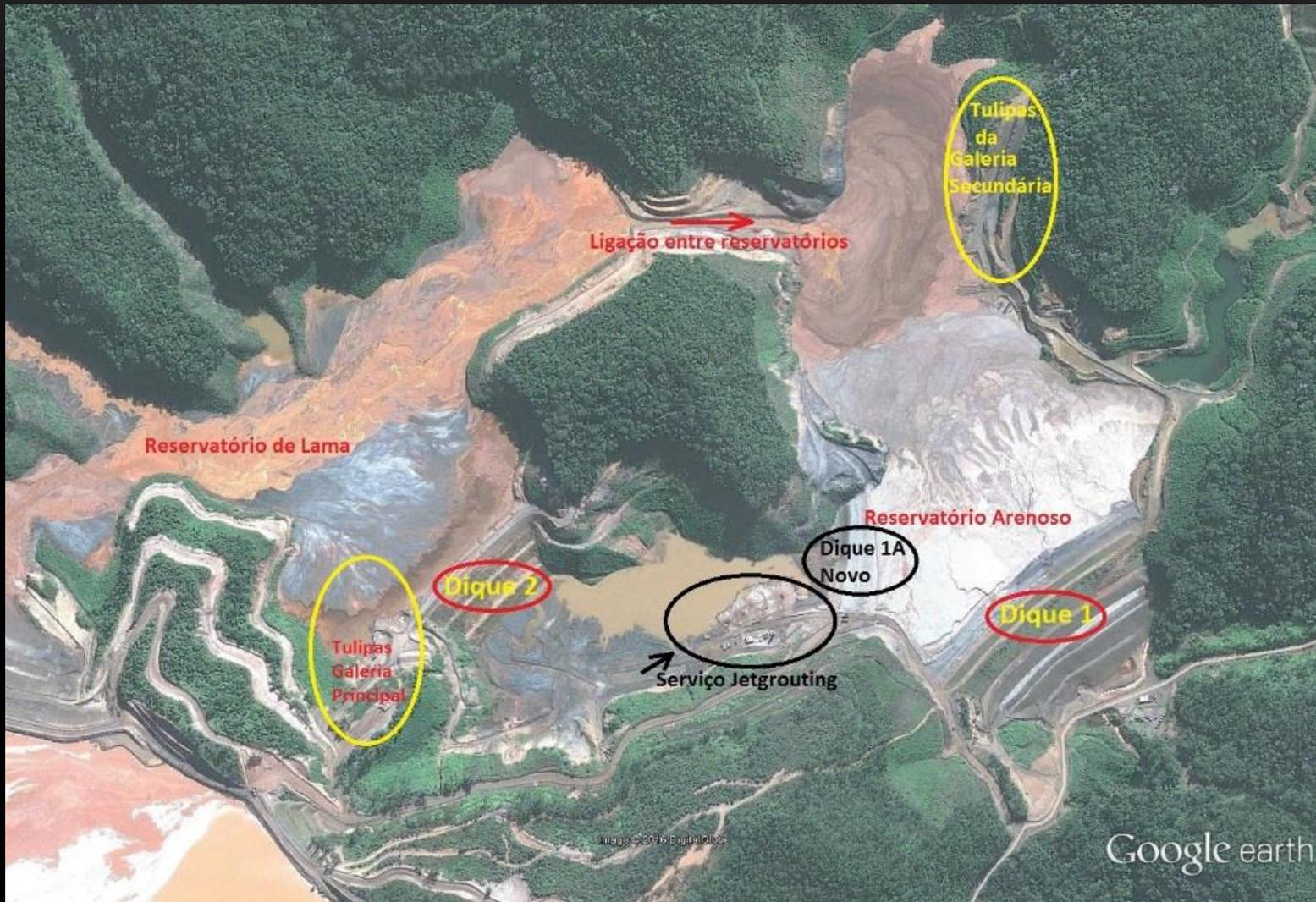


Julho 2010

Construção do Novo Dique 1A (Ensecadeira)



Recuperação da Galeria Principal



Maio 2011

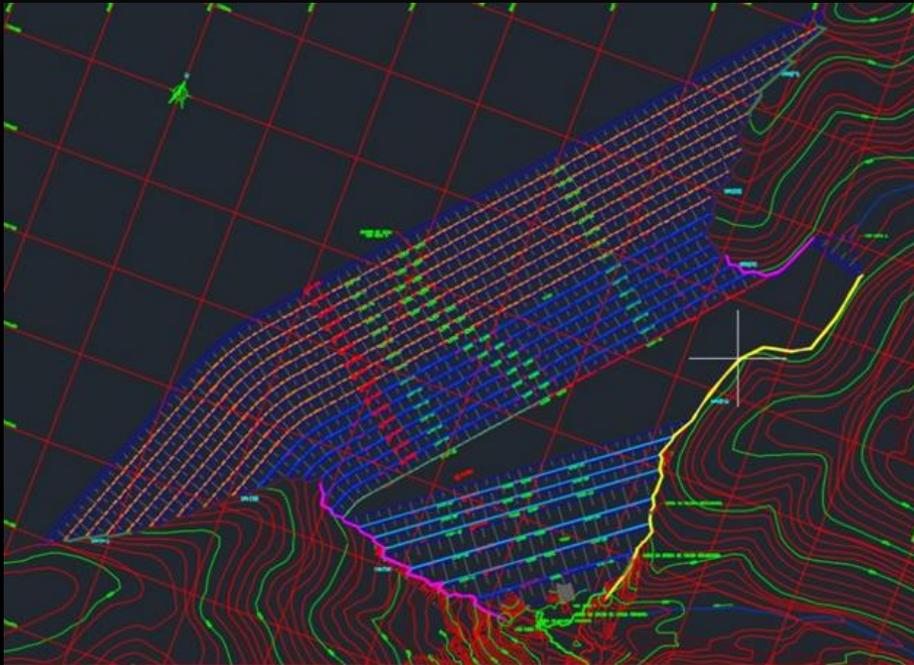
CANAL DE LIGAÇÃO



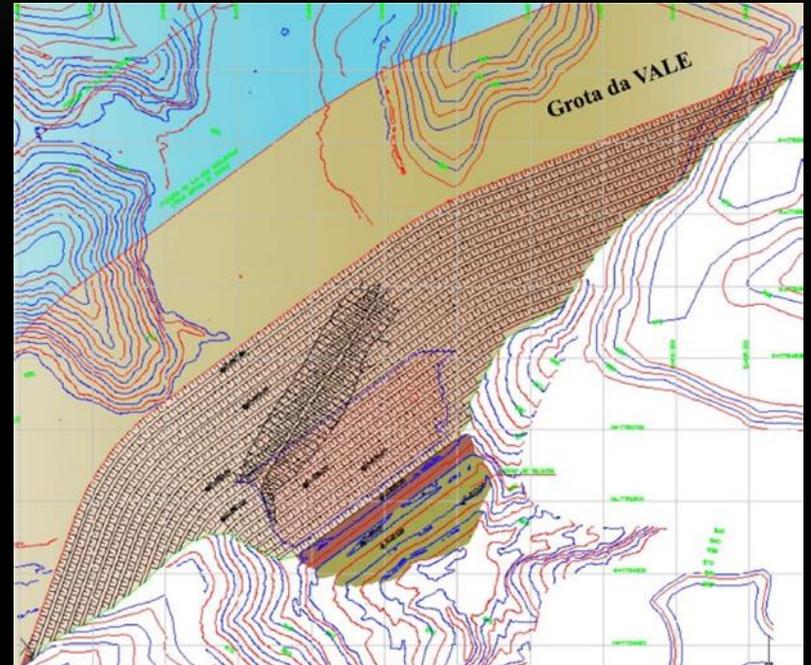
Serviço de Recuperação das Fundações da Galeria Principal



Alterações da Geometria do Dique 1

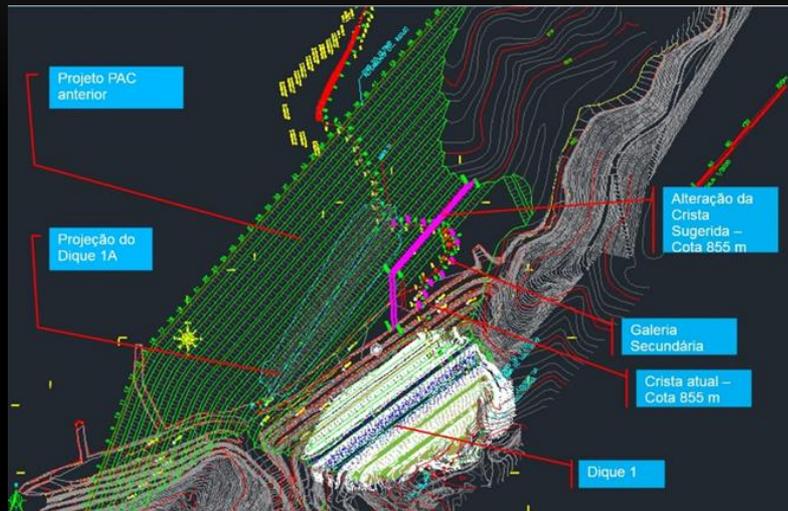


Dezembro 2006



Setembro 2011

Início do Recuo do Eixo do Dique 1



Setembro 2012



Outubro 2012

Contaminação do Rejeito Arenoso por Lama



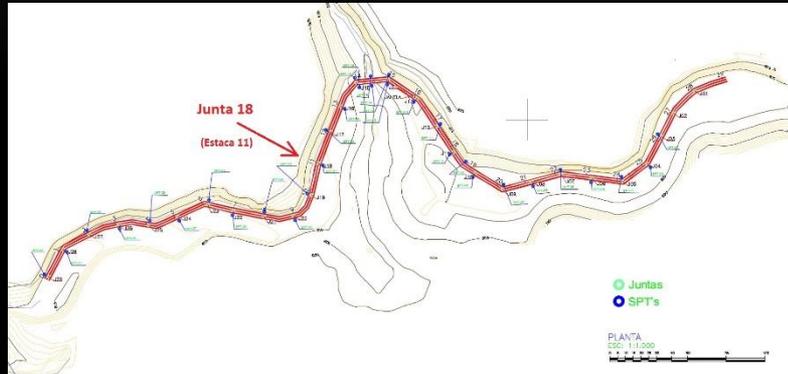
Julho 2013

Falha da Galeria Secundária



25 Novembro 2012

Falha na junta nº18 da Galeria Secundária



25 Novembro 2012

Substituição das Galerias Extravasoras



Avanço do Recuo do Eixo do Dique 1



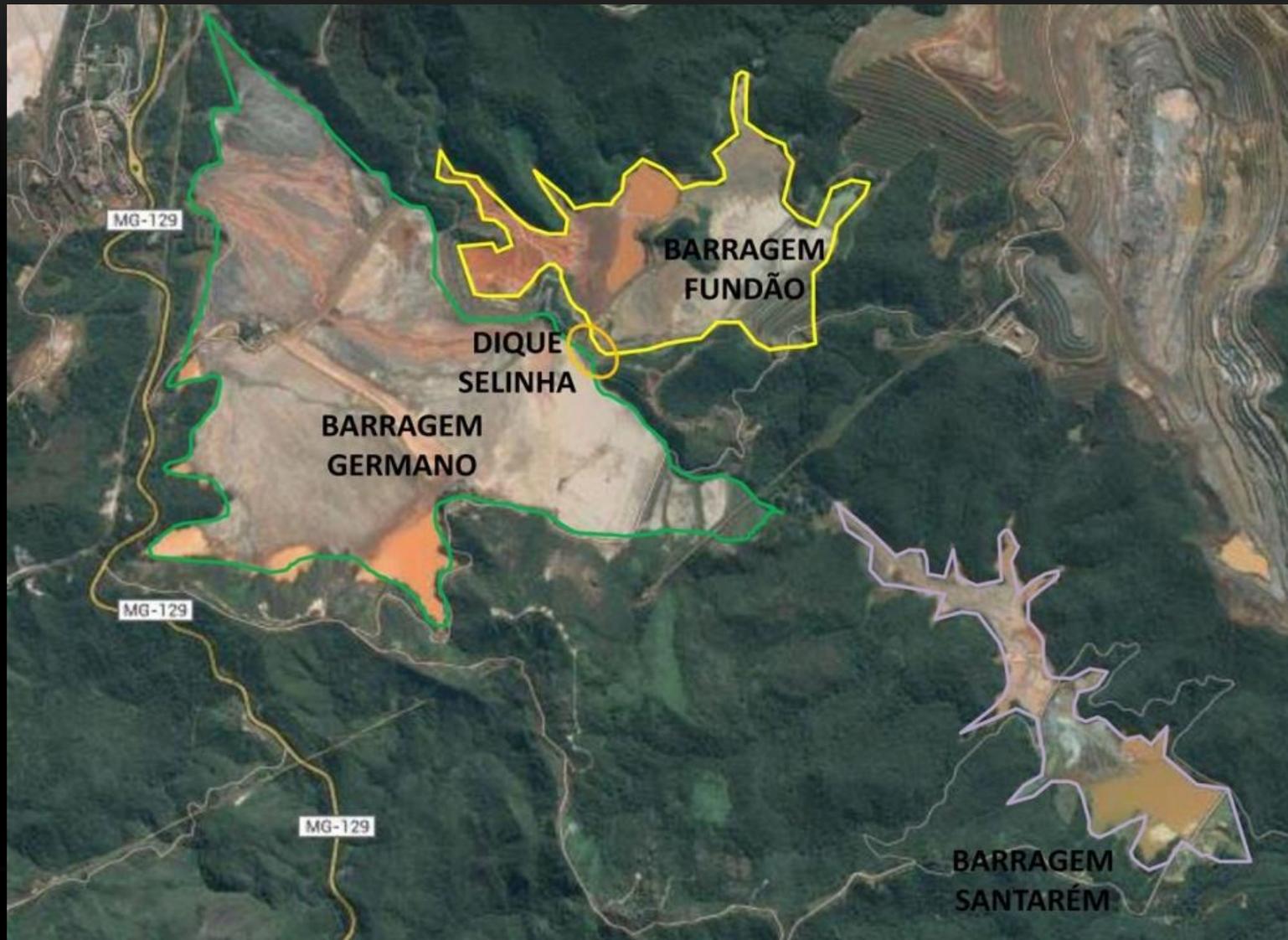
Dezembro 2012

Interferência da *Grota da Vale* e Recuos do Eixo

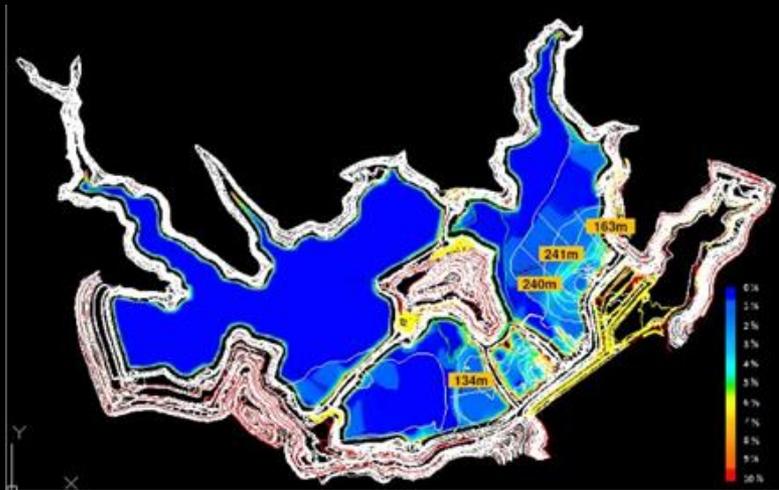


Maio 2013

Apresentação Geral



Descumprimento da Praia Mínima de Segurança de 200 m



Agosto 2013
(OD = 134 m e OE 163 m)

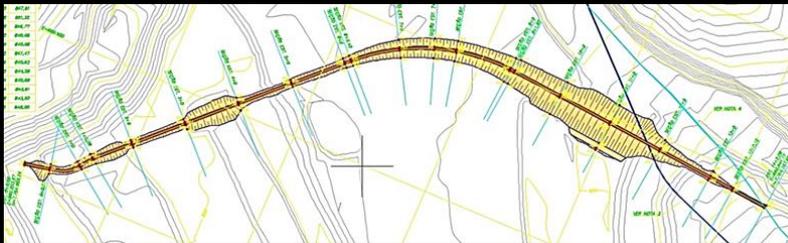


Novembro 2013
(OD = 319 m e OE 162 m)

Surgências Ombreira Esquerda – OE (Agosto e novembro de 2013)



Canal trapezoidal aberto revestido com geotêxtil

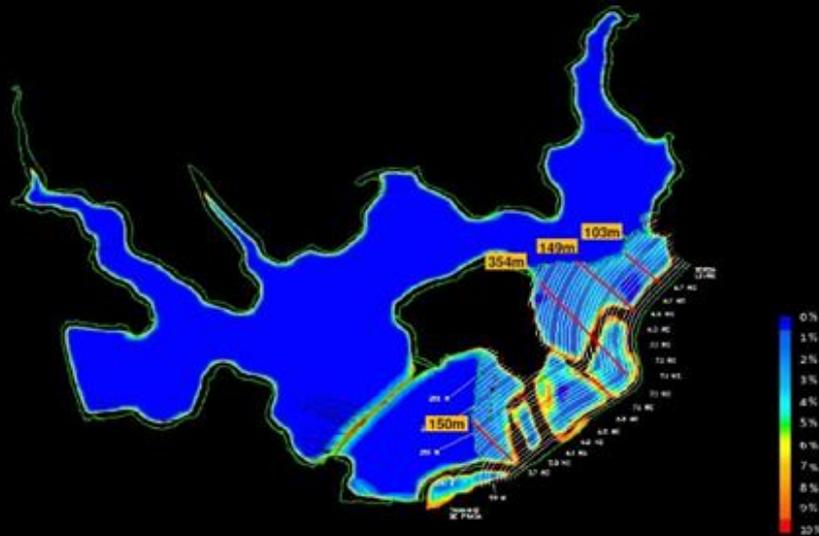


Projeto elaborado em maio/2014,
mas somente aprovado em dez/2014

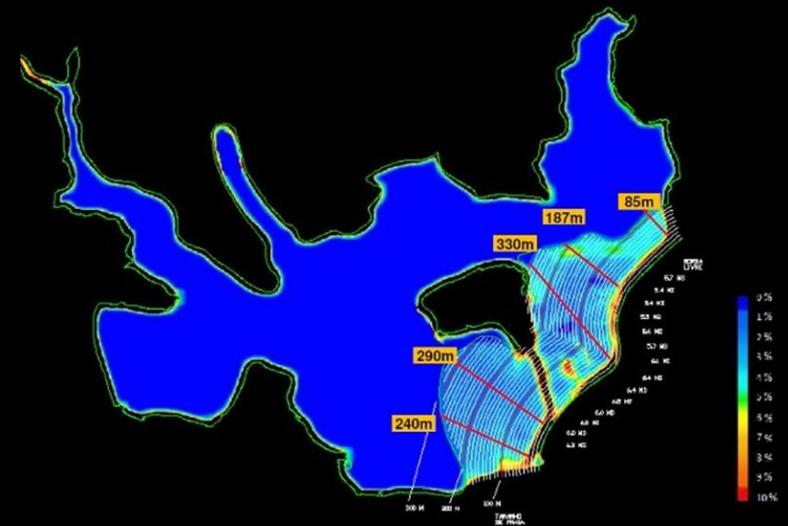
Trincas na Ombreira Esquerda - OE (Dezembro de 2013)



Descumprimento da Praia Mínima de Segurança de 200 m



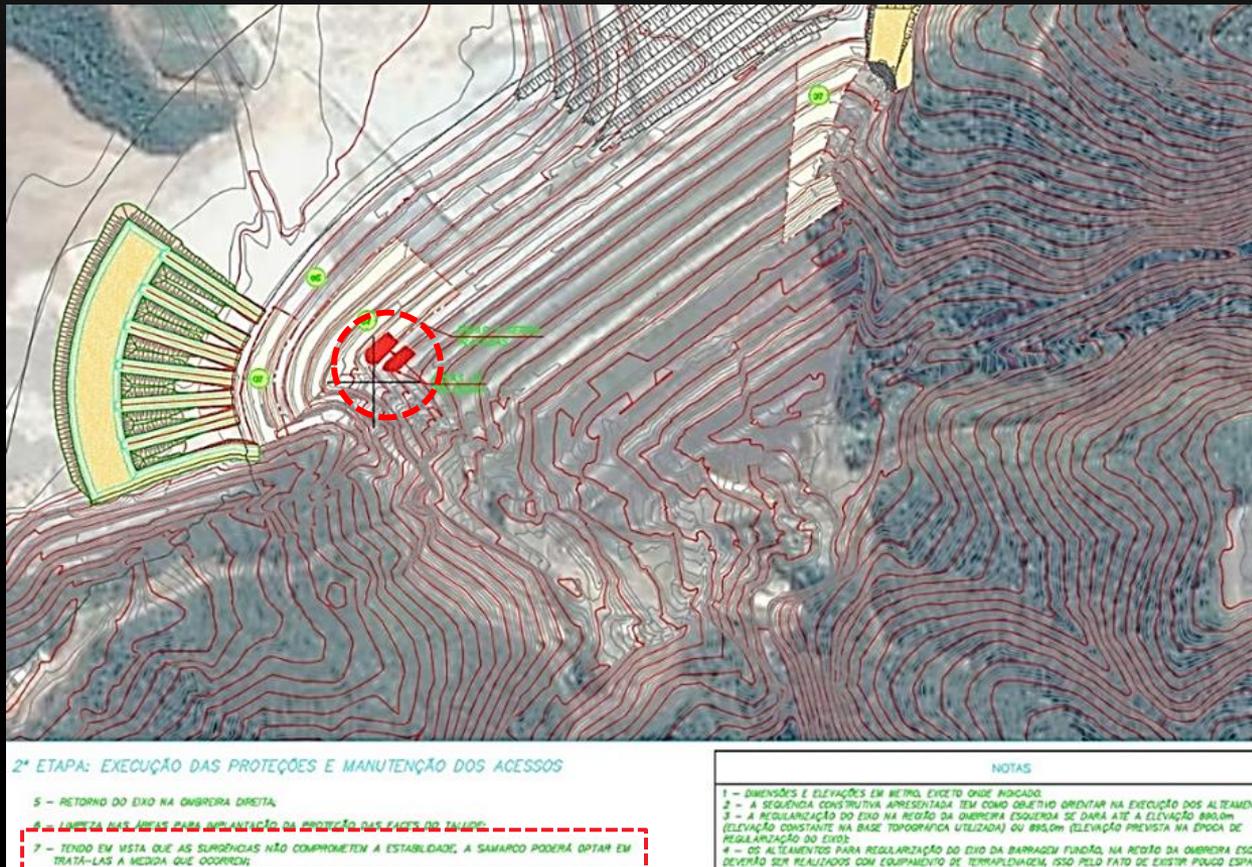
Janeiro 2014
(OD = 150 m ? e OE 103 m)



Dezembro 2014
(OD = 240 m ? e OE 85 m)

Surgências na Ombreira Direita - OD

(Julho 2014 e Janeiro 2015)

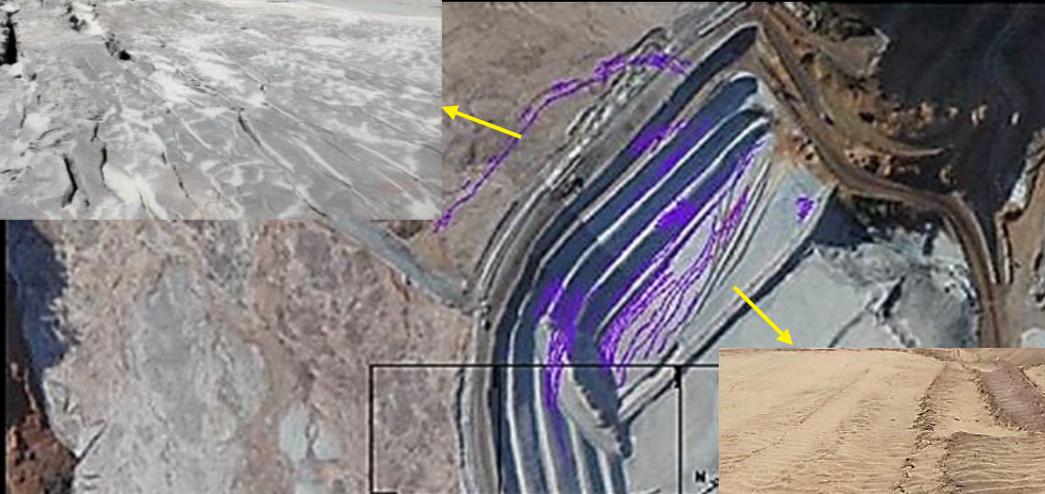


“7 – Tendo em vista que as surgências não comprometem a estabilidade, a SAMARCO poderá optar em tratá-las a medida que ocorrem”

Princípio de Ruptura do Eixo Recuado (Agosto 2014)



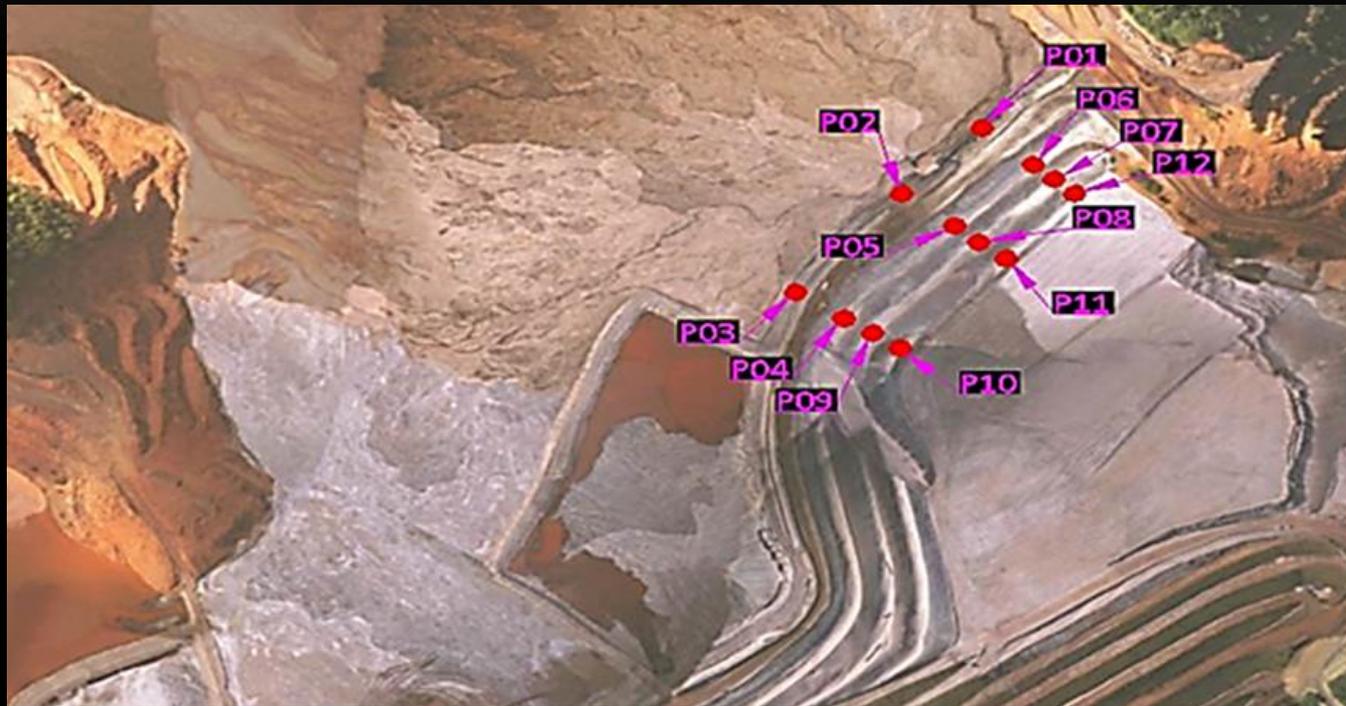
Trincas de tração no reservatório



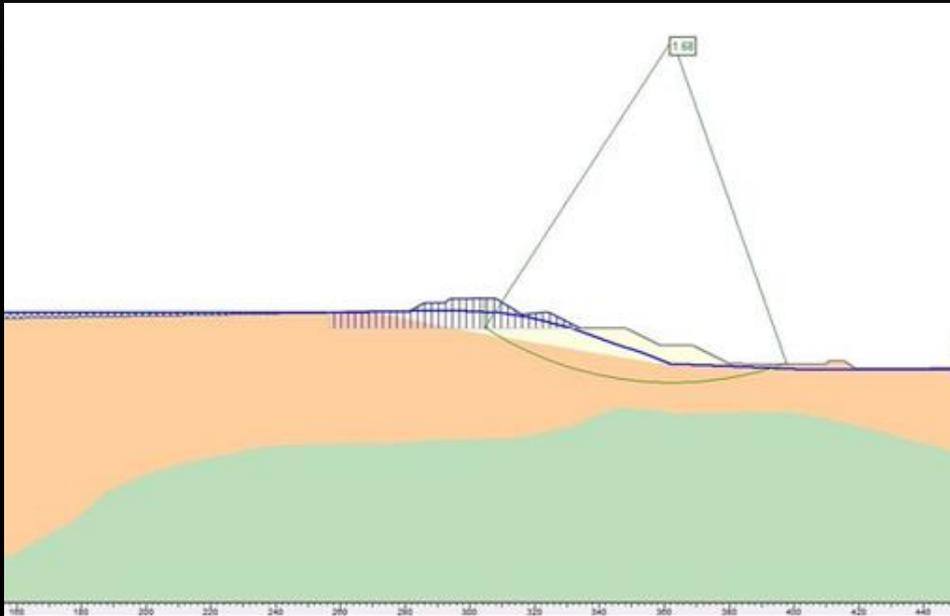
Trincas de compressão
no patamar



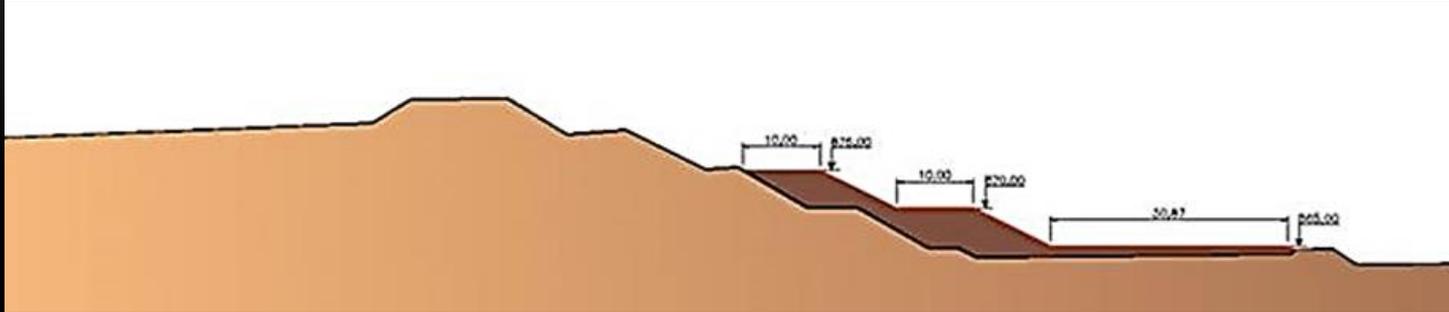
Início do Monitoramento do Eixo Recuado



Cálculo da Estabilidade



Construção de uma Berma Estabilizadora



Projeto de Retificação do Eixo

Usina de ciclonação



Construção dos Tapetes Drenantes das Ombreiras no segundo semestre de 2015



Ombreira direita



Ombreira esquerda
(Agosto 2015)

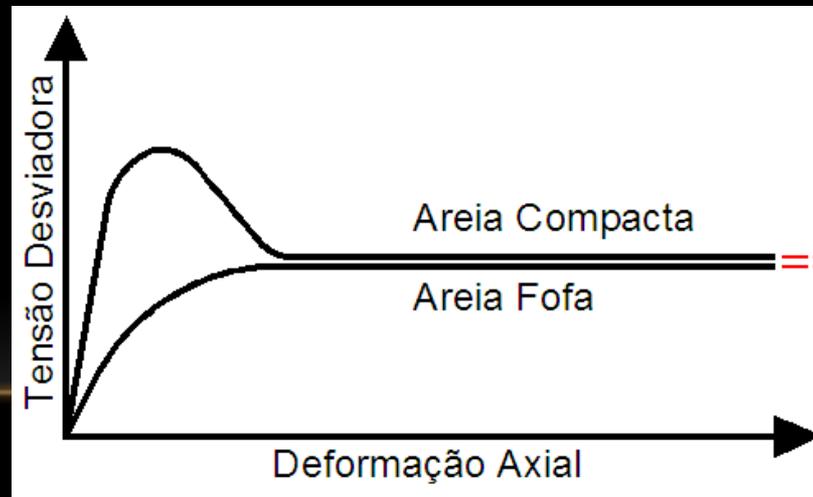
Considerações sobre Liquefação

Definição de Liquefação

Fenômeno quando um solo arenoso passa a se comportar como um material no estado líquido (perde atrito entre as partículas), a partir de determinado valor de pressão hidráulica ou pressão neutra (poropressão).

Condição para que a Liquefação se instale

É preciso que o solo arenoso seja suscetível de se liquefazer, o que ocorre com as areias pouco compactadas ou “fofas”.



Liquefação em Fundão

Setembro/2008 – Dissertação de Pós Graduação de Lorena Romã Penna pela UFOP, conclui positivamente sobre a suscetibilidade a liquefação do depósito de rejeitos da Baía 2 de Germano.

Agosto a Outubro/2009 – Durante as escavações investigatórias por ocasião da falha do dreno profundo, a consultoria Pimenta de Ávila observou: “[...] lentes intercaladas de material fino lançado no reservatório à montante do Dique 1 (sedimentos de fábrica nova e finos descarregados juntamente com o rejeito) [...] **elementos favoráveis à instalação de processos de liquefação encontram-se presentes**, principalmente na presença de um gatilho [...]”

Setembro/2014 – Por ocasião do princípio de ruptura do eixo recuado em ago/2014, a consultoria Pimenta de Ávila advertiu para a hipótese da ocorrência de liquefação estática.

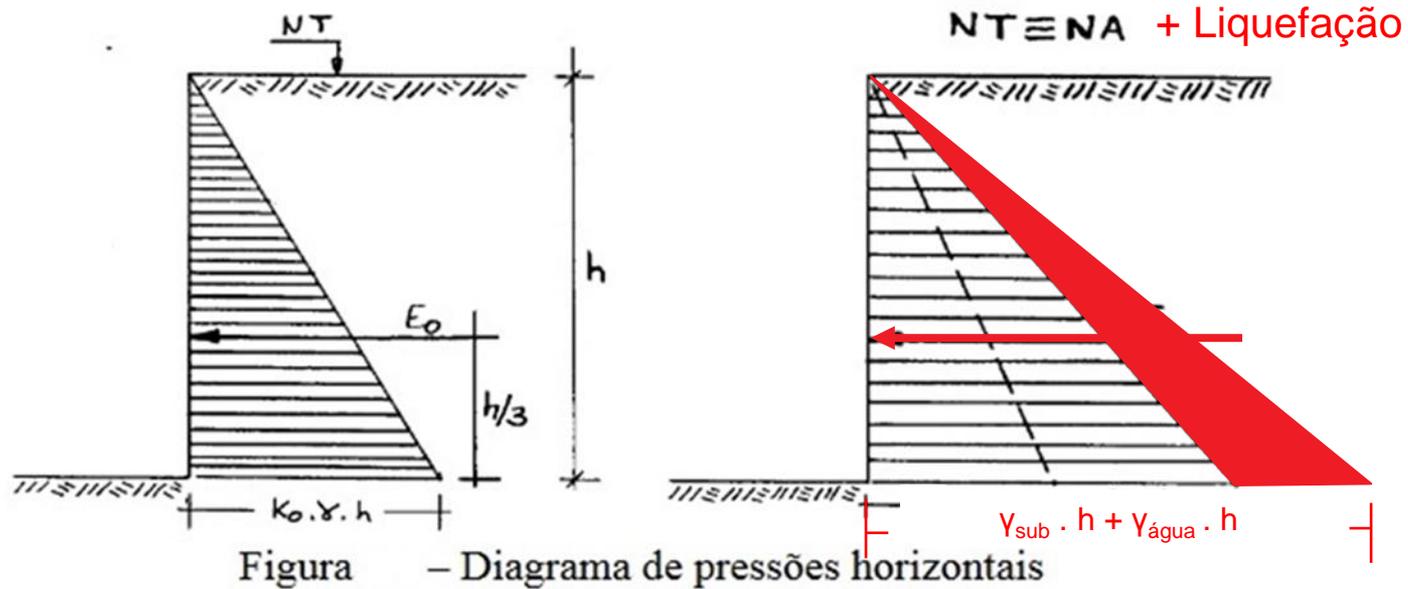
Junho/2015 – A empresa VOGBR solicitou a SAMARCO a realização de campanha de investigação complementar com a utilização de sondagens percussivas e ensaios CPTu a fim de realizar os estudos de liquefação com base na metodologia de Olson (2001).

Janeiro/2016 – A empresa VOGBR contratada da SAMARCO com base em ensaios CPTu de out/2015 concluiu: “[...] fica evidente a suscetibilidade a liquefação do rejeito arenoso.”

Abril/2016 – Relatório técnico da empresa Geomecânica contratada pelo MPE também concluiu pela suscetibilidade a liquefação do rejeito da barragem do Fundão.

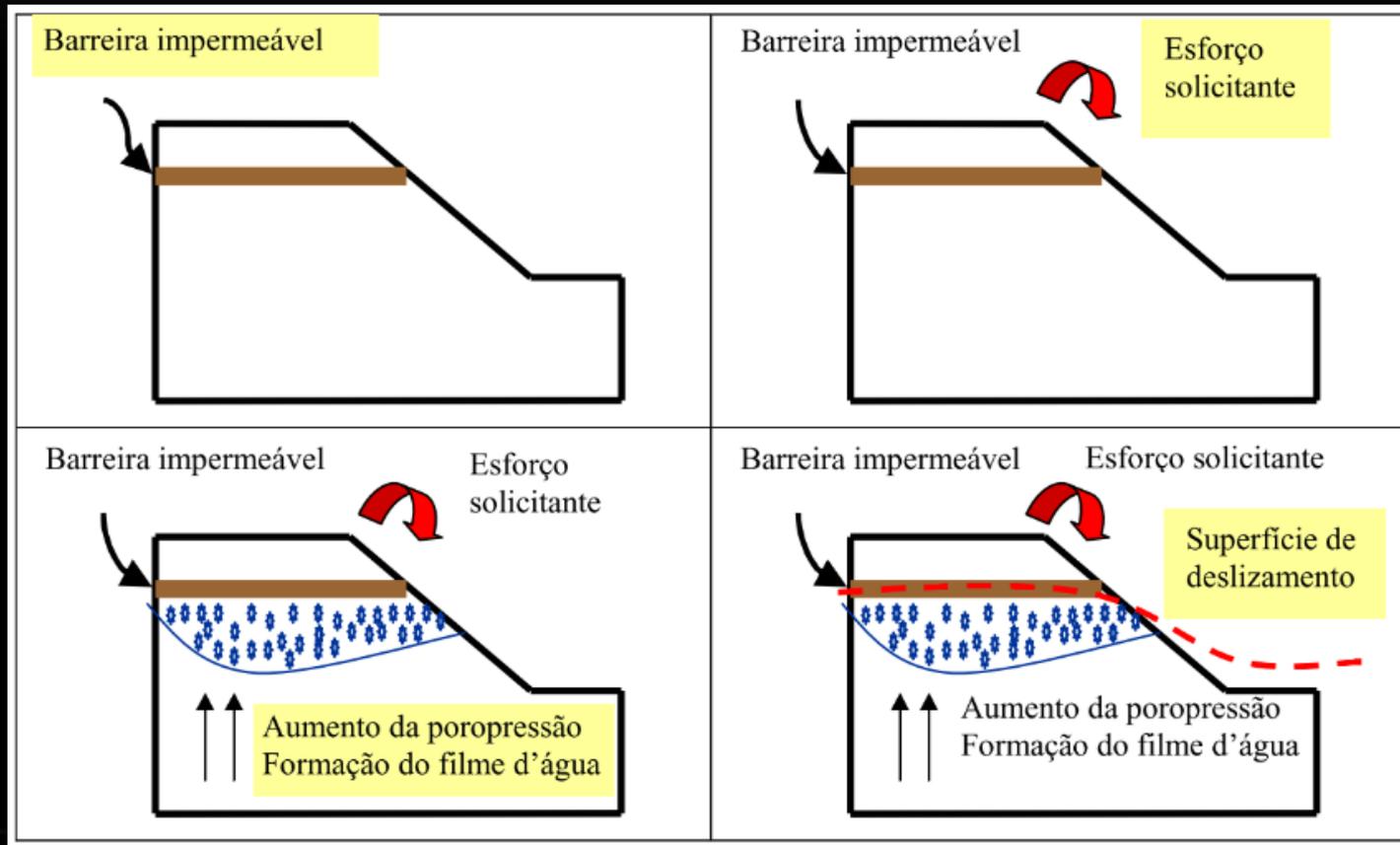
Efeito da Liquefação

EMPUXOS DE TERRA



Efeito Kokusho

Potencializador dos danos do processo de liquefação, quando o depósito de rejeitos possui estratigrafia com permeabilidade variável.



Esquema de formação do filme d'água (Penna, 2008)

Taxa de Alteamento Anual

É recomendado pela literatura técnica adotada internacionalmente para alteamentos a montante, com base na experiência prática da área, uma taxa que varia de 15 a 30 pés, ou seja, de 4,57 m até o máximo de 9,14 m anuais, havendo autores que recomendam valores ainda mais conservadores.

O manual de operações atualizado de 2012 pela PAC, informa que a taxa a ser adotada deveria ser de até 6 (sem unidade de medida) por ano.

A média de alteamento anual executada no SRF foi de 13,09 m, variando entre 11,00 m e 16,40 m (Tabela 63).

Ruptura da Barragem do Fundão (Simples acidente?)



Imagem do sinistro vista da Pilha de Estéril da VALE,
momentos após a ruptura no dia 05/11/2015