



Gestão de Riscos em Barragens

Prof. André Assis, PhD
(Universidade de Brasília)

Palmas TO, 25 de abril de 2018



Sumário

1

Introdução

2

Engenharia de Barragens

3

Análise e Gestão de Riscos

4

Gestão de Riscos em Barragens

5

Considerações Finais

Introdução

- Engenharia é um fator de desenvolvimento econômico da sociedade → Criação, Produção e Competitividade
 - **Infraestrutura de Energia → Produção**
 - **Infraestrutura de Transporte → Mobilidade**
 - **Infraestrutura Urbana → Funcionalidade**
- **Necessidade de formação de engenheiros**

Formação do Engenheiro Civil

- Base científica (matemática e ciências)
- Vestibular concorrido e curso exigente
- Áreas de atuação (estruturas, construção, geotecnia, recursos hídricos, saneamento e transportes)
- **Formação ampla (meio ambiente, economia, sociologia, direito e administração)**
- Criativo e empreendedor
- Necessidade de atualização constante

Atuação em Áreas Diversificadas

Áreas de Atuação: Barragens



Necessidade de Engenheiros

- **Criar meios de produção (crescimento)**
- **Inovar para agregar valor e competir
(capacidade tecnológica e científica)**
- **Necessidade e modernização de infraestrutura**

**→ “Formar engenheiros é uma questão de
viabilidade e sobrevivência do país”**

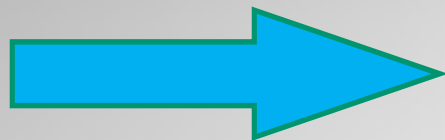
Necessidade de Formar Engenheiros

- **Total de engenheiros no Brasil = 800 mil (40% trabalham na área)**
- **6/1000 da força de trabalho (EUA = 25/1000)**
- **Número de Formados = 40 mil / ano**
- **Déficit de 20 mil / ano (150 mil no total)**

Necessidade de Formar Engenheiros

| | Engenheiros / 100.000 hab. | Graduados em Eng. (2006) | Engenheiros / Formandos (%) |
|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Brasil | 8 | 40.000 | 3 |
| Coréia do Sul | 25 | 80.000 | 25 |
| Rússia | 130 | 190.000 | 18 |
| Índia | 18 | 220.000 | 21 |
| China | 50 | 400.000 | 35 |

Ideal = 25



Programa Pró-Engenharia

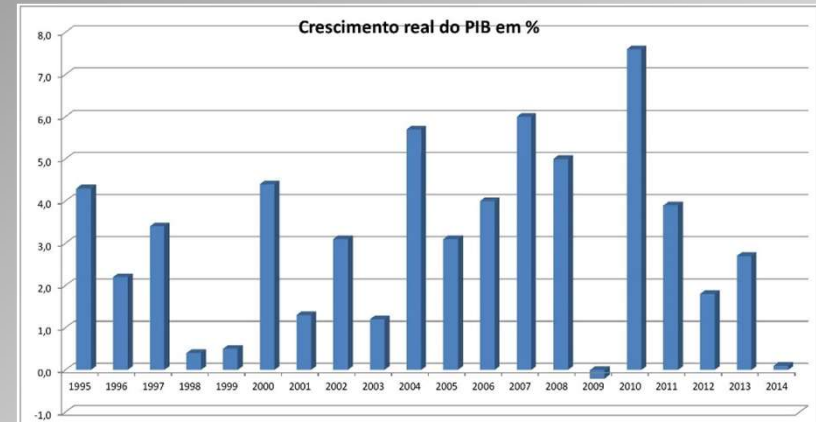
Necessidade de Formar Engenheiros

- **Até 2020 necessidade de 1,5 milhão de engenheiros (déficit de mais de 500 mil)**
- **Para aumentar o PIB de X% deve-se aumentar o número de engenheiros em 2X%**
- **O Brasil está entre os oito países mais propícios aos engenheiros (enorme demanda de infraestrutura)**

Necessidade de Formar Engenheiros

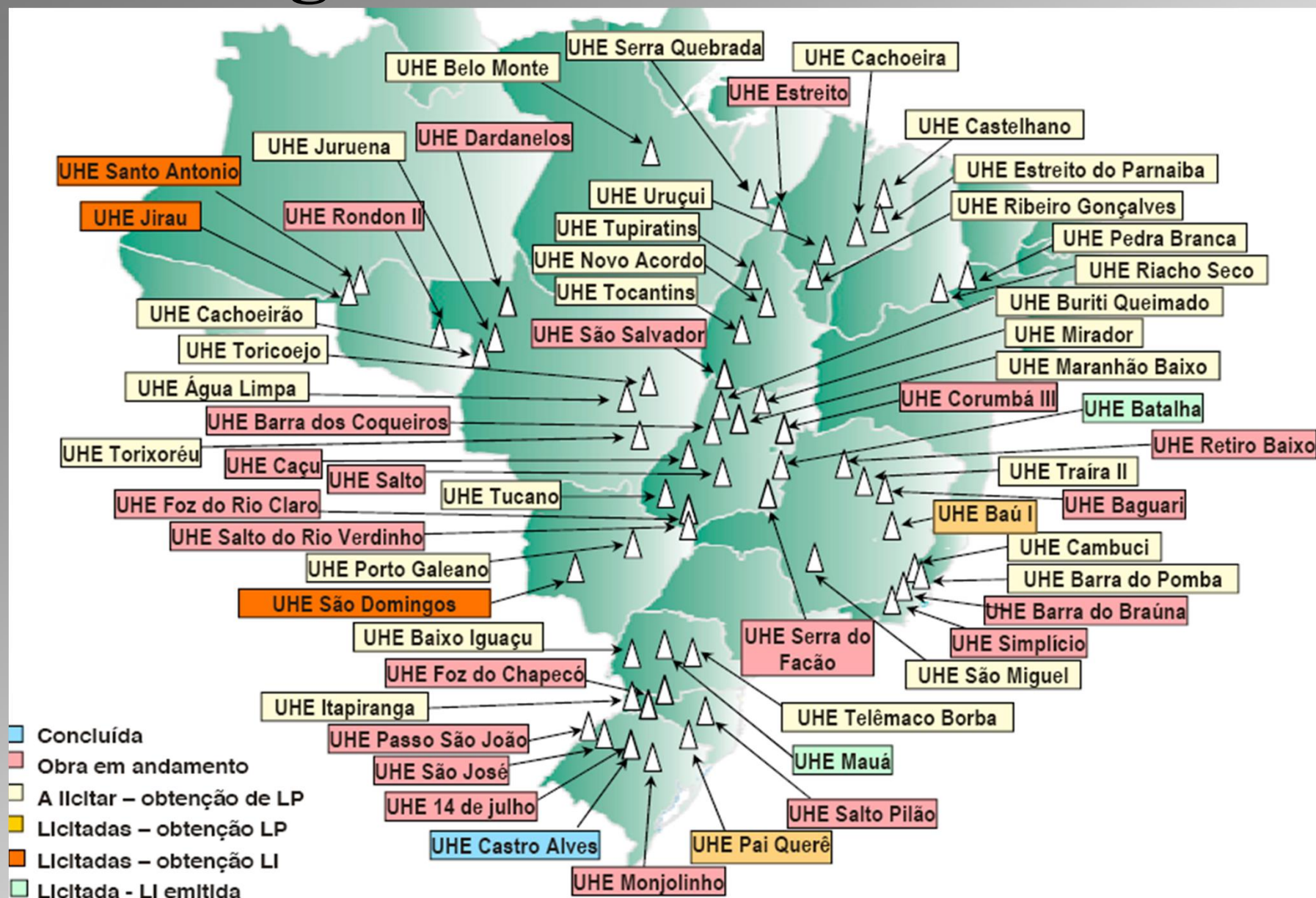
- Apesar de estar entre as dez economias mundiais, isso ainda não se reflete em uma sociedade desenvolvida e competitiva (60^a. a 70^a. PIB per capita e Índice de Competitividade)
- **Talento, inovação, competitividade → sustentar crescimento a longo prazo**
- **Baixa produção científica e de patentes (3 a 4% do BRIC) → 2% de empresas inovadoras (15% do emprego e 26% faturamento)**

Demanda de Infra-estrutura no Brasil



- Energia → **Produção**
 - ~100 GW e crescimento de 3% ao ano (3.000 MW)
 - 80% de origem hidrelétrica e 10% de eólica
- Infraestrutura de Transporte → **Mobilidade**
 - Modernização e duplicação de rodovias
 - Ferrovias e trens de alta velocidade
- Infraestrutura Urbana → **Funcionalidade**
 - Transporte de massa
 - Utilidades públicas (**abastecimento de água**)
 - Revitalização de centros urbanos

Energia – Usinas Hidrelétricas



Aproveitamento Integrado de Bacias Hidrográficas

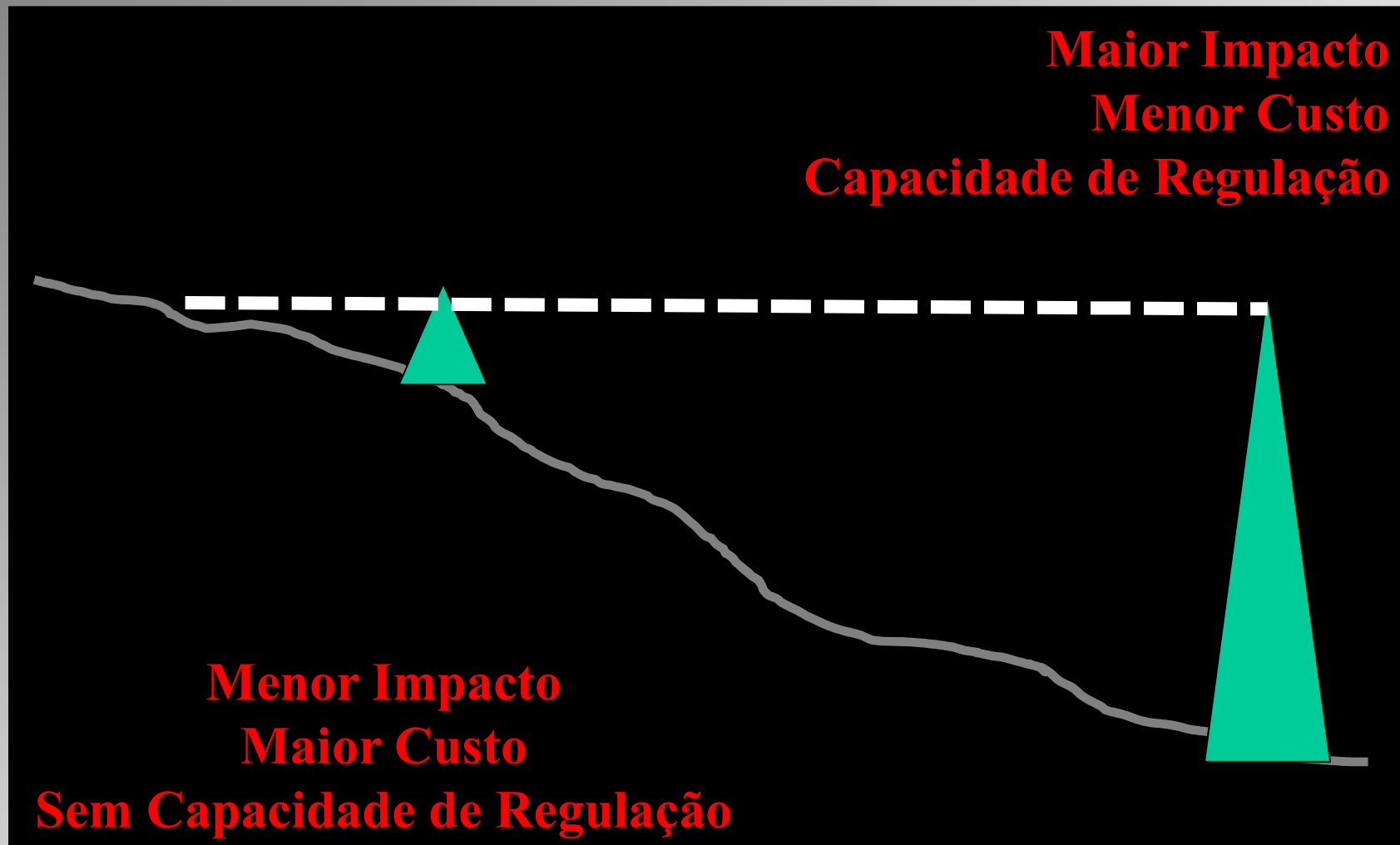


Tendências dos Projetos Hidrelétricos

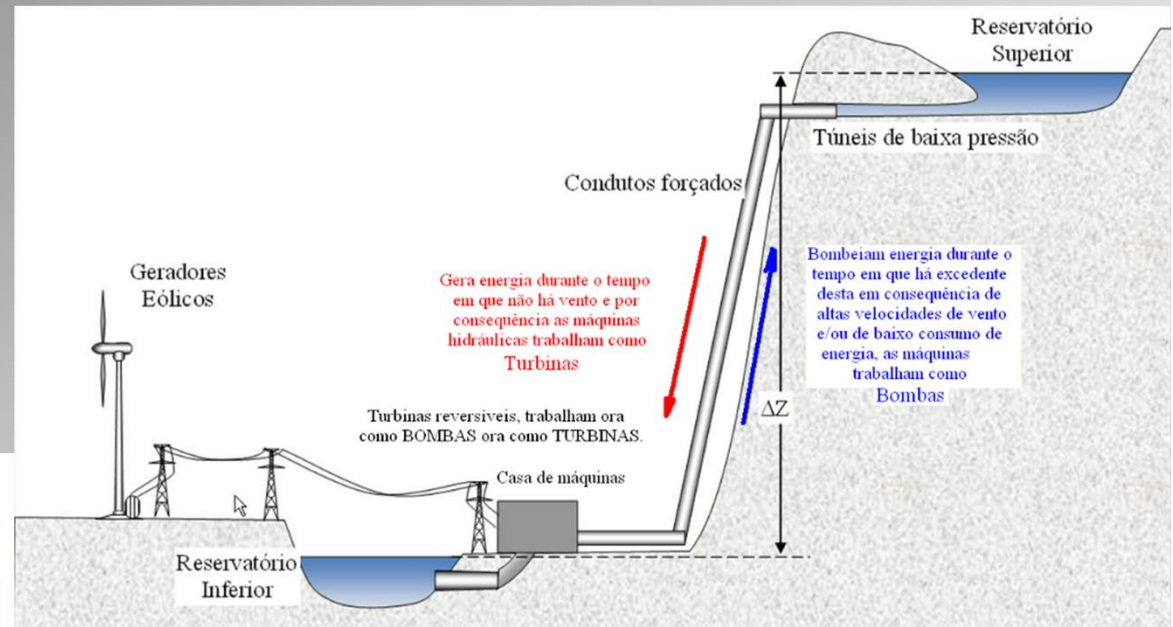
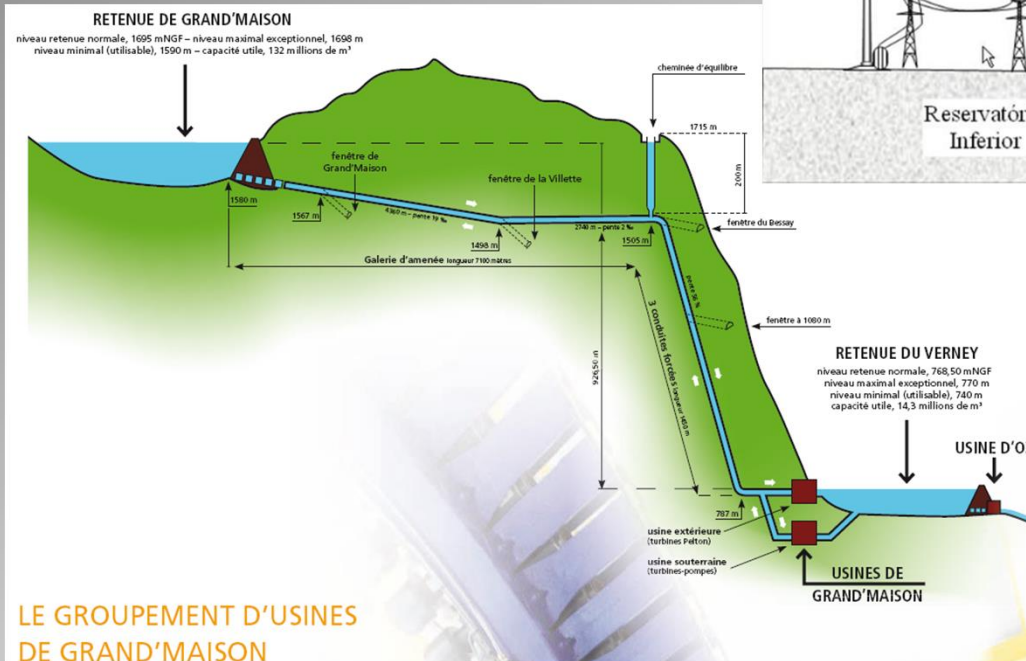
- ◎ **Vales encaixados**
- ◎ **Topo rochoso raso**
- ◎ **Barragens altas e curtas (CCR ou BEFC)**
- ◎ **Circuito hidráulico subterrâneo ou longos túneis de adução**
- ◎ **Reservatórios pequenos**
- ◎ **Baixo índice de impacto ambiental (km^2 / MW)**
- ◎ **Geração de energia (PCH a 100-2000 MW)**



Aproveitamentos Hidrelétricos: Pequenos versus Grandes Reservatórios



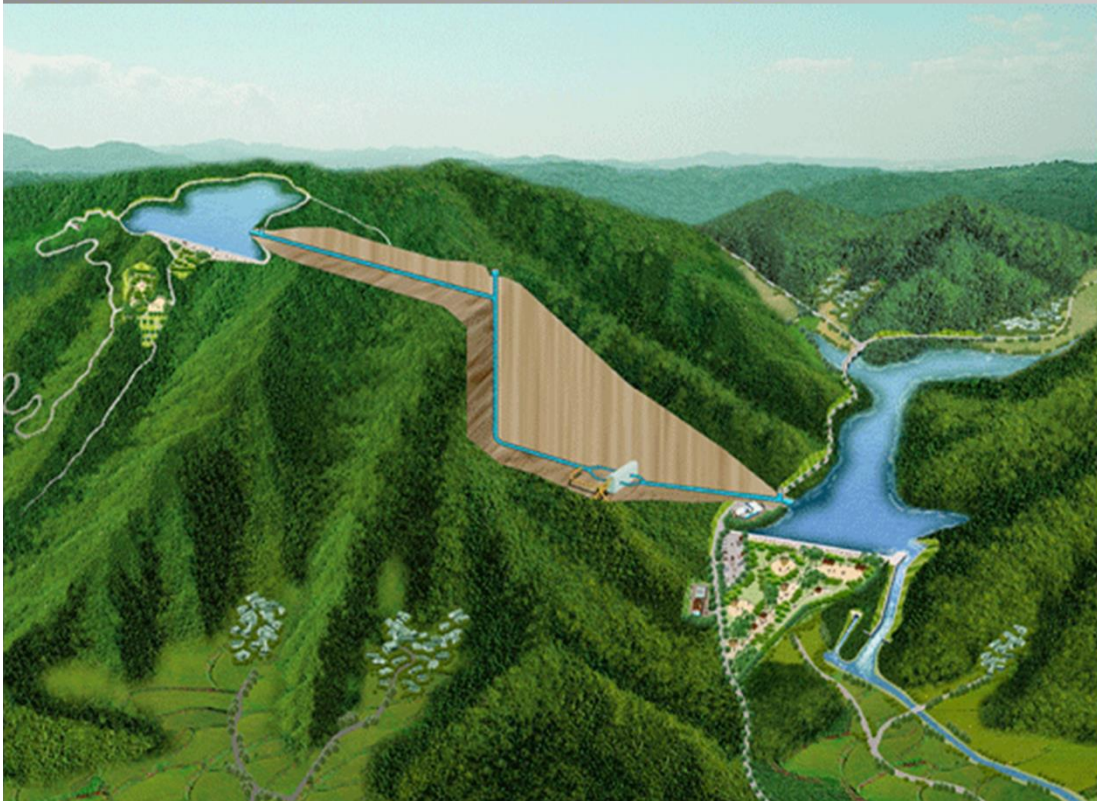
Aproveitamentos Hidrelétricos Reversíveis



Usa o período de baixa demanda para reabastecer o reservatório

Otimização de Fontes de Energia

**Usina Hidrelétrica
Reversível acoplada
a Eólica ou Solar**



Engenharia de Barragens

- **Barragens** são estruturas de solos, rochas ou concreto com **objetivo primário** de criar um **reservatório** (reter água, rejeitos, resíduos etc.)
- **Falhas de barragens** ocorrem pelas seguintes causas:
 - Hidrológicas (galgamento)
 - Estruturais (*piping*, instabilidade etc.)
 - Perda de capacidade do reservatório

Impacto da Engenharia Geológica na Engenharia de Barragens

Definição do tipo de barragem

- **Concreto (arco ou muro gravidade)**
- **Enrocamento (rocha)**
- **Solos**

Vales fechados indicam boa competência geológica e vales abertos geologia mais branda

Tipos de Barragens

Concreto



Arco

Contraforte

Muro Gravidade

Geotécnica



Enrocamento

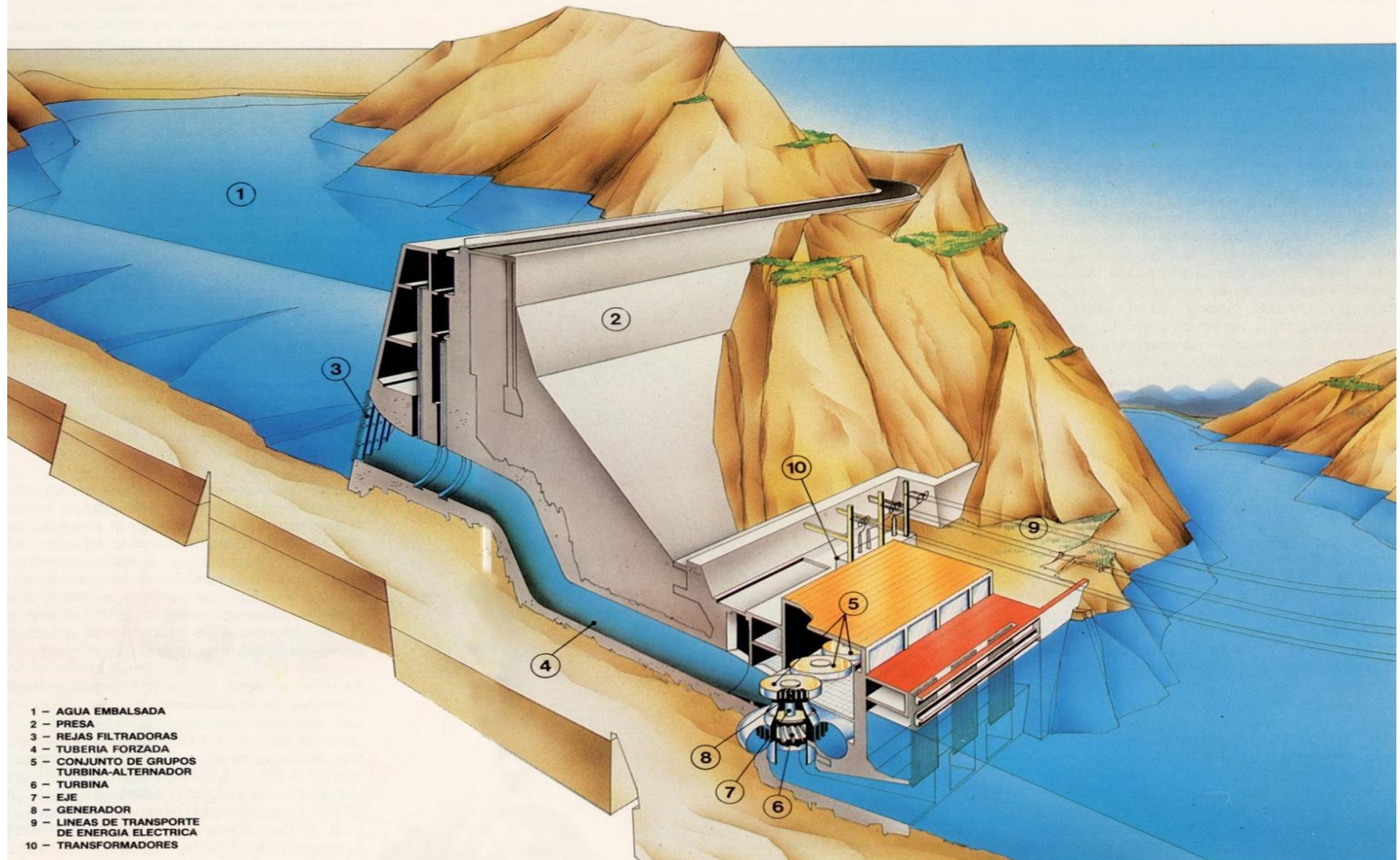
Mista

de Terra

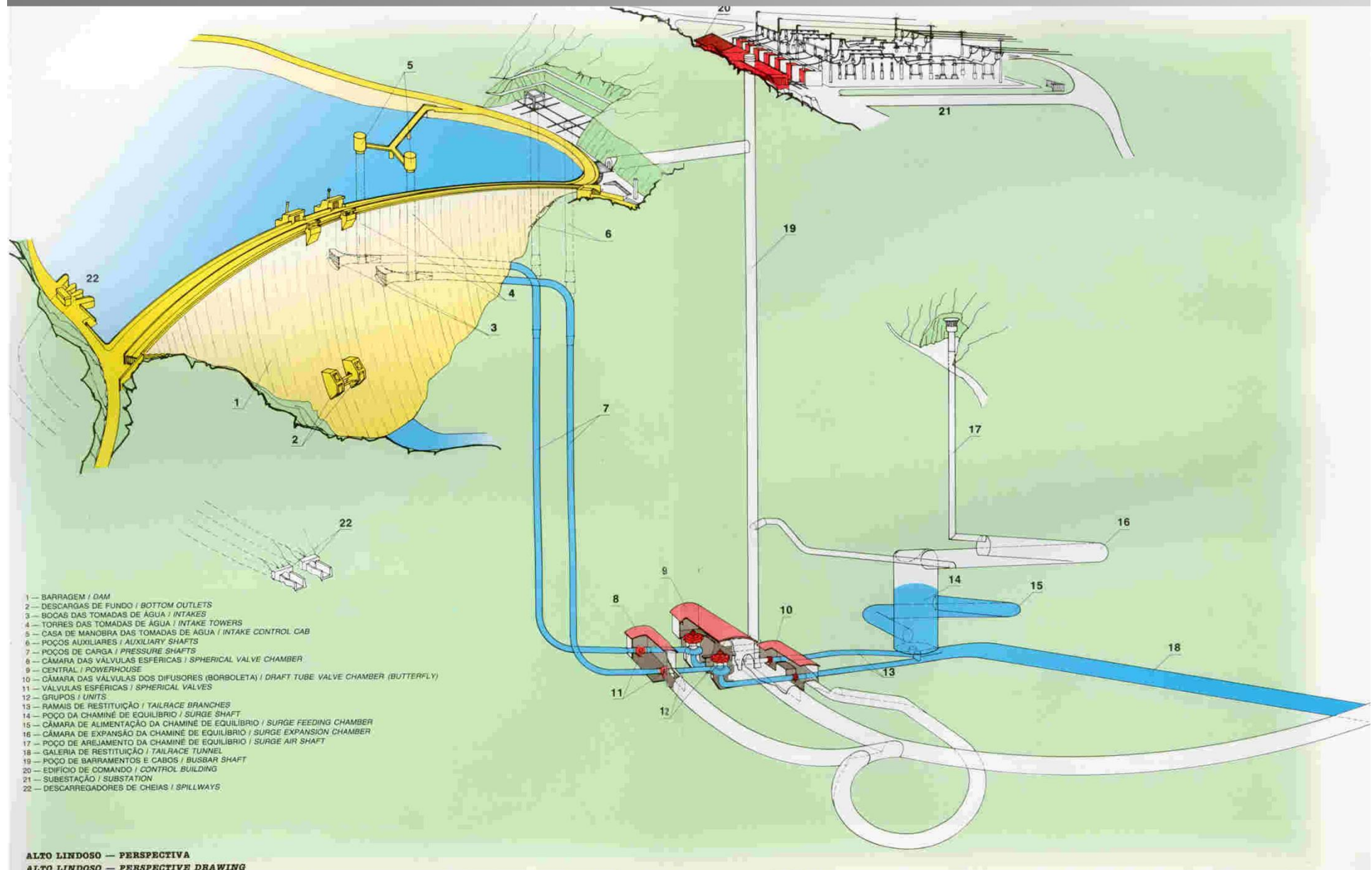
Elementos Estruturais de Barragens

- **Barramento (estrutura de concreto ou geotécnica que forma o reservatório)**
- **Circuito de Água Vertente (canal ou túnel de aproximação, vertedouro, canal de restituição)**
- **Circuito Hidráulico (canal ou túnel de adução, casa de força ou estação de bombeamento, canal ou túnel de fuga)**
- **Estruturas de desvio (ensecadeira, túnel, adufa)**
- **Estruturas de transposição (eclusas etc.)**

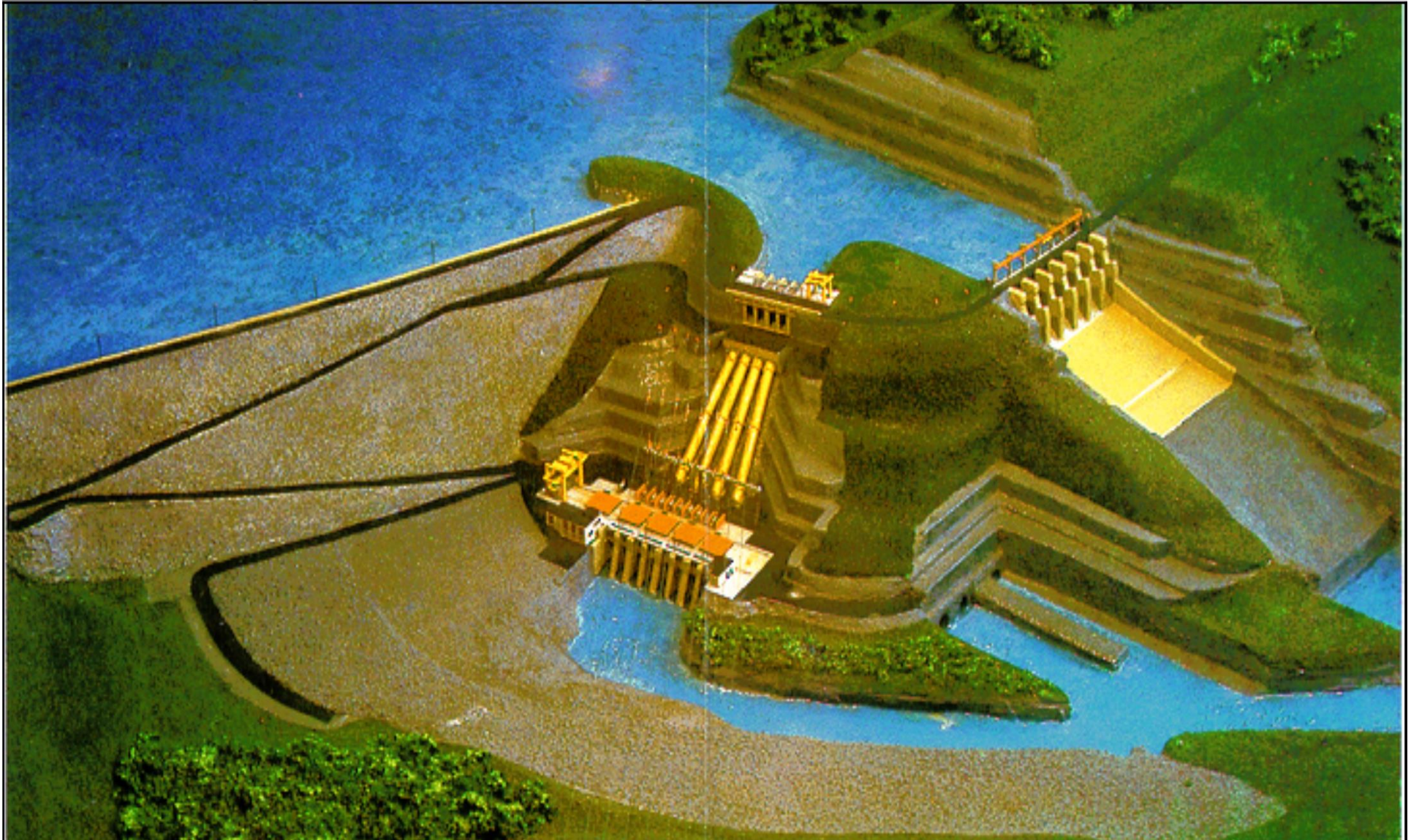
Esquema Geral de uma Barragem



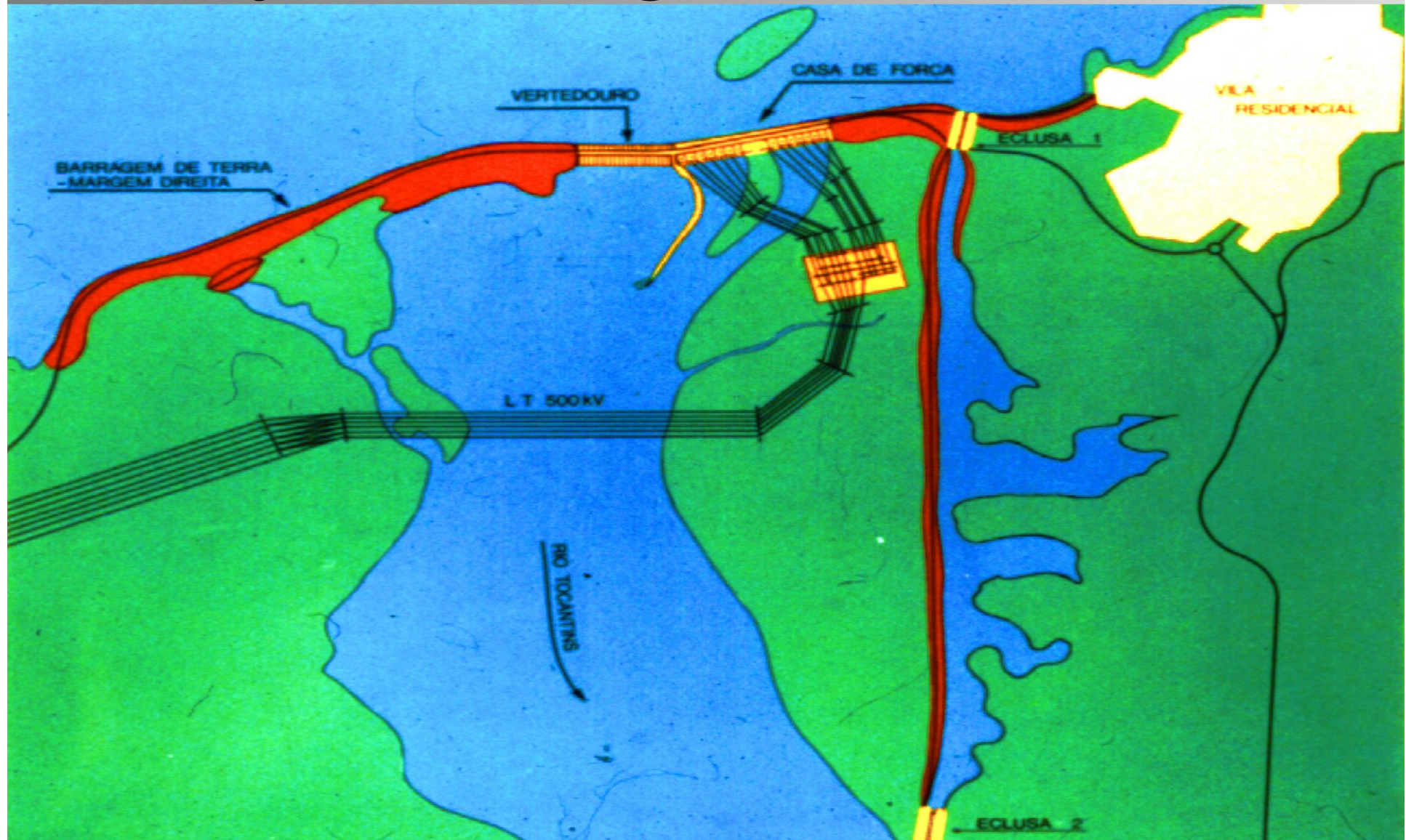
Arranjo de Barragem em Arco



Arranjo de Barragens em Vale Fechado



Arranjo de Barragens em Vale Fechado



Barragem de Concreto em Arco



Barragem de Concreto em Muro Gravidade



Fonte: <http://dourovalley.eu/>

Barragem de Enrocamento



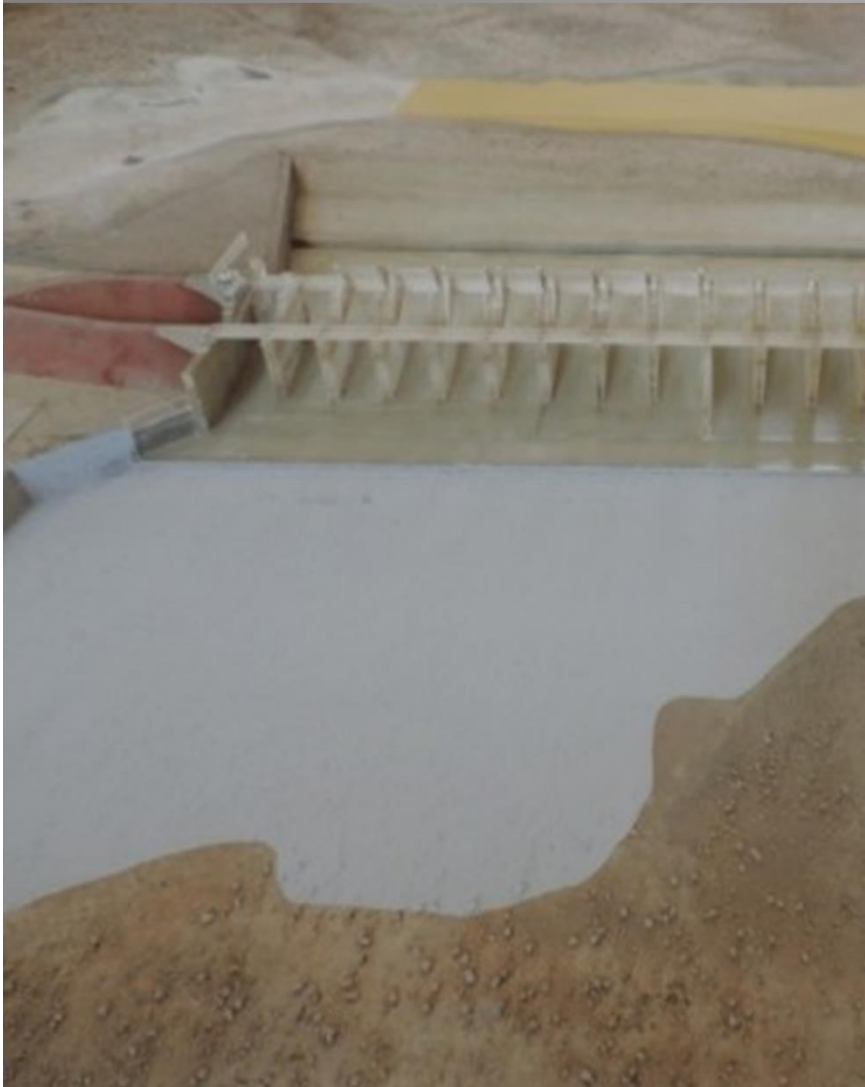
Barragem de Terra





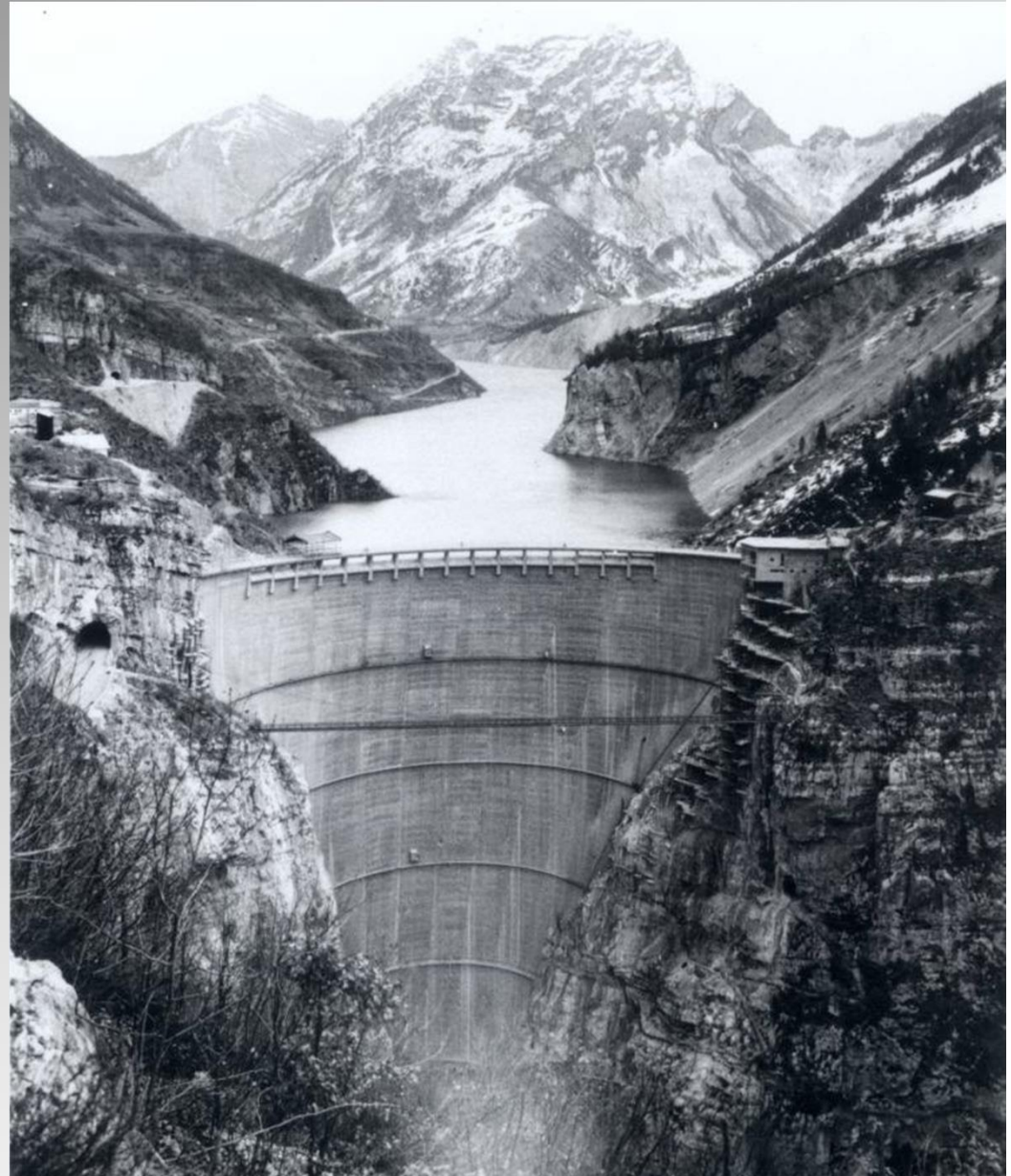
Falhas de Reservatório

- **Erosão e sedimentos**
- **Instabilidade de taludes naturais**
- **Fugas naturais (cavernas, falhas geológicas)**
- **Sismicidade induzida**



Instabilidade de Taludes Naturais

Vayont, Italia
(1963)





Falhas Geológicas em Barragens

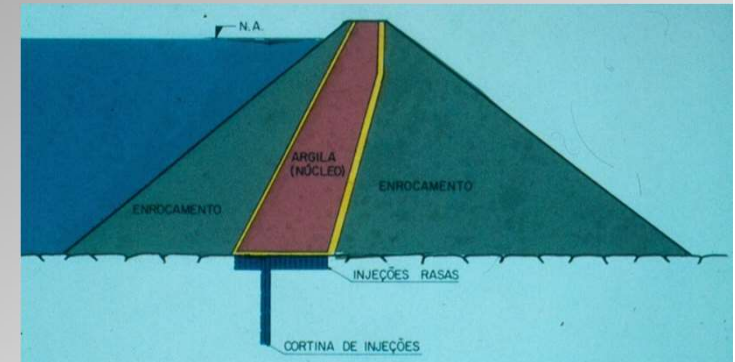


Barragem de Teton, USA

**Piping induzido por
descontinuidades na
fundação**



Falhas Causadas por Fundações em Rocha

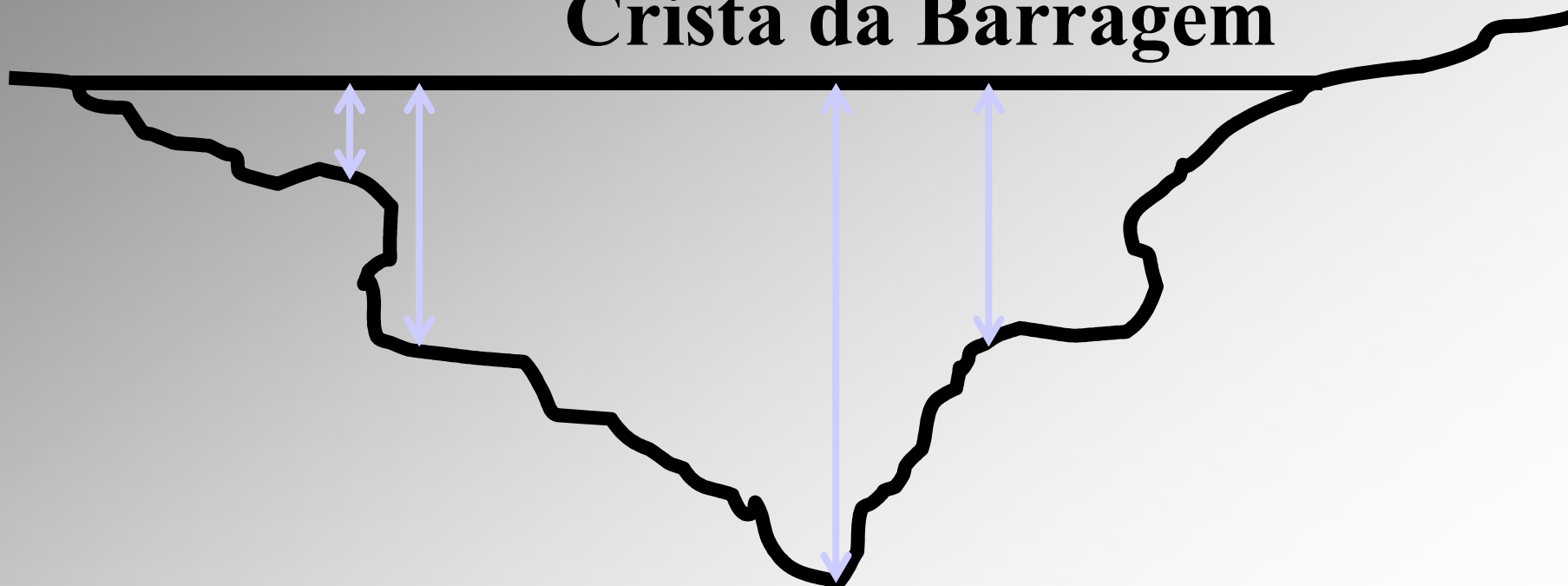


- **Maciço Rochoso Fraturado**
 - Perda de Água Excessiva
- **Descontinuidades Lisas ou Preenchidas**
 - Instabilidade de Taludes
- **Topo Rochoso Irregular**
 - Recalques Diferenciais Induzidos

Recalques Diferenciais Induzidos

Trincas cisalhantes induzidas
no maciço da barragem

Crista da Barragem



**Camada "G" revestida
com Concreto Projetado**



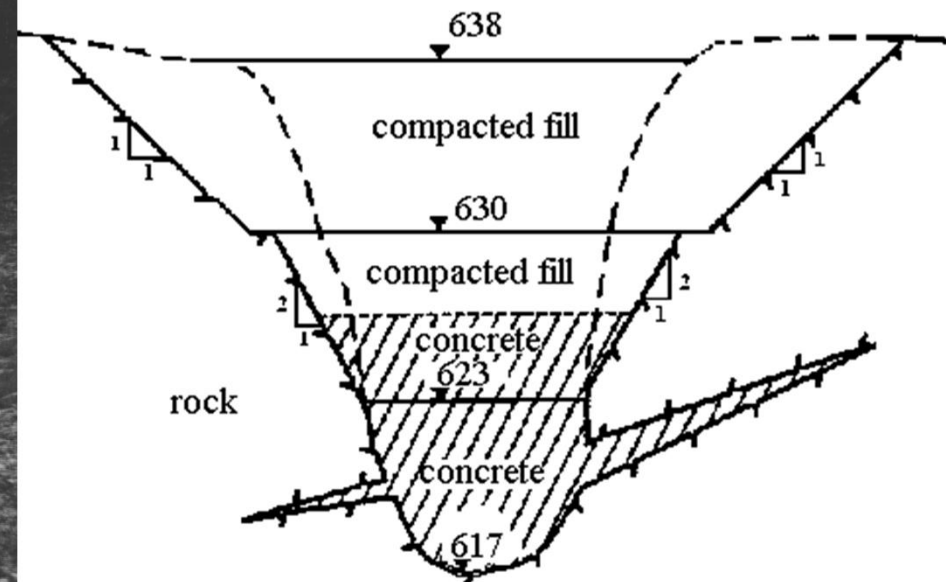
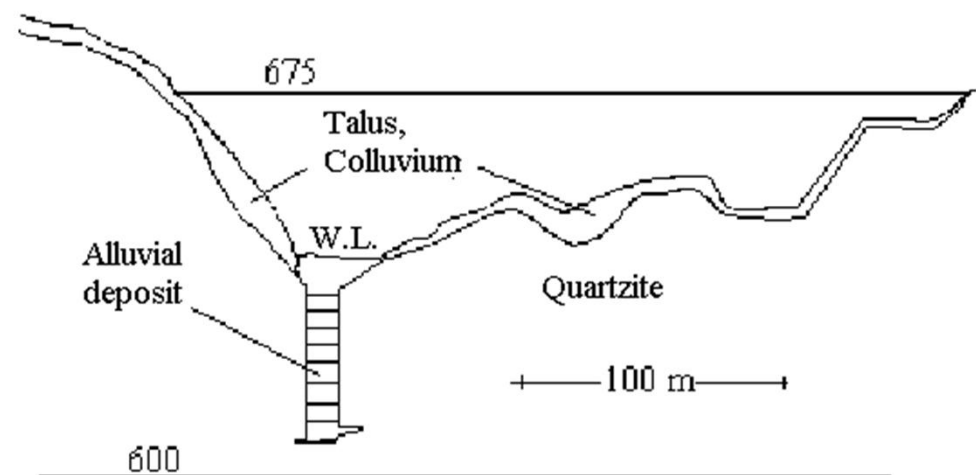
Instabilidade de Taludes por Descontinuidades na Rocha



Tratamento de Fundações



Barragem de Zabumbão

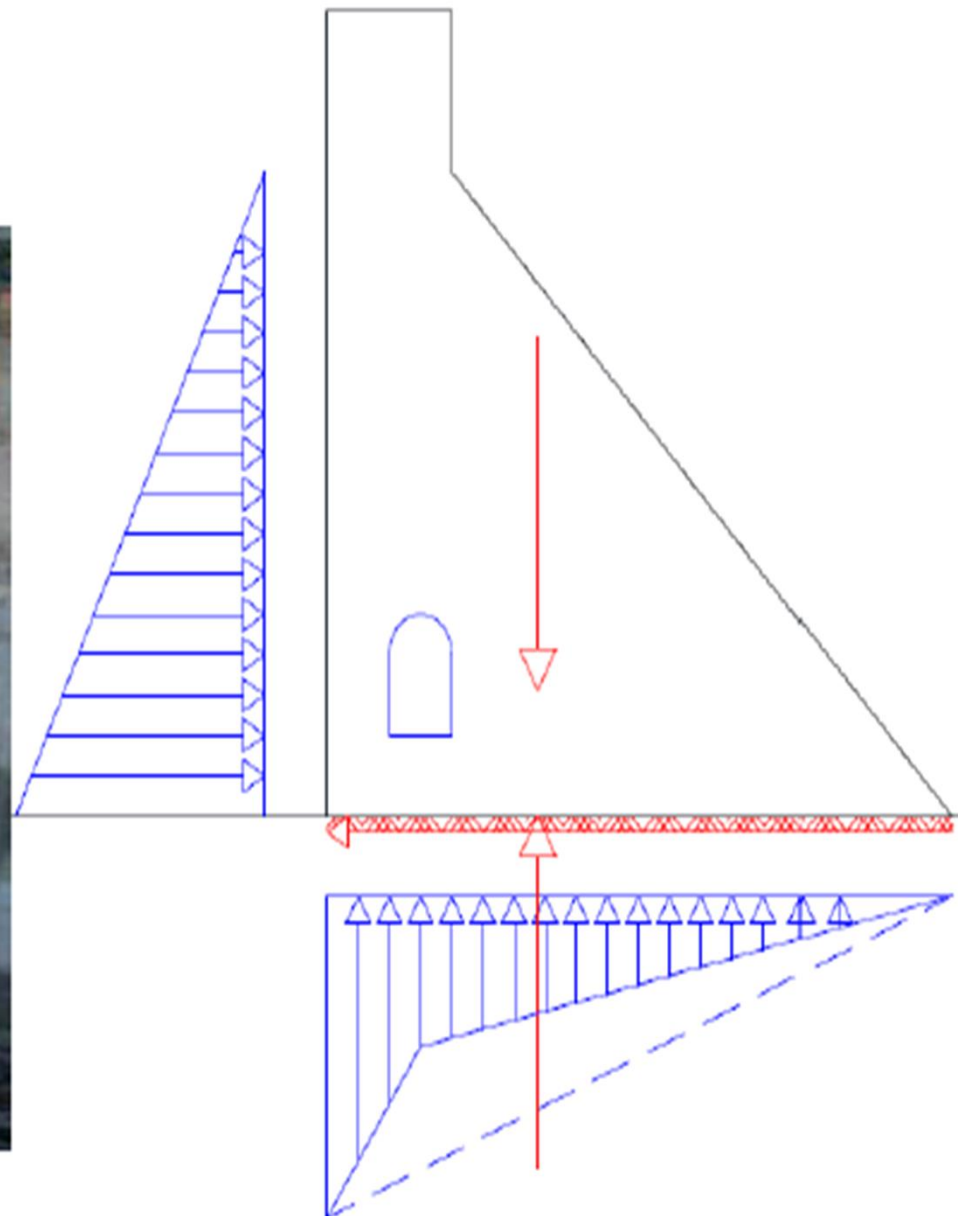


Falhas Estruturais em Barragens de Concreto tipo Muro Gravidade

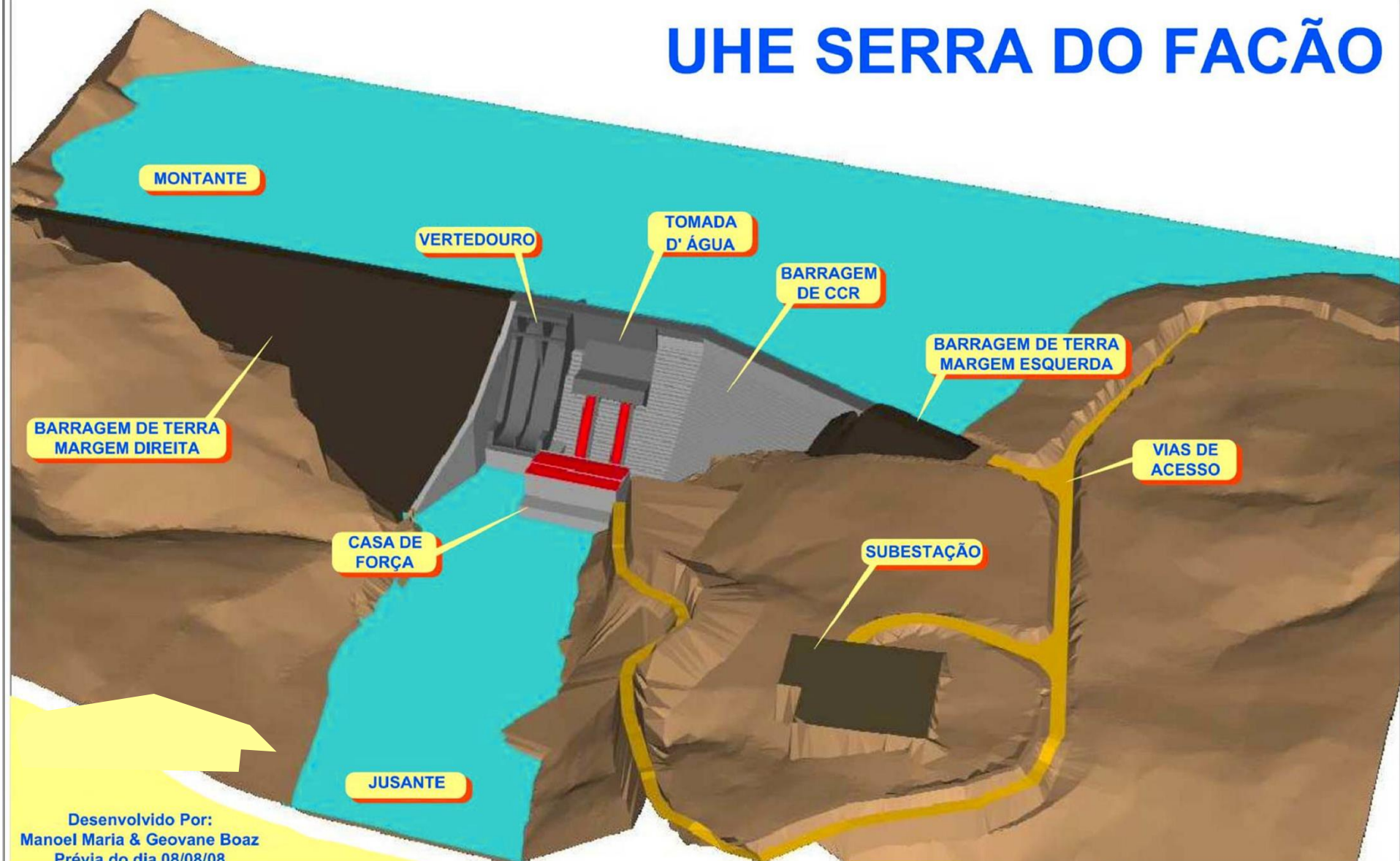
- **Deslizamento pelo contato com a fundação**
- **Flutuação (pressão ascendente de água)**
- **Tombamento**
- **Tensões admissíveis no concreto e fundação**

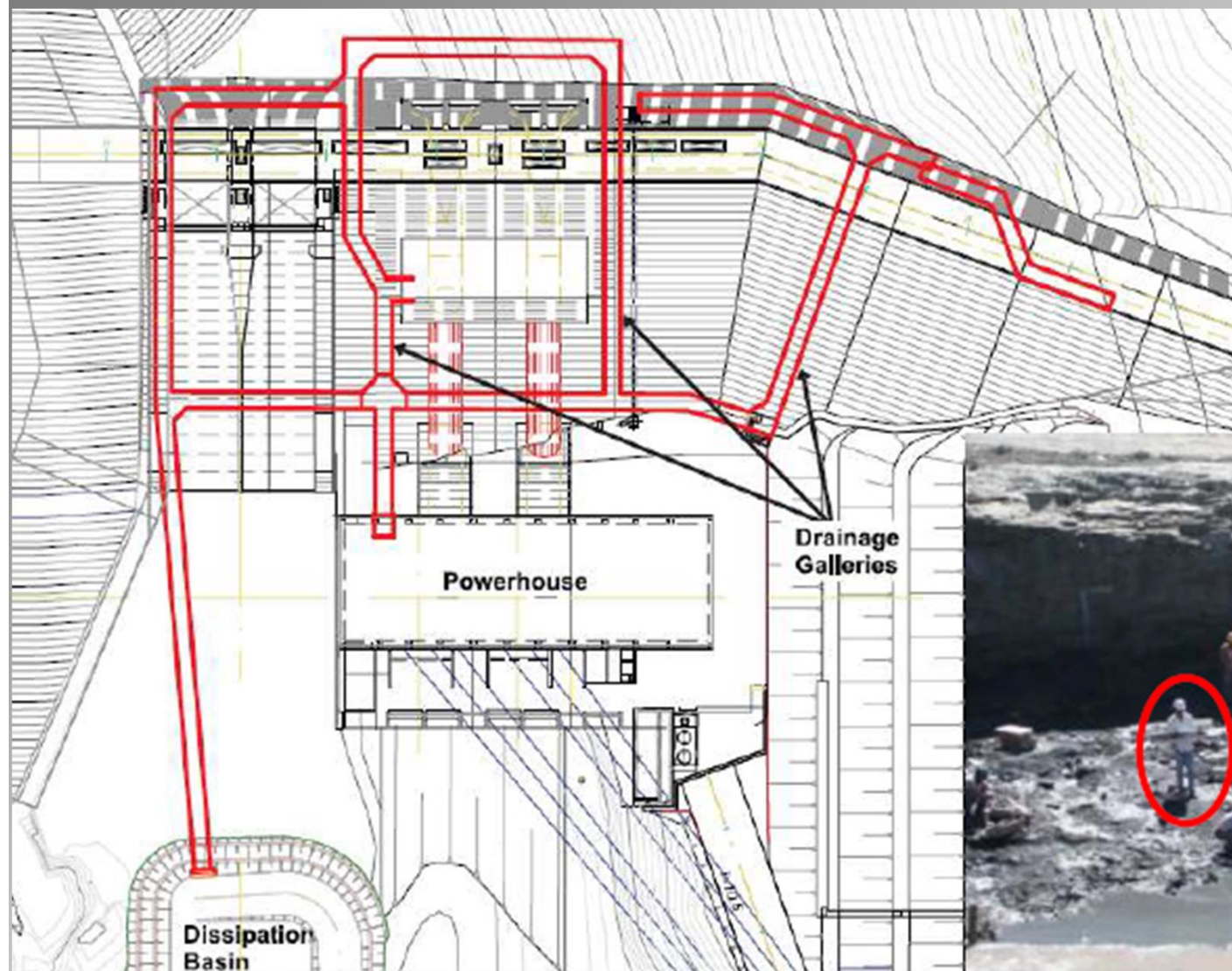
Deslizamento pela Fundação

- ▣ Cortinas de Injeção
- ▣ Galerias de Drenagem

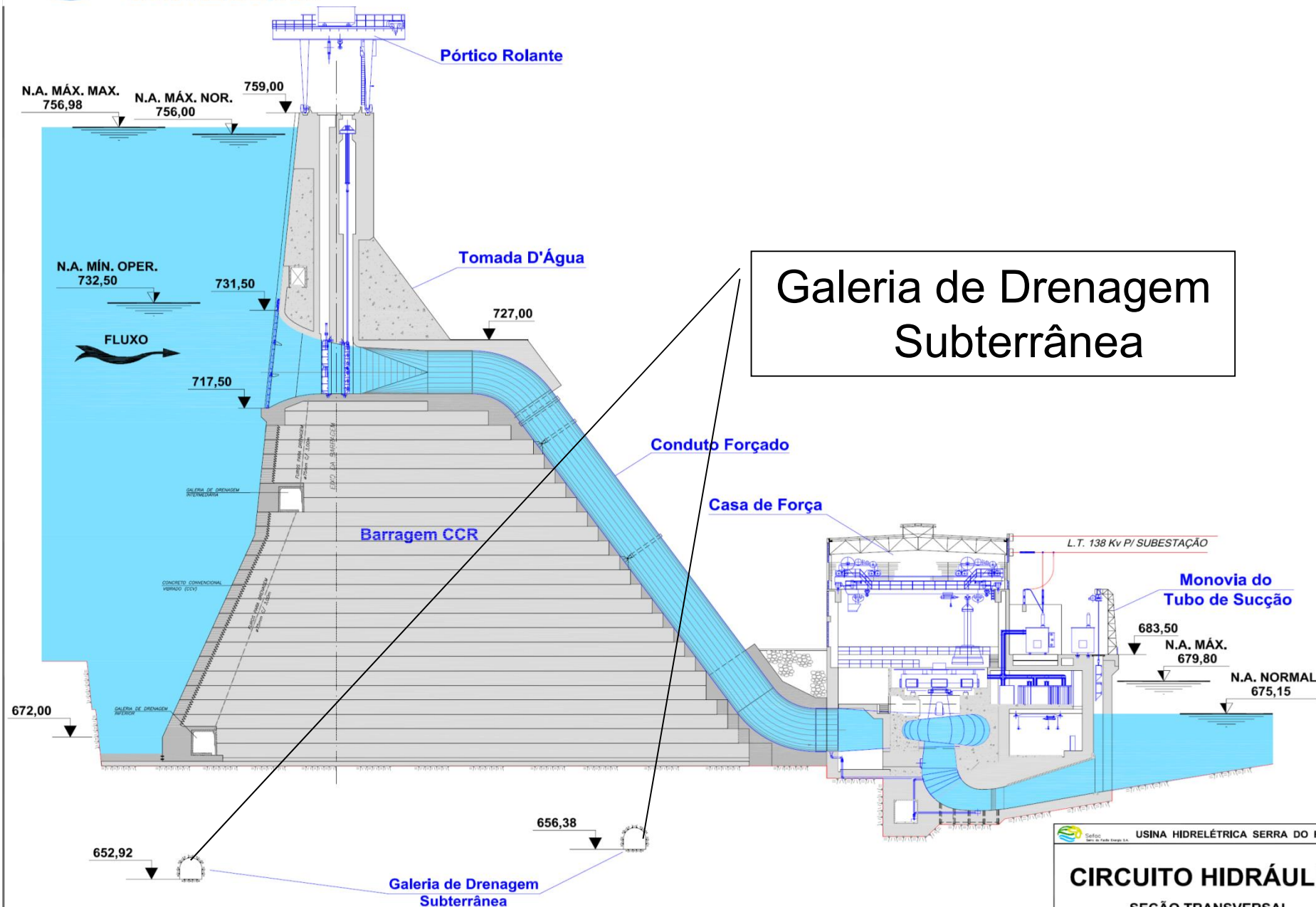


UHE SERRA DO FACÃO

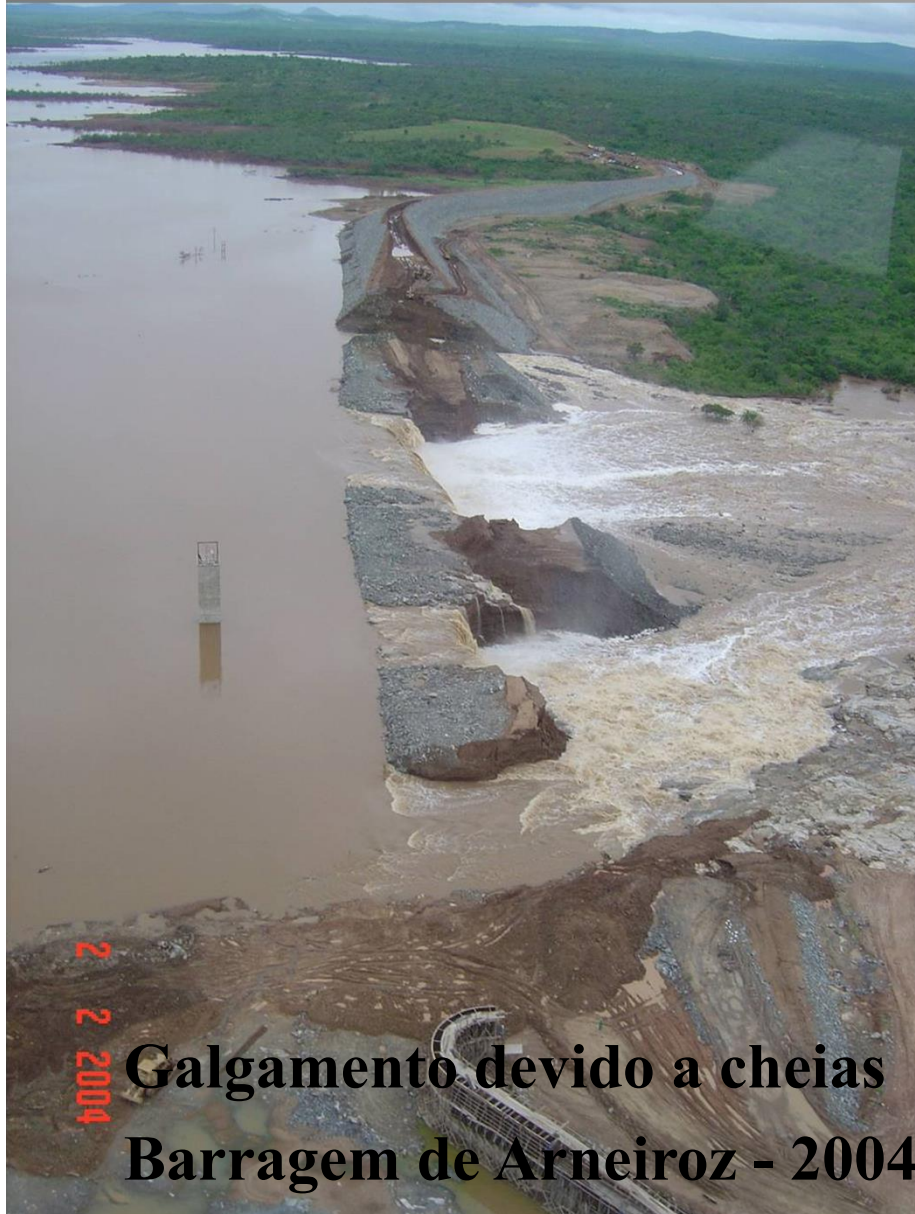




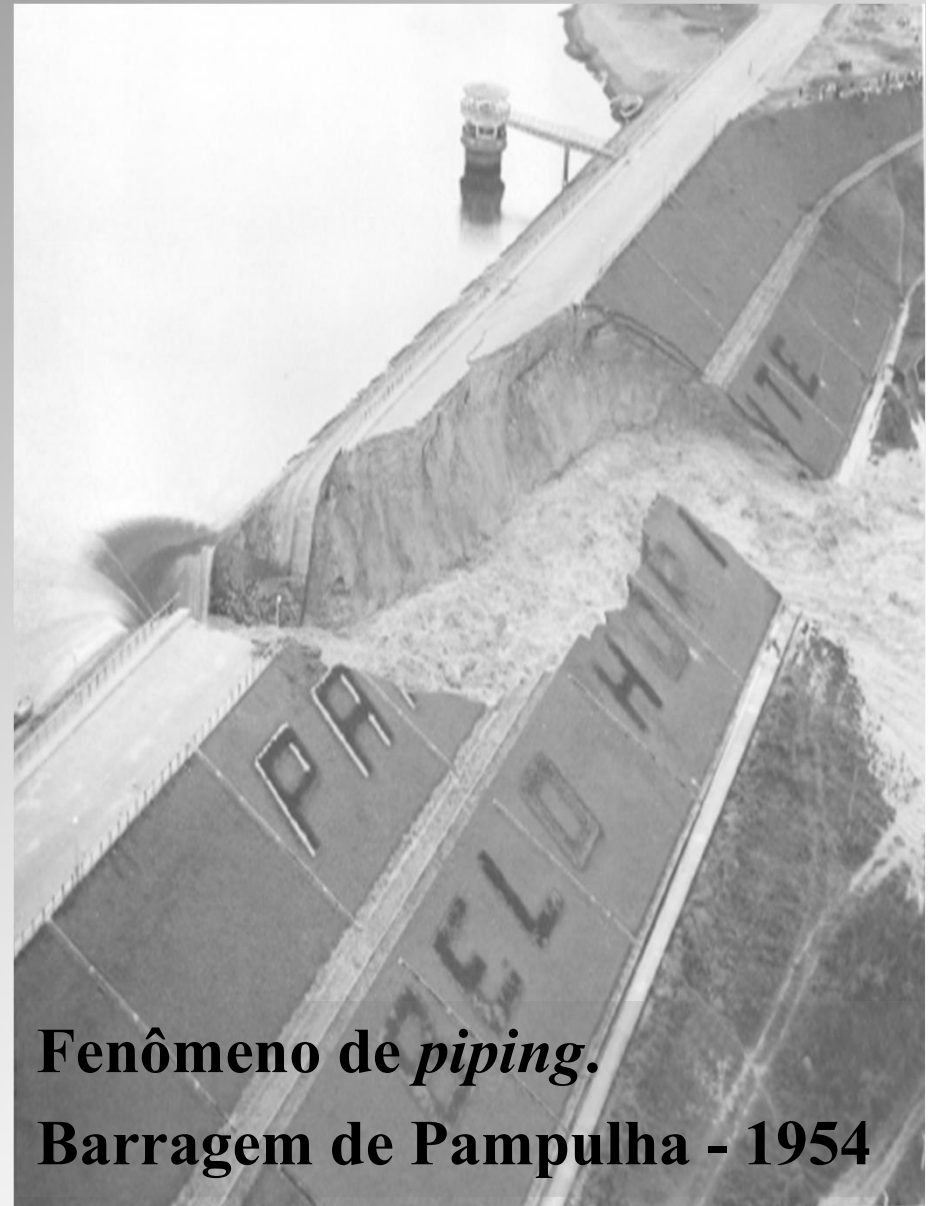
UHE Serra do Facão – 210 MW







**Galgamento devido a cheias
Barragem de Arneiroz - 2004**



**Fenômeno de *piping*.
Barragem de Pampulha - 1954**

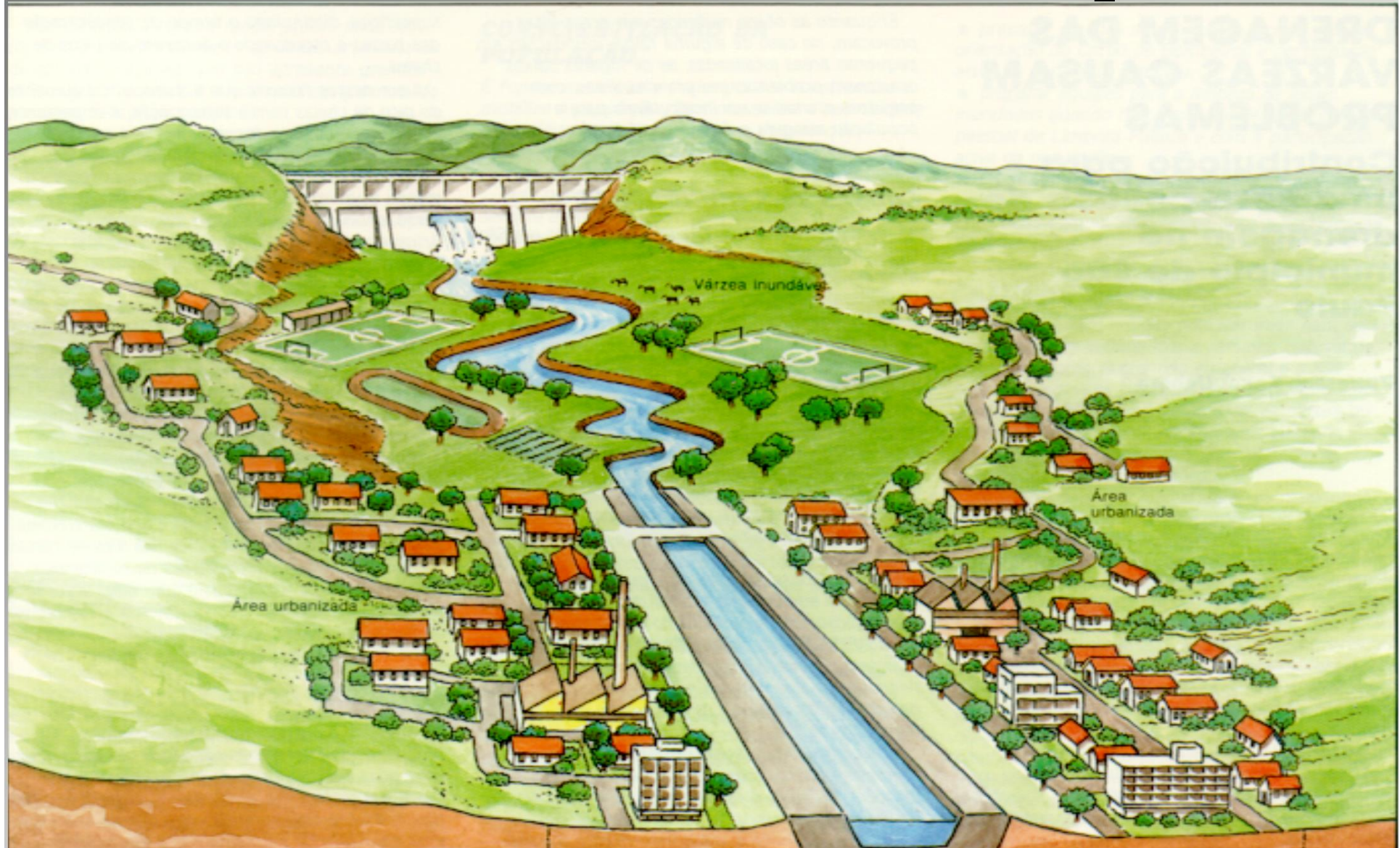
Análise e Gestão de Riscos

- Na engenharia tradicional existe um pré-conceito generalizado de **exatidão**
- Abordagem **Determinista**
 - Parâmetros e carregamentos assumidos constantes
 - Análise paramétrica ou de sensibilidade
- **Incertezas** são incorporadas em margens de segurança

Incerteza

- **Incertezas** → fonte de **Riscos**
- **Análise de Riscos** → elemento de Tomada de Decisão em Engenharia (década de 1950)
- **Gestão de Riscos** em Engenharia → Nova Engenharia (a partir da década de 1990)

Benefícios x Incertezas x Consequências



Incertezas x Consequências

- **Incertezas** → chance de falhas
- Engenharia tende a focar somente na segurança
- **Consequências** → impactos e danos
- Sociedade visa somente as consequências
- **Conceito de Risco** → denominador comum entre Engenharia e Sociedade

Principais Incertezas em Barragens

- Incertezas Geológico-Geotécnicas
- Incertezas Hidrológicas
- Carregamentos (Água, Sismos, Ventos etc.)
- Incertezas de Demanda e Operação



**Fases de
Projeto**

Conceito de Falha

Conceito de Falha → deficiência ou perda total de desempenho estrutural ou funcional da estrutura de engenharia


Principais Falhas

- **Técnica: segurança (rupturas), desempenho funcional (deslocamentos excessivos)**
- **Cronograma (prazo vencido)**
- **Orçamentária (sobre custos)**

Abordagens da Engenharia

Indicador de Desempenho → qualquer parâmetro (y) escolhido para medir o **desempenho estrutural ou funcional** de um empreendimento de engenharia

- Fator de Segurança
- Deslocamentos
- Vazão
- Tempo de construção
- Custos


$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$$

Métrica de Falha

Métrica de Falha → definir o limite do indicador de desempenho (y_{crit}) que a partir do qual indica **Falha**

$$y > y_{crit} \quad \text{ou} \quad y < y_{crit}$$

Abordagens da Engenharia

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_n)$$

Abordagem Determinística

- Parâmetros de projeto são assumidos constantes
- Resultado calculado é único

Abordagem Probabilística

- Parâmetros de projeto são variáveis
- Resultado calculado é uma distribuição de probabilidade

Probabilidade de Falha

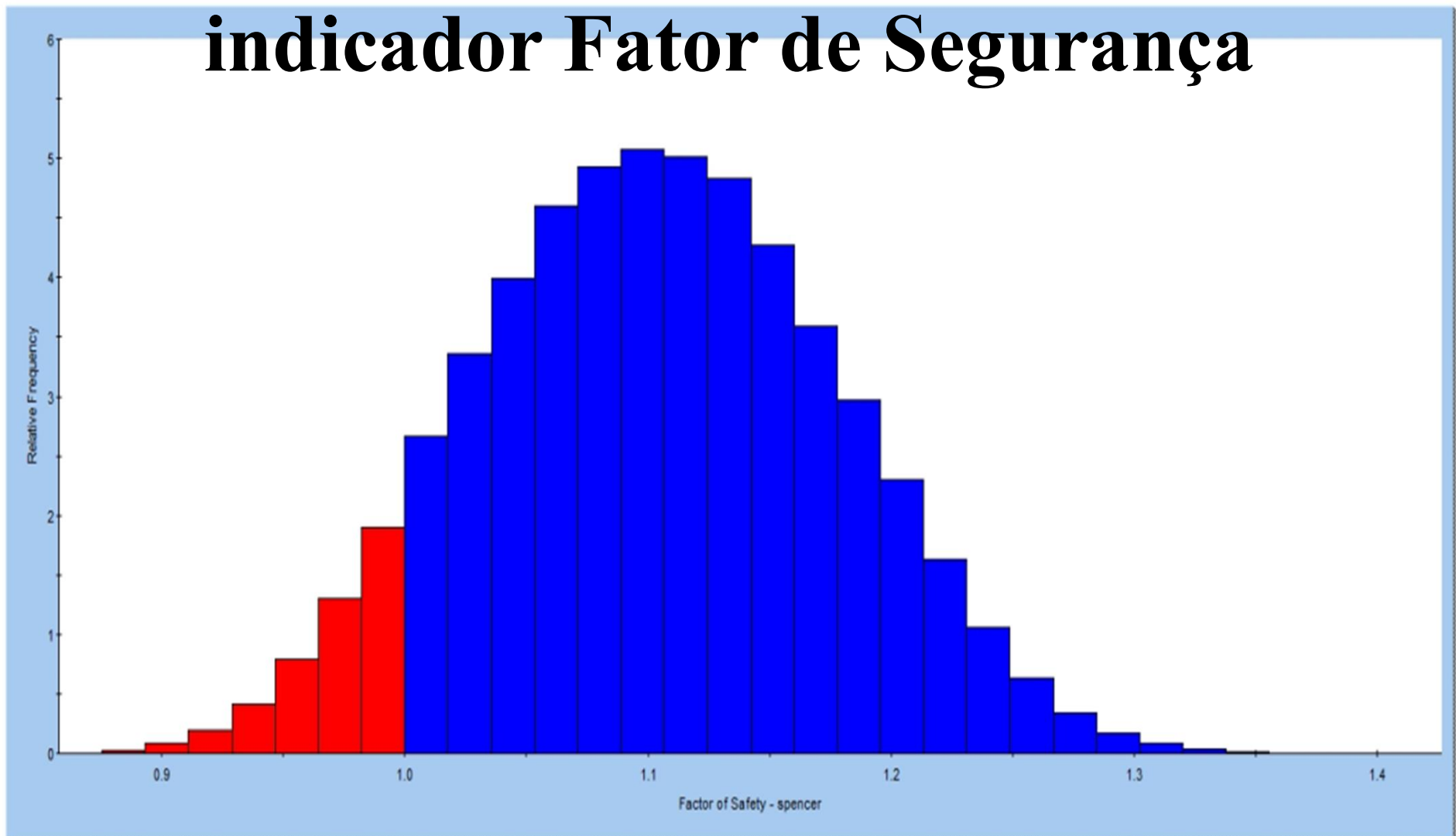
Abordagem Probabilística → aplicada ao parâmetro (y) escolhido como indicador de desempenho

Geração da Distribuição de Probabilidade da variável y (indicador de desempenho) →

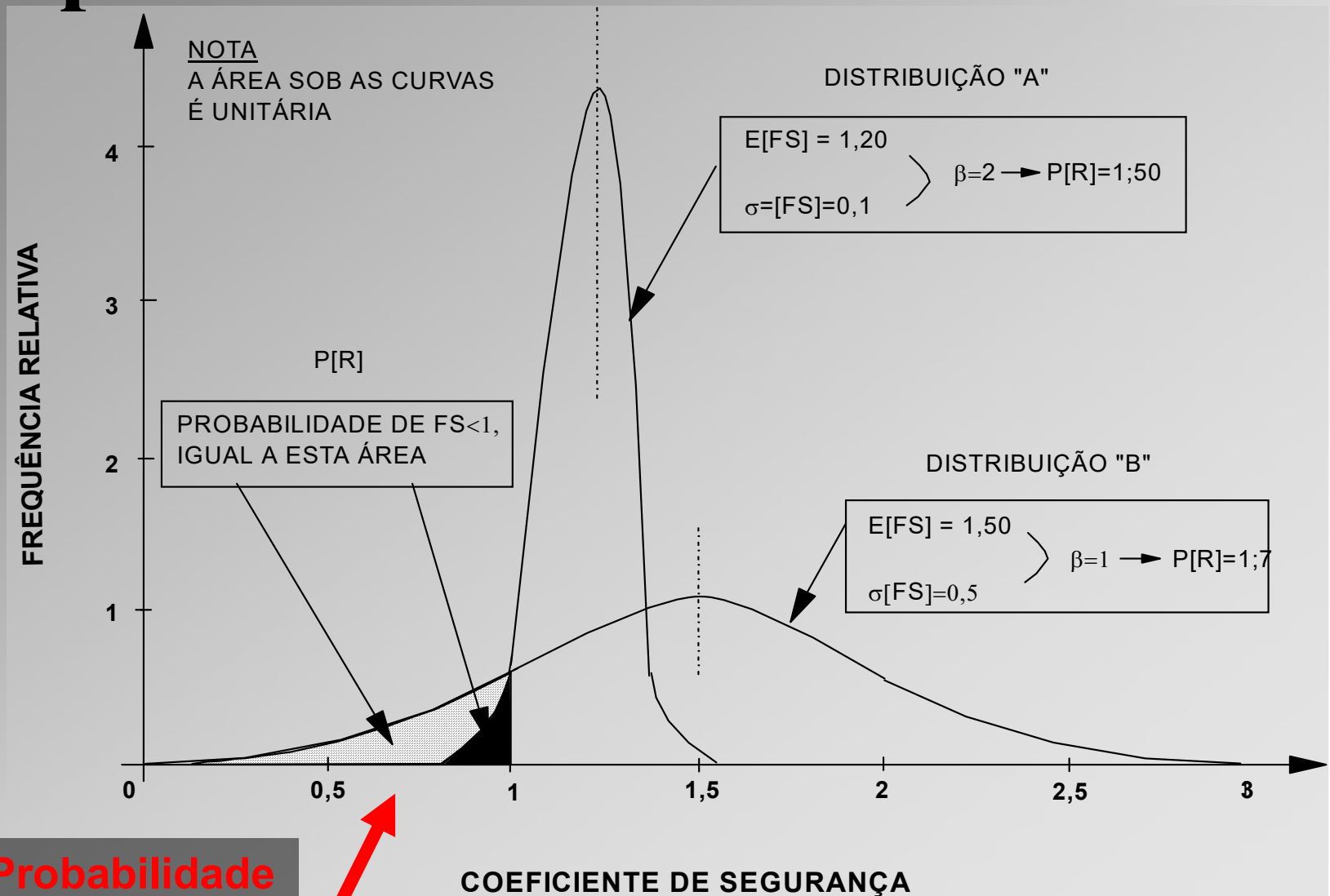
Probabilidade de Falha

$$p_f = p(y > y_{crit} \quad \text{ou} \quad y < y_{crit})$$

Ex.: Distribuição de Probabilidade do indicador Fator de Segurança



Exemplo de Probabilidade de Falha



Análise e Gestão de Risco

Evento de Risco – evento **incerto** que, caso ocorra, pode trazer impactos fora do padrão do comportamento esperado

- **Evento de Risco Negativo → Ameaça**
- **Incerteza → Probabilidade de Falha**
- **Impacto → Consequências** negativas decorrentes do evento de risco, caso ocorra

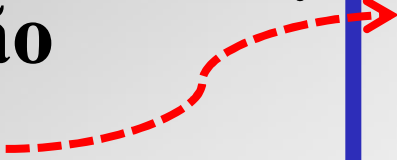
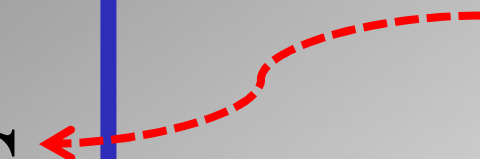
Métrica de Risco

$$R = p_f \cdot C$$

Valoração das
Consequências

Monetização
dos Riscos

$$R(\$) = p_f \cdot C(\$)$$

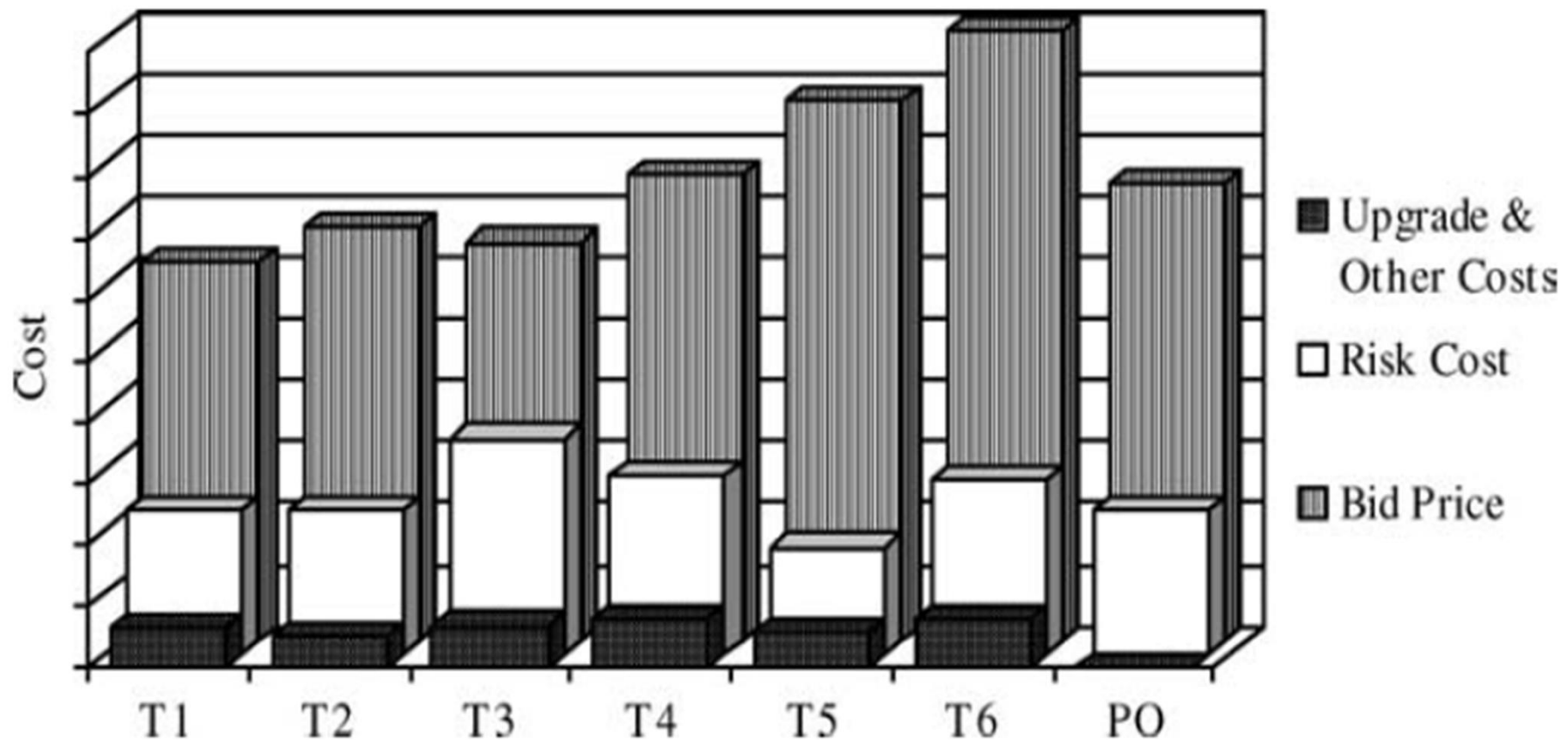


Conceito de Custo Global → Análise de Alternativas de Engenharia


$$R(\$) = p_f \cdot C(\$)$$

$$C_G = C_c + R$$

Ex.: Seleção da Melhor Oferta para Construção com base no Custo Global



Etapas da Análise de Risco

Identificação do Evento de Risco



Cálculo do Risco



Comparação do Risco com a Política de Riscos



Avaliação do Risco e Possíveis Soluções



Implantação da Solução de Mitigação do Risco

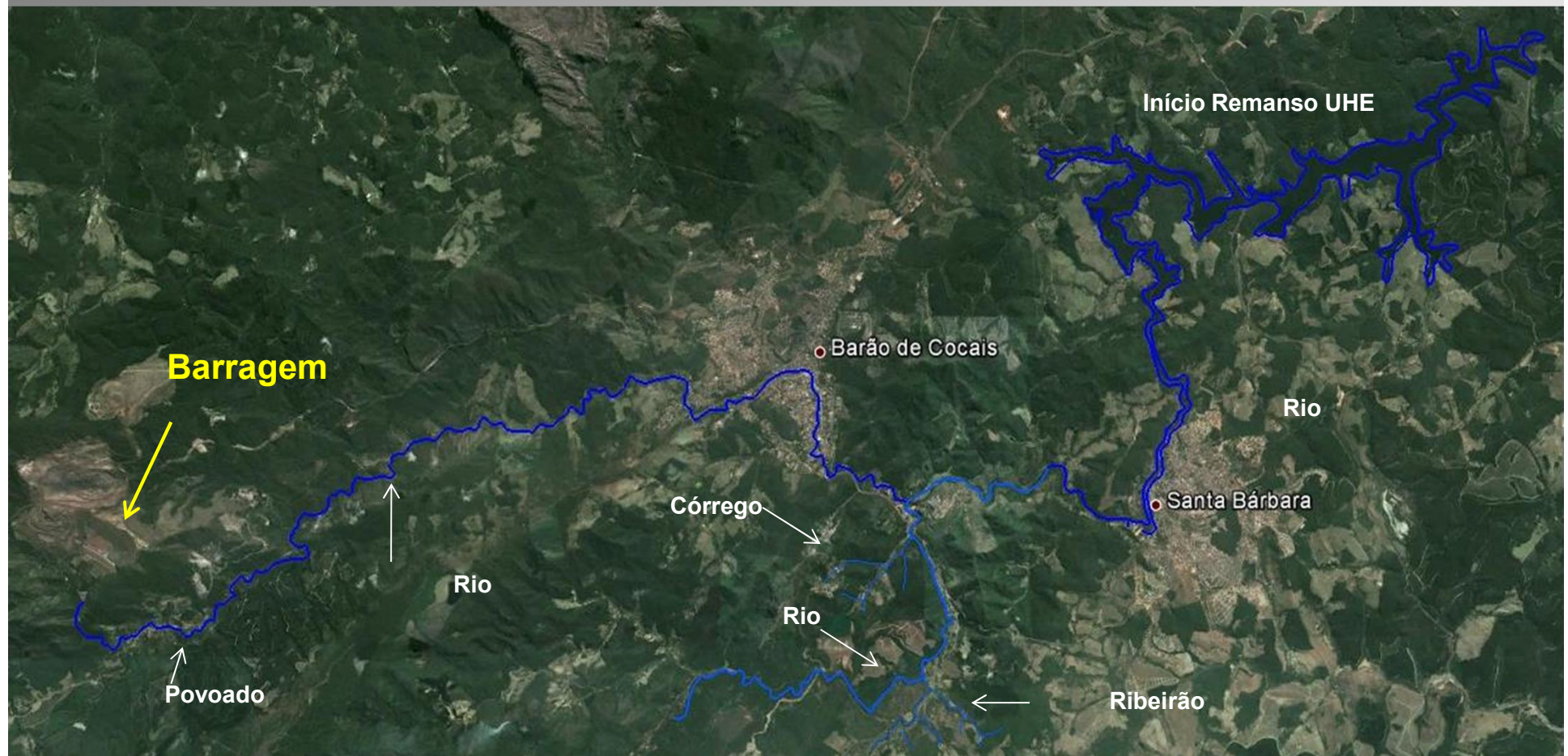
Gestão de Risco em Barragens

Eventos de Risco

- Galgamento
- Instabilidade
- Piping
- Liquefação



Exemplo de uma Barragem em Operação





Consequências de Falha Estrutural em Barragens



Quantificação das Consequências

Custos (impactos) de todas as possíveis consequências do evento de falha:

- **Diretos relacionados ao empreendimento em si**
- **Danos sociais a terceiros (edificações, feridos, mortos etc.)**
- **Danos a infraestrutura pública (serviços, transporte etc.)**
- **Danos ambientais**
- **Danos de imagem etc.**

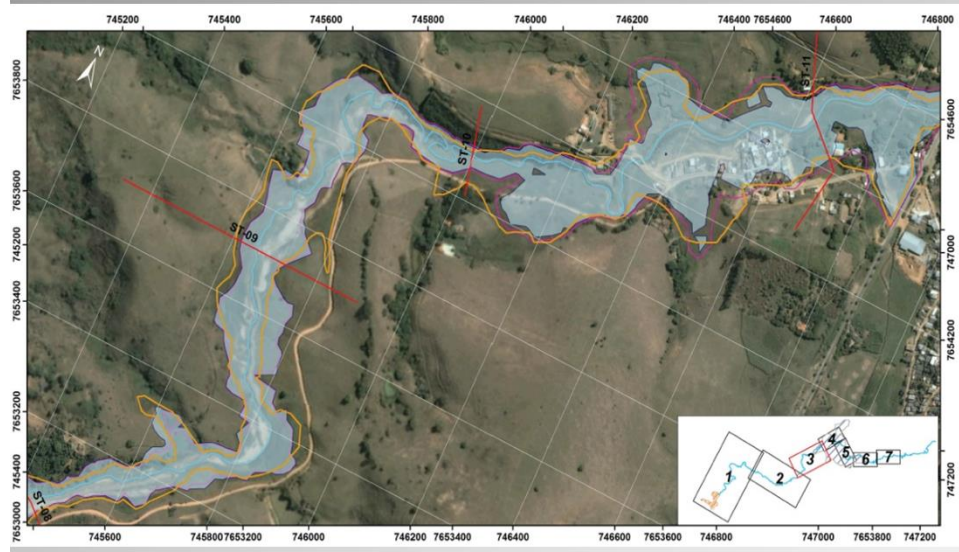
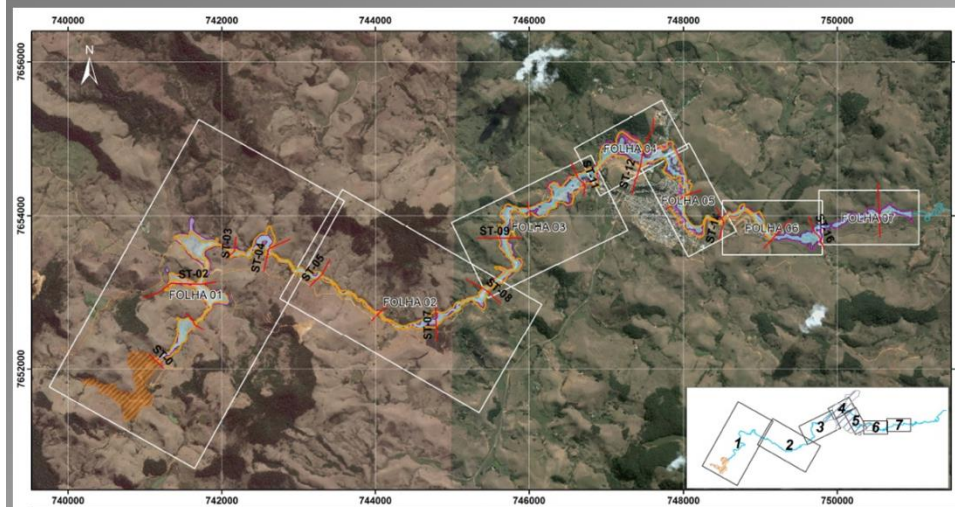
Quantificação das Consequências

Estudos de *Dam Break* para definir mapas de inundação, impacto hidrodinâmico e tempo de chegada:

- Modelo digital do terreno a jusante
- Fator de rugosidade da superfície
- Viscosidade do fluido do reservatório
- Levantamento de populações, edificações, bens, infraestrutura e patrimônio histórico, social, cultural e ambiental

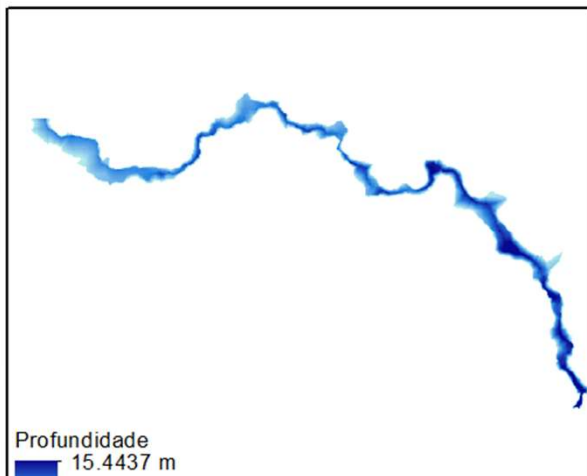
Exemplo de Mapa de Inundação

(Rocha, 2015)

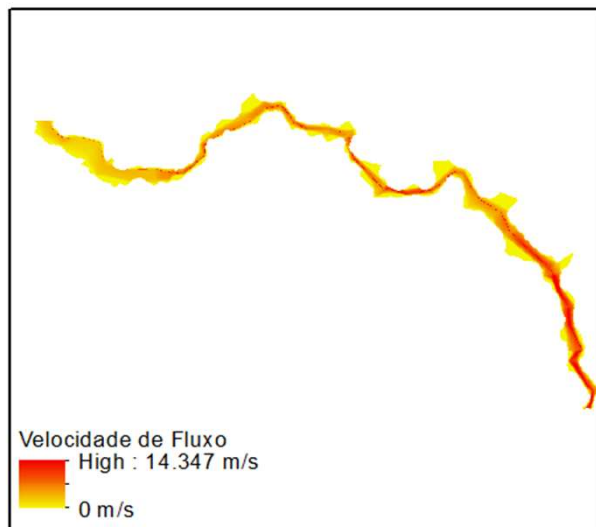


Mapa de Impacto Hidrodinâmico

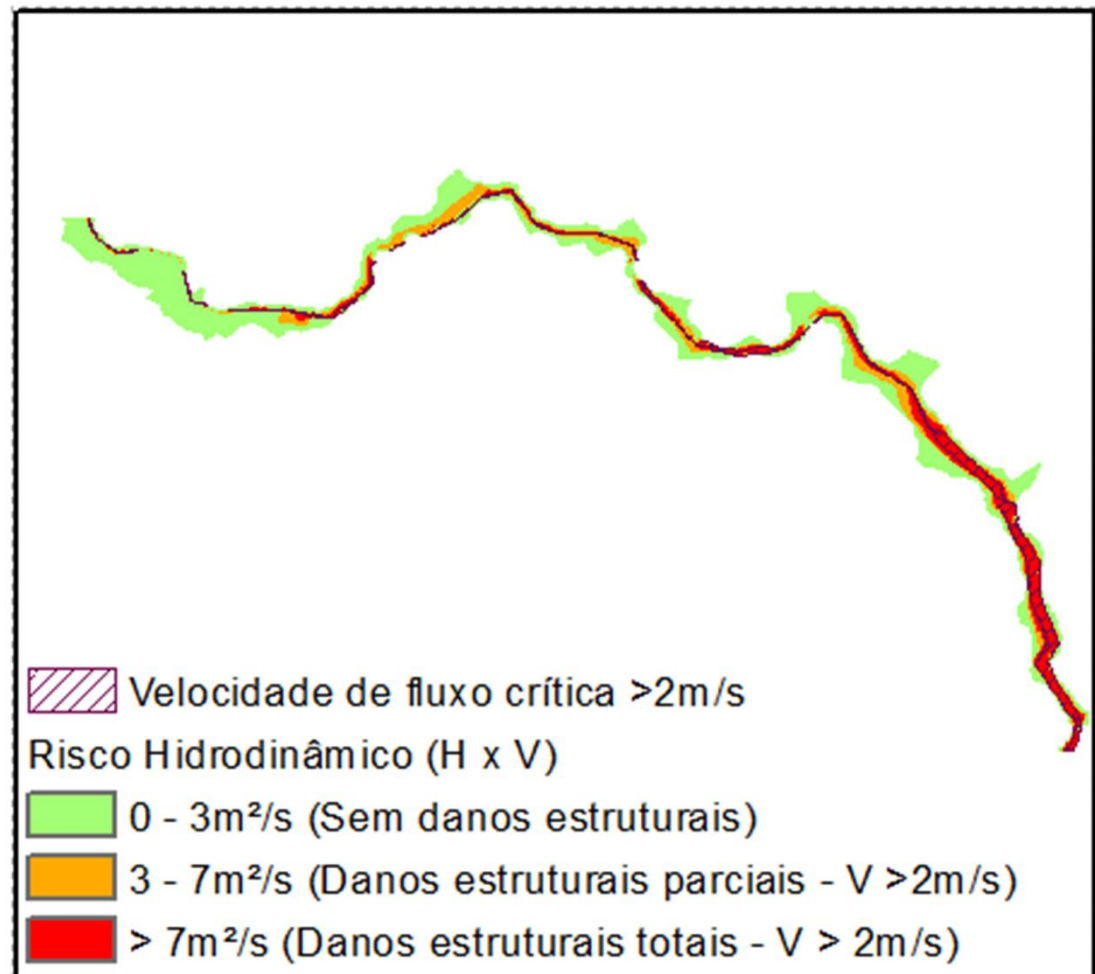
Profundidade de Inundação



Velocidade de Fluxo



Risco Hidrodinâmico



Exemplo de Quantificação do Risco em Barragens

$$R(\$) = p_f \cdot C(\$)$$

| Evento de Risco | p_f | $C(\$) \times 10^6$ | $R(\$) \times 10^6$ |
|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Taludes | 10^{-5} | 4.000 | 0,04 |
| Piping | 5×10^{-4} | | 2 |
| Liquefação | 10^{-3} | | 4 |
| Galgamento | 10^{-4} | | 0,4 |

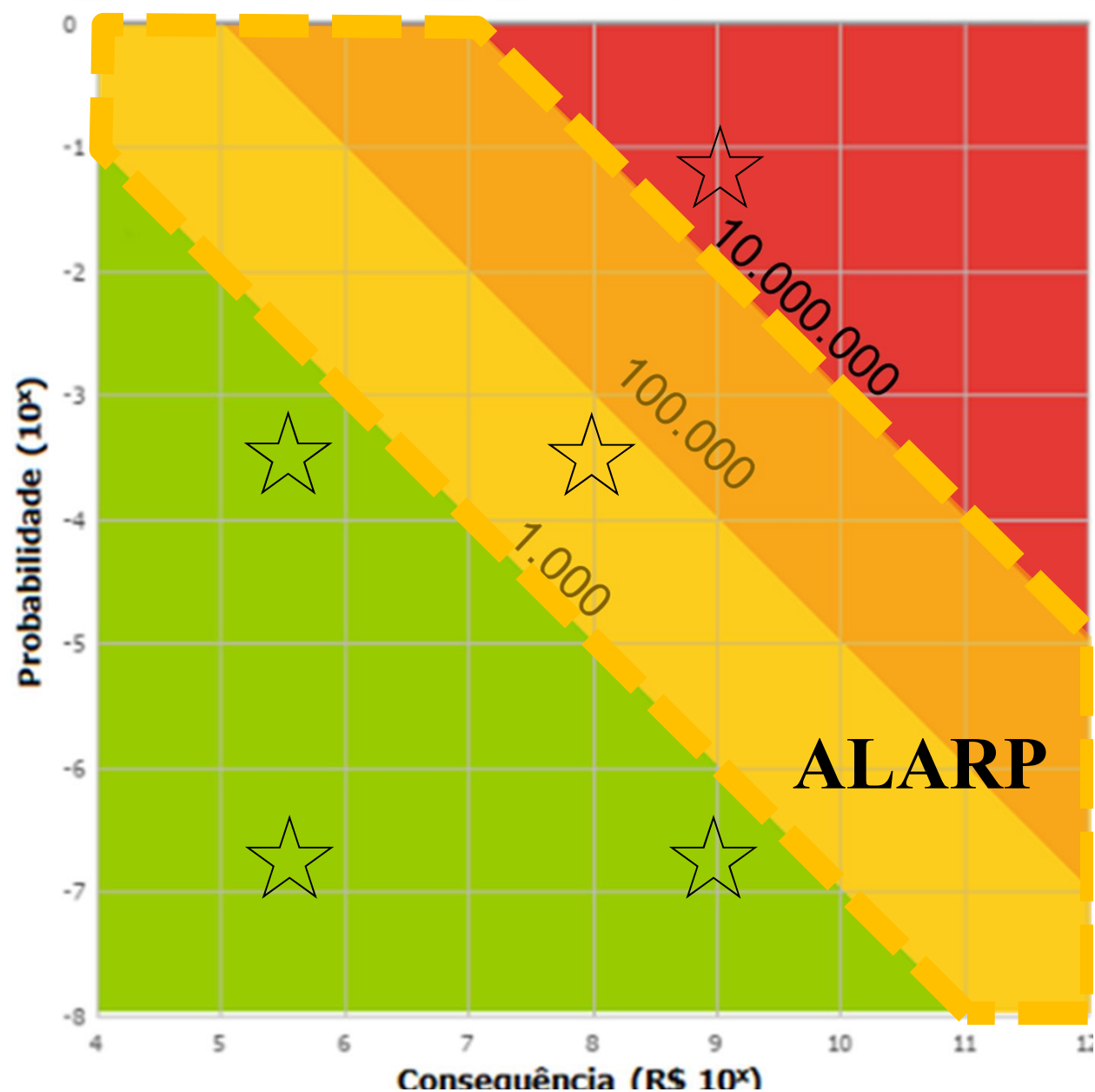
Política de Riscos

- Definida pela alta direção da empresa ou órgão da sociedade
- Define os níveis de responsabilidade dos riscos de acordo com os níveis hierárquicos da empresa
- Deve ser revista continuamente

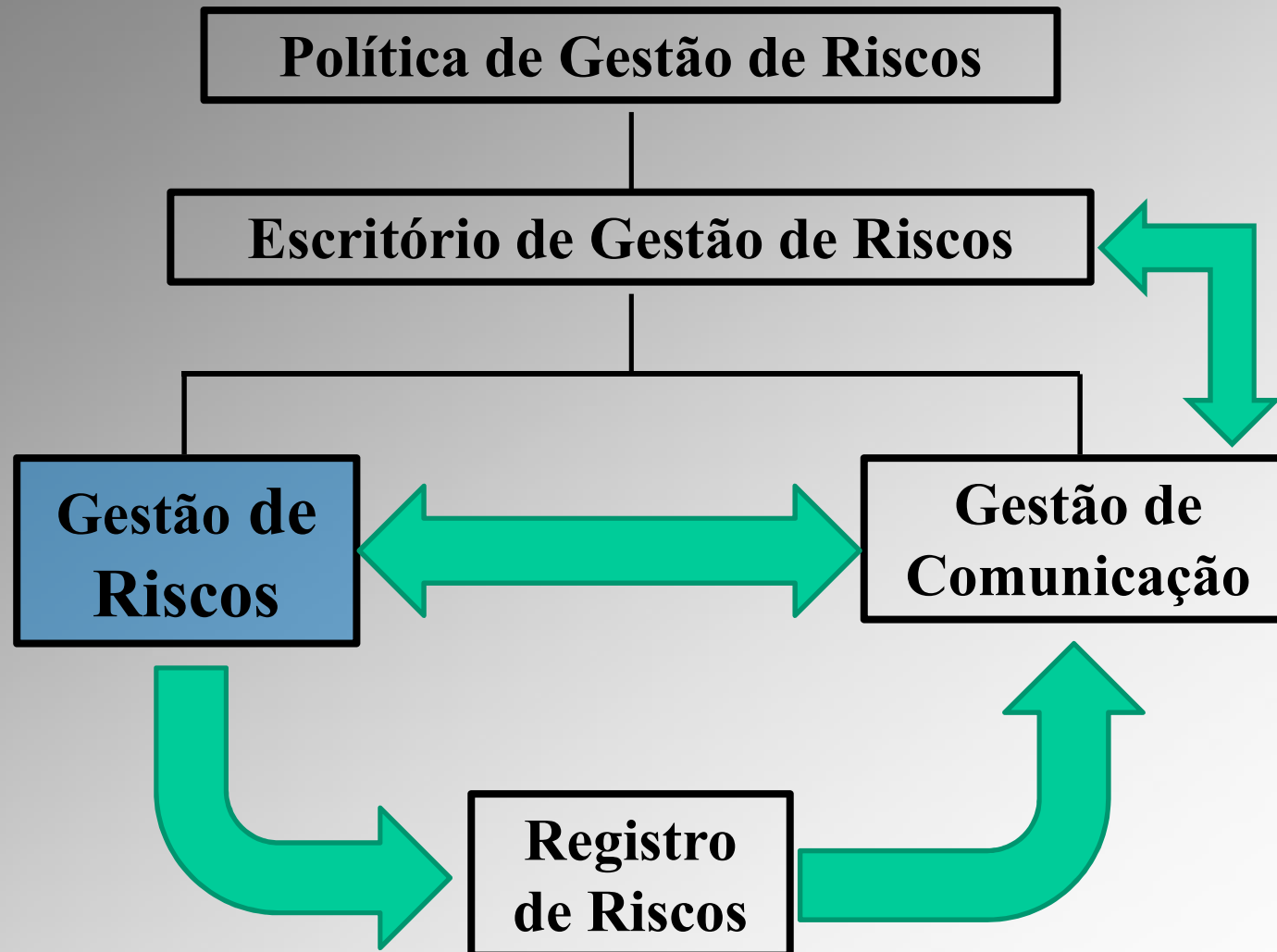


**Definir
Níveis de
Tolerância**

Painel de Controle de Riscos

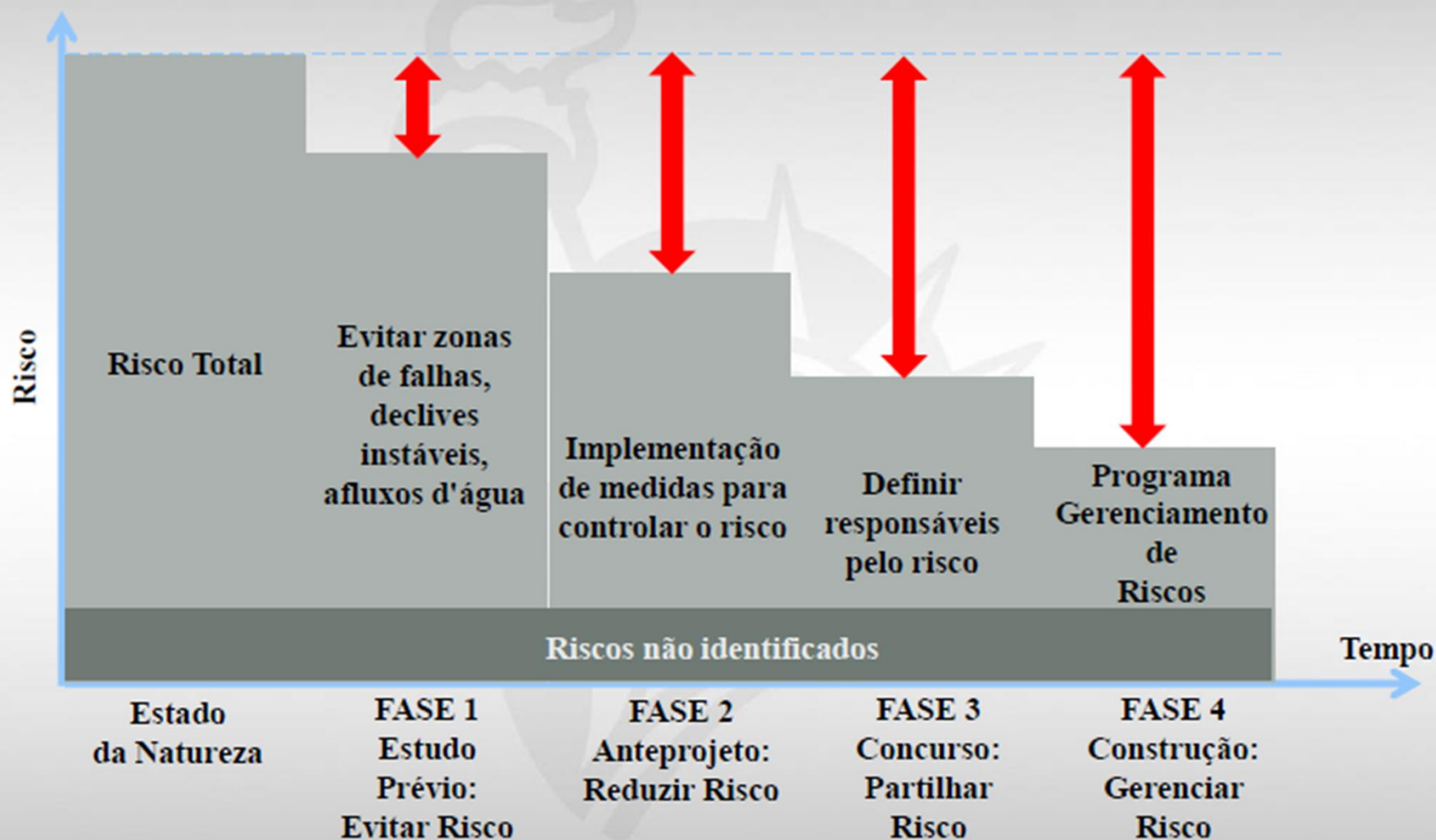


Sistema Integrado e Inteligente de Gestão de Riscos



CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Engenharia é fator predominante de desenvolvimento econômico
- Barragens são essenciais para diversas funções na sociedade (p.ex., energia, abastecimento etc.)
- Barragens, ao longo de sua vida útil, estão sujeitas a incertezas e conseqüentemente a riscos, que devem ser gerenciados



Obras Complexas Requerem Formação do Engenheiro do Futuro

- **Flexível**
- **Capaz de lidar com incertezas**
- **Inovador e criativo**
- **Educação continuada**
- **Sensibilidade social e comunicação**
- **Trabalhar em equipe e assumir responsabilidades**
- **Empreendedor**
- **Aberto a novas tecnologias**
- **Mentalidade internacional**
- **Multidisciplinar**

Formação T (especialização e visão global)

