

# **SEMINÁRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**

**METODOLOGIAS E TÉCNICAS PARA  
DETERMINAÇÃO DE DANOS E RISCOS DE  
ROMPIMENTO DE BARRAGENS DE  
REJEITOS**

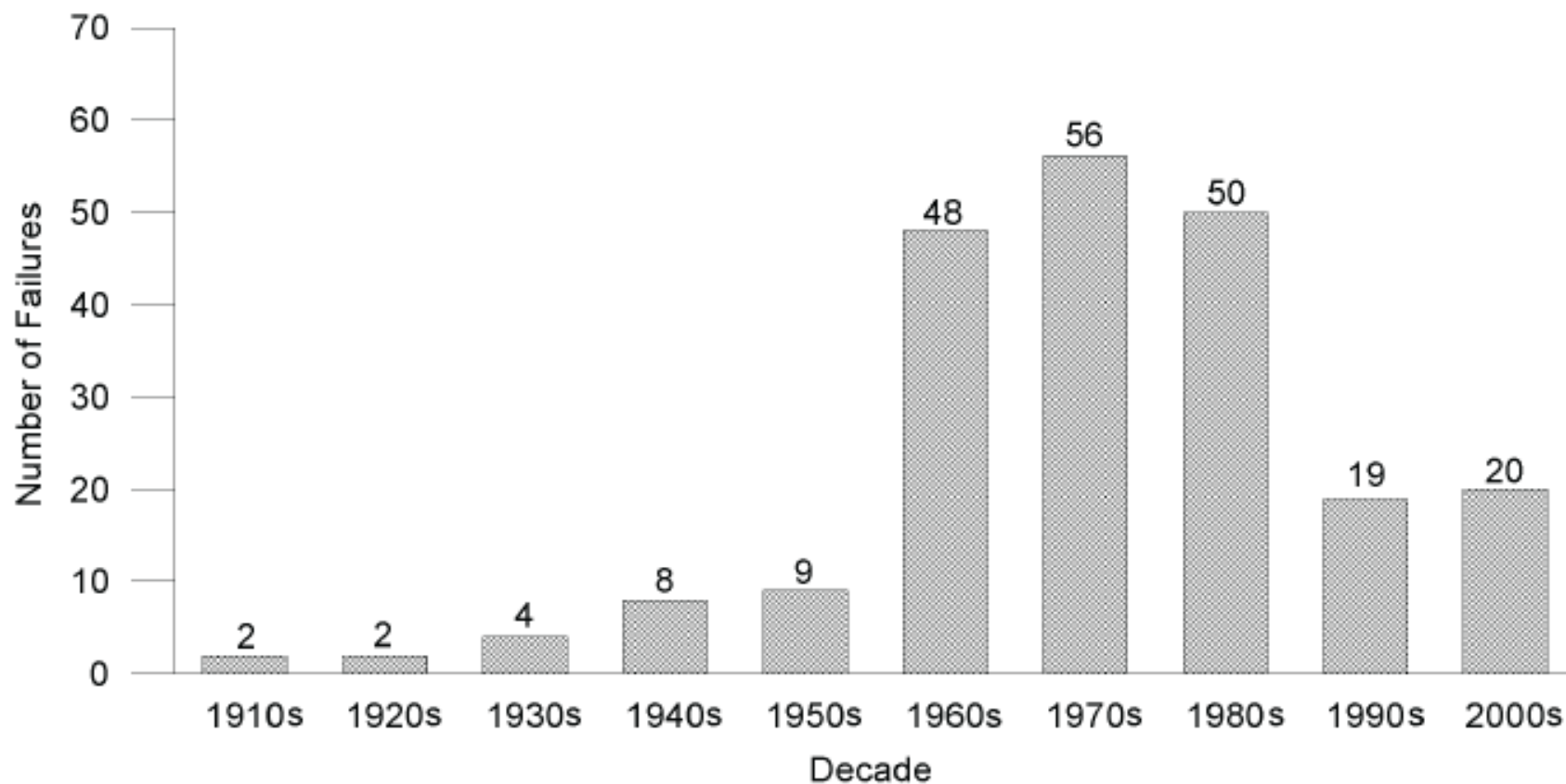
**André Lauriano | Eng. Civil, Msc. Recursos Hídricos**

**15 de Maio de 2019 | Brasília-DF**

# SUMÁRIO

- 1 – Casos Históricos de Ruptura de Barragens de Rejeitos**
- 2 – Hipóteses/mecanismos de Ruptura**
- 3 – Análise de Riscos**
- 4 – Estudo de Ruptura Hipotética (DAM BREAK)**

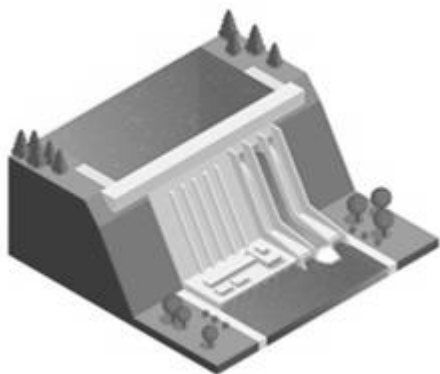
## ACIDENTES E INCIDENTES – BARRAGENS DE REJEITOS



## ACIDENTES COM BARRAGENS

Obras de Engenharia → Sujeito a **FALHAS**

**BARRAGENS  
DE REJEITOS**



**2 a 5** acidentes de grande porte por ano durante o período de 1970-2000

Percentual de falha varia entre **0,06%** e **0,14%**, uma amostra com 3.500 barragens de rejeitos

AZAM & LI, 2010

**8.000 mortes**, milhares de desabrigados e contaminação de milhões de m<sup>3</sup> de água em cerca de **200** acidentes com barragens maiores que **15 m** no século XX

SINGH, 1996

## CASOS HISTÓRICOS – BARRAGENS DE REJEITOS

	ANO	BARRAGEM/LOCAL	Nº. DE MORTES
<b>BRASIL</b>	2019	B1/Brumadinho-MG	Quase 300
	2015	Fundão/Mariana-MG	19
	2014	Herculano/Itabirito-MG	3
	2007	São Francisco/Miraí-MG	0 <i>(Contaminação e interrupção de abastecimento de água)</i>
	2003	Industria Cataguases de Papel/Cataguases-MG	0 <i>(Contaminação e interrupção de abastecimento de água)</i>
	2001	Rio Verde/Nova Lima-MG	5
	1986	Fernadinho/Itabirito-MG	7
<b>OUTROS PAÍSES</b>	2010	Kolontár/Hungria	10
	2008	Taoshi/China	254
	1985	Stava/Italia	269
	1972	Buffalo Creek/EUA	125
	1970	Mulfilira/Zambia	89
	1966	Aberfan, Reino Unido	144
	1966	Mir. Mine/ Bulgária	488
	1965	El Cobre Dam / Chile	Mais de 200

## BARRAGEM SÃO FRANCISCO – MIRAÍ (2007)



**Volume total: 3,7 Mm<sup>3</sup>**

**Volume liberado: 3,0 Mm<sup>3</sup>**

Rocha (2015)

# BARRAGEM SÃO FRANCISCO – MIRAÍ (2007)

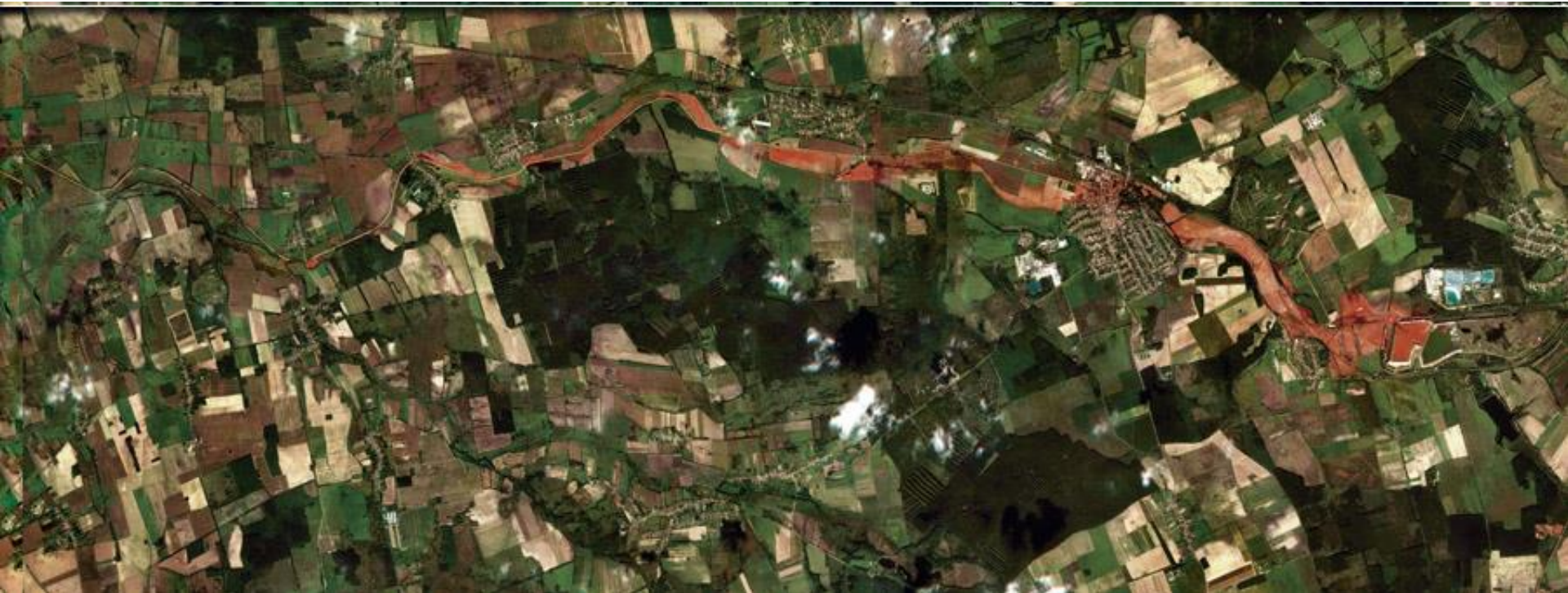


## KOLONTÁR – AJKA (2010)





## KOLONTÁR – AJKA (2010)



## KOLONTÁR – AJKA (2010)



10 perdas de vidas, 123 feridos, 260 casas impactadas e danos ambientais



## MOUNT POLLEY – CANADÁ (2014)

**Vol. total: 50 milhões de m<sup>3</sup> (Rourke & Luppnow, 2015)**

**Vol. liberado: 17 Mm<sup>3</sup> de água (incluindo água intersticial ) e 8 Mm<sup>3</sup> de sólidos (KLOHN CRIPPEN BERGER, 2015) - *Assesment of Failure Mechanism***



## MOUNT POLLEY – CANADÁ (2014)



Julho / 2014



Agosto / 2014

## MOUNT POLLEY – CANADÁ (2014)



## BARRAGEM DO FUNDÃO – MARIANA (2015)



**Volume total: 62 Mm<sup>3</sup>**

**Volume liberado: 31 Mm<sup>3</sup>** Fonte: Wise Uranium (<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>)

## BARRAGEM DO FUNDÃO – MARIANA (2015)



## BARRAGEM DO FUNDÃO – MARIANA (2015)





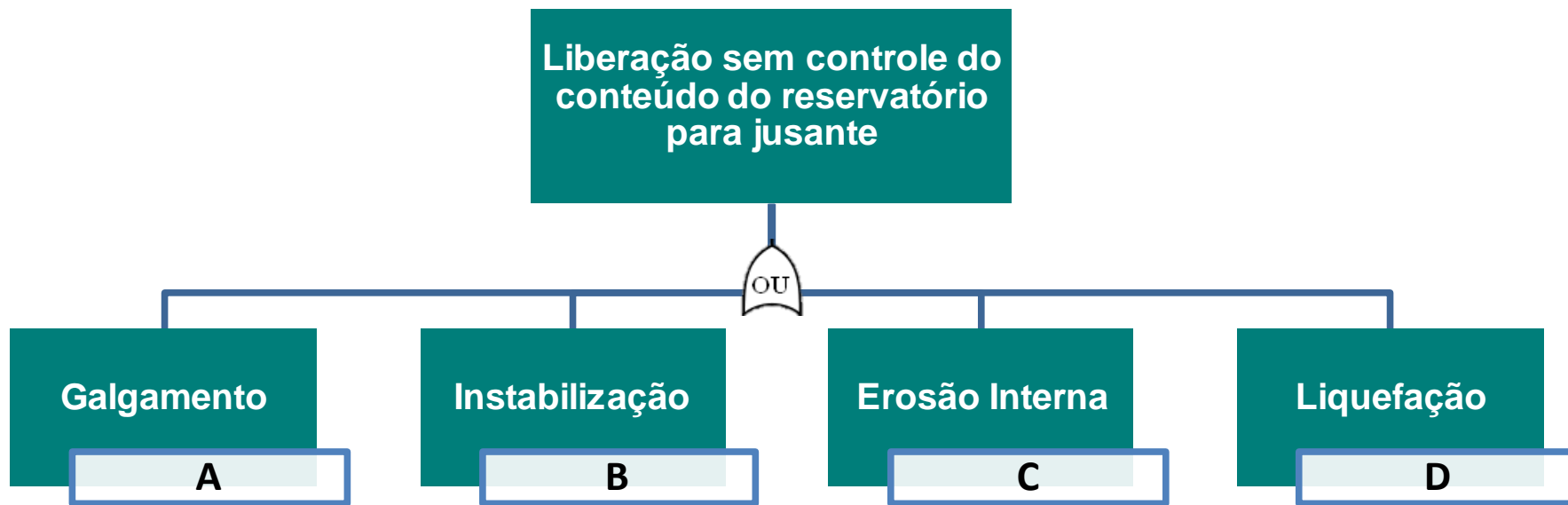
# Barragem B1 – Brumadinho - Antes e Pós Ruptura



# Barragem B1 - Brumadinho



## MODOS DE FALHA POTENCIAIS – EVENTOS DE RISCOS



(Pimenta de Ávila Consultoria, 2014, adaptado de Taguchi, G., 2014).

## EROSÃO REGRESSIVA PELO MACIÇO (PIPING)



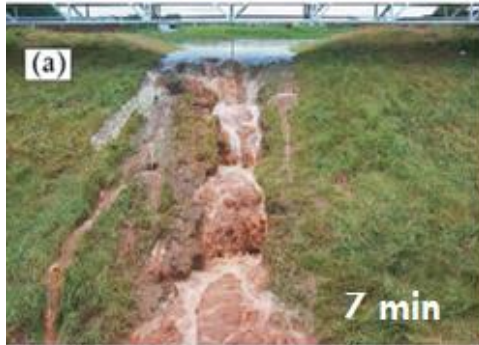
COLAPSO POR ALARGAMENTO DO "PIPING"

## EROSÃO REGRESSIVA PELO MACIÇO (PIPING)



Donated by Jeffery A. Farrar  
Available from [Geoengineer.org](http://www.geoengineer.org) Website  
<http://www.geoengineer.org>

# GALGAMENTO



## ANÁLISE DE RISCOS



QUAL A PROBABILIDADE DE FALHAS NA ESTRUTURA DE UMA BARRAGEM?

↪ PRESSUPONDO QUE A BARRAGEM IRÁ ROMPER ↪

QUAIS AS CONSEQUÊNCIAS DA RUPTURA DE UMA BARRAGEM?

## ACIDENTES COM BARRAGENS





## 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

## ABORDAGENS DETERMINÍSTICA X PROBABILÍSTICA

### Abordagem **DETERMINÍSTICA**:

- ✓ Parâmetros de projeto são assumidos constantes
- ✓ Valor único para o Fator de Segurança

### Abordagem **PROBABILÍSTICA**:

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

## ANÁLISE DE RISCOS

- ❑ Análises de riscos qualitativa do tipo FMEA (*Failure Modes Effects Analysis*)
- ❑ Análises de riscos quantitativa, adotando abordagem determinística ou probabilística, através da aplicação de diferentes metodologias, como ETA (*Event Tree Analysis*) e FTA (*Fault Tree Analysis*).

**MATRIZ FMEA**


		PROBABILIDADE				
		Improvável	Baixa	Moderada	Alta	Esperada
CONSEQUÊNCIAS	Extrema	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho
	Alta	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho
	Moderada	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho
	Baixa	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho
	Negligente	Verde	Amarelo	Laranja	Vermelho	Vermelho



Eventos  
Históricos &  
Julgamento  
de  
Engenharia



Métodos  
Probabilísticos



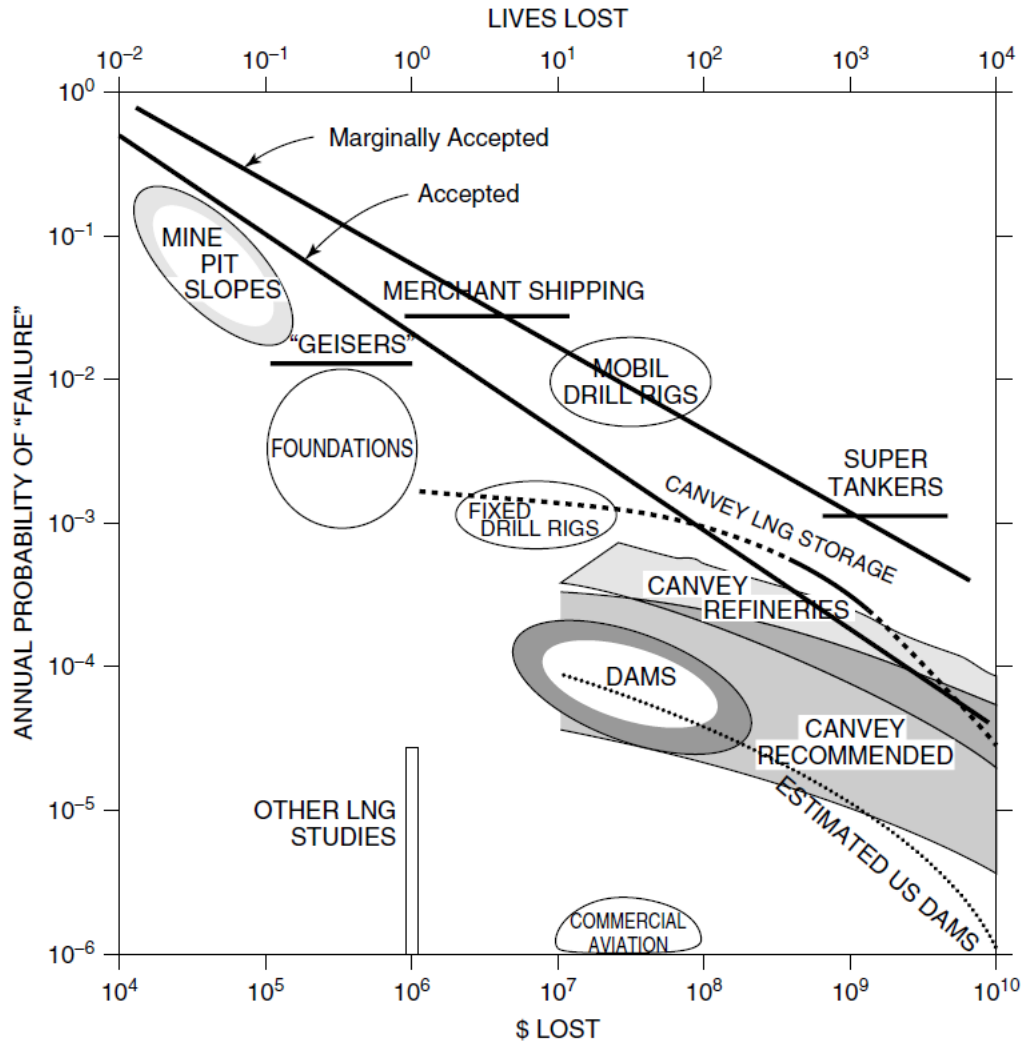
Árvore de  
Eventos - ETA



Árvore de  
Falhas - FTA



# TOLERABILIDADE AO RISCO



Whitman (1981)

## ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

### O que é o Estudo de Ruptura Hipotética?

Estudo que **simula** a ruptura de uma barragem e a consequente propagação hidráulica do material liberado a partir da aplicação de **modelos matemáticos**;

É baseado na definição de **premissas** (pré-definições) e **cenários**;

*Hipótese/mecanismo de ruptura, formação da brecha, condições do reservatório, associação à cheia, efeito cascata; ponto de parada da simulação; modelos matemáticos*

## ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

### Por que realizar um Estudo de Ruptura Hipotética?

- 1) **Delimitar** a **máxima inundação** do vale a jusante  
*Identificar infraestrutura e propriedades potencialmente atingidas*
- 2) **Caracterizar** a **onda** de ruptura  
*Estimar o potencial destrutivo da onda por meio da análise dos parâmetros hidráulicos (tempo de chegada, duração, velocidade, profundidade e vazão)*
- 3) **Minimizar** possíveis impactos e **salvar vidas**



## ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

### Como usar os resultados do Estudo de Ruptura Hipotética?

- 1) Preparar **ações de resposta** para uma eventual ruptura  
*Definir zonas de autossalvamento, planos de evacuação e resgate, etc.*
- 2) **Quantificar** os **impactos** causados pela onda de ruptura  
*Estimativa do potencial destrutivo da onda para estruturas e pessoas*



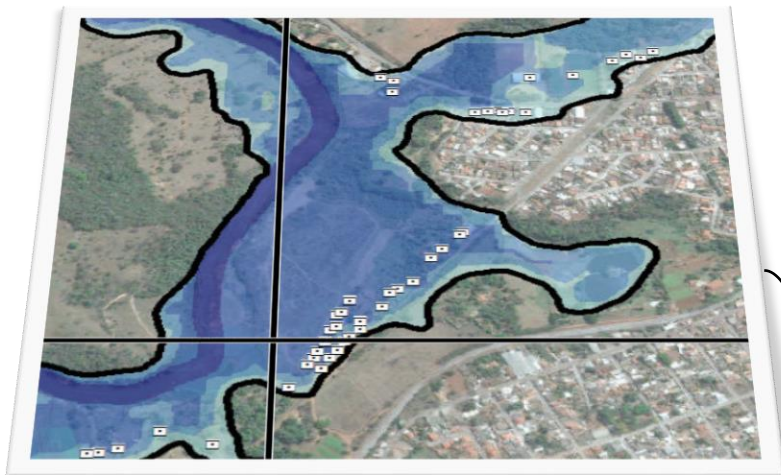
## Por que realizar um Estudo de Ruptura Hipotética ?

🎯 Delimitar a **máxima inundação** do vale a jusante

Identificar infraestrutura e propriedades potencialmente atingidas

🎯 **Caracterizar** a onda de ruptura

Estimar potencial destrutivo da onda



Parâmetro Hidráulico	Uso
Tempo de chegada	<i>Evacuação, resgate, autossalvamento</i>
Duração	
Velocidade máxima	<i>Potencial destrutivo</i>
Profundidade máxima	
Vazão máxima	<i>Limite de inundação</i>

**PREPARAR AÇÕES DE RESPOSTA**



## ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

### Como fazer um Estudo de Ruptura Hipotética ?

O desenvolvimento do **Estudo de Ruptura Hipotética** é baseado na definição de **PREMISSAS** (pré-definições)

O estudo apresenta **LIMITAÇÕES** que devem ser conhecidas e entendidas

## ESTUDO DE RUPTURA DE BARRAGEM (DAM BREAK)

**ESTUDO DE  
RUPTURA DE  
BARRAGEM**



**MAPEAMENTO  
DA INUNDAÇÃO**



**PLANO DE AÇÕES  
EMERGENCIAIS  
QUANTIFICAÇÃO DE  
DANOS E RISCOS  
CLASSIFICAÇÃO DO  
DANO POTENCIAL  
ASSOCIADO  
REQUISITO LEGAL  
RESPONSABILIDADE  
SOCIAL**

## DEFINIÇÃO DE PREMISSAS

- Hipótese/mecanismo de ruptura
- Tempo de formação e geometria da brecha de ruptura
- Volume do material do reservatório que é desprendido para jusante
- Evento de cheia considerado
- Precisão da base topográfica do vale a jusante
- Propagação do fluido
- Modelos matemáticos
- Níveis/condições operativas do reservatório
- Coeficiente de *Manning*
- Critério de parada
- Condição de contorno de jusante
- Impactos relacionados a qualidade de água

# ÁGUA x REJEITO

- Guias disponíveis na literatura
- Modelos numéricos disponíveis
- Fluido newtoniano
  
- Mais complexos
- Fluidos mais viscosos que a água, com teor de sólidos variáveis
- Percentagem de volume retido no reservatório
- Modelagem numérica difícil

# Definição de **Critérios e PREMISSAS** → Casos Históricos

Qual o **formato** da brecha de ruptura?



Qual é o **volume** propagado na ruptura?



Qual a **extensão** da mancha de inundação?



Qual é o **gatilho** da ruptura?



# Qual o critério para **parada** (limite) da propagação da onda de ruptura?

## LIMITE FÍSICO

Reservatório



Oceano



Rio de maior porte



## PERCEÇÃO DE INUNDAÇÃO



## Vazões

08/11/15 – 585 m³/s

Alerta: 1.654 m³/s

Inundação: 1.877 m³/s

## DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DE PARADA

- Distância a jusante entre a barragem e um curso de água de maior porte?
- Reservatório a jusante? Dia Seco ou Chuvoso? Dano incremental?

### **Critério hidrológico**

- Vazão de pico do hidrograma de ruptura inferior à vazão do curso de água para um determinado período de retorno (ex. TR = 100 anos)
- Vazão inferior à vazão de débito de margens plenas (TR = 2 anos)

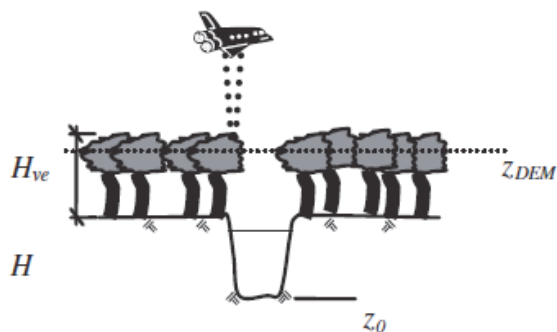
### **Critério hidráulico**

- Diferença entre a cota de inundação de cheia natural e induzida pela ruptura é inferior a um limiar (exemplo: 0,6 cm)
- Nível de água totalmente contido na calha menor;
- Nenhuma edificação ou infraestrutura importante atingida

# Precisão da Topografia

## MDE x MDT

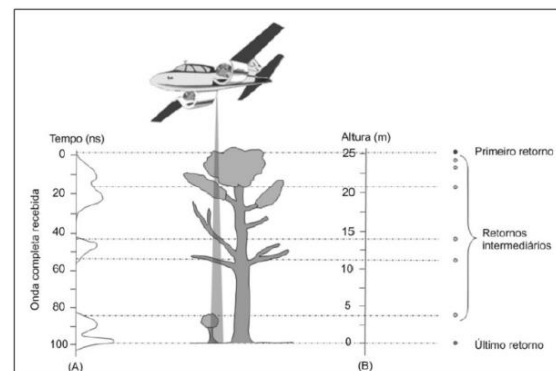
### Modelo Digital de Elevação (MDE)



Não desconsidera objetos posicionados sobre a superfície;

Exemplo: **SRTM**

### Modelo Digital de Terreno (MDT)



Desconsidera objetos posicionados sobre a superfície;

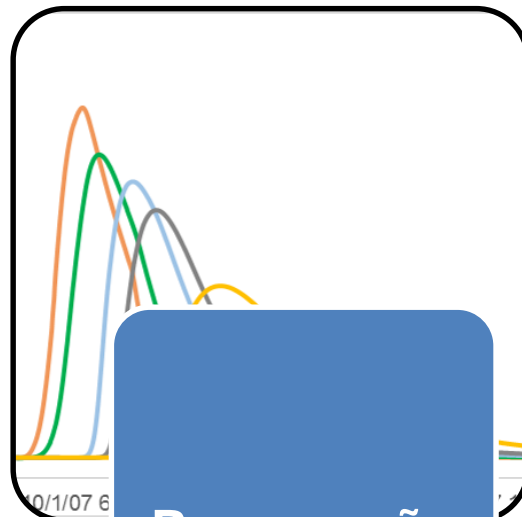
Exemplo: **LIDAR**



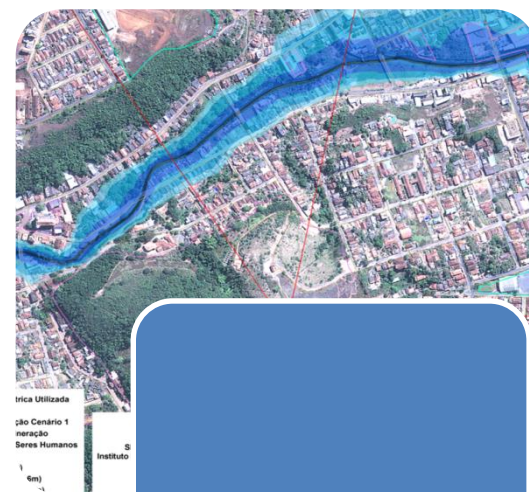
# SEQUÊNCIA METODOLÓGICA



**Formação  
da brecha e  
síntese do  
hidrograma  
de ruptura**



**Propagação  
da Onda de  
Ruptura**



**Mapeamento  
da  
Inundação**

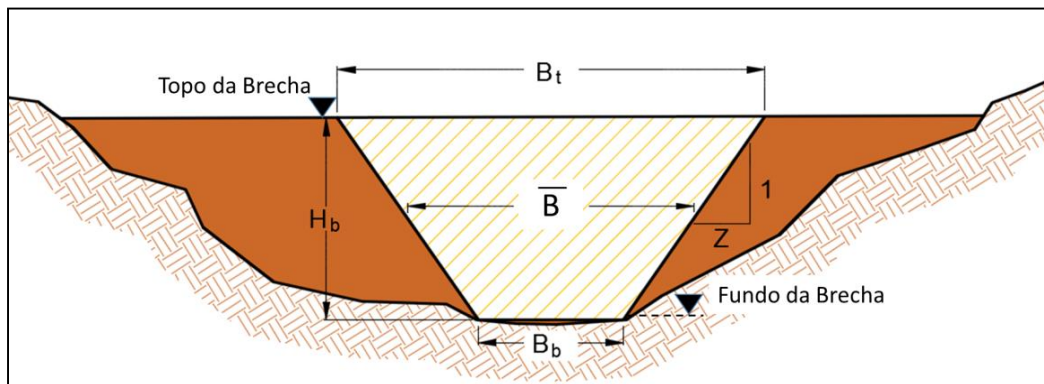
## BRECHA DE RUPTURA EM BARRAGENS DE TERRA



Formato Trapezoidal;

Parâmetros calculados a partir de equações de previsão empíricas;

$P_{\text{Brecha}} = f(V_{\text{reserv.}}, H_{\text{Barragem}}, \text{Modo de falha}, \text{erodibilidade})$



## BRECHA DE RUPTURA EM BARRAGENS DE TERRA

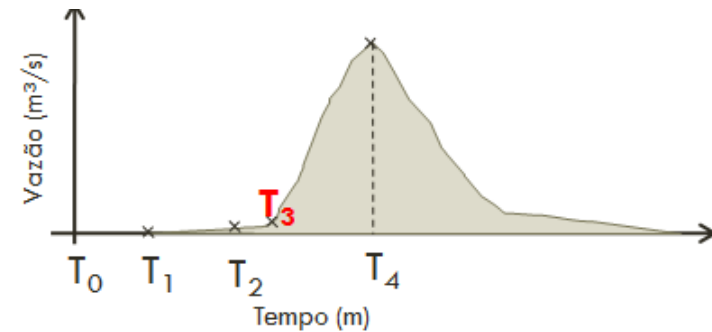
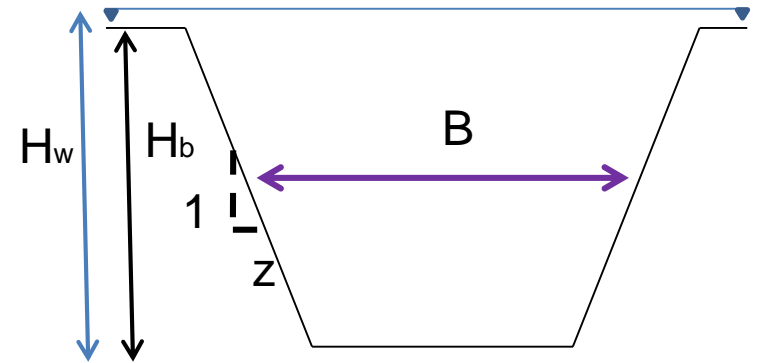
### Parâmetros característicos:

#### Geométricos:

- Altura brecha –  $H_b$ ; Largura média –  $B$ ;
- Fator de inclinação lateral –  $Z$ ;

#### Hidrográficos:

- Vazão de pico defluente;
- Tempo de início e desenvolvimento da brecha

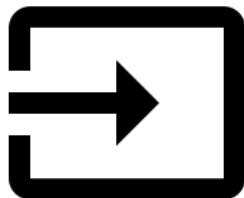


**Tempo de falha → igual ou menor que 3 horas, sendo que a probabilidade do tempo de falha ser inferior a 90 minutos é equivalente a 50%. (Singh, 1996)**

# ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

## Aplicação do modelo matemático

ENTRADAS

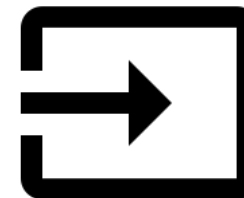


**Volume** do reservatório,  
**brecha** de ruptura,  
Modelo Digital de **Terreno**,  
**Características** do terreno

Modelo Hidráulico



RESULTADOS

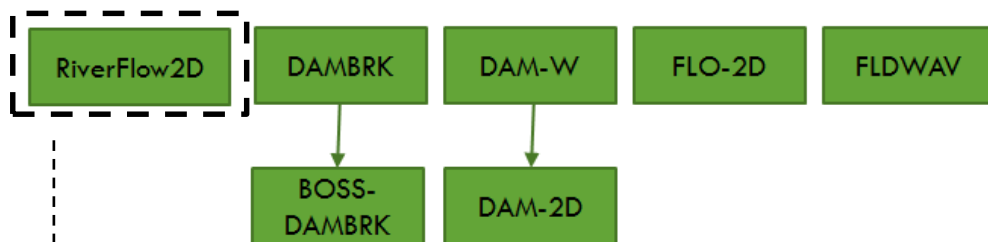


Caracterização hidráulica  
da onda de ruptura  
Vazão, velocidade,  
profundidade, tempo

# SOFTWARES

## Modelagem Fluxo de Rejeitos

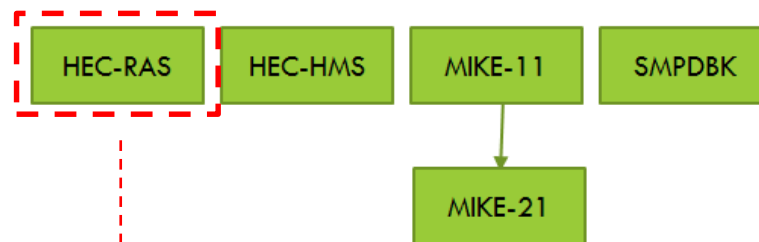
### Fluido Não Newtoniano



#### **Necessário:**

- *Topografia de precisão*
- *Dados de reologia do rejeito*
- *Caracterização do Teor de Sólidos no reservatório*
- *Maior esforço computacional (tempo e dados mais precisos)*

### Fluido Newtoniano



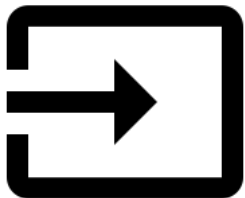
#### **Pseudo - Manning**

Ajuste nos valores de *Manning*,  
coeficientes de contração e expansão

# ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA (DAM BREAK)

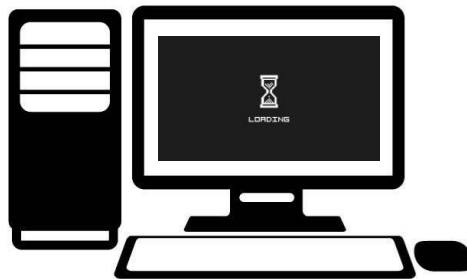
## Mapeamento

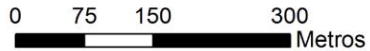
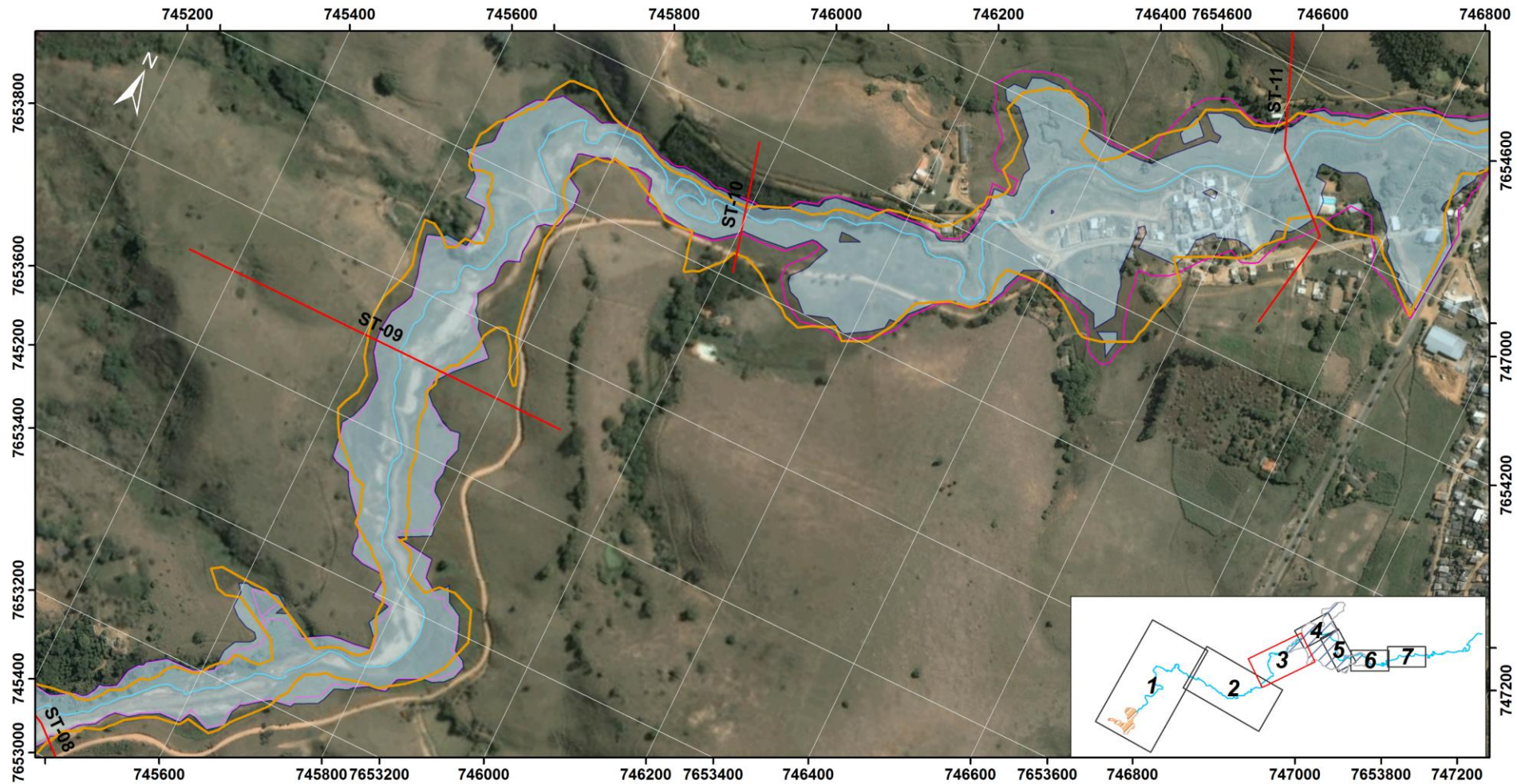
RESULTADOS



Caracterização hidráulica  
da onda de ruptura  
Vazão, velocidade,  
profundidade, tempo

Sistema de Informações  
Geográficas (GIS)





ESCALA ORIGINAL: 1:5.000







Projeção: UTM FUSO 23S DATUM WGS84

Fonte:

Imageamento Orbital Google Earth  
SRTM Shuttle Radar Mission

Formato construído para impressão em A3

### Legenda

-  Seções transversais
-  Envoltória de inundação observada
-  Cenário Base
-  Cenário após calibração da rugosidade
-  rio Fubá
-  Reservatório Barragem São Francisco

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (UFMG)

RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM SÃO FRANCISCO - MIRAÍ/MG

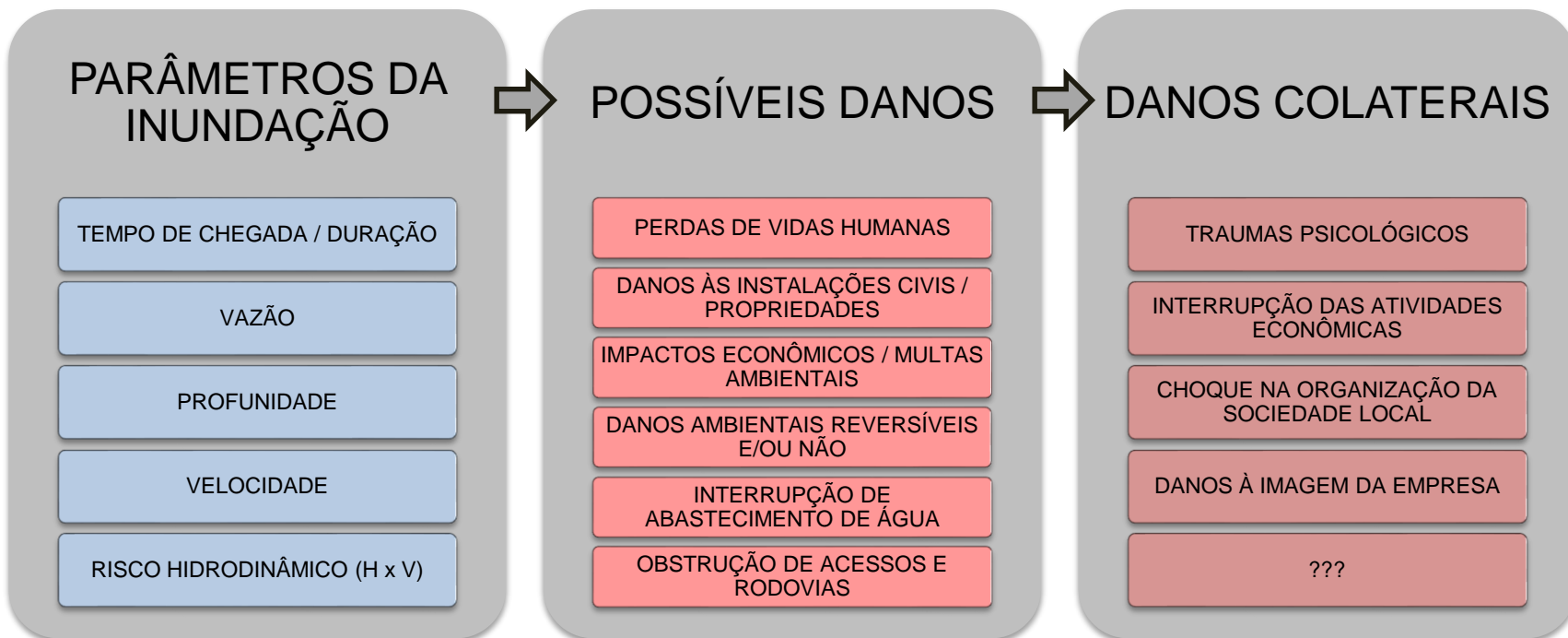
Restituição da envoltória de inundação - Folha (3/7)

Data: 06/04/2015

Felipe Figueiredo Rocha

# QUANTIFICAÇÃO DOS DANOS

COMO ESTABELECEER CORRELAÇÕES PARA QUANTIFICAR OS DANOS?







Fonte Imagem: Heartland Coast Guard

“A noção da possível inundação gera mais segurança ao empreendedor e à sociedade do que o completo desconhecimento sobre os potenciais danos”

*Projetos HAZUS-MH e European Directive 2007/60/EC*

**OBRIGADO!**

**André Lauriano**

**+55 (31) 98866-6391**

**[andre.lauriano@gwsengenharia.com.br](mailto:andre.lauriano@gwsengenharia.com.br)**