

# *Curso de treinamento do PAE*

## *Gestão do risco de ruptura de barragens e avaliação das consequências*

### *Modelagem da brecha de ruptura e do hidrograma efluente da barragem em ruptura*



**Maria Teresa Viseu**

# Curso de Treinamento do PAE

## > ÍNDICE

### > Enquadramento legal

- > Conceitos da gestão do risco em barragens
- > Eventos, anomalias e probabilidades de ocorrências
- > Consequências, danos e magnitude de perdas
- > Apreciação e mitigação do risco em barragens

### > Avaliação das consequências. Uma visão hidráulica

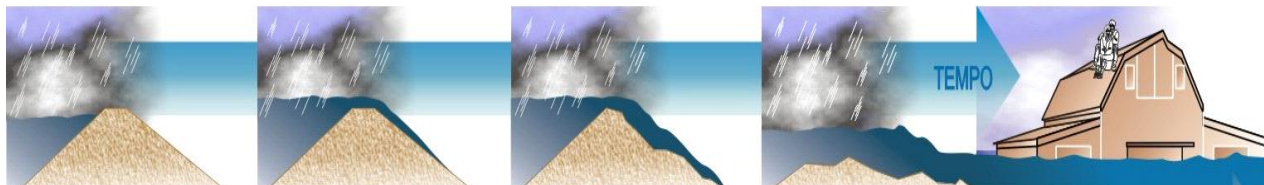
- > Definição de cenários
- > Modelagem da brecha na secção da barragem em ruptura
- > Abordagens para a modelagem da propagação de cheias de ruptura

### > Considerações finais

# Conceitos da gestão de risco em barragens

$$Risco = P(Evento) \times P(Rupt / Evento) \times P(PAR / Rupt) (PAR)$$

= Consequências



## > Abordagem que requiere:

- > Determinação de probabilidades de ocorrência do evento ou da anomalia ( $P(\text{evento})$ )
- > Estado e resposta da barragem ( $P(\text{ruptura}/\text{evento})$ )
- > Impacto das “vazões” da barragem, estimando perda de vida e danos ( $P(\text{PAR}- \text{People At Risk}/\text{ruptura})$ ) e que depende da resposta das agência (barragem, segurança de barragens e de Protecção e Defesa Civil) e da população (alerta e evacuação)

# Conceitos da gestão de risco em barragens

- > Quão segura é a barragem?
- > O que pode originar uma rotura? – Identificação de eventos e anomalias
- > Quão prováveis são os modos de rotura? – Probabilidade
- > O que poderia acontecer, caso ocorresse a rotura?  
consequencias (perda de vidas e danos)

**Análise do  
risco na  
barragem e  
no vale a  
jusante**

> O risco é aceitável ?

**Apreciação do risco**

> Que fazer para reduzir ou mitigar o risco?

**Mitigação do risco**

# Conceitos da gestão de risco em barragens



# Conceitos da gestão de risco em barragens



# Avaliação da segurança da barragem

- > Quão segura é a barragem?
- > Eventos – condições que podem resultar de uma causa externa à barragem com potencial de criar consequências adversas
  - > Eventos naturais
    - > Nota: também podem ser consideradas como deteriorações associadas a eventos naturais, o envelhecimento e a alteração desfavorável da estabilidade ou resistência do corpo da barragem, da sua fundação e encontros e ainda das vertentes da albufeira
  - > Eventos antropogénicos ou provocados

# Avaliação da segurança da barragem

- > Quão segura é a barragem?
- > As Nações Unidas reconhecem, globalmente, três tipos de eventos naturais (“natural hazards”), respectivamente:
  - > os eventos meteorológicos e hidrológicos, de que constituem exemplos as tempestades (ciclones, tufões, furacões), as cheias e as secas, i.e., as condições meteorológicas e climáticas extremas;
  - > os eventos geofísicos: os sismos, os deslizamentos de terras, a acção dos vulcões, o transporte de lamas e os tsunamis;
  - > os eventos ambientais, nomeadamente a erosão, a desertificação, os incêndios e as infestações.



# Avaliação da segurança da barragem

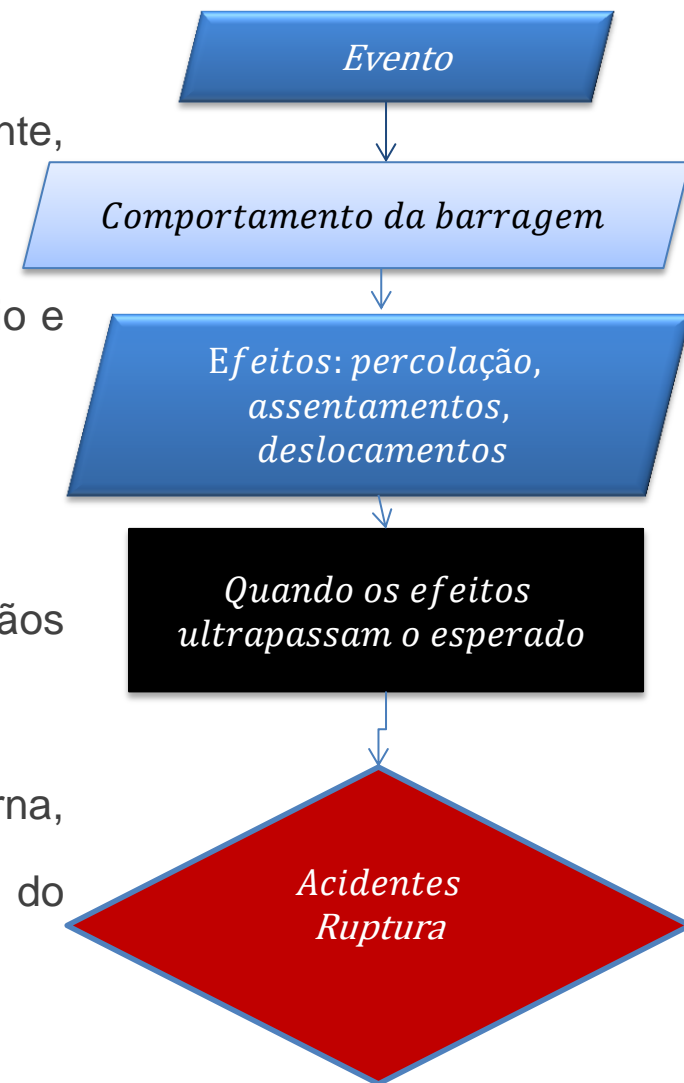
## > Eventos no contexto da segurança da barragem:

- > Naturais: sismos, cheias, rotura de barragens a montante, deslizamento de encostas a montante
- > Anthropogénicos hazards: erros operação do reservatório e acções criminosas (sabotagem, terrorismo ou guerra)

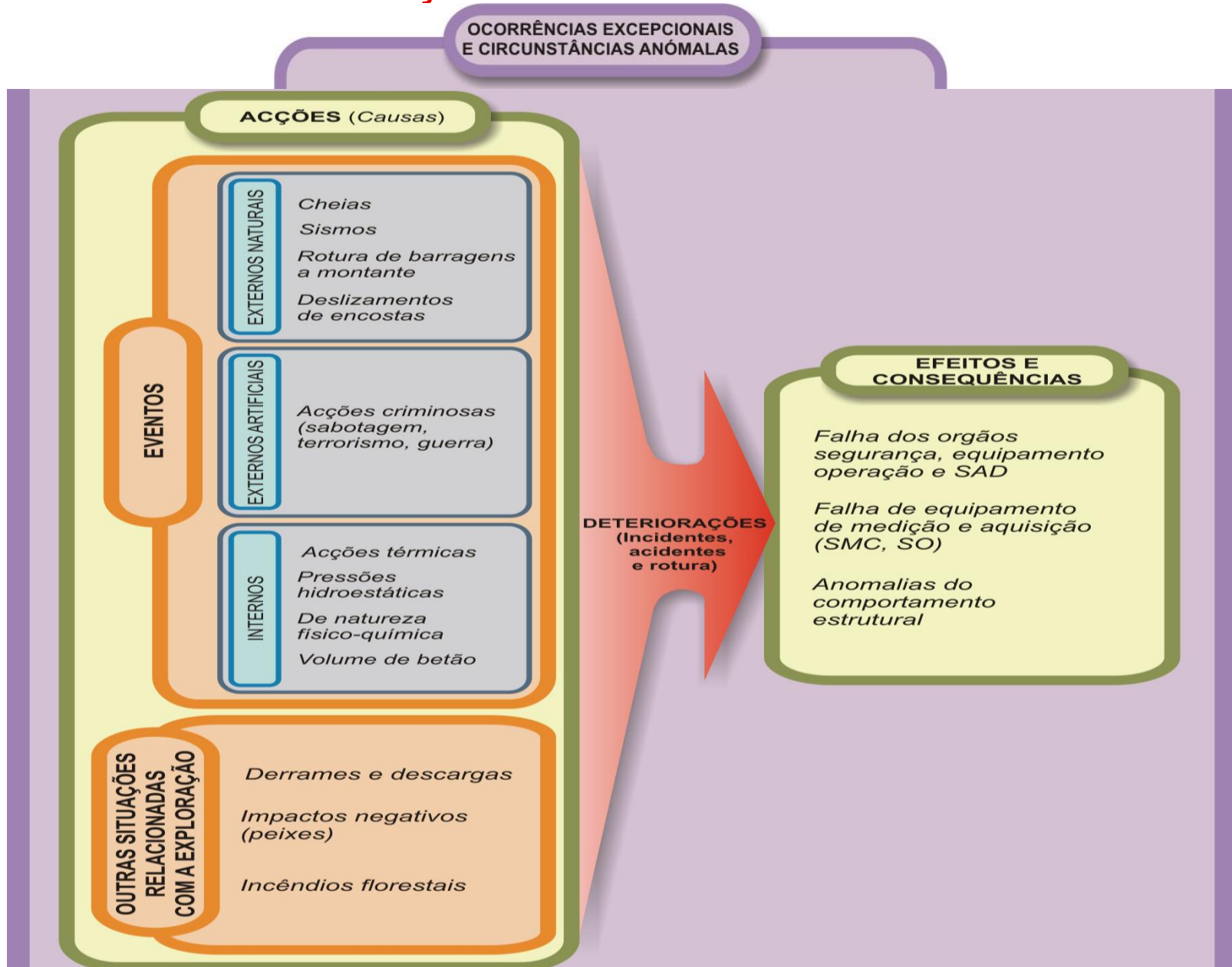
## > Anomalias do comportamento da barragem:

- > Falhas de equipamento (controlo de comportas de órgãos extravasores)
- > EXCESSO de infiltrações, assentamentos, erosão interna, de alterações de natureza fisico-química, do volume do concreto, etc...
- > Fraca resistência hidráulica ou mecânica

## > Acidentes e/ou ruptura da barragem

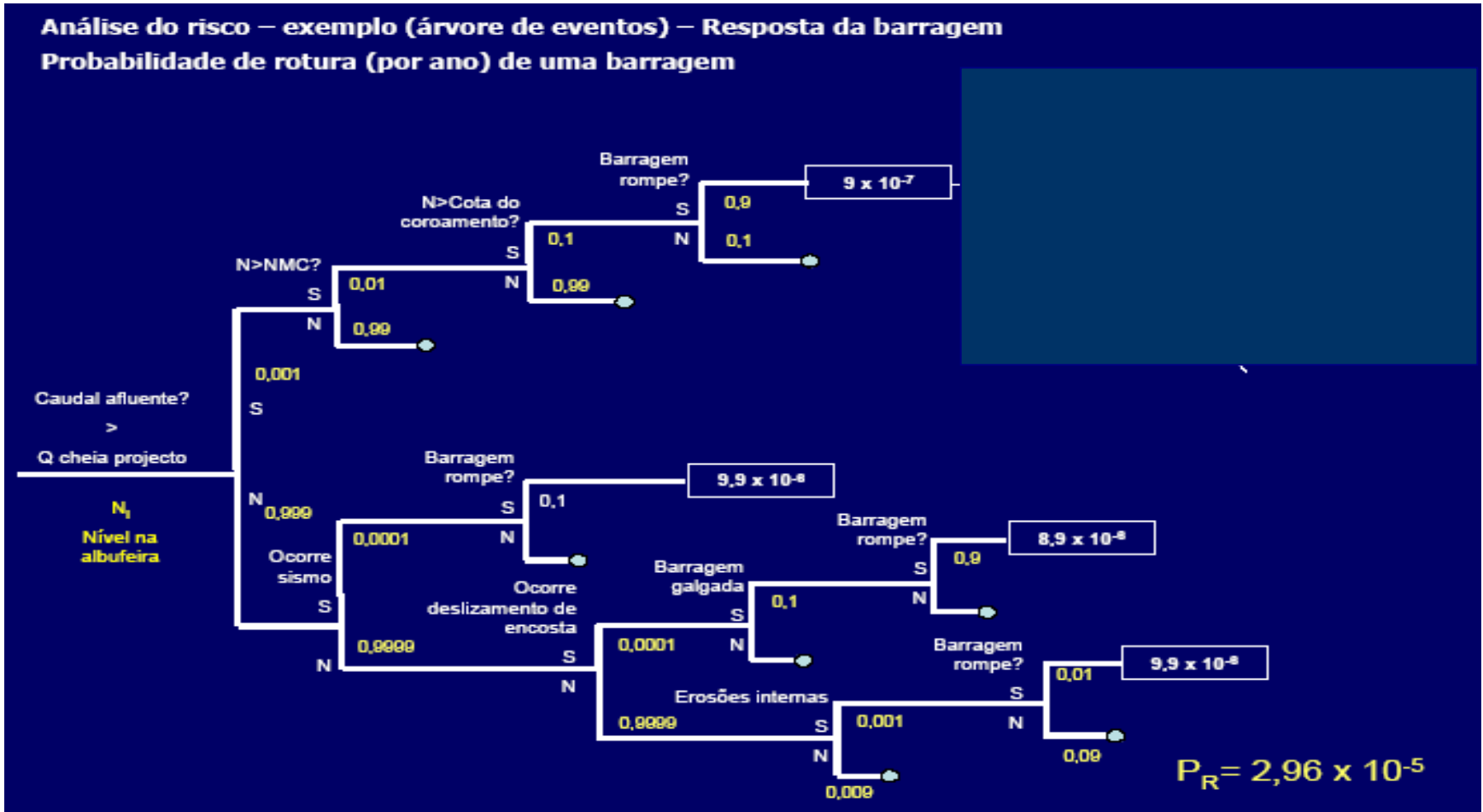


# O que pode originar uma ruptura? Identificação de eventos e anomalias



# Avaliação da segurança da barragem

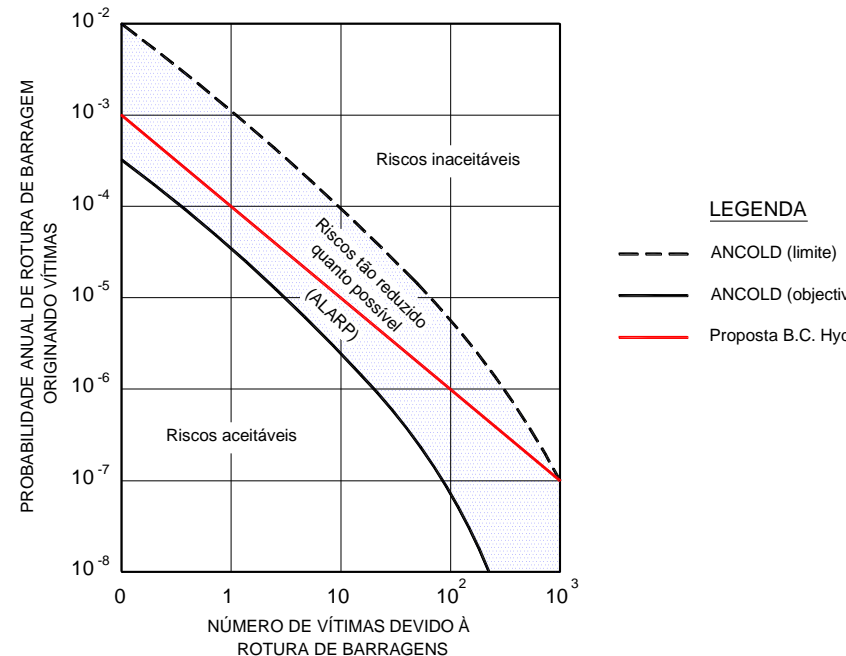
> Quão prováveis são os modos de ruptura?



# Apreciação do risco da barragem

## > O risco é aceitável ?

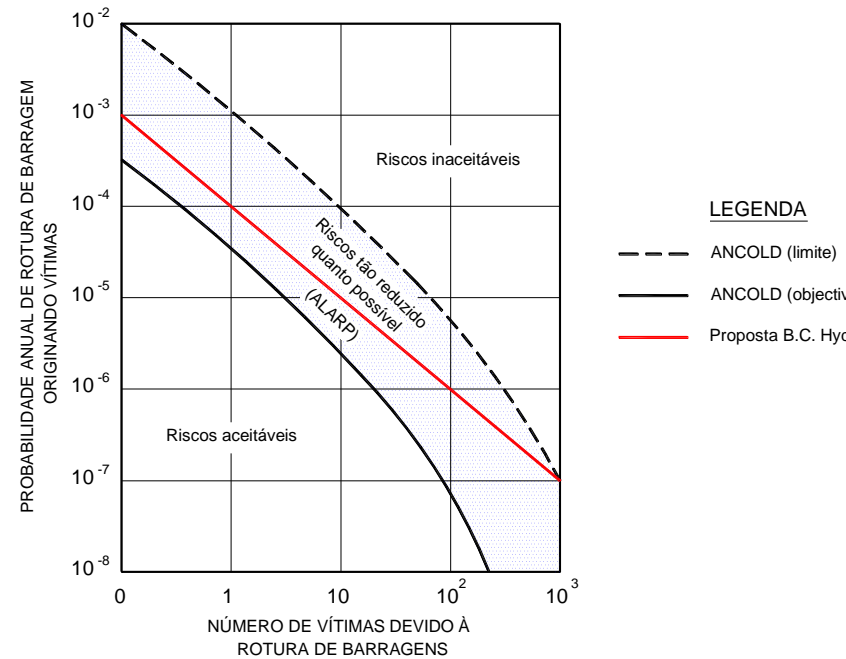
- > Um limite superior para o risco (“risco máximo”) - linha a partir da qual o risco é considerado inaceitável porque elevado
- > um limite inferior para o nível de risco (“risco óptimo”) - linha abaixo da qual o risco deixa de ser uma preocupação legal (negligenciável)
- > a zona ALARP - ... do risco “tão reduzido quanto possível” (“risk as low as reasonably practicable”); zona em que se devem implementar as medidas de segurança (estruturais e não estruturais) de modo a reduzir o risco que deverá ser restrito, tanto quanto possível, ao limite inferior



# Apreciação do risco da barragem

> O risco é aceitável ?

- > Risco=Probabilidade x Consequências
- > De uma forma geral, parece ser aceitável, um risco de  $10^{-4}$ , por exemplo:
- > a morte de 1 indivíduo com uma probabilidade de ocorrência de  $10^{-4}$
- > a morte de 10 indivíduos com uma probabilidade de ocorrência de  $10^{-5}$
- > a morte de 100 indivíduos com uma probabilidade de ocorrência de  $10^{-6}$



# Mitigação do risco

> Que fazer para reduzir ou mitigar o risco?

> As medidas de mitigação do risco de deterioração na barragem e do risco nos vales a jusante consistem na implementação de metodologias e de procedimentos com vista a:

> reduzir a probabilidade de ocorrência de um acidente (medidas estruturais de reforço e manutenção da barragem ou não estruturais de controlo de segurança)

> reduzir as consequências ou “volume de perdas” em caso de ocorrência de um acidente (medidas não estruturais no vale a jusante, por exemplo, alerta e evacuação)

> Risco=Probabilidade x Consequências!



# Mitigação do risco

> Que fazer para reduzir ou mitigar o risco?

> Prevenção (reforço)

> As medidas estruturais interferem com o fenómeno de deterioração, travando o processo por forma a eliminar a possibilidade de rotura

> Constituem exemplos:

> Reforço da estrutura

> Reabilitação dos órgãos de segurança (aumento da capacidade do descarregador)

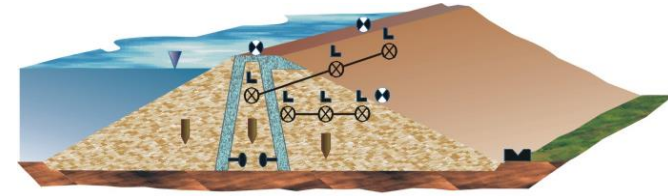
> Reparação de superfícies em contacto com o escoamento, tratamento de juntas, a reparação de drenos, a estabilização e protecção de taludes

> Substituição do equipamento hidro-mecânico



**Objetivo: reduzir a probabilidade de ocorrência de um acidente... quando o risco não é aceitável!**

# Mitigação do risco



- ▼ - LIMNÍGRAFO
- - PIEZÓMETROS
- ◆ - MARCAS SUPERFICIAIS
- ⊗ - EXTENSÓMETROS
- - DESCARREGADOR
- - CÉLULA DE PRESSÃO
- L - MEDIÇÃO DE ASSENTAMENTOS

> Que fazer para reduzir ou mitigar o risco?

> Prevenção (controlo da segurança)

> As medidas não-estruturais permitem a detecção em tempo útil de eventos perigosos ou de anomalias no comportamento da barragem por forma a eliminar a possibilidade de rotura

> Constituem exemplos:

> Instrumentação na barragem

> Sistema de monitorização de afluências e de previsão de cheias

**Objetivo: reduzir a probabilidade de ocorrência de um acidente...**



# Mitigação do risco



Transitar de imediato para  
**cotas elevadas**

> Que fazer para reduzir ou mitigar o risco?

> Preparação

> São essencialmente medidas não-estruturais e permitem a comunicação de ocorrências aos agentes e à população envolvida e ainda a preparação de respostas adequadas à emergência. Constituem exemplos:

> preparação de mapas com zonamento de risco

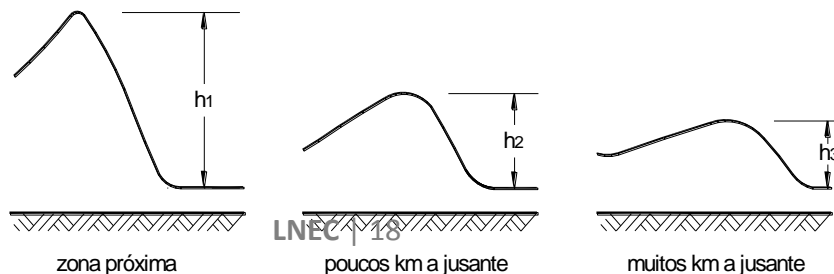
> sistemas de aviso e alerta

> planos de emergência

**Objetivo: reduzir o “volume de perdas” em caso de ocorrência de um acidente**

# Avaliação das consequências do ponto de vista hidráulico

- > No contexto da segurança nos vales a jusante das barragens, o evento que interessa é a ocorrência de uma cheia induzida:
  - > É uma cheia não natural, i.e., provocada pelas deteriorações que afectam uma barragem, sejam elas uma ruptura ou qualquer outro acidente que implique descargas não controladas com impacto no vale a jusante.
  - > As características da cheia induzida são usualmente diferentes das cheias naturais (ondas de frente abrupta) e são determinadas recorrendo a modelos numéricos de simulação



## Avaliação das consequências

- > O que poderia acontecer caso ocorresse a rotura?
- > Definir cenários de acidente/ruptura
- > Mapear as áreas submersas pela cheia induzida – identificar pessoas e bens em “exposição” (mapa de inundação)
- > Estimar a magnitude ou o grau de perigosidade da cheia de ruptura (velocidades, alturas da onda) e o tempo de aviso às populações em risco (tempo de chegada) – conhecer o perigo
- > Caracterizar o vale a jusante e identificar os elementos em risco (população, infra-estruturas)

# Avaliação das consequências

- > A avaliação das consequências permite ainda...
- > Definir a classificação do Dano Potencial Associado (DPA) e contribuir para definir o risco associado à barragem
- > Estimar a “probabilidade” das perdas ou seja avaliar a vulnerabilidade do vale a jusante
  - > Indivíduos: número de pessoas que residem na área de risco vs número total de vítimas
  - > Danos em Infra-estruturas: colapso parcial ou disrupção vs total destruição
- > Definir estratégias de mitigação do risco:
  - > Dimensionar sistemas de aviso à população
  - > Desenvolver Planos de Ação Emergenciais (PAE)

# Avaliação das consequências

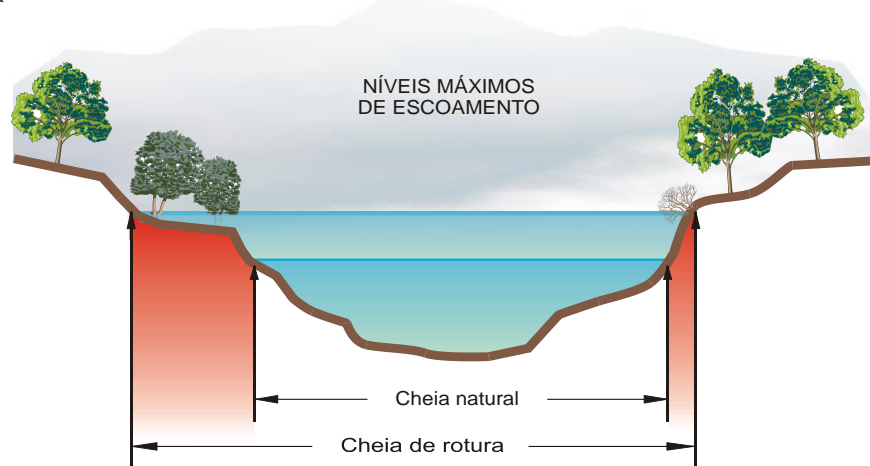
- > A magnitude dos danos depende:
  - > Barragem (tipo, características e estado de manutenção)
  - > “%” de galgamento da barragem sem originar ruptura
  - > Afluências ao reservatório (período de retorno da cheia afluyente), níveis iniciais no reservatório e da política de operação do aproveitamento
  - > Modo de ruptura e características da brecha
  - > Modo como um dado hidrograma de ruptura é propagado para jusante (modelos numéricos)
  - > Métodos de tratamento de afluentes e outros sistemas de armazenamento e amortecimento de cheias (modelos simplificados, 1D, 2D)
  - > Factores de fricção e condições iniciais para propagação no rio a jusante
  - > Métodos de tratar pontes e outras singularidades
  - > Distância de propagação a jusante

# Cenários de ruptura


- > A magnitude dos danos depende de diversos factores
- > Definem-se cenários, por exemplo:
  - > Ruptura por mecanismos estrutural ou por percolação (devido por exemplo à ocorrência de pipping na barragem) que origina o denominado cenário de ruptura em dia de sol (sem influência da precipitação)
  - > Ruptura por mecanismo hidráulico que origina o denominado cenário de ruptura por galgamento
- > Problema:
  - > Os resultados dependem das hipóteses de simulação (cenários e parâmetros)

# Cenários de ruptura

- > Não se devem multiplicar o  $n^{\circ}$  de cenários
- > Usualmente são considerados 2 cenários:
  - > Cenário de ruptura (2 escolas):
    - > mais gravoso (ruptura por galgamento)
    - > mais provável (ruptura no denominado cenário de ruptura em dia de sol)
  - > Cenário de acidente (vazão de projeto do vertedouro)



Nota:

 - Área onde ocorrem as perdas que se consideram como incremento devido à ruptura da barragem

# Cenários de ruptura

> Critérios para simulação da cheia induzida. Exemplo para o Cenário de ruptura mais provável

Todos os tipos de barragens		Tipo de barragem	Características da brecha	
Nível inicial	Cheia afluyente		Dimensão	Tempo de ruptura
Nível Máximo Normal (ruptura em dia de sol - <i>ruptura da fundação</i> )	Vazão média anual ou T=100 anos	Arco	ruptura total	10 min
<i>Coroamento (ruptura por galgamento)</i>	<i>Cheia de projeto T=1 000 anos</i>	Gravidade	Brecha rectangular correspondente a 50% da estrutura total ou 3 dos blocos maiores	30 min
Coroamento <i>ruptura por galgamento</i>	Cheia de projeto T=1 000 anos	Aterro	$2 < \frac{B_{ibre}}{H_{barr}} < 3$ $H_{bre} = H_{barr}$	Máximo de {FROEHLICH, 1987 ou 90 min}



# Avaliação das consequências do ponto de vista hidráulico

> As 3 fases da simulação da cheia de ruptura:

> Definir a formação da brecha

> Calcular a vazão efluente através da brecha



> Simular a propagação da vazão efluente através da brecha pelo rio a jusante por forma a determinar:

> Mapa de inundação

> Características da cheia ao longo do vale a jusante

> Níveis máximos em aglomerados populacionais

> Vazões e velocidade do escoamento

> Tempos de chegada e de ocorrência do pico



# Do ponto de vista do engenheiro o que é necessário definir para definir a formação da cheia?

> Afluências ao reservatório de nível de galgamento que induz a ruptura

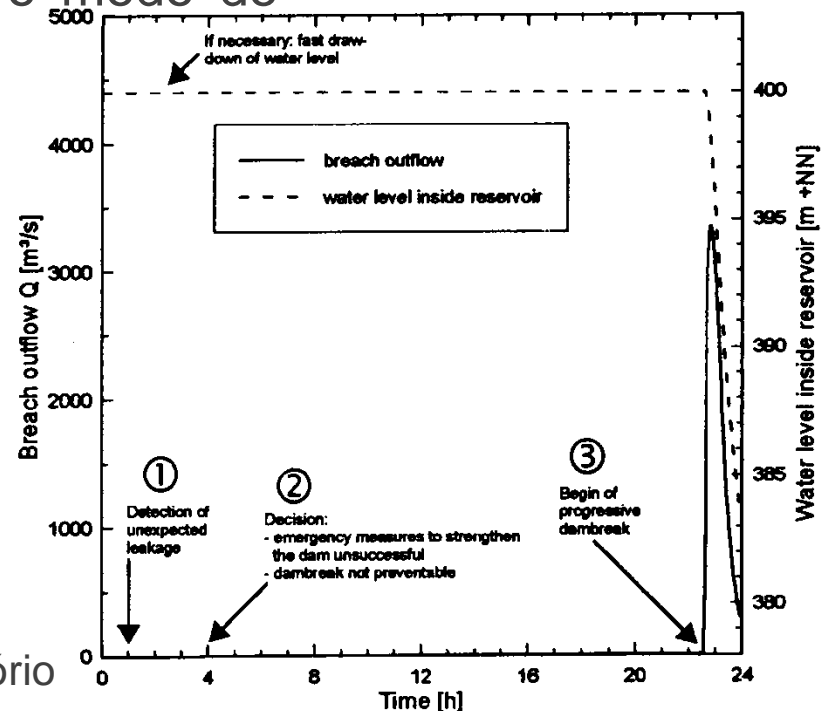
> Características da brecha ou seja qual o modo de ruptura (parcial, total)?

- > Geometria
- > Altura
- > Largura

> Qual o tipo de ruptura (rápida vs lenta)?

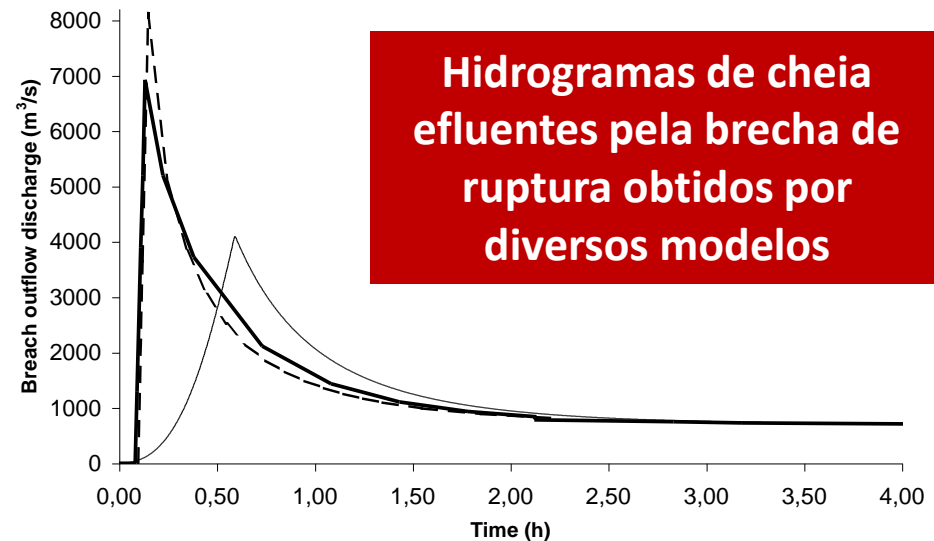
- > Tempo para iniciar a brecha
- > Tempo de ruptura ou para esvaziar o reservatório

> Parâmetros que influenciam o pico e o hidrograma de cheia



# Modelos existentes para definir a brecha de ruptura

- > Equações empíricas
- > Modelos paramétricos
- > Modelos de erosão baseados em métodos físicos  
(hidráulicos e geoténicos)



- > Nota: Uma das principais fontes de incerteza na previsão das características da cheia decorrente da ruptura gradual de uma barragem de aterro diz respeito à evolução temporal da brecha que se forma no corpo da barragem

# Modelos existentes para definir a brecha de ruptura

- > Equações empíricas
- > Expressões que relacionam a vazão máxima efluente da brecha com as características da barragem ou do reservatório (altura, capacidade)
- > Apenas determinam a vazão máxima efluente, ou seja, não simulam a brecha nem definem um hidrograma efluente da mesma
- > Ticamente desenvolvidas para barragens de solos não coesivos.
- > Regressões baseadas em amostras limitadas, logo a incerteza é elevada.
- > Exemplo: Froehlich, 1987 (Largura e tempo de ruptura)

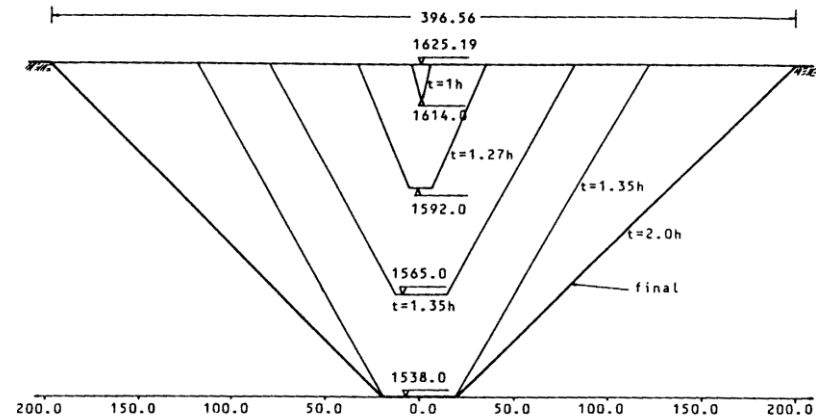
$$\bar{B}_{breach} = 0,47 \left( \frac{V_{Reservoir}}{H_{Dam}} \right)^{0,5}$$

$$t_{failure} = 0,007 \left( \frac{V_{reservoir}}{H_{Dam}^2} \right)^{0,50}$$

# Modelos existentes para definir a brecha de ruptura

- > Modelos paramétricos
- > Pressupõem que a brecha evolui ao longo do tempo de ruptura até às suas dimensões finais que são definidas pelo modelador com base no uso do tratamento estatístico da informação que é obtida das rupturas históricas (protótipos) ou de resultados experimentais
- > A geometria, também definida pelo modelador, pode ser rectangular, traingular ou trapezoidal
- > Adotam usualmente a hipótese simplificativa de assumir rupturas lineares ao longo do tempo:

$$B_{bre}(i) = B_{bre} \left( \frac{t_{failure}(i)}{t_{failure}} \right)$$



**Modelo de evolução da brecha de ruptura da barragem de Teton(Singh, 1996)**

# Modelos existentes para definir a brecha de ruptura

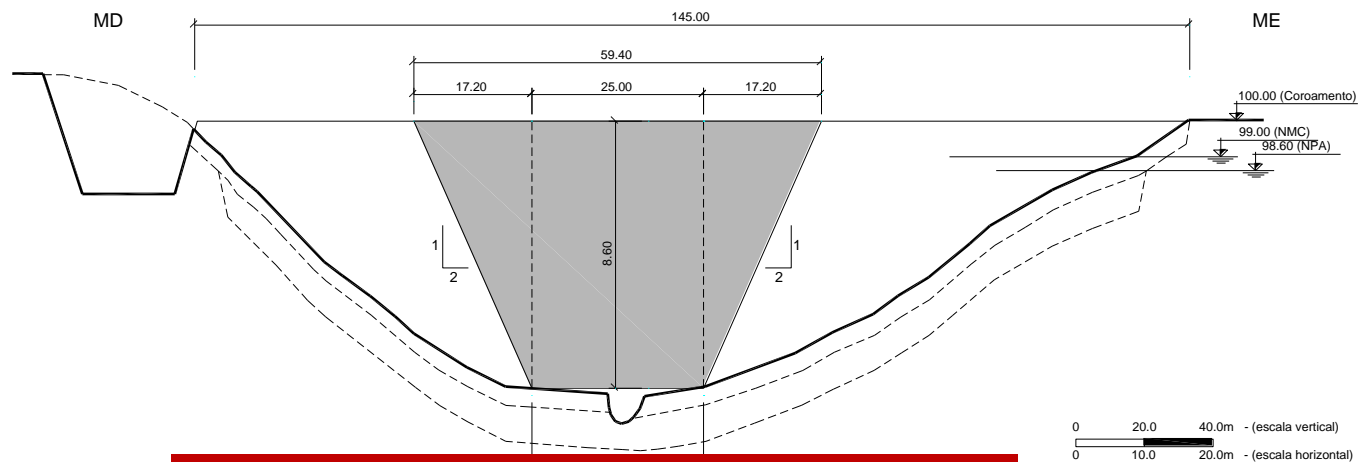
> Modelos paramétricos

> Estabelecimento dos parâmetros da brecha:

> As dimensões da brecha e o tempo de ruptura dependem do:

> Tipo de barragem (aterro, concreto?)

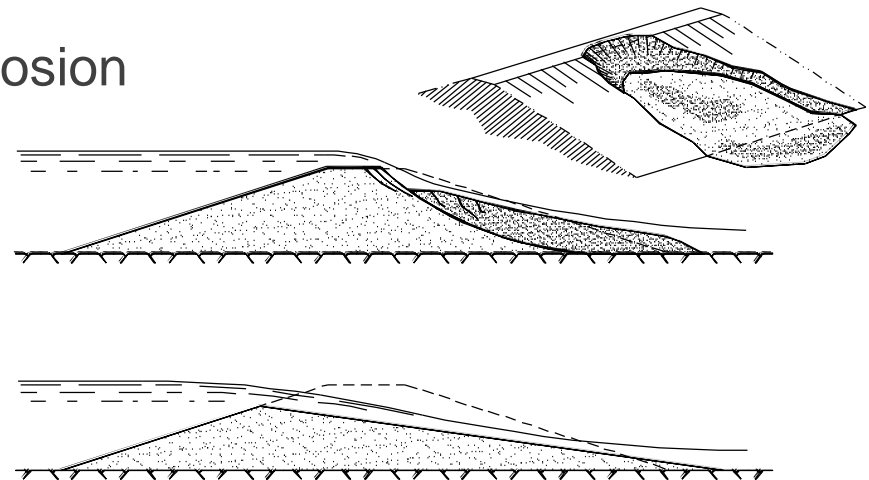
> Modo de ruptura (total, parcial, lenta, rápida?)



**Parâmetros idealizados para a  
modelação típica de uma brecha**

# Modelos paramétricos . Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

- > As barragens de aterro não são “perigosas” do que as de concreto
- > São mais vulneráveis do que as de concreto porque podem colapsar devido à erosão do material constituinte:
  - > Através do corpo da barragem (percolação e erosão interna)
  - > Do paramento de jusante devido à erosão do paramento de jusante devido ao galgamento
- > Tipicamente:
  - > Solos não coesivos = surface erosion
  - > Solos coesivos = headcut



# Modelos paramétricos . Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

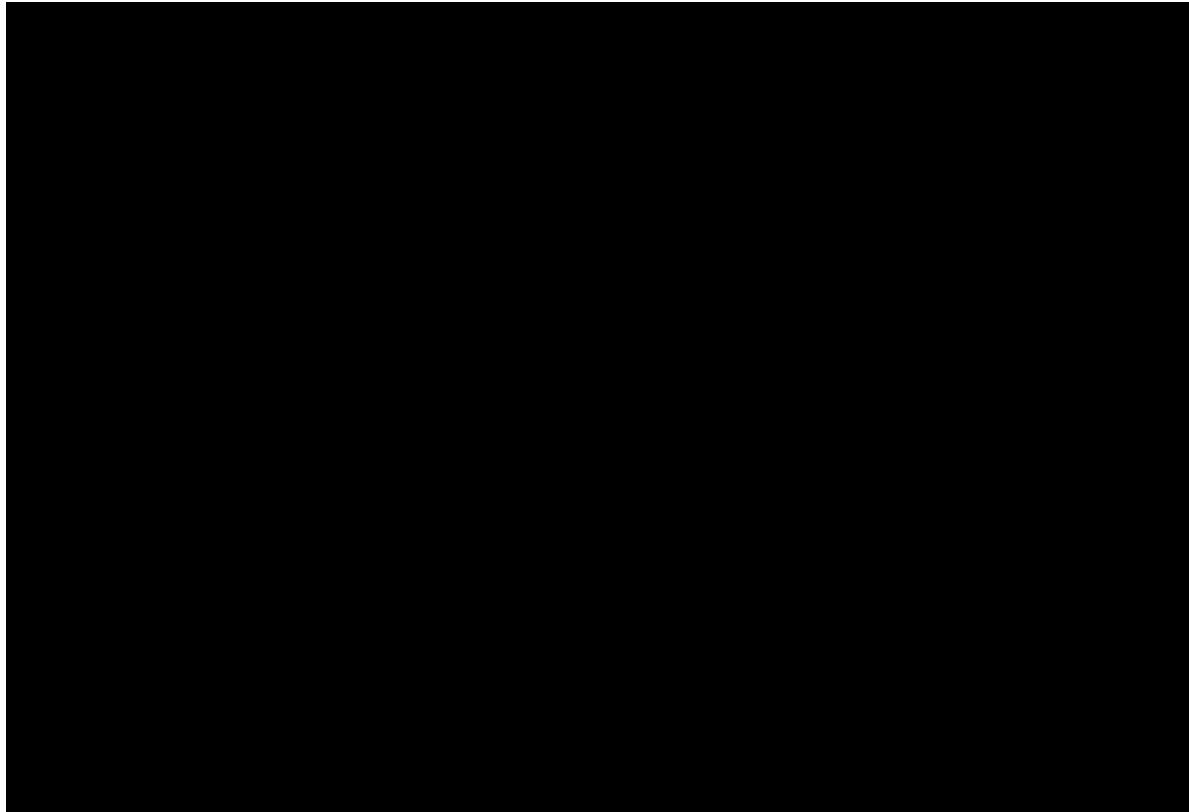
- > A barragens de aterro apresentam usualmente rupturas lentas e parciais:
  - > Largura: 0.5 a 3 altura da barragem
  - > Inclinação: 0H:1V a 1H:1V
  - > Tempo de ruptura: 0.5 a 4 Hrs





# Modelos paramétricos . Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

- > A barragens de aterro apresentam usualmente rupturas lentas e parciais:



## Modelos paramétricos . Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

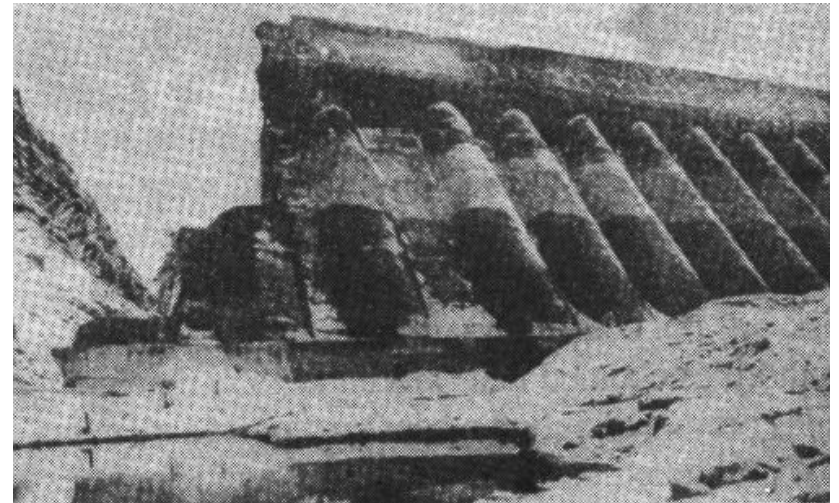
- > As barragens de concreto mantêm frequentemente a sua integridade estrutural mesmo durante a ruptura. Por exemplo, estima-se que a barragem de Vajont tenha resistido a uma acção 8 vezes superior à de dimensionamento quando galgada por dezenas de metros.
- > A causa mais provável da ruptura está associada à ruptura da fundação.
- > São geralmente rupturas rápidas or praticamente instantâneas.

## Modelos paramétricos . Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

- > A ruptura das barragens e arco pode ser considerada rápida e parcial:
- > Largura: um múltiplo dos monólitos
- > Inclinação: 0H:1V
- > Tempo de ruptura: 0.1 a 0.5 Hrs



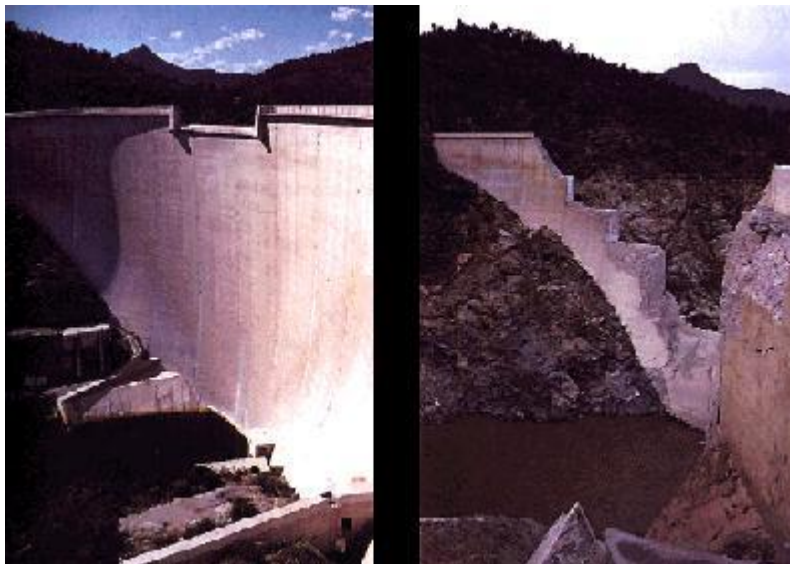
Vista de jusante da brecha da Barragem de St. Francis, EUA



Vista de montante da brecha da Barragem de Gleno, EUA

## Modelos paramétricos. Estabelecimento dos parâmetros da brecha de ruptura

- > A ruptura de barragem em arco pode ser considerada total e praticamente instantânea:
- > Largura: toda a largura do vale
- > Inclinação: inclinação do vale
- > Tempo de ruptura: quase instantânea



Vista de jusante da barragem de Malpasset, França

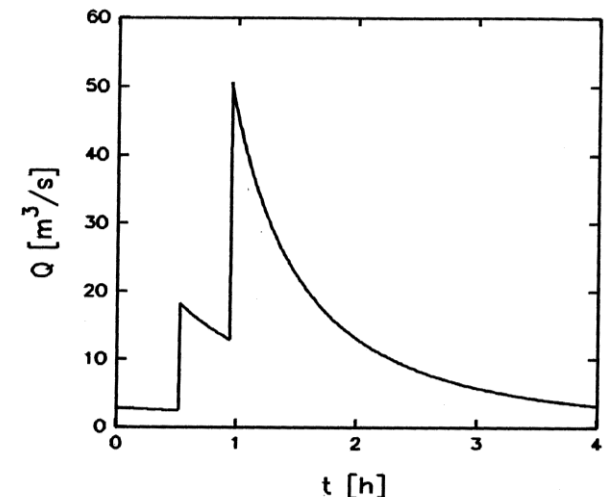
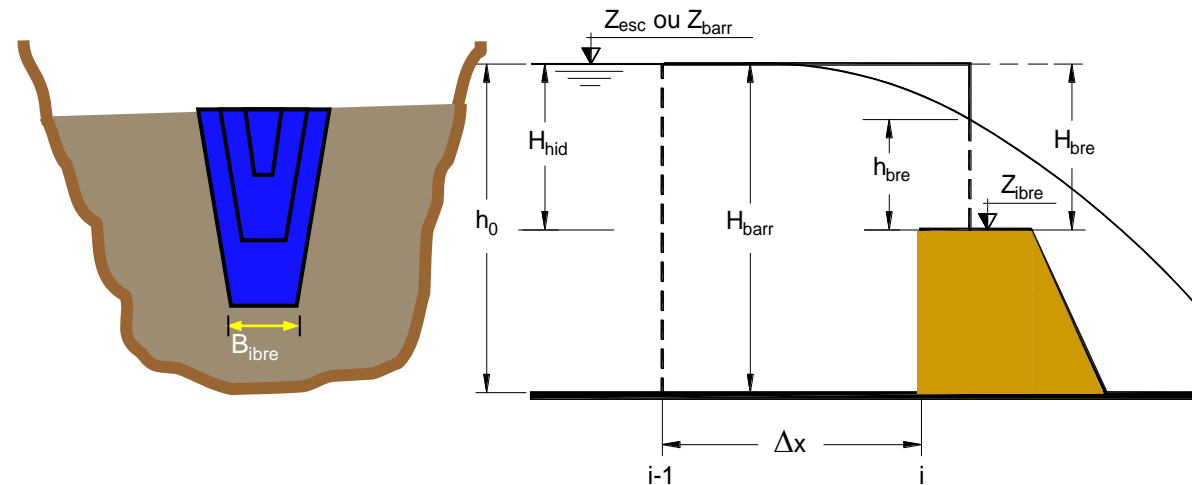
# Modelos paramétricos. Cálculo da vazão efluente da brecha de ruptura

- > A vazão é calculada assumindo que a brecha é um vertedouro cujas “dimensões” (cota da soleira e desenvolvimento) vão aumentando ao longo do tempo de ruptura.
- > São usadas curvas de vazão de vertedouros (definição dos coeficientes de vazão):

$$Q_{bre} = C_1 (Z_{esc}(i) - Z_{ibre}(i))^{1,5} + C_2 (Z_{esc}(i) - Z_{ibre}(i))^{2,5}$$

$$C_1 = 2,2 B_{ibre} C_v k_{sub}$$

$$C_2 = 2,45 z C_v k_{sub}$$



Typical hydrograph for a dam-break with cohesive core

## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

- > Simulam a evolução da brecha e calculam o hidrograma resultante da ruptura de barragens de aterro usando modelos de erosão baseados na realidade física do problema, ou seja, em princípios de mecânica dos solos, transporte sólido e hidráulicos associados do escoamento através da brecha em desenvolvimento para calcular a vazão efluente
- > São modelos combinados desenvolvidos acoplando as equações do regime variável a equações de erosão e de transporte sólido:

$$q_s = \frac{8\sqrt{g}}{\rho_w^{0.5} \rho'} (\tau - \tau_c)^{1.5} \quad \Delta H_{bre} = 3600\Delta t \frac{Q_s}{P_{bre} L(1-p)}$$

Modelo baseado na fórmula de Meyer-Peter e Muller



## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

<b>Model and Year</b>	<b>Sediment Transport</b>	<b>Breach Morphology</b>	<b>Parameters</b>	<b>Other Features</b>
Cristofano (1965)	Empirical formula	Constant breach width	Angle of repose, others	
Harris and Wagner (1967); BRDAM (Brown and Rogers, 1977)	Schoklitsch formula	Parabolic breach shape	Breach dimensions, sediments	
DAMBRK (Fread, 1977)	Linear pre-determined erosion	Rectangular, triangular, or trapezoidal	Breach dimensions, others	Tailwater effects
Lou (1981); Ponce and Tsivoglou (1981)	Meyer-Peter and Müller formula	Regime type relation	Critical shear stress, sediment	Tailwater effects
BREACH (Fread, 1988)	Meyer-Peter and Müller modified by Smart	Rectangular, triangular, or trapezoidal	Critical shear, sediment	Tailwater effects, dry slope stability
BEED (Singh and Scarlatos, 1985)	Einstein-Brown formula	Rectangular or trapezoidal	Sediments, others	Tailwater effects, saturated slope stability
FLOW SIM 1 and FLOW SIM 2 (Bodine, undated)	Linear pre-determined erosion; Schoklitsch formula option	Rectangular, triangular, or trapezoidal	Breach dimensions, sediments	

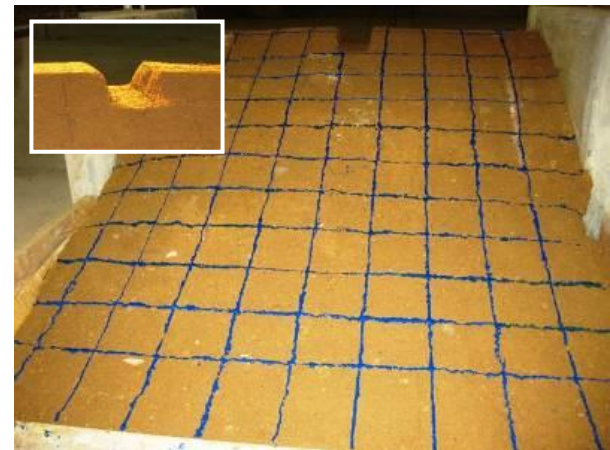
## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

- > Os dados típicos para empreender a modelação com base em métodos físicos são:
  - > Tipo de solo e estado de humidade (affectam a erodibilidade e influenciam o processo geral de ruptura)
  - > Caracterização granulométrica (D50, D90,...)
  - > Parâmetros geotécnicos – coesão, ângulo de atrito
  - > Outros parâmetros mecânicos – peso volumico
  - > Parâmetros empíricos
- > Os modelos numéricos baseados em métodos físicos têm potencial para dar informação mais detalhada do processo de ruptura mas continuam a ter uma precisão limitada.
- > Não existe muita informação para realizar a previsão da ruptura e existe a necessidade de melhorar o conhecimento do processo de ruptura de aterros



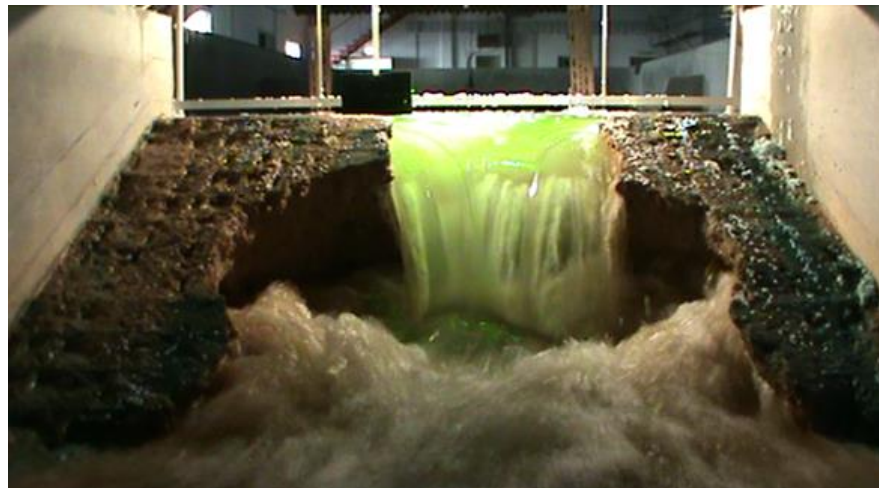
## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

- > Linha de investigação com o objetivo de desenvolver um novo modelo numérico baseado em métodos físicos para modelação do processo de formação de brechas em aterros:
- > Testes intensivos em aterros de grande dimensão de solos coesivos para (1/2):
  - > Avaliação a geometria final da brecha usando análise dimensional para obter relações entre as dimensões da brecha e as características da barragem
  - > Caracterização da vazão efluente da brecha com determinação de coeficientes de vazão variáveis no tempo



## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

- > Testes intensivos em aterros de grande dimensão de solos coesivos para (2/2):
  - > Comparação dos fenómenos envolvidos em barragens homogéneas compostas por solos não coesivos e coesivos e em barragens zonadas com núcleo argiloso;
  - > Calibração directa do modelo numérico com base em testes controlados de erosão



## Modelos de erosão baseados em métodos físicos

- > Testes intensivos em aterros de grande dimensão de solos coesivos para (2/2):



# Modelos existentes para propagar a cheia de ruptura

## > Modelos simplificados:

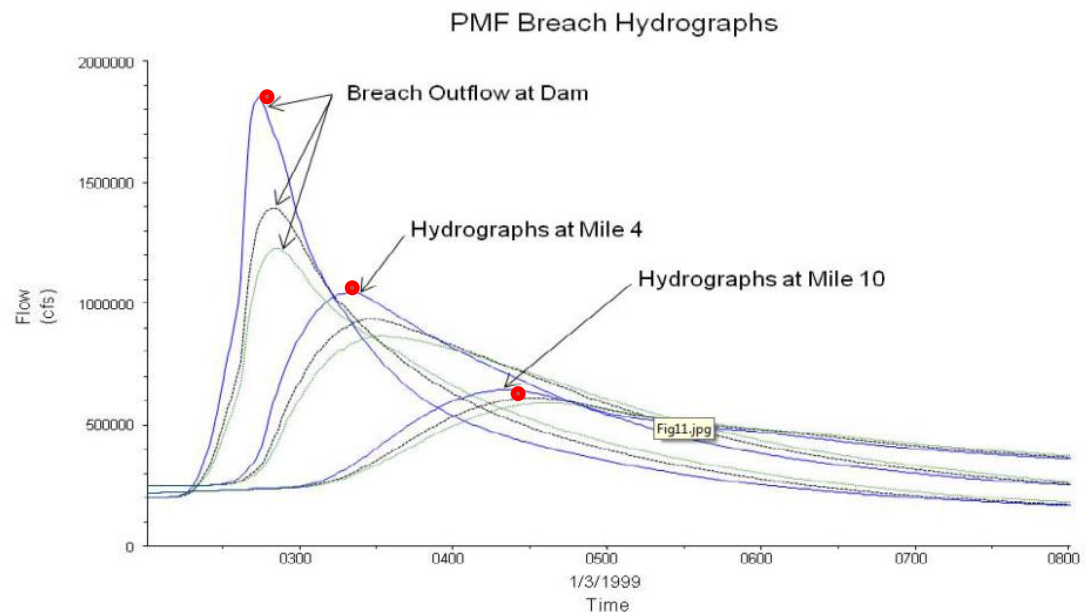
- > Métodos simplificados baseados em equações empíricas que traduzem o amortecimento da cheia ao longo do rio

## > Modelos hidrológicos:

- > modelo HEC-Ras, US Army Corps of Engineers (<http://www.hec.usace.army.mil/>)

## > Modelos hidrodinâmicos baseados nas equações do escoamento (Saint-Venant):

- > 1D, exemplo DAMBRK
- > 2D, por exemplo ,os modelos:
  - > TELEMAC (EDF)
  - > MIKE-21 (Delft Hydraulics)
  - > BIPLAN (LNEC/IST)

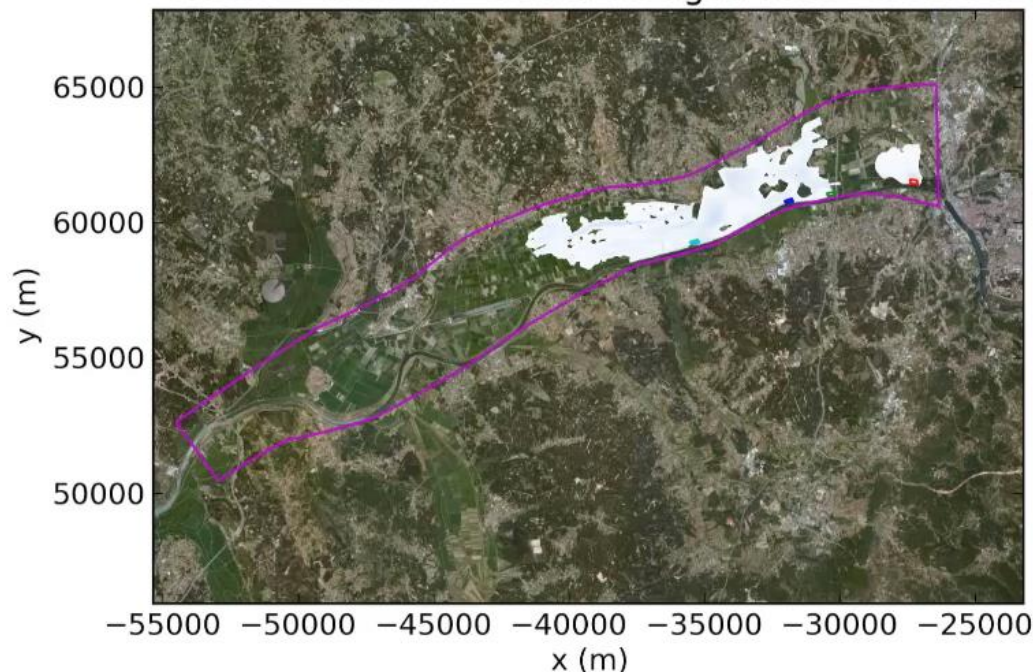


## Modelos existentes para propagar a cheia de ruptura

- > O mapeamento deve ser feito com base em simulações da cheia induzida, reservando os métodos simplificados para pequenas barragens
- > Abordagem simplificada conduz a mapas de inundação mais abrangentes e conservadores e não caracteriza cabalmente a cheia:

- > tempo de chegada – ideia à defesa civil do tempo disponível e para definição da ZAS
- > velocidade do fluxo – ideia do poder destrutivo da cheia

M03a3 - case 10 - altura de agua final - 30000 s

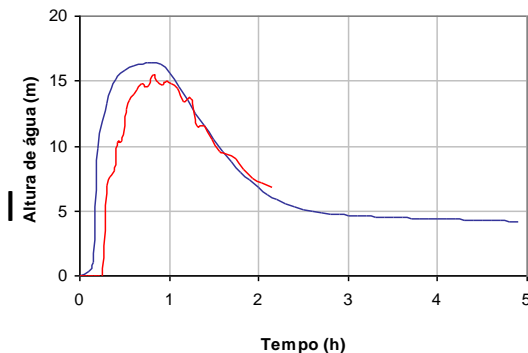


- > I.e., informação chave para o PAE

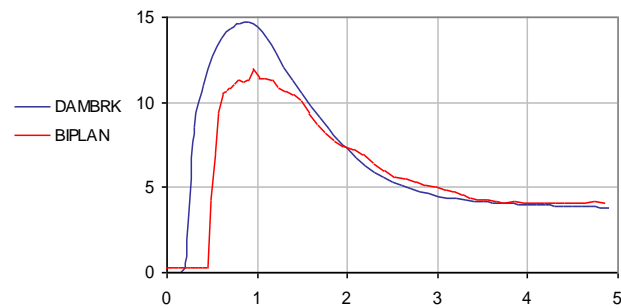
# Problemas que surgem com a simulação da cheia de ruptura

- > Os resultados dependem do tipo de modelo de simulação utilizado
  - > Os modelos 2D fornecem valores de alturas de água inferiores às obtidas com os modelos 1D e valores do tempo de chegada da frente da cheia induzida superiores aos obtidos com os modelos 1D
  - > A área de inundação é sobre-estimada com os modelos 1D, sendo os resultados a favor da segurança das populações, os que os torna como uma boa solução para definir áreas de risco a jusante

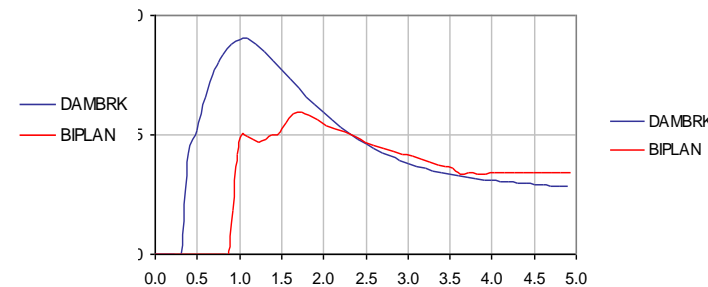
P<sub>4</sub> (km 14,0)



P<sub>7</sub> (km 16,0)



P<sub>12</sub> (km 20,0)



# Métodos simplificados para simulação da cheia de ruptura

- > Com base na capacidade, na altura e distancia à barragem -> fórmulas de cálculo empíricas -> extensão para jusante e vazão máxima na secção da barragem e às distância  $s_x$  da barragem
- > Com base em SRTM, Google Earth e ArcGis – seções de cálculo ao longo do vale afetado
- > Com base na vazão seção e na geometria da seção  $x$  -> cálculo hidráulico aproximado -> nível máximo da onda de rotura na seção  $x$
- > Migração de resultados para ArcGis e cruzamento topografia SRTM e Níveis máximos no vale inundado



# Equações empíricas para determinação da vazão máxima na secção da barragem

- > Fórmulas baseadas na altura da barragem ( $H_{max}$ ), na capacidade do reservatório ( $V_{max}$ ) ou na combinação de ambos ( $H_{max}$ ;  $V_{max}$ ).
- > Não é obtido o hidrograma de vazão na secção da barragem. O único resultado é  $Q_{max}$

Type of Equation	Author	Equation
$Q_{max} = f(H_{max})$	Kirkpatrick (1977)	$Q_{max} = 1.268 (H_{max} + 0.3)^{2.5}$
	SCS (1981)	$Q_{max} = 16.6 (H_{max})^{1.85}$
	USBR (1982)	$Q_{max} = 19.1 (H_{max})^{1.85}$
	Singh and Snorrason (1982)	$Q_{max} = 13.4 (H_{max})^{1.89}$
$Q_{max} = f(V_{max})$	Singh and Snorrason (1984)	$Q_{max} = 1.776 (V_{max})^{0.47}$
	Evans (1986)	$Q_{max} = 0.72 (V_{max})^{0.53}$
	MMC	$Q_{max} = 0.0039 (V_{max})^{0.8122}$
$Q_{max} = f(V_{max}, H_{max})$	Hagen (1982)	$Q_{max} = 1.205 (V_{max} \cdot H_{max})^{0.48}$
	MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 1.154 (V_{max} \cdot H_{max})^{0.412}$
	MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	$Q_{max} = 3.85 (V_{max} \cdot H_{max})^{0.411}$
	Costa (1985)	$Q_{max} = 0.763 (V_{max} \cdot H_{max})^{0.42}$
	Froehlich (1995)	$Q_{max} = 0.607 (V_{max}^{0.295} \cdot H_{max}^{1.24})$



# Equações empíricas para amortecimento da vazão máxima na secção da barragem

> Equação proposta pelo USBR (1989) para  $V_{max} > 6.2 \text{ hm}^3$

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = 10^{-0.01243x}$$

> Equação proposta pelo Dams Sector (2011) para  $V_{max} \leq 6.2 \text{ hm}^3$

$$\frac{Q_x}{Q_{max}} = a \cdot e^{b \cdot x}$$

$$a = 0.002 \ln(V_{max}) + 0.9626$$

$$b = -0.20047 (V_{max} + 25000)^{-0.5979}$$

$V_{max}$  – capacidade do reservatório ( $\text{m}^3$ )

$Q_x$  – vazão máxima ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) à distância  $x$  da barragem [(m) para USBR's eq. ; (km) para Dams Sector eq.]

$Q_{max}$  – vazão máxima na secção da barragem em ruptura ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

# Métodos simplificados para amortecimento da cheia

- > Necessidade de caracterizar topograficamente o rio a jusante
- > Conversão da vazão em alturas de água nas seções a jusante:

$$h_{n+1} = \left( \frac{Q}{K_s \sqrt{i}} \right)^{0,6} \frac{\left( B + 2h_n \sqrt{1 + m^2} \right)^{0,4}}{B + mh_n}$$

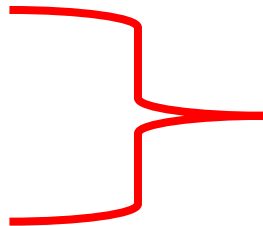
I  $Q$  – vazão associada à ruptura numa dada secção de cálculo

$i$  – declive do rio

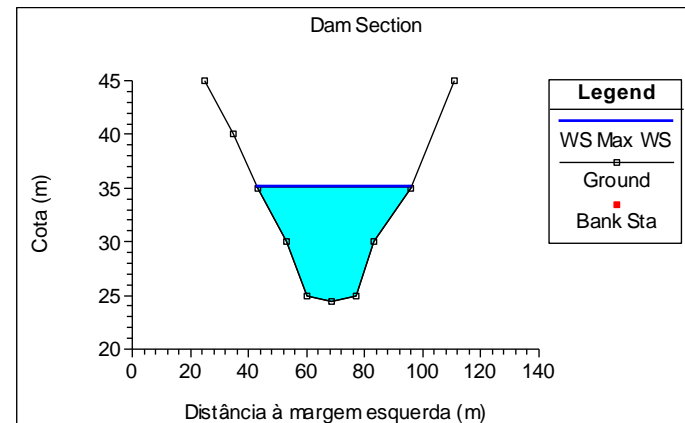
$m$  – inclinação do talude da margem

$B$  – largura do leito

$h$  – altura de água


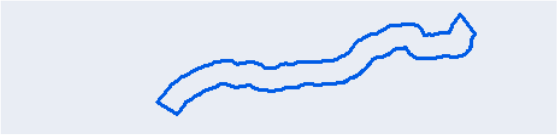


informação sobre topografia e relevo do rio



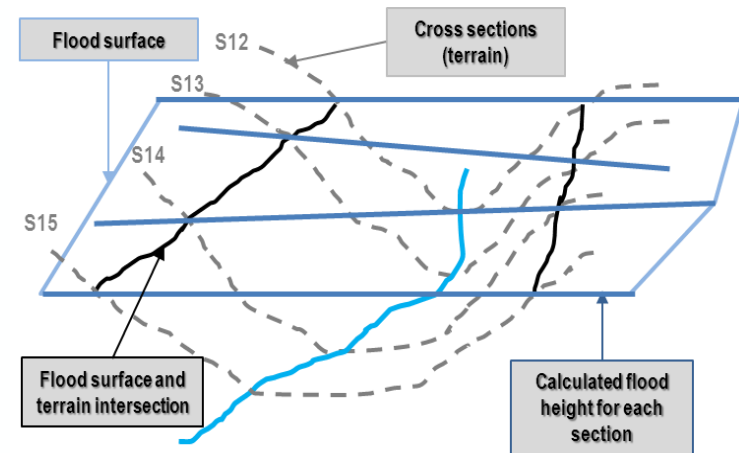
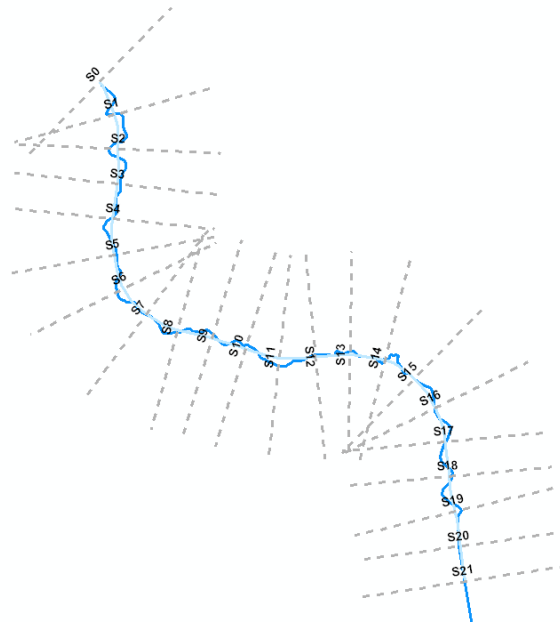
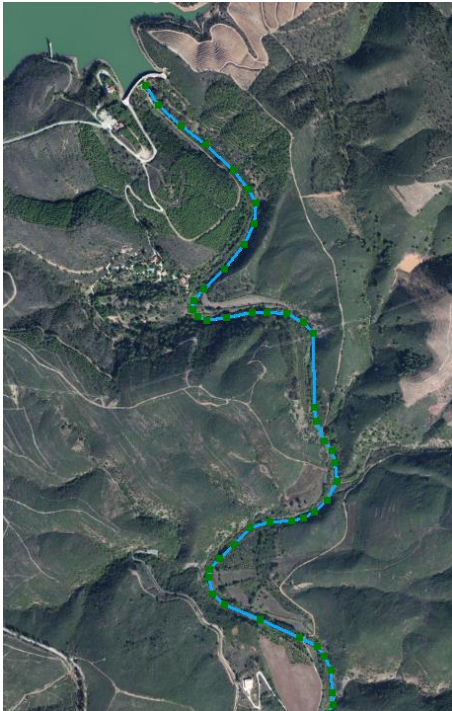
# Métodos simplificados para amortecimento da cheia

- > E quando não há mapas topográficos?
- > GIS and Digital Terrain Model, utilização do SRTM e imagens satélite para obter seções de cálculo ao longo do vale afetado e mapear áreas de risco

Tema	Nome	Exemplo
Curso de água digitalizado	<ID>_rio	
Seções originais	<ID>_secoes20	
Seções com altura de inundação	<ID>_secoes20_e	
Área de inundação (calculada pela diferença de superfícies de terreno e de inundação)	<ID>_inunda_L	

# Métodos simplificados para amortecimento da cheia

- > Vectorização do rio
- > Levantamento de secções de cálculo
- > Cruzamento do “plano de inundação” com o DTM



# Modelos hidrológicos para propagação da cheia de ruptura HecRas

- > O modelo Hec-ras utiliza as equações da continuidade e dos momentos :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_o + S_f\right) = 0 \qquad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

- > As perdas de energia são calculadas:
  - > fricção - Manning Equation
  - > Coeficiente de perda de carga localizado para as contracções/alargamentost
- > Momentum equation is used for:
  - > Ressonância hidráulica
  - > Hidráulica de pontes
  - > Junção de afluentes

# Modelo hidrodinâmicos para propagação da cheia de ruptura 1D-DAMBRK ou 2D-BIPLAN

Equações de Saint-Venant

$$O_t + P_x + R_y = S$$

Variáveis de estado

Termos fonte

$$O = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad P = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}(gh^2) \\ uvh \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}(gh^2) \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(i_x - J_x) \\ gh(i_y - J_y) \end{bmatrix}$$

Algoritmo de previsão. Método  
MacCormack TVD

$$\tilde{O}_{i,j}^{n+1} = O_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (P_{i,j}^n - P_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t}{\Delta y} (R_{i,j}^n - R_{i,j-1}^n) - \Delta t S_{i,j}^n$$

# Modelo hidrodinâmicos para propagação da cheia de ruptura

- > Do ponto de vista do engenheiro, qual a informação necessária?
- > Características da cheia em cada secção do rio a jusante:
  - > Distância à barragem
  - > Vazões máximas
  - > Tempos de chegada da cheia
  - > Tempo de ocorrência do pico
  - > Velocidades máximas do escoamento
  - > Níveis máximos em aglomerados populacionais



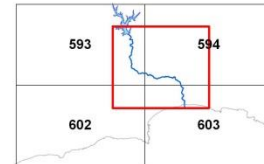
# Modelo hidrodinâmicos para propagação da cheia de ruptura

Caudal máximo $Q_{m\acute{a}x}$ ( $m^3/s$ )	Velocidade máxima $V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	Nível máximo $N_{m\acute{a}x}$ (m)	Instante de chegada da Frente de Onda de Inundação $T_{Cheg}$ (h:m)	Instante de chegada do Pico da Onda de Inundação $T_{Nm\acute{a}x}$ (h:m)	Duração da fase crítica da Inundação $T_{Crit}$ (h:m) = Tempo para que se restabeleçam os níveis iniciais	Altura máxima da onda $h_{m\acute{a}x}$ (m)
1 476,00	3,46	126,82	00h03	00h18	00h31 (00h03 - 00h34)	6,43
1 233,55	1,99	118,61	-	-	-	4,39
1 008,72	3,40	113,90	00h06	00h21	00h34 (00h06 - 00h40)	5,34
821,94	4,02	110,27	-	-	-	6,64
773,08	3,88	103,66	00h08	00h24	00h42 (00h08 - 00h50)	5,40
736,66	3,29	99,46	-	-	-	7,74
685,94	2,69	91,37	00h10	00h27	00h48 (00h10 - 00h58)	5,31
620,89	4,08	87,10	-	-	-	6,37
611,64	4,10	82,37	00h12	00h30	00h54 (00h12 - 01h06)	6,01
592,13	3,16	77,16	00h13	00h33	00h56 (00h13 - 01h09)	5,00
542,74	2,18	73,59	00h14	00h36	00h58 (00h14 - 01h12)	4,56
529,76	2,66	71,85	-	-	-	4,82
484,00	2,36	67,50	00h16	00h42	01h10 (00h16 - 01h26)	4,47
448,04	1,93	62,72	-	-	-	3,62
414,38	1,94	60,21	00h18	00h54	01h16 (00h18-01h34)	4,82
391,11	2,55	56,58	-	-	-	4,90
375,94	2,50	51,84	00h24	01h06	01h38 (00h24-02h02)	4,75
365,85	3,18	47,14	-	-	-	5,37
358,14	2,53	39,59	00h34	01h12	01h40 (00h34-02h14)	4,04
350,44	2,65	32,78	-	-	-	3,85
341,81	3,33	27,53	00h44	01h24	01h42 (00h44-02h26)	4,98
336,58	3,43	18,98	-	-	-	4,86
331,93	2,49	10,48	-	-	-	4,18
326,30	2,82	3,24	01h00	01h36	01h40 (01h00-02h40)	3,24



# Resultados

## MAPA DE INUNDAÇÃO DA BARRAGEM DA BRAVURA



Folhas da Carta Militar de Portugal  
Esc. 1: 25 000, IGeoE

### Legenda:

- Barragem de Bravura
- Limite de Município
- Limite de Freguesia
- Cenário I - Rotura Extrema da Barragem
- Cenário II - Ocorrência da Cheia de Dimensionamento do Descarregador de Cheias

Base Cartográfica: Carta Militar de Portugal (Série M888)  
Esc. 1: 25 000

Sistema de Projeção ETRS89  
Unidades (m)

0 1 km

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Plano de Emergência Interno da Barragem da Bravura

TÍTULO: Áreas de inundação	NÚMERO: 1
DATA: Janeiro de 2014	ESCALA: 1: 25 000

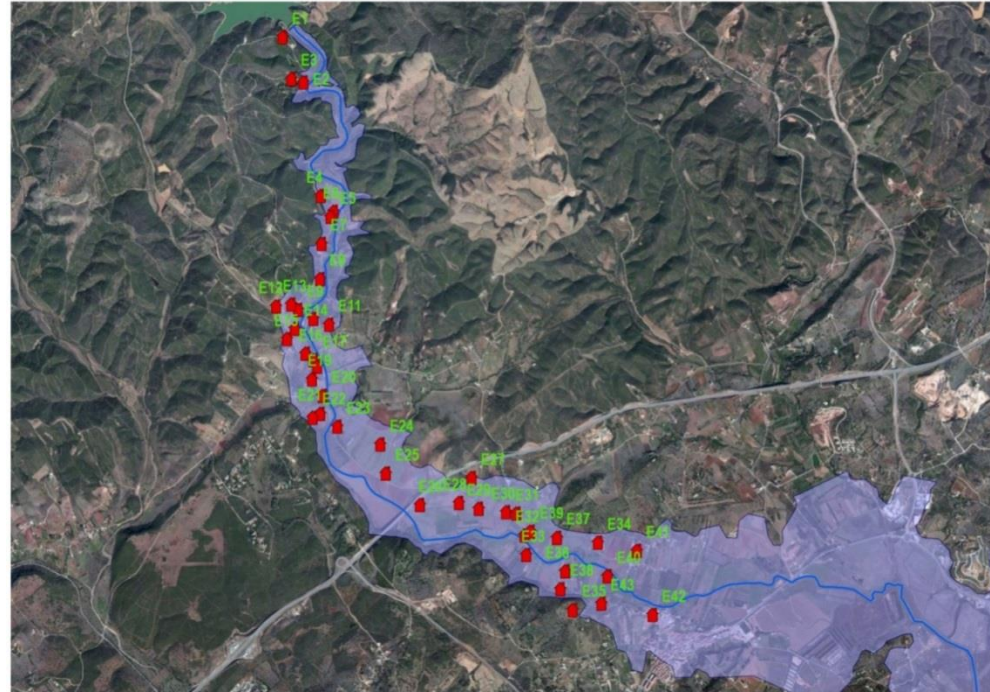


# Avaliação das consequências

- > Dados de fonte:
  - > Cartas a diversas escalas (1:25 000, em Portugal)
  - > Fotos aéreas e de satélite (Google Earth)
  - > Trabalho e levantamentos de campo envolvendo participação dos serviços municipais de protecção civil
  - > Dados estatísticos (recenseamentos gerais da população e da habitação)



# Avaliação das consequências



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- > Apesar do aumento da segurança das barragens verificado a nível internacional, é impossível garantir uma situação de risco nulo dando origem a acidentes gerados por eventos naturais ou provocados bem como por anomalias no comportamento
- > Assim, são empreendidos esforços para a gestão do risco associado às barragens, em duas fases: i) avaliação da probabilidade de ruptura e das respetivas consequências e ii) implementação de medidas apropriadas, quando o risco residual não é aceitável

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- > Por outro lado a ruptura de uma barragem tem uma probabilidade de ocorrência extremamente reduzidas MAS as consequências são usualmente catastróficas
- > A avaliação das consequências implica o estudo da cheia de ruptura (brecha, vazão efluente e propagação no vale a jusante), e a caracterização da vulnerabilidade das zonas de inundação, em particular a estimativa do n<sup>o</sup> de vítimas
- > Existem diversos modelos de simulação da cheia que diferem na sua complexidade, disponibilidade de dados, que têm influência na qualidade dos resultados. A apresentação desta abordagem será apresentada no decorrer deste curso



# ***Curso de treinamento do PAE***

***Gestão do risco de ruptura de barragens e avaliação das consequências***

***Modelagem da brecha de ruptura e do hidrograma efluente da barragem em ruptura***

***Obrigada pela atenção***