

CAPÍTULO 7

EMERGÊNCIAS E GESTÃO DO RISCO*

7.1. RISCO A JUSANTE DE BARRAGENS

7.1.1. Introdução

As barragens construídas pelo Homem, e os volumes de água por elas retidas, constituem potenciais factores de risco no sentido de poderem vir a ser a origem de acidentes graves que ponham em perigo a segurança de pessoas e bens nos vales a jusante. A segurança das barragens, nomeadamente as condições em que as mesmas são exploradas, está, assim, intimamente associada à segurança nos vales onde estão localizadas.

Historicamente, os vales e as respectivas planícies férteis nas margens dos rios constituíram zonas de atracção para as populações se fixarem. Os benefícios desta ocupação têm como contrapartida os custos associados aos riscos naturais próprios dos vales. As cheias, não obstante os efeitos positivos que têm para a agricultura, constituíram sempre um grande perigo para os habitantes dos vales. Este perigo é fortemente minimizado sempre que o ritmo de ocorrência das cheias naturais é empiricamente apreendido e transmitido através das gerações. Este conhecimento é a base dos procedimentos intuitivos de protecção contra as cheias adoptados naturalmente pelas populações em risco.

Contudo, as cheias violentas, súbitas ou inesperadas, permanecem como sendo o evento mais temido, perigoso e catastrófico para os habitantes dos vales. Com barragens em exploração num vale, a cheia potencialmente mais perigosa e devastadora é a resultante de acidentes nas barragens. Salienta-se, no caso extremo, o esvaziamento de uma albufeira por efeito da ruptura, total ou parcial, da respectiva barragem. Assim, cada barragem introduz no vale a

* António Betâmio de Almeida

jusante um factor de incerteza relacionado com a possibilidade, mesmo que remota, de ser, em resultado de um acidente, a causa de cheias catastróficas.

Felizmente, os avanços da engenharia têm vindo a fazer diminuir, de modo muito significativo, a taxa expectável de rupturas nas grandes barragens que têm vindo a ser construídas mais recentemente.

Alguns acidentes paradigmáticos que ocorreram na Europa, na segunda metade do século XX, obrigaram a reflectir no risco nos vales a jusante e na prevenção contra os potenciais efeitos de rupturas de barragens. Citam-se, a título de exemplo, as mais importantes:

- Barragem de Malpasset, em França, de betão (arco) com 61 m de altura, rompeu em 1959, provocando a cheia induzida 421 mortes ao longo dos 11 km de vale até ao Mediterrâneo.
- Barragem de Vega de Tera, em Espanha, de contrafortes com 34 m de altura, colapsou parcialmente, em 1959, provocando a morte de 144 pessoas no vale a jusante.
- Barragem de Vaiont, em Itália, de betão (arco) com 265 m de altura, foi galgada, em 1963, pela água inicialmente armazenada na albufeira ($150 \times 10^6 \text{ m}^3$), em resultado do deslizamento de cerca de $240 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rocha de uma encosta, provocando a morte a cerca de 2 600 pessoas no vale a jusante.

Não obstante o menor grau de mediação a que estes acontecimentos estavam sujeitos à época, a sociedade, em geral, e a comunidade técnico-científica associada à construção e exploração das barragens reagiram de forma decidida a este tipo de ameaça.

Regista-se, como muito relevante, as acções sistemáticas, a nível mundial, do ICOLD (International Committee on Large Dams) nos domínios da recolha de informação e tratamento estatístico, de análise de possíveis causas de acidentes e incidentes e de recomendações e critérios de projecto e exploração visando a melhoria da segurança das barragens e, de forma indirecta, dos vales a jusante.

O risco induzido pelas barragens e a forma de o controlar nos vales a jusante podem ser objecto de dois tipos extremos e opostos de reacção:

- uma confiança extrema na segurança das barragens e na respectiva exploração, admitindo que todos os aspectos foram adequadamente considerados durante o projecto (ponto de vista do especialista), ou em resultado de uma fé absoluta no poder da ciência e da tecnologia (ponto de vista do crente na eficácia do progresso tecnológico);

- uma forte suspeita, que pode degenerar em aversão e terror, pelas consequências incertas e desconhecidas induzidas por uma ameaça tecnológica e pelas alterações nas condições ambientais naturais, impostas aos cidadãos que habitam o vale a jusante.

A partir da década de 60, começaram a surgir regulamentos e procedimentos de segurança de barragens envolvendo, explicitamente, os efeitos nos vales a jusante das mesmas e a prevenção contra os potenciais efeitos de acidentes, incluindo sistemas de aviso prévio e planos de evacuação das populações a jusante. A eficácia destes sistemas foi reconhecida nos acidentes, entre outros, das barragens de Baldwin Hill (1963) e San Fernando (1971), nos EUA. Por seu turno, no acidente da barragem de Orós (1960), no Brasil, a inexistência deste tipo de medidas de protecção pode ter sido responsável por 50 mortos. No entanto, foi ainda possível com a ajuda das forças armadas, evacuar milhares de habitantes.

Desde a década de 70 até ao presente, a evolução na segurança dos vales tem sido sempre no sentido de melhorar os sistemas de protecção civil bem como os modos de participação e de informação pública, complementando, assim, as acções, cada vez mais elaboradas, de segurança estrutural e hidráulico-operacional nas barragens.

Os meios de informação e o tipo de sociedade actual, extremamente sensível à discussão dos aspectos de segurança ambiental, tornaram a segurança e os riscos tecnológicos um assunto de interesse público cuja discussão aberta passou a ser incontornável.

Entretanto, milhares de barragens foram sendo construídas, enquanto outras vão envelhecendo sujeitas a uma potencial deterioração de materiais e perda de capacidade de resistência estrutural ou a alterações hidrológicas que podem tornar inadequados os órgãos de segurança inicialmente construídos. No entanto, vivem, em todo o Mundo, nos vales a jusante, milhões de pessoas, nomeadamente em zonas urbanas ou densamente ocupadas.

Segundo ICOLD, 1997, a maioria das vítimas mortais de todos os acidentes em barragens que rompem envolvem barragens com uma altura inferior a 30 m constituindo este tipo de barragem o de maior risco no futuro próximo (ICOLD, 1997, pg. 132).

Nas sociedades democráticas e participativas contemporâneas, o poder da comunicação social e da opinião pública, a liberalização dos regimes económicos, incluindo a privatização da propriedade e exploração de grandes infra-estruturas de interesse público, e a responsabilização pelos danos resultantes de acidentes tecnológicos, são factores de pressão muito fortes que tornaram a segurança nos vales a jusante de barragens um domínio emergente

de interesse público que é reconhecido pelos novos regulamentos de segurança que têm vindo a ser adoptados nos países desenvolvidos, incluindo o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) em vigor em Portugal (Decreto-Lei nº 11/90).

Nas décadas de 80 e 90, são propostos e desenvolvidos novos conceitos e metodologias integradas para a segurança nos vales a jusante, conjugando os conhecimentos de engenharia das barragens com novas tecnologias de apoio à decisão e à protecção civil, com metodologias de ciências sociais aplicadas, nomeadamente a sociologia e a psicologia social e, finalmente, com o ordenamento do território e a gestão da ocupação do vale tendo em conta os riscos de ocorrência de cheias.

O principal conceito é o de sistema de segurança integrada baseado em três vectores fundamentais:

- Técnico-Operacional;
- Monitorização-Vigilância;
- Gestão do Risco-Emergência.

O componente mais recente, que complementa e consolida os tradicionais sistemas de segurança é um componente importante para a segurança dos vales a jusante de barragens. Ele introduz a consideração da resposta às situações de Emergência, no sentido de ocorrência de qualquer situação crítica ou acidente imprevisto que coloque em perigo a segurança da barragem e do vale. Esta resposta deverá ser planeada e enquadrada por procedimentos especiais. Obviamente, as situações de emergência nas barragens podem constituir uma séria ameaça à segurança dos vales a jusante.

O outro componente, a Gestão do Risco, é o conceito que tem sido adoptado para definir o enquadramento e a aplicação de metodologias de resposta aos problemas de segurança integrada da barragem e do vale envolvendo, a necessidade de avaliação e manutenção de níveis de risco, quer na fase de projecto, quer nas fases de construção e exploração, de mitigar danos e de promover a protecção nos vales, face à inevitabilidade de uma segurança não absoluta ou sujeita a incertezas.

No presente capítulo, apresentam-se conceitos e metodologias relacionados com a segurança e o risco de barragens e dos vales a jusante que, progressivamente, vão sendo objecto de atenção nos regulamentos e normas de segurança e no projecto e exploração de barragens. Incluem-se alguns procedimentos propostos para a aplicação do Regulamento de Segurança de Barragens de Portugal.

7.1.2. Âmbito

Impõe-se uma nota explicativa adicional relativamente ao âmbito do tema Emergências e Risco no contexto do tema geral, já há muito consolidado, da Segurança de Barragens. A razão básica para o interesse e o desenvolvimento apreciável do referido tema, a nível mundial, resulta da aceitação dum novo paradigma entre as décadas de setenta e oitenta: a aceitação como hipótese metodológica técnico-operacional da possibilidade de ocorrência de acidentes e de cenários de ruptura das barragens, independentemente da respectiva probabilidade, e da análise dos consequentes danos. Trata-se de uma modificação que ocorreu de modo gradual, mas fortemente pressionada por alguns eventos pontuais, que abriu novas perspectivas de desenvolvimentos técnico-científicos e da organização dos sistemas de segurança, em particular no que concerne a interacção das tecnologias de engenharia com os comportamentos sociais das populações e com as técnicas de previsão e de protecção eficaz das mesmas. Em nosso entender esta evolução veio completar a estrutura da segurança com um componente não menos importante do que os restantes já tradicionalmente aceites.

O risco nos vales a jusante de barragens é, em geral, considerado nos seguintes domínios principais:

- nos métodos de avaliação de soluções alternativas de projecto e de dimensionamento, em obras novas e de reforço ou reabilitação, introduzindo critérios baseados em riscos admissíveis;
- no cumprimento dos regulamentos e normas de segurança mais actualizados que graduam o nível dos procedimentos de segurança, exigidos durante as diversas fases da vida da obra, pelo risco induzido a jusante;
- no estabelecimento de sistemas, mais completos e eficazes, de protecção das populações nos vales, nomeadamente no que concerne o planeamento de acções orientadas para eventuais fases de emergência, incluindo a informação pública;
- na fundamentação e desenvolvimento de metodologias para implementação de sistemas integrados de defesa não-estrutural, nos vales e bacias hidrográficas, através da aplicação de critérios de ocupação do solo, tendo em conta os zonamentos de riscos potenciais

hidrodinâmicos resultantes dos diferentes tipos de cheias que possam ocorrer no vale;

- no enriquecimento dos instrumentos de apoio à decisão, no que concerne a partilha de responsabilidades da sociedade, nas fases de discussão e de negociação relativas à construção de infra-estruturas hidráulicas ou outras tendo em conta a percepção pública dos riscos (e a progressiva resistência manifestada) e a melhor forma de caracterizar, objectiva e subjectivamente, os mesmos;
- na resposta à evolução das sociedades democráticas no sentido da participação e discussão pública nas decisões do desenvolvimento e nas questões ambientais;
- e, finalmente, na tendência que se desenvolveu nas últimas duas ou três décadas nas sociedades ocidentais, em particular nos EUA, que é o crescente grau de responsabilização e vitimização envolvendo acidentes, reais ou potenciais.

O presente capítulo constitui, assim, uma introdução a este domínio emergente de actuação em defesa de uma sociedade tecnológica mais preparada para compreender e assumir os riscos inerentes ao tipo de progresso ou desenvolvimento dominante¹. Esta matéria foi objecto de um projecto fornecido pela NATO (Projecto NATO PO-FLOOD RISK) desenvolvido em Portugal (1994-99)

7.1.3. Segurança de barragens e vales

Um dos deveres básicos da Engenharia é o de evitar o mais possível a ocorrência de acidentes graves nas obras construídas, nomeadamente nas barragens. Decorre deste dever a aplicação das melhores práticas possíveis ou conhecidas no projecto, construção e exploração das barragens, incluindo a consideração do conceito de segurança e a necessidade da respectiva avaliação.

¹ O projecto foi executado por investigadores do LNEC e do IST e teve o apoio do Instituto da Água, da Electricidade de Portugal e do Serviço Nacional de Protecção Civil. Podem ser consultados textos produzidos pelos membros da equipa do projecto NATO e por outros, nas seguintes duas publicações:

- Dams and Safety Management at Downstream Valleys, Ed. A. Betâmio de Almeida e Teresa Viseu, Balkema, 1997.
- Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens. Coordenação de M. Alzira Santos e Delta Silva, Edição NATO PO-FLOODRISK, LNEC, Lisboa, 1997.

A segurança (da barragem) pode ser definida como a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes (RSB, artigo 3º).

Do ponto de vista lexical, a palavra segurança traduz o grau de firmeza ou de certeza na concretização da referida capacidade mas, também, o grau de confiança ou de tranquilidade de espírito relativamente ao comportamento da barragem.

Podemos, assim, considerar como adequado caracterizar a segurança da barragem a dois níveis distintos (Fig. 7.1):

- Nível Objectivo, de acordo com a quantificação tecnicamente possível do grau de certeza na capacidade de evitar incidentes e acidentes;
- Nível Subjectivo, de acordo com a caracterização da percepção da confiança, individual e social, suscitada por uma determinada barragem ou conjunto de barragens e do relativo grau de incerteza na ocorrência de acidentes.

No que concerne o vale a jusante, de uma ou mais barragens, e os respectivos habitantes e bens materiais económicos ou ambientais, o conceito de segurança está associado à possibilidade de ocorrência de cheias, inesperadas, súbitas e muito intensas (por vezes designadas por macro-cheias), resultantes de eventuais incidentes e acidentes nas barragens a montante. Neste contexto, a segurança no vale envolve dois escalões:

- Escalão Barragem, como sendo a origem potencial de cheias perigosas, em resultado de múltiplas causas possíveis;
- Escalão Vale, como sendo a zona de impacto das cheias resultantes dum eventual comportamento inadequado de uma ou mais barragens a montante.

Cada um dos escalões engloba os dois níveis atrás referidos: o nível objectivo e o nível subjectivo.

O nível objectivo da segurança da barragem consubstancia-se através das práticas e dos critérios adequados de projecto, construção e exploração e da capacidade de observação e vigilância (monitorização) do comportamento da barragem.

De acordo com o RSB (artigo 3º), a segurança da barragem compreende os aspectos estruturais, hidráulicos operacionais e ambientais:

- Segurança estrutural, corresponde à capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento estrutural perante as acções e outras influências, associadas à construção e exploração e a ocorrências excepcionais;

- Segurança hidráulica, corresponde à capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento hidráulico dos órgãos de segurança e exploração e dos sistemas de impermeabilização, de filtragem e de drenagem;
- Segurança operacional, corresponde à capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento relacionadas com a operação e funcionalidade dos equipamentos dos órgãos de segurança e exploração;
- Segurança ambiental, corresponde à capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento relativas à limitação de incidências prejudiciais sobre o ambiente, designadamente sobre os meios populacionais e produtivos.

A segurança ambiental inclui, entre outros aspectos, a preocupação com as incidências sobre os meios populacionais e produtivos localizados nas áreas sob o efeito potencial da barragem (incluindo a albufeira), nomeadamente:

- no vale a montante, em particular, na fase de construção, a necessidade de deslocar habitantes e meios de produção por efeito da inundação provocada pela criação da albufeira;
- no vale a jusante, em particular, na fase de projecto e de exploração, a necessidade de prever as consequências de um acidente, independentemente da probabilidade da sua ocorrência.

A definição dos níveis de segurança na barragem, a consideração da segurança no vale a jusante, relativamente aos efeitos de eventuais falhas na barragem, pode justificar a introdução de técnicas de análise de risco nos critérios de dimensionamento estrutural e hidráulico. O nível (objectivo) da segurança da barragem passa, assim, a depender do valor ou importância das consequências expectáveis de um possível acidente compatível com o referido nível de segurança.

A especificação de níveis de segurança nos vales a jusante, relativamente aos efeitos de acidentes em barragens, incluindo ocorrências catastróficas prováveis, implica, inevitavelmente, a adopção de medidas não estruturais de protecção baseadas, fundamentalmente, em zonamentos e cartas de risco, planos de emergência, sistemas de alerta e aviso, exercícios e um ordenamento consequente da ocupação do vale.

Na segurança de barragens e dos vales a jusante, o nível subjectivo é o mais complexo na medida em que abrange a percepção individual e a percepção dos grupos de pessoas abrangidas pelos potenciais efeitos de um acidente.

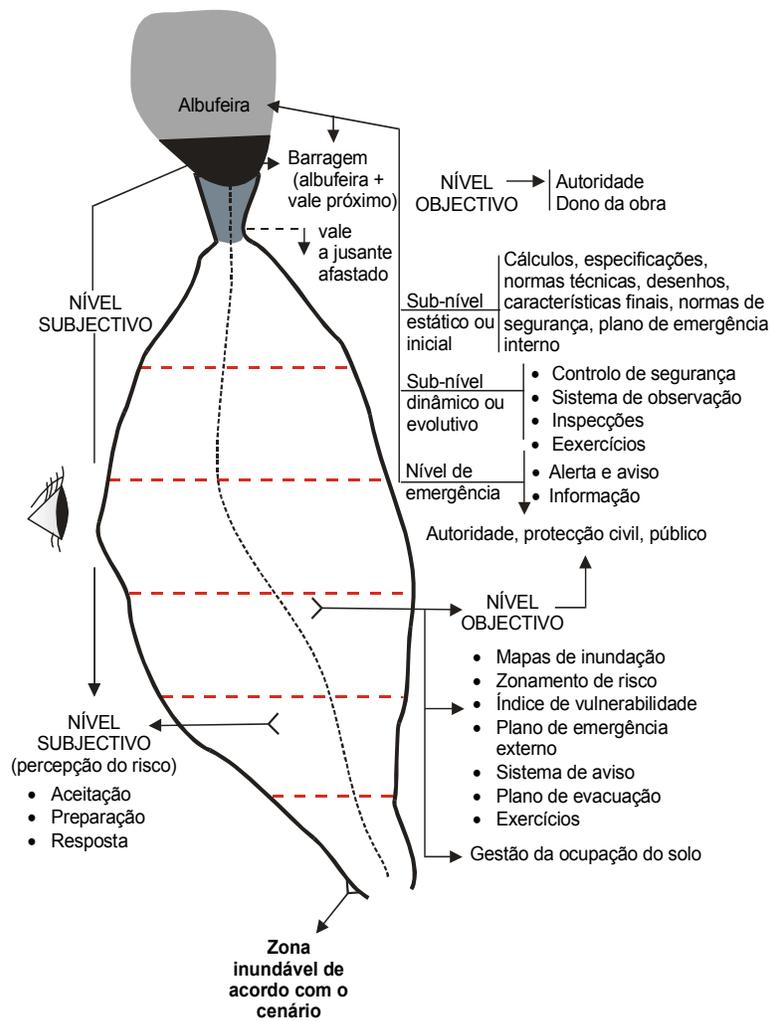


Figura 7.1 - Segurança de barragens e vales a jusante. Níveis objectivo e subjectivo.

Este nível subjectivo é função de um conjunto de factores sociais e físicos e influenciará, de modo significativo, o processo de segurança tendo em conta a forma como afectará:

- o diálogo e a informação pública;
- a resposta aos sistemas de aviso e aos planos de emergência;

- a opinião sobre as barragens e as tomadas de decisão sobre as mesmas, nomeadamente futuras obras de reforço ou reabilitação.

Para compreender melhor a razão dos conflitos sociais e dos problemas induzidos por este tipo de infra-estruturas, **metodologias multidisciplinares emergentes** precisam de ser desenvolvidas e aplicadas.

7.1.4. Sistema de segurança integrada

O conceito emergente para contribuir para uma resposta mais adequada ou completa ao problema do controlo da segurança das barragens em vales, e dos vales com barragens, é, conforme já foi referido anteriormente, o designado **Sistema de Segurança Integrada**. Este sistema baseia-se na consideração do suporte da segurança global das barragens por três pilares operacionais fundamentais (Fig. 7.2):

- **Técnico-Operacional;**
- **Monitorização-Vigilância;**
- **Gestão do Risco-Emergência.**

O pilar técnico-operacional compreende as medidas de controlo de segurança estrutural, hidráulica e operacional recomendadas a que devem ser aplicadas nas fases de projecto, construção, exploração e abandono, de acordo com os critérios e as normas técnicas actualizadas.

O pilar de monitorização-vigilância compreende as medidas de observação ou monitorização estrutural e hidráulica e, em especial no contexto em causa, as medidas especiais de vigilância. Estas últimas medidas incluem os sistemas de inspecção, detecção, previsão e análise orientados para a prevenção a curto/ /médio prazo de emergências e de controlo de eventuais situações de crise².

Finalmente, o pilar de gestão do risco e de emergência pode ser considerado como a contribuição complementar, introduzida a partir da década de oitenta³, ao tripé de suporte à segurança. Este subsistema inclui a implementação e preparação de todas as medidas e procedimentos necessários para controlo do risco e fazer face, ou dar resposta, aos eventuais acidentes ou incidentes que possam ocorrer numa barragem.

² Conforme é estipulado no artigo 17º, ponto 2 das Normas de Observação e Inspeção de Barragens.

³ Na Suíça, por exemplo, este conceito começou a ser implementado oficialmente a partir de 1985.

Um sistema deste tipo deve integrar adequadamente os três pilares tendo em vista o objectivo principal que é o de controlar a segurança do sistema barragem-vale e garantir a protecção dos vales da forma mais eficaz possível (Fig. 7.2).

O sistema de vigilância, em particular nas barragens mais importantes ou de nível de risco mais elevado, deve compreender, para além dos sistemas de observação a longo e a médio prazo, subsistemas de detecção especiais que possibilitem a previsão a curto prazo de situações perigosas conducentes a situações de emergência ou de crise.

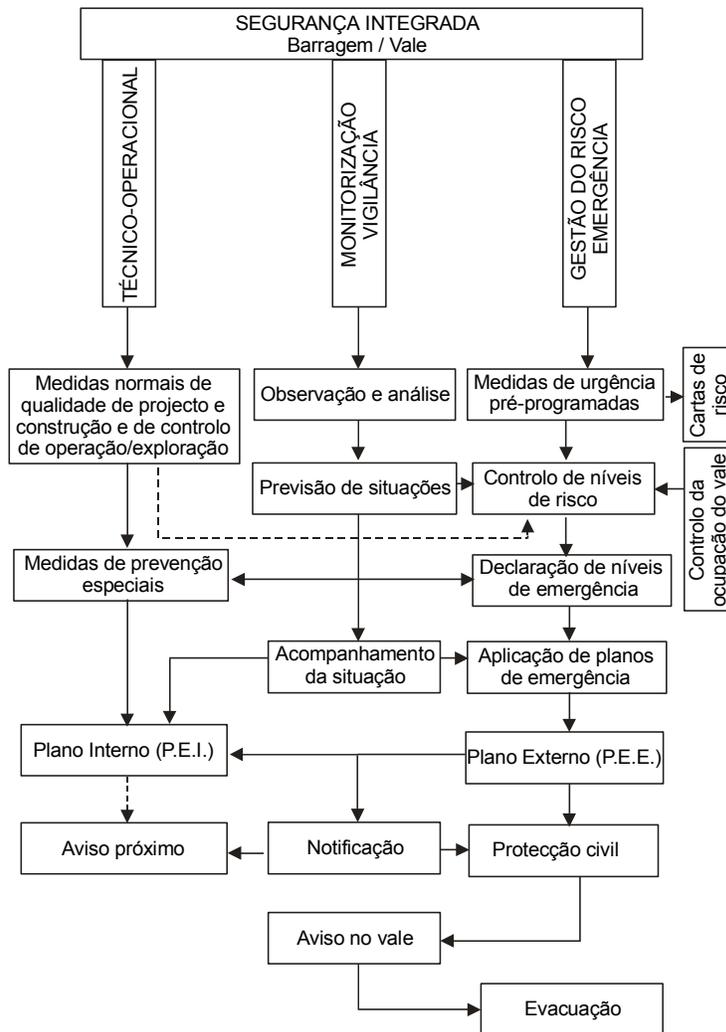


Figura 7.2 - Esquema geral do sistema de segurança integrada aplicado ao conjunto barragem-vaies.

O esforço técnico a desenvolver no pilar da monitorização-vigilância deve incluir o desenvolvimento de novas técnicas de previsão especiais no sentido de antecipar o mais possível a detecção, com elevado grau de fiabilidade, de um eventual evento perigoso ou situação de crise (eventualmente desencadeando no âmbito dum plano de emergência a declaração da **situação de alerta**) por forma a aumentar de modo significativo o tempo total de alerta, de aviso e de evacuação de populações a jusante.

Os pilares do sistema devem ser organizados e testados periodicamente por forma a ser possível o funcionamento integrado, de acordo com estratégias pré-definidas, por forma a manter o controlo do nível de risco e, em caso de emergência, diminuir o número de vítimas resultantes de um acidente numa barragem. As acções para atingir estes dois objectivos específicos são especialmente concretizadas pela organização e execução da gestão do risco e pelos planos de emergência.

7.2. IMPACTES, RISCO E PROTECÇÃO DO VALE A JUSANTE

7.2.1. Impactes sociais dos riscos das barragens

A engenharia tenta identificar os impactes “reais ou objectivos” incluindo os riscos ou ameaças decorrentes da construção e exploração de barragens de modo a quantificá-los e controlá-los.

Contudo, a situação real, no seio dos grupos sociais sujeitos aos impactes de barragens, é mais complexa:

- as pessoas sob a influência física de uma barragem “construem” subjectivamente os seus riscos. Riscos baseados na sua própria percepção;
- estes riscos podem ter diferentes naturezas e valores;
- ignorar esta parte do problema põe definitivamente em causa a possibilidade de se atingir um consenso aceitável.

De um ponto de vista técnico, da engenharia, os impactes sociais induzidos por barragens podem ser agrupados do seguinte modo:

- impactes imediatos (1ª ordem), decorrentes da ocupação do vale a montante da barragem pela albufeira (embalse) e a eventual inundação de aglomerados e transferência de populações;

- impactes de alteração (2ª ordem), decorrentes da alteração do regime natural das cheias ou dos caudais no vale resultantes da exploração da barragem;
- impactes diferidos (3ª ordem), decorrentes da ameaça de uma eventual falha de segurança na barragem e da conseqüente ruptura total ou parcial desta.

Os estudos de risco e de emergência no âmbito da segurança de barragens e de vales podem ter diferentes objectivos e metodologias consoante os objectivos e fases de intervenção: durante o projecto, face a eventuais incidentes durante a construção ou a exploração, para cumprimento de procedimentos regulamentares (RSB) e elaboração de planos de emergência ou para apoio à tomada de decisões numa fase de emergência.

7.2.2. Risco efectivo

A impossibilidade de garantir às barragens uma segurança completa e permanente, durante os respectivos períodos de vida da obra (período que abrange as fases desde a construção ao abandono), introduz o conceito de risco. Este conceito, contudo, tem diversas definições e o termo risco é encarado de maneiras diferentes para os especialistas de segurança e para o cidadão comum.

O Regulamento de Segurança de Barragens (artigo 3º) distingue o risco efectivo e o risco potencial.

O risco efectivo corresponde ao produto do risco potencial pela probabilidade de ocorrência de acidente com ele relacionado, num determinado período de tempo ou de vida da obra.

O risco potencial corresponde à quantificação das conseqüências de um acidente (e.g. o número de vítimas no vale a jusante), independentemente da probabilidade da sua ocorrência.

7.2.3. Gestão do risco

A gestão do risco é um conceito operacional que abrange os processos de avaliação do risco e de mitigação do risco de uma forma consistente, controlável e lógica. A gestão do risco envolve metodologias e procedimentos específicos aplicados basicamente a quatro tipos de acções:

- Identificação e caracterização dos eventos perigosos (naturais ou não) e determinação da respectiva probabilidade de ocorrência.

- Análises de risco, admitindo a ocorrência de eventos, o desenvolvimento de cenários de ruptura e a avaliação das respectivas probabilidades, bem como a avaliação das respectivas consequências, por forma a ser possível quantificar o risco da barragem e compará-lo com níveis de referência ou de aceitação social.
- Redução dos riscos, estudando e implementando medidas de protecção estruturais ou não estruturais que permitam reduzir a probabilidade de ruptura e/ou a gravidade dos efeitos a jusante.
- Resposta a crises, preparando as medidas a implementar no caso de ocorrer uma situação de emergência ou de crise, incluindo a assistência durante e após uma catástrofe.

As primeiras duas acções inserem-se no sub-processo Avaliação do Risco e as duas restantes no sub-processo Mitigação do Risco.

7.2.3.1. Gestão do risco interno

A gestão do risco interno, ou no escalão barragem, tem por objectivo fundamental a implementação e manutenção de medidas de segurança e protecção por forma a manter ou diminuir o nível de risco associado à barragem, através de acções concertadas que diminuam a probabilidade de ocorrer um acidente na estrutura da barragem, nomeadamente o respectivo galgamento e(ou) ruptura, provocando uma cheia perigosa para o vale a jusante.

Do ponto de vista teórico, a gestão do risco interno terá por objectivo o controlo da segurança da barragem, através do controlo da probabilidade p_2 , referida no ponto 7.2.2, tendo em vista o controlo do nível de risco adoptado.

Esta gestão deverá atender aos seguintes pressupostos gerais:

- deve basear-se na aplicação de métodos de análise e critérios de projecto e construção e exploração considerados os mais adequados ou necessários;
- deve basear-se na interpretação do sistema de observação incluindo o sistema de inspecções periódicas, por forma a propor e realizar as intervenções adequadas;
- deve basear-se na previsão e caracterização adequada dos potenciais eventos e situações que constituam um perigo para a segurança estrutural e operacional da barragem (e.g. cheias afluentes anormais,

comportamento estrutural anómalo, avarias em equipamentos, entre outros);

- deve ter em conta as características específicas da barragem (e da albufeira), incluindo o equipamento hidromecânico essencial para a segurança da mesma;
- deve ter em conta as características de exploração previstas, incluindo o modelo de organização das actividades de exploração e, em particular, os automatismos e os meios humanos responsáveis;
- deve incluir medidas de protecção de uma zona do vale próxima da barragem.

Com base no levantamento (listagem) das situações potencialmente mais perigosas (eventos naturais ou provocados) para a segurança da barragem destacando-se, de entre estes as cheias afluentes anormalmente intensas, deverão ser estudadas e definidas as acções ou procedimentos mais eficazes tendentes a evitar um acidente grave e, em particular uma ruptura da barragem.

A organização das medidas a tomar pelo dono da obra nas situações de emergência, no âmbito da gestão do risco interno, através da equipa técnica ou do técnico responsável pela exploração da barragem e com a eventual intervenção da Autoridade em situações especiais, é materializada no **plano de emergência interna** (PEI) e nas situações correntes de exploração durante vida da obra nas **normas de segurança** das barragens (artigo 32º).

O referido plano de emergência deverá englobar os seguintes três aspectos:

- **Detecção** dos eventos perigosos;
- **Tomada de decisões**, adequadas face ao evento detectado;
- **Notificação** de autoridades e das populações (zona próxima do vale), de acordo com um plano pré-estabelecido.

A detecção eficaz do evento perigoso envolve a **previsão** de eventos naturais ou ambientais (e.g. cheias ou eventos hidrológicos anormais, deslizamento de uma encosta na albufeira ou outros) e de anomalias estruturais ou operacionais graves (e.g. deslocamentos anormais da estrutura, infiltração e erosão interna ou outras). A previsão estará em grande parte dependente do **sistema de vigilância** (automático ou não) associado ao sistema de observação da barragem e da albufeira (e.g. níveis de água, posição de abertura das comportas e caudais efluentes) mas com capacidades e meios específicos que detectem o início de situações de disfunção graves, nomeadamente através da análise dos parâmetros considerados críticos, e

regional (e.g. informação hidro-meteorológicas na bacia hidrográfica), em função das informações recolhidas e tratadas.

Um dos objectivos fundamentais do sistema de vigilância, como componente da gestão do risco da barragem é o de garantir um tempo de análise da informação e de tomada de decisão que permita mobilizar, em tempo útil, o sistema de emergência no vale a jusante. Destaca-se, desde já, a estratégia de dilatar o tempo de alerta e de aviso o mais possível por forma a aumentar, significativamente, a capacidade de sobrevivência no vale a jusante.

O sistema de vigilância deverá incluir um **sistema de análise de dados** que permita com elevada fiabilidade diagnosticar a origem de eventuais anomalias e prever os efeitos expectáveis das anomalias na segurança da barragem.

À detecção do evento perigoso ou da possibilidade que ele ocorra com elevada probabilidade deverá corresponder uma primeira tomada de decisão: a classificação da situação de perigo para a barragem em diferentes **níveis de alerta ou emergência**.

Estes níveis (em geral três ou quatro) corresponderão a diferentes níveis de prontidão da equipa técnica de exploração e de operação do equipamento, bem como a diferentes níveis de notificação ou informação do evento às autoridades de segurança e de protecção civil.

À notificação está associado o sistema de meios de comunicação disponíveis ou preparados para o cabal cumprimento do plano de emergência interno. Para além da notificação da Autoridade e do sistema de protecção civil, há que prever o aviso à população na zona próxima do vale, eventualmente através de sirenes com sinais previamente codificados de acordo com o nível de emergência (Fig. 7.3).

À tomada de decisão deverá estar associada uma cadeia de decisão bem definida, nomeadamente no que respeita as competências dos diferentes decisores. Estas competências incluem responsabilidades a diversos níveis:

- local, barragem e vale;
- regional, bacia hidrográfica e distrito afectados;
- nacional;

em função do nível de emergência e de catástrofe potencial (Fig. 7.4).

No que respeita às decisões técnicas de segurança, o plano de emergência interno deverá, ainda, incluir informações gerais ou mesmo a indicação das medidas operacionais precisas que, face ao tipo de evento ou de situação e às características da barragem e do respectivo equipamento, garantam uma melhoria em termos de segurança, nomeadamente diminuindo a probabilidade de ruptura face à ocorrência do evento em causa. Parte das

medidas estarão incluídas nas normas de segurança da barragem, outras deverão estar descritas no plano de emergência interno (provavelmente sob a forma de anexos específicos para cada caso).

O RSB (artigo 3º) indica, expressamente, a necessidade de o dono da obra implementar medidas imediatas para diminuir o risco, nomeadamente nos casos de cheias ou sismos, de erosões provocadas pelas descargas ou da observação de comportamentos anormais.

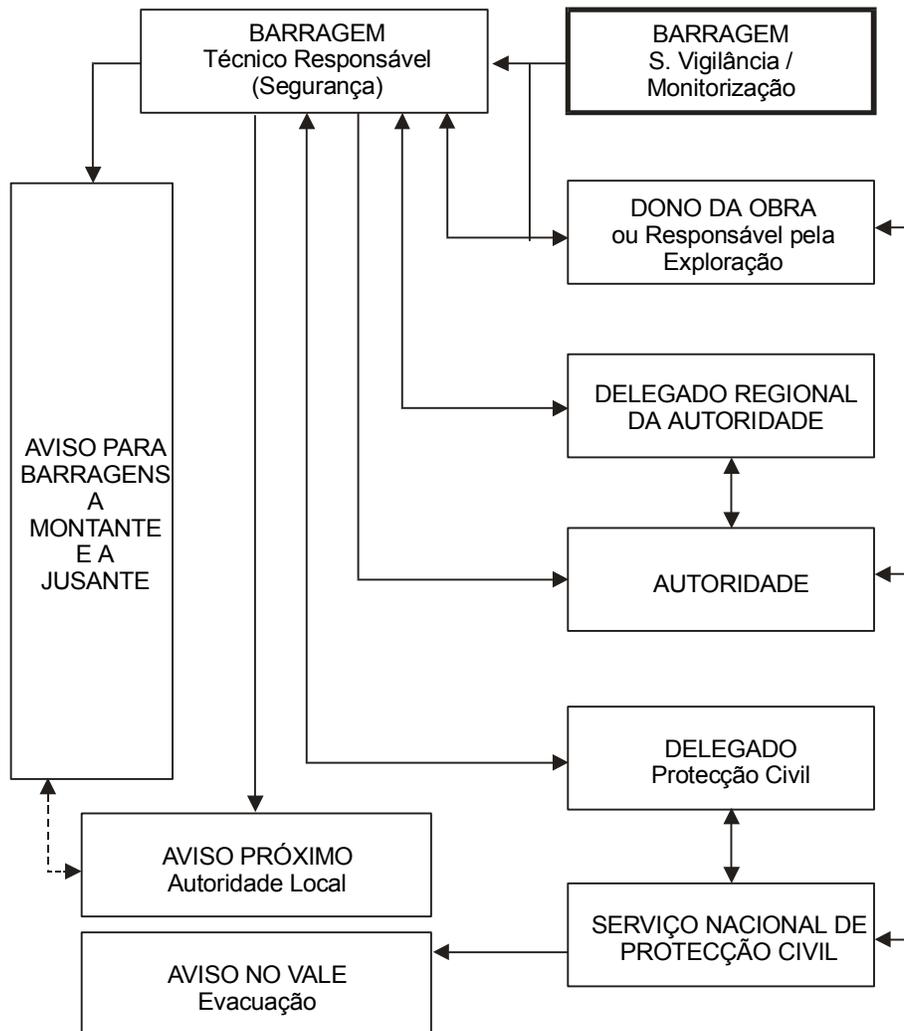


Figura 7.3 - Esquema geral do eventual sistema principal de notificação e aviso, em fase operacional de emergência, com base no

sistema de vigilância e monitorização da barragem e na decisão do técnico responsável pela segurança desta.

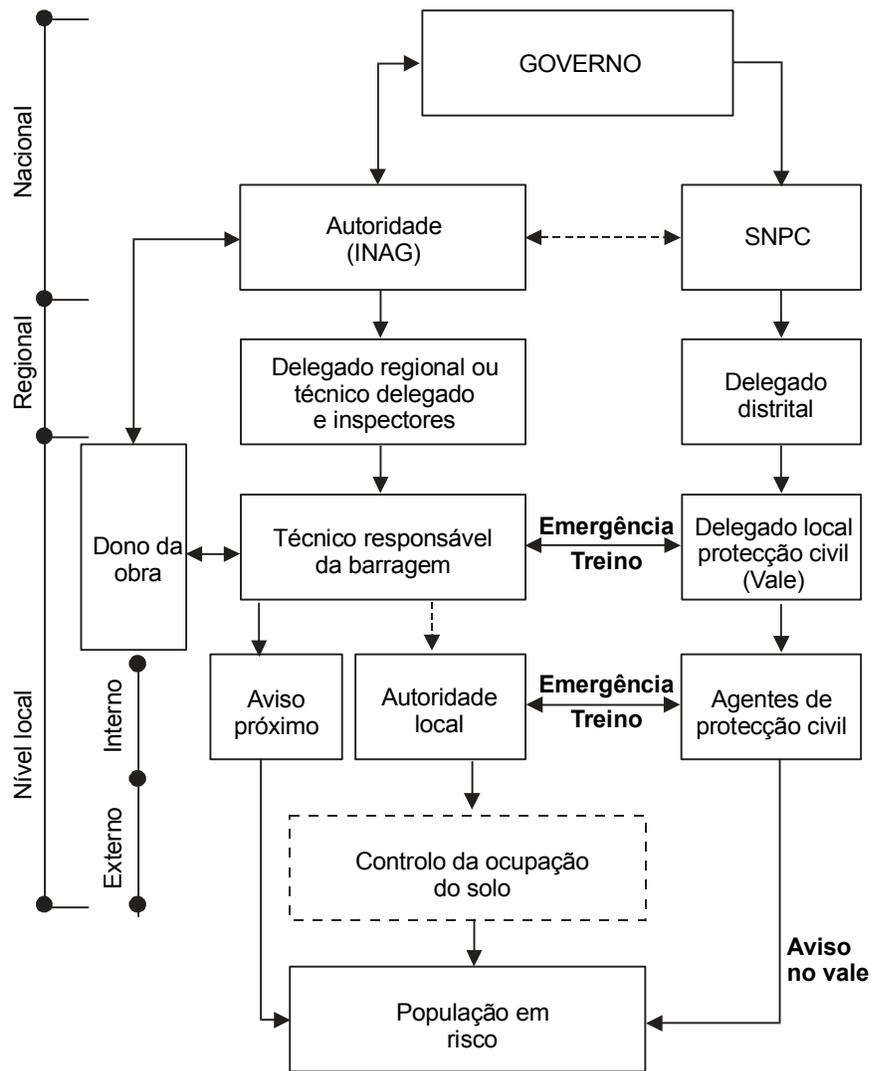


Figura 7.4 - Diferentes níveis de responsabilidade de intervenção nas acções de gestão do risco e de emergência.

De entre estas medidas salienta-se o abaixamento controlado do nível de água na albufeira o qual deverá ter em conta a segurança do vale a jusante

relativamente às descargas correspondentes. Para o cumprimento deste tipo de medidas o plano de emergência interno deverá incluir indicações precisas.

Conforme já foi referido, em situação de exploração normal, deverão também ser cumpridas as normas de segurança específicas, definidas no artigo 32º do RSB, destinadas a fazer respeitar as condições de segurança estrutural, hidráulica, operacional e ambiental. Estas normas a elaborar pelo dono da obra, deverão abranger a exploração da albufeira e a operação e conservação dos órgãos de segurança e exploração.

Todas as medidas de controlo da segurança previstas nas Normas de Exploração de Barragens (NEB) e nas Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) enquadram medidas gerais muito importantes tendentes ao controlo permanente da probabilidade correspondente ao controlo da segurança contra acidentes graves na barragem, se ocorrer um evento perigoso, nomeadamente aqueles que potencialmente provoquem cheias para o vale a jusante (onda de inundação de acordo com o RSB).

7.2.3.2. Gestão do risco externo

A gestão do risco externo, ou no escalão vale a jusante, tem por objectivo fundamental a implementação e manutenção de medidas de protecção no vale a jusante de uma barragem por forma a contribuir para a manutenção ou a diminuição do nível de risco no vale, principalmente diminuindo o número expectável de potenciais vítimas humanas e outros danos no caso de ocorrer um acidente na referida barragem.

Do ponto de vista teórico, a gestão do risco externo terá por objectivo o controlo da segurança do vale através do controlo da probabilidade de ocorrência de um determinado nível de danos no vale a jusante da barragem, no caso de ocorrer um acidente estrutural ou operacional nesta.

Esta gestão deverá atender aos seguintes pressupostos gerais:

- deve basear-se numa caracterização física adequada das potenciais cheias decorrentes de acidentes graves, com ou sem ruptura da barragem, ou das barragens, a montante;
- deve ter em conta as características específicas de ocupação de vale fora da zona próxima da barragem, no que concerne, nomeadamente, o cadastro de construções e de infra-estruturas bem como os tipos de população residente, permanente e flutuante, e transitória;
- deve ter em conta as características de vulnerabilidade das populações e bens face ao risco de cheias induzidas por acidentes na barragem, ou nas barragens, a montante;

- deve prever, para além de medidas estáticas, medidas dinâmicas e adaptativas face ao desenvolvimento sócio-económico e ocupação do vale o que pressupõe medidas de actualização;
- deve conjugar acções de protecção civil de emergência com acções de gestão operacional da ocupação do solo e de decisão no âmbito da intervenção das autoridades locais e regionais.

A caracterização física das potenciais cheias a jusante deverá ser, de acordo com o RSB, executada pelo dono da obra incluindo:

- selecção de cenários de acidente, com ou sem ruptura da barragem ou das barragens eventualmente existentes a jusante;
- selecção dos cenários de ruptura da barragem, incluindo as características especificadas das brechas e caudais afluentes e efluentes à barragem, imediatamente antes do acidente;
- elaboração de mapas de inundação no vale a jusante correspondentes aos cenários seleccionados;
- elaboração de cartas de risco hidrodinâmico baseado na caracterização da perigosidade física das cheias (altura e velocidades máximas, instantes de chegada da cheia e das alturas máximas e da quantidade de movimento).

Esta caracterização deverá constar de documento próprio que poderá ser designado por **Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico**.

Com base na caracterização das cheias ao longo do vale e, em particular, dos mapas de inundação, deverá ser caracterizada a ocupação e a vulnerabilidade do vale face ao risco de acidentes nas barragens a montante.

A caracterização física e sócio-económica da zona do vale sujeita ao risco de acidentes em barragens a montante constituirá um contributo importante na selecção, organização e implementação das medidas de protecção adequadas, nomeadamente:

- sistema de aviso;
- zonamento de intervenção;
- plano de evacuação;
- sistemas de informação e de mobilização dos agentes de protecção civil;
- recursos de intervenção e apoio;
- esquema de informação ao público;
- treinos e exercícios;

- medidas restritivas de ocupação do solo.

As primeiras seis medidas de protecção são orientadas para actuação em situações de emergência. Estas medidas deverão ser elaboradas pelo centro operacional de protecção civil distrital (artigo 44º) e deverão estar incluídas no **plano de emergência externo**. Este plano específico deverá ser articulado com os planos de emergência gerais municipais e distritais de acordo com a área geográfica envolvida.

A sexta medida deverá, em princípio, envolver os responsáveis pela gestão interna da barragem por forma a ser possível a execução periódica de treinos ou exercícios coordenados que ponham à prova a operacionalidade do sistema de emergência implementado.

A última medida referida é um exemplo de gestão operacional, permanente, do controlo da ocupação do solo por forma a ajustar, das zonas mais críticas, tipos de ocupação estratégicos ou mais vulneráveis. Esta medida caberá às autoridades locais e aos decisores da ocupação do solo (licenciamentos) tendo em conta o zonamento de risco.

Finalmente, o esquema de informação do público, é crucial para a aceitação da gestão do risco externo e a participação pública na mesma e na segurança do vale. O esquema de informação deverá ter em conta as características culturais dos habitantes e, em particular, da respectiva percepção do risco em causa.

Uma gestão do risco nos vales deverá organizar-se por forma a considerar, de forma integrada, outros tipos de cheias: as decorrentes de operações de descarga correntes ou periódicas na barragem e as cheias naturais correspondentes ao funcionamento normal dos órgãos de descarga (evacuadores) em períodos de cheia.

Em caso de emergência, a actuação dos responsáveis deverá ser apoiada por auxiliares de informação e de decisão (bases de dados, SIG, etc.) baseados nas actuais tecnologias de informação.

7.2.4. Análise e avaliação do risco

7.2.4.1. Análise quantitativa

A análise quantitativa do risco de uma barragem exigiria, por um lado, a determinação dos valores das probabilidades correspondentes à ocorrência simultânea de eventos perigosos (cheias, sismos, entre outros), de acidentes na barragem e de determinados níveis de danos no vale a jusante, para um determinado período de tempo, incluindo a identificação e valorização

consistente dos diferentes danos. Na situação actual dos conhecimentos, as metodologias da análise quantitativa do risco, defrontam-se com dificuldades reais na obtenção de resultados global e indiscutivelmente aceitáveis. Referem-se, entre outros, os seguintes problemas na caracterização probabilística referentes à:

- Ocorrência de todos os eventos perigosos, que podem actuar sobre determinada barragem. Para além da caracterização das cheias, dos ventos, e dos sismos e de um ou outro potencial evento ambiental especialmente detectado e estudado é difícil garantir a previsão e detecção de todos os possíveis eventos naturais ou provocados por erros, omissões ou acções de guerra e a adequada caracterização probabilística respectiva. Nos casos considerados recorre-se, regra geral, a critérios ou cenários de combinação dos eventos considerados mais importantes.
- Determinação da probabilidade de ruptura de barragem em resultado da ocorrência da ocorrência dos diferentes eventos previstos; a metodologia baseia-se, regra geral, na consideração da aplicação do método das árvores ou redes de risco no qual se exige o conhecimento de sucessivas probabilidades condicionadas de ocorrência de falhas estruturais ou hidráulico-operacionais para os diferentes cenários ou hipóteses consideradas como possíveis, para um dado período de serviço de obra; o significado e a consistência da maioria dos valores atribuídos e estas probabilidades carece, em geral, de fundamento científico; salienta-se, em particular, o facto de a maioria das situações seleccionadas não estarem associadas a frequências físicas de ocorrências reais; os acidentes nas barragens são muito específicas não existindo número suficiente de casos estatisticamente consistentes para se obterem valores suficientemente rigorosos para as probabilidades de ruptura ou de uma falha a atribuir à maioria dos componentes ou acções relativas a uma determinada barragem; o conceito de probabilidade é, então, atribuído através de estimativas pessoais de painéis de especialistas tentando caracterizar o grau de incerteza ou desconhecimento específico; as probabilidades finais de ruptura da barragem são em geral baseados em cenários prováveis facilmente previsíveis, não incluindo os casos inesperados ou desconhecidos "à priori" que são frequentemente os que correm em cada acidente real; apesar de todos os conditionalismos e limitações a obtenção das probabilidades de ruptura através da análise de uma árvore ou rede de risco de cenários de falhas tem mérito, reconhecido

por muitos projectistas, tendo em vista a possibilidade de melhorar o conhecimento da fiabilidade da barragem à actuação das causas mais prováveis ou importantes.

- Determinação das características da cheia para jusante a qual resulta, para cada cenário de ruptura, de uma cadeia de eventos, de diversos factores físicos também sujeitos, por sua vez, a incertezas (e.g. características e parâmetros de formação da brecha, coeficiente de vazão, interacção com a resposta hidrodinâmica da albufeira, entre outros).
- Caracterização dos efeitos ou danos resultantes dos impactos no vale provocados pelas diferentes cheias resultantes de cada um dos cenários de ruptura previsíveis (ou considerados) para a barragem; a dificuldade na determinação da probabilidade de ocorrer um determinado número de vítimas, ou de prejuízos materiais, é difícil, não só por razões de consistência metodológica ou científica semelhantes às referidas para o caso de ruptura de barragem, como também, pela complexidade da resposta humana e respectiva capacidade de sobrevivência, a qual dependerá, significativamente, de ser possível um aviso eficaz e da organização de protecção civil.

7.2.4.2. Risco aceitável

A análise quantitativa de riscos pode, assim, conduzir a valores estimados para a perda expectável anual de vidas humanas correspondente a uma determinada barragem existente, ou a diferentes soluções alternativas para barragens em projecto. Regra geral, os valores obtidos, admitindo que se considera como aceitável o rigor da metodologia, têm ordens de grandeza relativamente pequenas. Por exemplo, da ordem de 2×10^{-4} de perdas expectáveis de vidas humanas por ano. A questão que se coloca então é a seguinte: será este suposto valor do risco efectivo aceitável?

Para esta apreciação consideram-se duas situações de referência:

- o limiar de aceitabilidade individual;
- o limiar de aceitabilidade colectivo.

O limiar ou risco aceitável individual depende de diversos factores, incluindo as características próprias (idade, sexo, educação ...), a percepção pessoal do risco entre outros, e, em particular o facto da exposição ao risco ser voluntário (com benefícios pessoais) ou não.

Como referência aproximada, quando não existem estudos psicológicos executados para a zona e risco em causa, é usual considerar o valor da probabilidade de, nos países desenvolvidos, uma pessoa com idade inferior a 60 anos falecer de causas naturais. Este valor é da ordem de 10^{-3} por ano.

Nos casos que envolvam experiência histórica, poder-se-á também adoptar o critério de calcular o valor da razão entre o número de vítimas e o número total de pessoas que aceitaram estar sujeitas a um determinado risco.

Nos países mais desenvolvidos (Europa, EUA) os valores obtidos tendem actualmente a ser estáveis.

Para atender ao efeito do grau de voluntariedade é usual afectar o valor da probabilidade de ser vitimado mortalmente de referência pelo acidente em causa, por um coeficiente cujo valor variará entre, tipicamente 10 (total voluntariado) e 10^{-1} (risco imposto).

No que concerne a aceitabilidade social, da comunidade, a situação é metodologicamente diferente: qual é o balanço positivo aceitável entre os benefícios esperados por uma obra e os custos sociais incluindo a perda expectável de vidas humanas? Como é evidente trata-se de uma questão muito complexa que tem sido encarada em alguns critérios de segurança de barragens mais recentes. Uma forma maioritariamente rejeitada em muitos países é a de caracterizar o valor da vida humana com um valor quantitativo a somar a outros custos económicos.

A via mais consensual é a baseada na análise estatística de acidentes ocorridos e em princípios como os seguintes:

- a sociedade tem a percepção do que são acidentes com baixa probabilidade;
- deve-se ter em conta a tendência para a proporcionalidade inversa entre o número potencial de vítimas num acidente e o valor da probabilidade socialmente aceitável (se o acidente provocar um elevado número expectável de vítimas, a probabilidade socialmente aceitável será menor).

Com base nestes princípios têm vindo desenvolvidos métodos e modelos para a obter a relação entre perda expectável anual de vidas humanas e número total de vítimas potenciais. Um dos métodos é baseado na hipótese que cada membro da comunidade gradua o nível de risco social com base nos acontecimentos que ocorrem no respectivo círculo de pessoas conhecidas (número restrito na ordem de cem), tendo em conta a frequência conhecida (a nível nacional ou internacional) de vítimas referentes a cada hipótese de acidente.

Os modelos desenvolvidos introduzem diversos factores adicionais para obter a relação atrás referida. No caso da segurança de barragens e dos vales a jusante destacam-se os dois critérios mais conhecidos:

- o critério de British Columbia Hydro do Canadá (Fig. 7.5);
- o critério ANCOLD da Comissão Australiana das Grandes Barragens (Fig. 7.6).

Do critério da B.C. Hydro pode concluir-se que no caso do número potencial de vítimas no vale a jusante ser 100 a possibilidade anual de ocorrência do acidente não deverá exceder 10^{-5} ou seja, admita-se um risco de 10^{-3} vítimas por ano. Com o critério da ANCOLD considera-se uma curva limite e uma zona onde se deve aplicar o princípio ALARP (risco, "as low as reasonably practicable") e uma outra curva que seria a curva objectiva, para obter directamente a probabilidade de ruptura admissível.

Estes critérios podem servir de base à fixação de parâmetros ou variáveis de dimensionamento, em particular à fixação dos períodos de retorno de caudais e de sismos de projecto (SALMON e HARTFORD, 1995), tendo em conta o número potencial de vítimas no vale a jusante, estimado com base na **agressividade** ou **severidade** hidrodinâmica das cheias induzidas, o número total de habitantes em risco e a respectiva capacidade de **sobrevivência**, ou seja, tendo em conta a vulnerabilidade humana do vale face aos acidentes na barragem em causa.

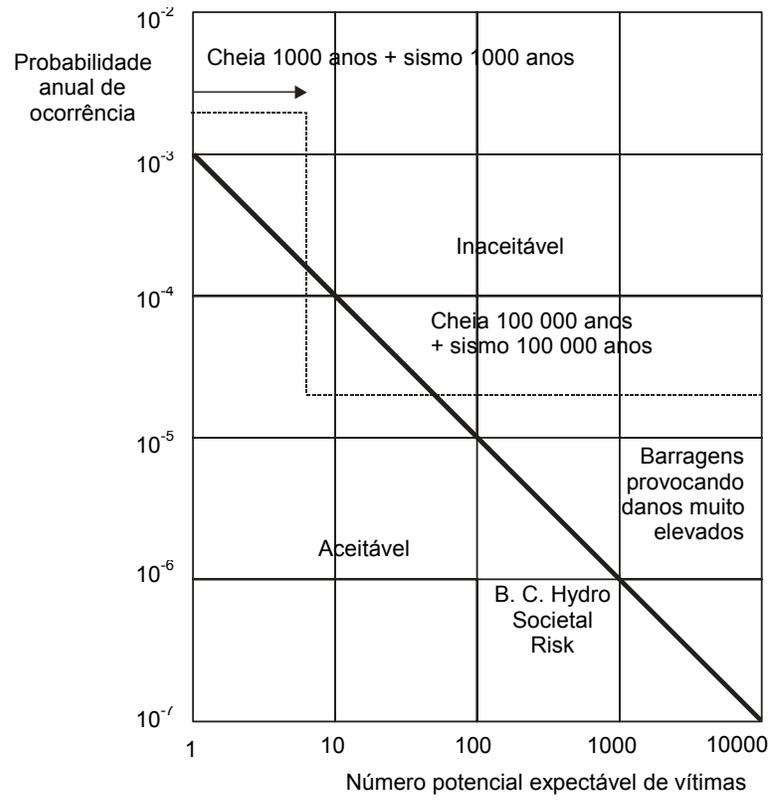


Figura 7.5 - Critério de aceitação do risco por parte da sociedade (B.C. Hydro).

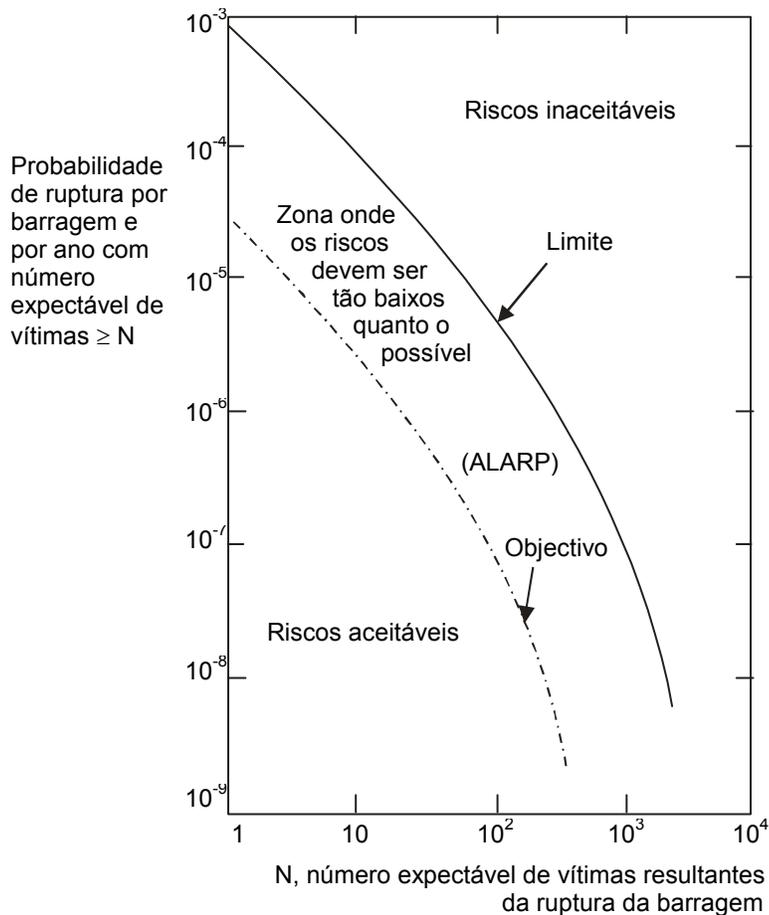


Figura 7.6 - Critério de aceitação do risco por parte da sociedade (Risco Societal) (ANCOLD).

OOSTHUIZEN (em 1986), referido em OOSTHUIZEN e ELGES, 1998, desenvolvem uma metodologia conducente a um critério de aceitabilidade de risco conjunta de vários factores como sejam, em função da probabilidade da ocorrência de acidentes:

- valor de perdas directas ou indirectas de bens (em US\$);
- perdas expectáveis de vida humana;
- aspectos ecológicos;

e ainda o risco aceitável para a composição de risco anual de vítimas, por hora de exposição, e o risco anual de perdas económicas.

7.2.4.3. Efeito do período de tempo

Os critérios descritos baseiam-se, regra geral, numa avaliação de probabilidades e de risco correspondentes a uma base de tempo anual. O efeito da consideração de um período pluri-anual altera os valores do risco.

Este aspecto é tipicamente considerado no caso do risco hidrológico R_H , quando se pretende conhecer qual é a probabilidade que um evento, caracterizado pelo período de retorno T (anos), ocorra pelo menos uma vez num período de n anos:

$$R_H = 1 - \left(1 - 1/T\right)^n \quad (7.1)$$

Neste caso a probabilidade de ocorrência do evento aumenta significativamente o que altera também o risco efectivo no vale a jusante, em particular para o caso do evento hidrológico e o potencial cenário provocado por galgamento da barragem.

Este aspecto é particularmente importante na fase de consulta e discussão pública e de tomada de decisão participada pelos representantes dos habitantes do vale em função da respectiva percepção do risco de acidente. Conforme refere TAVARES 1997, a análise com base anual tende a distorcer a sensibilidade de opção de soluções alternativas com probabilidades muito pequenas. Quer utilizando a expressão (7.1), quer adoptando uma distribuição de Poisson, como faz Tavares, mostra-se que, tomando, como base um período de tempo de 20, 50 ou 100 anos e assumindo diferentes níveis de risco anual, λ , as diferenças de risco hidrológico ou de nível de segurança, em função do valor adoptado λ , tornam-se muito mais perceptíveis para períodos de tempo superiores a 20 anos.

7.2.4.4. Aplicação do conceito de risco aceitável

Admitindo que se adopta um critério de risco socialmente aceitável na orientação de acções a tomar na gestão do risco, há que ser prudente, nomeadamente nas fases de informação e discussão públicas.

Considera-se, em primeiro lugar, o próprio processo de apresentação do conceito de probabilidade de eventos relativamente raros mas muito perigosos.

É usual caracterizar os acidentes de ruptura de barragens pela frequência do evento por ano e por barragem. Os valores típicos obtidos na época de 80 variam, segundo os autores, entre 10^{-4} e 10^{-5} . Esta ordem de grandeza poderá ser difícil de sentir. Por seu turno os casos históricos ocorrem ao longo de um período de tempo durante o qual o número total de barragens no instante de

cada acidente é variável. Para atender a esta inconsistência, o Instituto Paul Scherrer na Suíça, através do trabalho de um conjunto de investigadores (HIRSCHBERG *et al.* 1996), calcularam, com base nos registos do ICOLD, para cada tipo de barragem, para diferentes períodos de tempo e diferentes instantes em que o acidente ocorreu, o intervalo de tempo expectável, em anos, entre rupturas, correspondente a cada acidente ocorrido ao longo tempo, tendo em conta ordenação desse caso de ruptura e o tempo de operação em anos correspondente a totalidade das barragens existentes à data. Apresentam-se no Quadro 7(1) alguns dos resultados para o período 1930-1992, referentes à análise baseada no último acidente considerado na análise.

Quadro 7.1 - Intervalo de tempo expectável entre acidentes com diferentes tipos de barragens (HIRSCHBERG *et. al* 1996).

Tipo de barragem	Frequência de ruptura (por ano e barragem)	Intervalo expectável⁽ⁱ⁾ entre acidentes (anos)
gravidade	1,6 10^{-5}	78
arco (no Ocidente)	4,5 10^{-5}	87
contrafortes	1,2 10^{-4}	55
aterro (no Ocidente)	1,9 10^{-4}	2
enrocamento (no Ocidente)	1,8 10^{-4}	10

(i) Correspondente à situação imediatamente após o último acidente em 1992

O intervalo expectável em anos entre acidentes poderá ser uma forma mais eficaz de apresentar os diferentes graus de possibilidade de ocorrer um acidente com ruptura.

Por seu turno, a aplicação de um critério de risco socialmente aceitável introduz consequências a nível da fixação de parâmetros de projecto. Considere-se, por exemplo, o caso do risco correspondente ao galgamento de uma barragem de aterro considerando, como simplificação, a ruptura certa da barragem logo que o caudal de projecto do evacuador fosse excedido (o que está longe de ser assim conforme se sabe). Considerem-se dois casos consoante o número expectável de perdas de vidas humanas a jusante: uma (caso A) ou 1 000 (caso B).

De acordo com a expressão geral do risco efectivo anual no vale,

$$R_{ev} = p_{cp} \times p(\text{ruptura} | cp) \times \bar{N} \quad (7.2)$$

sendo:

R_{ev} = risco efectivo no vale;

p_{cp} = probabilidade de ocorrência anual de uma cheia igual ou superior à de projecto;

$p(\text{ruptura} | cp)$ = probabilidade de ruptura para cheia superior à de projecto (considerada igual à unidade);

\bar{N} = número expectável de vítimas (uma ou 1 000).

O risco aceitável R_{ev}^* , de acordo com o critério B.C. Hydro conduz a um risco máximo aceitável de 10^{-3} de vítimas expectáveis por ano e, assim,

Caso A (uma vítima) - $p_{cp} = 0,001$ por ano (T = 1 000 anos)

Caso B (1 000 vítimas) - $p_{cp} = 0,000001$ por ano (T = 1 000 000 anos)

Estes resultados mostram que, na realidade, o projectista terá de contar com reservas de segurança contra o evento de galgamento para satisfazer o critério. Com efeito, a probabilidade de ocorrer uma ruptura por galgamento dado que o caudal de projecto é excedido depende de vários fatores, nomeadamente, a capacidade de folga e coeficientes de segurança estruturais.

7.3. RISCO A JUSANTE NOS REGULAMENTOS E NORMAS DE SEGURANÇA

7.3.1. Contexto internacional

A partir da década de setenta, os regulamentos e normas técnicas referentes à problemática da segurança das barragens começam a introduzir, explicitamente, conceitos, disposições ou critérios envolvendo a segurança de pessoas e bens no vale a jusante, nomeadamente a avaliação de danos potenciais resultantes de um acidente na barragem. Salienta-se, em particular, o caso da fixação do caudal projecto para o dimensionamento dos evacuadores de cheia em função dos danos a jusante (ICOLD, 1992).

O regulamento francês é paradigmático desta evolução o qual contém, desde 1968, regras para a protecção dos habitantes nos vales a jusante de barragens. Estas regras foram actualizadas em 1994.

Nos EUA as agências federais, nomeadamente o Bureau of Reclamation (BUREC) e a Federal Energy Regulatory Commission (FERC) produziram, durante as décadas de setenta e oitenta, um elevado número de recomendações e procedimentos técnicos aplicáveis às barragens sob a respectiva jurisdição. De entre estes procedimentos destacam-se:

- critérios para fixação das cheias de projecto dos órgãos de segurança tendo em conta os efeitos no vale a jusante;
- planos de emergências e de evacuação;
- treinos e exercícios.

Estas acções nos domínios da segurança de barragens e vales nos EUA resultam directamente da importância atribuída aos mesmos ao mais alto nível, em particular tendo em conta o “Presidential Memorandum” de Outubro de 1979 e os “Federal Guidelines for Dam Safety” de Junho de 1979, na sequência da ruptura da barragem de TETON (1976). Presentemente, outras agências dos EUA aplicam procedimentos semelhantes aos do BUREC, nomeadamente no que se refere às medidas de protecção a jusante.

No Canadá, medidas de protecção civil nos vales com barragens passaram também a ser exigidas. Refere-se, por exemplo o caso da Província de Alberta onde, em 1988, o respectivo “Disaster and Emergency Programs Branch” passou a exigir aos donos de barragens a elaboração de Planos de Emergência e de Sistemas de Aviso específicos para cada sítio.

Em Itália, duas circulares técnicas oficiais promulgadas, respectivamente, em 1986 e 1987 vieram obrigar os responsáveis pelas barragens a efectuarem estudos relativos às áreas inundáveis a jusante por efeito de descargas e de hipotéticos colapsos estruturais.

Um caso paradigmático é o da Suíça. Até 1985, o regime de segurança das barragens baseava-se na segurança estrutural e no sistema de observação. Após 1985, a revisão do regulamento de segurança introduziu, a nível idêntico de importância, o conceito de gestão de emergência, incluindo a protecção nos vales a jusante.

Na década de noventa, alguns países europeus promulgam, ou estão em fase de estudo, nova ou renovada regulamentação ou normas técnicas de segurança envolvendo o estudo das consequências nos vales a jusante e a elaboração de planos de emergência e de sistemas de aviso às populações. A título de exemplo, referem-se, na Europa, os casos de Portugal (1990), Espanha (1996) e Suécia, Finlândia e Noruega (1997).

Na Grã-Bretanha a edição de 1996 do Guia Técnico, referente aos critérios a aplicar na análise de cheias e segurança de barragens, elaborado pelo The Institution of Civil Engineers, inclui na classificação das barragens a consideração dos potenciais efeitos a jusante provocados por uma ruptura. Actualmente estão em curso, neste país, estudos para a preparação de procedimentos mais elaborados relativos à protecção dos vales a jusante.

Em diversos países, e independentemente da existência ou não de regulamentação específica, o interesse pela segurança nos vales e pela protecção dos respectivos habitantes face a um acidente numa barragem aumentou significativamente no último decénio, conforme mostra o número de artigos e comunicações publicadas em revistas e conferências.

Historicamente, podemos, assim, detectar na evolução dos regulamentos de segurança de barragens uma tendência clara para uma maior abrangência do domínio de intervenção e para a consideração directa dos efeitos de hipotéticos acidentes e da protecção dos habitantes nos vales a jusante. Esta evolução pode ser sinteticamente caracterizada do seguinte modo:

- A - Segurança estrita e efectiva da barragem, sem incluir a hipótese provável de um cenário de acidente, nomeadamente a ruptura da barragem.
- B - Segurança da barragem, mas tendo em conta, nos critérios de dimensionamento e nos métodos de observação da obra, as consequências de um hipotético acidente, incluindo a classificação em termos de risco induzido.
- C - Segurança da barragem e do vale em termos da preparação de um plano de emergência e evacuação, a implementação de um sistema de aviso e a execução de treinos e exercícios, tendo por base o estudo de zonas inundáveis e os danos expectáveis, com base em cenários de ruptura.

O controlo de segurança no âmbito dos regulamentos e critérios técnicos referentes a barragens tende, assim, a abranger o conjunto barragem e o vale a jusante de uma forma continuada e dinâmica.

7.3.2. O Regulamento e as Normas Portuguesas

O Regulamento de Segurança de Barragens foi publicado em anexo ao Decreto-Lei nº 11/90 sendo aplicável a todas as barragens de altura superior a 15 m, desde o ponto mais baixo das fundações até ao coroamento e às barragens de altura inferior cuja albufeira tenha uma capacidade superior a

100 000 m³. Poderão ainda ser sujeitas às disposições do presente Regulamento outras barragens desde que, no acto de aprovação de projectos de aproveitamento de águas públicas ou particulares, a entidade competente verifique a existência de risco potencial elevado ou significativo (artigo 2º).

O objectivo principal do RSB é o de garantir a implementação de medidas para controlo de segurança (da barragem), “a tomar nas várias fases da vida da obra e contemplando aspectos estruturais, hidráulicos, operacionais e ambientais, com vista ao conhecimento adequado e continuado do estado da barragem, à detecção oportuna de eventuais anomalias e a uma intervenção eficaz sempre que esta se revele necessária” (artigo 3º). No que concerne a segurança a jusante, o RSB inclui um capítulo (Capítulo III, artigos 42º a 45º) dedicado a medidas de protecção civil com vista à protecção de pessoas e bens em caso de acidentes resultantes, nomeadamente, de catástrofes, acções de guerra ou sabotagem e de outras ocorrências susceptíveis de afectarem a segurança da barragem e do vale.

O Artigo 2º, ao definir o âmbito de aplicação do RSB, introduz, de imediato, a importância da avaliação do risco nos vales a jusante. Com efeito, o regulamento passa a ser obrigatoriamente aplicável desde que, independentemente da probabilidade de ocorrência, um acidente na barragem tenha como consequências estimadas a perda de algumas vidas humanas e custos materiais relativamente importantes.

A aplicação do RSB incide no projecto, na observação e inspecção e na exploração de barragens. As Normas de Projecto, de Observação e Inspeção e de Exploração de barragens entretanto publicadas, estabelecem princípios e critérios gerais consistentes com o RSB. Saliem-se, seguidamente, as principais exigências regulamentares no que respeita explicitamente a segurança e o risco nos vales a jusante.

- Na fase de **projecto**:

- O projecto deve incluir o estudo dos riscos potenciais induzidos pelo aproveitamento que deverá ser elaborado tendo em vista a definição dos critérios de dimensionamento e servir de base ao planeamento de medidas de protecção civil, nos casos aplicáveis (artigo 12º).
- No dimensionamento dos órgãos de segurança e exploração da barragem, a cheia de projecto para as fases de construção e exploração deve ter em consideração o risco potencial induzido pelo aproveitamento incluindo, nomeadamente, a existência de outras barragens a montante e a jusante (artigo 14º).

- Nas Normas de Projecto de Barragens (anexo à Portaria 846/93), exige-se que nos estudos hidrológicos os períodos de retorno a adoptar no dimensionamento dos órgãos de descarga e protecção contra cheias devam ser fixados, em função da ocupação do “leito” a jusante da barragem, de acordo com o Quadro 7.2.
- É recomendável, de acordo com as Normas, que a cheia de projecto seja comparada com a cheia máxima provável (C.M.P.), nos casos em que, de acordo com o Quadro 7.2 o período de retorno seja superior a 1000 anos, isto é, no caso de risco potencial elevado, para barragens de betão com $h \geq 50$ m e de aterro com $h \geq 15$ m e no caso de risco potencial significativo, para barragens de betão com $h \geq 100$ m e de aterro com $h \geq 50$ m.
- Os estudos hidrológicos devem ser completados com a avaliação das áreas inundáveis e do tempo de propagação das cheias provocadas por cenários de ruptura da barragem, recorrendo a modelos hidrodinâmicos adequados e, ainda, com o estudo de sistemas de aviso e previsão de cheias em tempo real.

Quadro 7.2 - Períodos de retorno da cheia de projecto, em anos⁽ⁱ⁾.

Barragem		Risco Potencial	
Betão	Aterro	Elevado	Significativo
$h \geq 100$	$h \geq 50$	10 000 a 5 000	5 000 a 1 000
$50 \leq h < 100$	$15 \leq h < 50$	5 000 a 1 000	1 000
$15 \leq h < 50$	$h < 15$	1 000	1 000
$h < 15$	---	1 000	500

h = altura da barragem, em metros

(i) (Artigo 6º e Anexo 1 das Normas de Projecto de Barragens)

- O projecto deve conter o estudo da zona inundável a jusante em caso de ruptura da barragem, considerando as hipóteses da ruptura súbita e progressiva, parcial ou total, conforme o modo de ruptura mais provável. Com base nos elementos existentes sobre a ocupação populacional, agrícola ou industrial a jusante da barragem, deve ser

feita a avaliação dos prejuízos materiais e da eventual perdas de vidas humanas. Esta avaliação permitirá calcular o risco potencial que a barragem representa.

- Plano de **observação**:

- A definição do sistema de observação e sua exploração devem ter em conta um conjunto de factores de apreciação das condições de risco os quais são sintetizados no **índice global de risco**, α_g , definido nas Normas de Observação e Inspeção de Barragens (anexo à Portaria 847/93). Os factores considerados são os seguintes (Quadro 1 das Normas de Observação de Inspeção de Barragens):

- Exteriores ou ambientais (E), em número de cinco (sismicidade, escorregamento de taludes, cheias superiores à do projecto, tipo de gestão da albufeira e acções agressivas).
- Associados à barragem (F), em número de quatro (dimensionamento estrutural, fundações, órgãos de descarga e manutenção).
- Associados a factores humanos e económicos (R), em número de dois (volume da albufeira e instalações a jusante).

A graduação de cada factor é feita em seis níveis (1 a 6) sendo o índice global definido do seguinte modo:

$$E = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i ; F = \frac{1}{4} \sum_{i=6}^9 \alpha_i ; R = \frac{1}{2} \sum_{i=10}^{11} \alpha_i ; \alpha_g = E \cdot F \cdot R \quad (7.3)$$

A aplicação destes procedimentos de segurança permitem diminuir as probabilidades condicionadas respeitantes à segurança estrutural e operacional da barragem.

7.4. ANÁLISE FENOMENOLÓGICA E COMPUTACIONAL

7.4.1. Causas e consequências

Em resultado de diversas causas as barragens podem vir a sofrer um colapso estrutural total, ou parcial, ou a serem galgadas sem destruição. A caracterização estatística das causas é conhecida e objecto de muitas publicações, nomeadamente ICOLD (em 1962, esta organização registava a existência de 8 300 grandes barragens e a ocorrência de 400 acidentes com

ruptura em 1998 o número registado era de 38 000) que estima que 1% é o valor médio das rupturas ocorridas (esta média diminui significativamente para períodos de tempo mais recentes). Análises estatísticas mais actualizadas são apresentadas em ICOLD, 1995 e ICOLD, 1997, esta última publicação inclui dados sobre barragens com altura inferior a 30 m.

As barragens que rompem mais são as relativamente pequenas: 70% dos acidentes ocorrem nas barragens com alturas inferiores a 30 m. A maioria dos acidentes tende a ocorrer, de acordo com os resultados históricos, nos primeiros 10 anos de vida.

As causas próximas dos acidentes com ruptura são, predominantemente, as seguintes: galgamento (em particular nas barragens de aterro), colapso de fundações ou de encontros e fenómenos de erosão interna (“piping”) e nas barragens de aterro.

Mostram os factos que as barragens de aterro são as mais susceptíveis a sofrerem acidentes com ruptura (76% dos casos, segundo a ICOLD em 1980).

A destruição total, ou parcial de uma barragem tem como consequência imediata o aumento rápido do caudal no trecho do rio a jusante e o progressivo esvaziamento da albufeira. Consoante a duração e extensão da ruptura, assim o regime hidráulico transitório poderá ser mais ou menos gradual. No caso de ruptura instantânea ou muito rápida, ocorrerá a propagação de uma onda positiva de frente abrupta ou onda de inundação (elevação súbita da cota de água) para jusante e de uma onda negativa (abaixamento da cota de água) para montante ao longo da albufeira (Fig. 7.7).

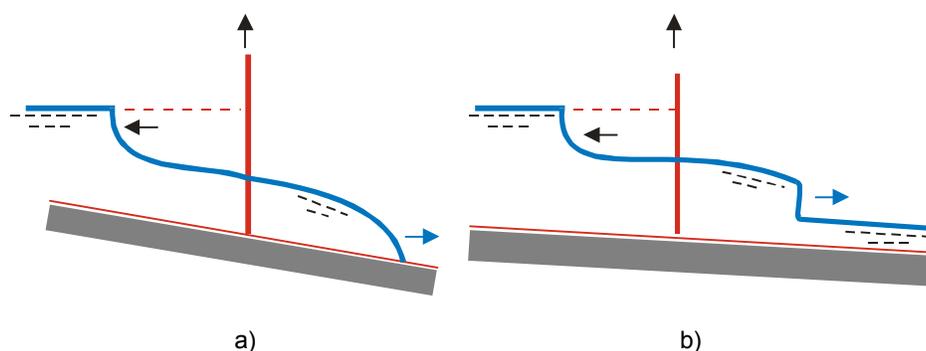


Figura 7.7 - Ruptura total e instantânea de uma barragem:
a) frente de onda em leito seco a jusante;
b) frente de onda com escoamento inicial a jusante.

A frente de onda positiva, propagando-se a elevadas velocidades, provocará no vale a jusante uma elevação da cota de água no rio e a inundação das respectivas margens, podendo, contudo, a máxima cota de água em cada secção ser atingida algum tempo após a passagem da frente (Fig. 7.8). A elevada velocidade do escoamento e a rápida subida das águas, em particular quando conjugadas com o factor surpresa, torna este tipo de cheia particularmente perigoso para as populações das zonas ribeirinhas.

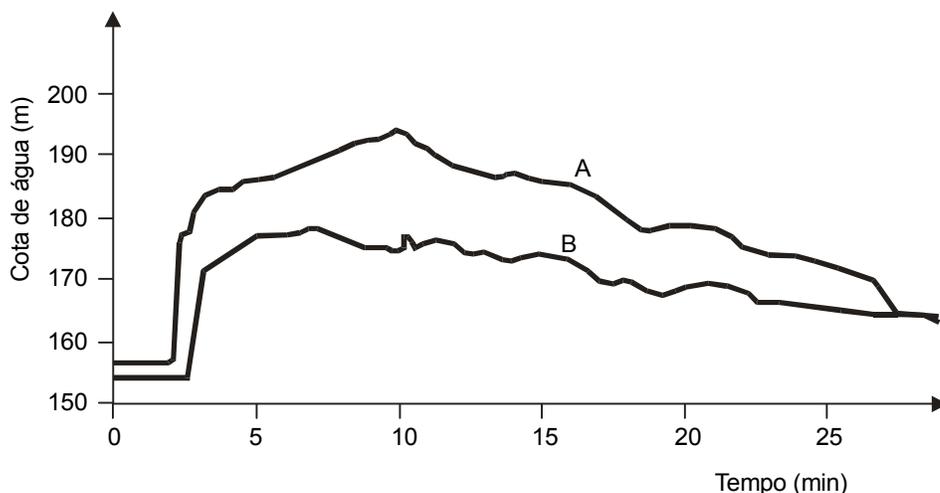


Figura 7.8 - Variação típica do nível de água, motivada por ruptura de uma barragem, em duas secções diferentes do rio no vale a jusante:

A - mais próxima;

B - mais afastada.

Para além dos prejuízos directos correspondentes a perda de vidas e aos danos materiais na barragem e nas zonas inundadas numa zona do vale (da ordem dos 40 a 60 km a partir da barragem), há ainda que considerar os danos indirectos resultantes da interrupção das actividades produtivas na zona afectada e do funcionamento da albufeira, bem como os prejuízos resultantes dos traumas psicológicos e dos danos físicos nos sobreviventes. A estimativa do valor total dos prejuízos é sempre muito difícil. Em certa medida, a importância dos acidentes ocorridos em barragens pode ser avaliada pelo número de mortos provocado. As medidas de prevenção e de resposta a emergências tendem a fazer diminuir este número (Quadro 7.3).

A importância e potencial agressividade das cheias induzidas é, em geral, caracterizada pelo caudal de ponta da cheia na secção da brecha estimada para diversos casos históricos. Estes dados são, tipicamente, apresentados em

função da altura inicial da água na albufeira como é o caso da figura apresentada por Kirkpatrick e incluída no Floods and Reservoir Safety de ICE (1978) (Fig. 7.11).

Quadro 7.3 - Número de mortos causado em alguns acidentes por ruptura de barragens.

Barragem	País e ano	Altura (m)	Número de mortos estimado
South Fork	USA (1889)	22	2 000 - 4 000
Saint Francis	USA (1928)	55	400 - 2 000
Vega de Terra	Espanha (1959)	34	140 - 400
Malpasset	França (1959)	66	420 - 700
Orós	Brasil (1960)	54	50 - 1 000
Baldwin Hills	USA (1963)	18	3
Teton	USA (1979)	83	6
Hirakud	Índia (1980)	61	118

Nota: O acidente de Vajont (2 600 a 3 000 mortos) não foi ruptura mas sim um galgamento.

As consequências da cheia para jusante da barragem dependem das características da albufeira e da barragem e, fundamentalmente, das características da ocupação para jusante das margens do rio.

A existência de albufeiras em cascata ao longo de um rio pode agravar, significativamente, os danos causados pela ruptura de uma das barragens localizadas mais a montante. Com efeito, as barragens a jusante podem ir sendo destruídos pela passagem da onda de cheia, sobrepondo-se, assim, os efeitos de sucessivas rupturas em cadeia.

7.4.2. Tipologia dos estudos de risco e de emergência

Os estudos das consequências da ruptura de uma barragem a efectuar no âmbito do projecto e exploração (estudos de risco e de emergência), podem ser de diferentes tipos e seguir diferentes metodologias e níveis de rigor consoante os casos. Saliem-se, a título de exemplo:

- Na fase de projecto, como métodos de cálculo e dimensionamento

- como base metodológica na relação de soluções alternativas; tendo em conta a relação custo-benefícios ou a fixação de níveis de risco socialmente aceitáveis;
 - como instrumento de previsão das acções sobre a barragem resultantes de eventuais situações de risco detectados, nomeadamente a forte probabilidade de um deslizamento numa vertente da albufeira.
- No cumprimento estrito de Regulamentos e Normas de Segurança
 - para satisfazer os requisitos ou procedimentos impostos por regulamentos de segurança que tenham em conta a implementação de medidas especiais de protecção nos vales a jusante, como é o caso do Regulamento de Segurança de Barragens, em que os estudos são baseados em hipóteses ou cenários convencionados.
 - Na fase de Exploração, como apoio a tomadas de decisão em eventuais situações de emergência
 - algumas situações de emergência que ocorram durante a fase de exploração de uma barragem, podem exigir um melhor conhecimento das consequências de cenários favoráveis de ruptura para apoio a decisões face a ocorrências anómalas (e.g. após um sismo de intensidade relativamente moderada, uma barragem de aterro sofreu um assentamento e urge tomar medidas tendo em conta o regime de aflúncias e o nível na albufeira; ou a inesperada avaria no sistema de comando e de manobra de uma comporta e, face ao regime de aflúncias previsto, ser necessário proceder a acções preventivas).

Os estudos hidráulicos deverão possibilitar o conhecimento, tanto quanto possível correcto, do tempo de chegada da frente de onda, da cota máxima de água, e do tempo de ocorrência desta após o instante do acidente e ao longo do vale do rio a jusante.

Os estudos em modelo reduzido poderão ser especialmente úteis no estudo de especiais como sejam:

- deslizamentos e entrada na albufeira de grandes volumes de terra provenientes da encostada;
- destruição de barragens de material incoerente e respectiva interacção com o escoamento nomeadamente o arrastamento de material sólido.

Em ICOLD, 1998 apresenta-se uma análise sobre os estudos hidráulicos e hidrodinâmicos relativos à formação e propagação da onda de cheia induzida por rupturas de barragens.

7.4.3. Análise Hidrodinâmica

7.4.3.1. Condições de fronteira e iniciais

Tipo de barragem e de ruptura

O intervalo de tempo que leva a barragem a romper ou formar brecha e o respectivo grau de ruptura influenciam as características podendo uma modelação mais detalhada da evolução da brecha conduzir a medidas de protecção mais consistentes com as consequências do acidente. O tipo de ruptura depende, fundamentalmente, das características da barragem e das causas de acidente:

- ruptura total, ou quase total, muito rápida em barragens de tipo arco ou abóbada;
- ruptura parcial (e.g. 50%) em barragens de gravidade em betão;
- ruptura lenta e parcial em barragens de aterro.

De acordo com uma regra empírica aproximada, o valor do caudal máximo correspondente a uma ruptura instantânea é cerca do dobro do valor correspondente a uma ruptura gradual (relação que se verificou no caso da barragem de aterro de Teton, nos EUA, cuja fase decisiva de ruptura durou cerca de três horas).

A título de exemplo mostra-se na Fig. 7.9 a influência relativa da largura da brecha (rectangular) numa barragem, e do tempo de abertura da mesma no caudal da ponte e no hidrograma na secção imediatamente a jusante. Desta figura pode-se concluir que, neste caso particular, a largura da brecha é um factor mais importante que o tempo de ruptura.

Características do vale a jusante e albufeira

O leito do rio a jusante da barragem pode estar seco ou com um escoamento base consoante a época do ano e o regime de caudais do rio. Regra geral, a geometria dos vales é irregular e a consideração de canais prismáticos sendo uma simplificação útil para aplicação de métodos analíticos e obtenção de soluções exactas, deixa de ser válida nos casos práticos de vales reais.

Na albufeira a montante, pode considerar-se ou não a propagação da perturbação resultante em simultâneo com a ruptura de barragens. No primeiro caso (modelos de análise acoplada) o efeito da variação real do nível de água junto da brecha, tendo em conta os efeitos dinâmicos, pode ser determinado melhorando, assim, a previsão do hidrograma ou de cheia efluente para jusante.

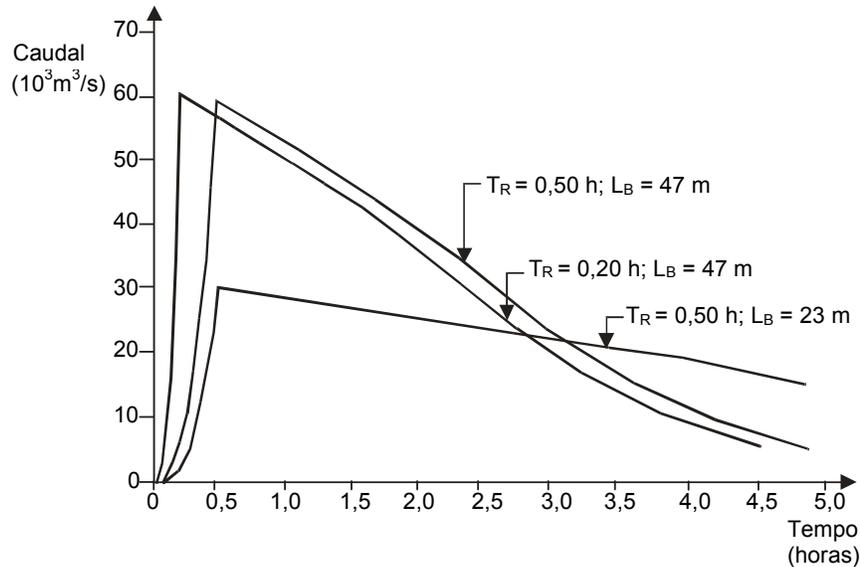


Figura 7.9 - Exemplo de análise de sensibilidade relativamente ao tempo de ruptura T_R e largura da brecha L_B (simulação de ruptura parcial da barragem da Aguieira).

Fase inicial da ruptura (leito seco a jusante)

O escoamento na zona da brecha é tridimensional (largura de brecha inferior à do vale) ou bidimensional (brecha com a largura do vale). Para este último caso, existe uma solução analítica baseada nas equações da dinâmica e da continuidade, segundo a vertical e a horizontal, desprezando as perdas de carga e admitindo a eliminação instantânea da barragem (plano vertical) apresentada por STOKER (1957).

Soluções numéricas bidimensionais, em planta foram também apresentadas, para o caso de rupturas parciais (largura da brecha inferior à largura do rio) por KATAPODES e STRELKOFF (1978).

A solução analítica **unidimensional** (a partir das equações de Saint-Venant) foi obtida por RITTER (1892) para as seguintes condições: ruptura total e instantânea em canal prismático de secção rectangular, de fundo horizontal e com resistência nula (Fig. 7.10). WITHAM (em 1955) mostrou como é que os efeitos da resistência do leito podiam ser tidos em conta de forma prática e DRESSLER (em 1952) mostrou que a influência da resistência

aumentava com o tempo sendo nos primeiros instantes a solução de Ritter válida. SU e BARNES (1970) generalizaram as soluções analíticas para certos tipos de canais de secção não rectangular.

7.4.3.2. Caudal máximo efluente ou de ruptura

A ruptura de barragens é, em geral, acompanhada pelo aumento rápido do caudal no trecho do rio a jusante. O caudal máximo efluente é, em geral, muito elevado relativamente aos valores dos caudais de cheia de projecto (Fig. 7.11 e Quadro 7.4).

Apresentam-se, seguidamente, algumas expressões teóricas e empíricas para o cálculo do caudal máximo efluente resultante de uma ruptura instantânea:

- **Fórmula de Ritter**

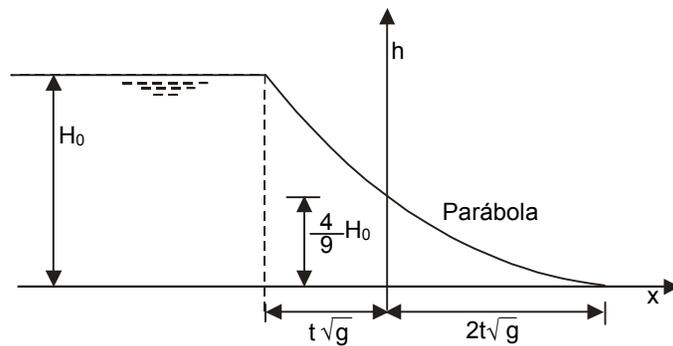
$$Q_M = \frac{8}{27} B \sqrt{g} H_0^{3/2} \quad (7.4)$$

Fórmula teórica de Ritter correspondente à remoção completa e instantânea da barragem numa secção rectangular, com largura B (m) e altura inicial de água a montante H (m), sem dissipação de energia e sendo g a aceleração da gravidade (expressão válida para $H_v/H_0 \leq 0,138$, sendo H_v a altura de água inicial a jusante).

- **Fórmula de Schoklitsch**

$$Q_M = \frac{8}{27} \left(\frac{B}{B_b} \right)^{1/4} B_b \sqrt{g} H_0^{3/2} \quad (7.5)$$

Fórmula de Schoklitsch para ruptura parcial (de largura B_b) e instantânea numa secção rectangular.



7.10 - Solução de Ritter para ruptura completa e instantânea de uma barragem em canal retangular.

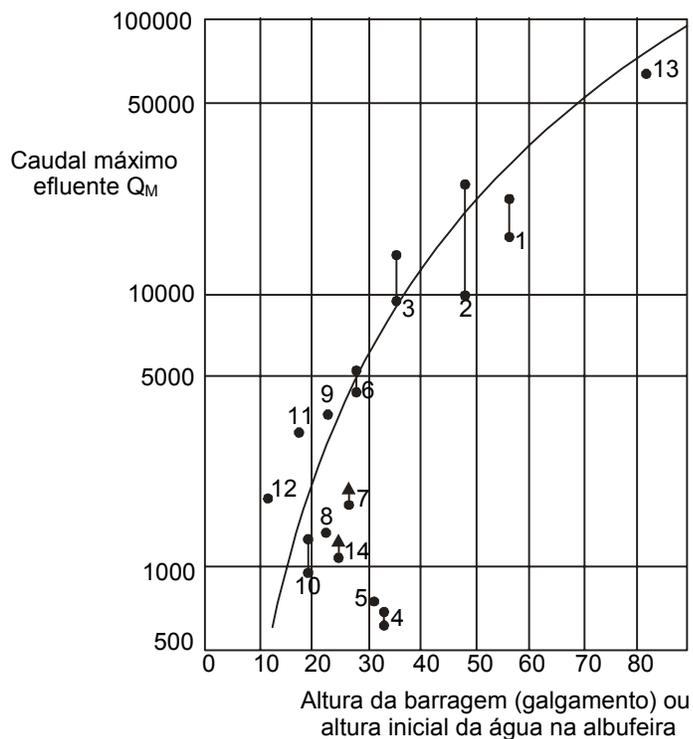


Figura 7.11 - Relação empírica entre caudais máximos estimados e altura da barragem ou de água (H_0) baseada em 14 casos de ruptura de barragens de terra ou de enrocamento (segundo Kirkpatrick).

Quadro 7.4 - Caudais máximos de ruptura estimados em acidentes reais.

Barragem	Ano de ruptura	Altura da barragem (m)	Caudal máximo (m ³ /s)
Orós (Brasil)	1960	54	9,7 × 10 ³
Swift (EUA)	1964	48	1,0 × 10 ⁴
Middle Fork (EUA)	1972	15	1,5 × 10 ³
Teton (EUA)	1976	83	6,5 × 10 ⁴
Salles Oliveira (Brasil)	1977	35	3,7 × 10 ³
Hirakud (Índia)	1980	61	3,7 × 10 ⁴

• **Fórmula do Corps of Engineers**

$$Q_M = 0,29 \sqrt{g} B_b H_b^{3/2} \left(\frac{B}{B_b} \cdot \frac{H_0}{H_b} \right)^{0,28} \quad (7.6)$$

Fórmula do Corps of Engineers para ruptura parcial (brecha de largura B_b e altura H_b e instantânea numa secção rectangular.

Baseado em casos reais apresentam-se, entre as muitas existentes na bibliografia especializada, as seguintes duas fórmulas:

• **Fórmula de Hagen**

$$Q_M = K (H_0 \cdot V_0)^{0,48} \quad (7.7)$$

Expressão empírica proposta por HAGEN (1982), sendo V_0 o volume inicial da albufeira (m³), com $K = 780$, para barragens arco e abóbada e $K = 550$, para barragens de gravidade (aterro ou betão).

• **Fórmula de Froehlich**

$$Q_M = 0,607 V_0^{0,295} H_0^{1,24} \quad (7.8)$$

Fórmula apresentada FROEHLICH (1995), baseada em 22 acidentes, considerada como sendo uma das mais adequadas (1998), sendo V_0 (m³) e H_0 (m) o volume e a altura da albufeira acima da base final da brecha.

Diversos autores sustentam que, no caso de uma ruptura completa e muito rápida e durante os primeiros instantes, a altura da onda de cheia no vale pode atingir 60% da altura inicial de água a montante da barragem. A formulação teórica (solução exacta para secções rectangulares e leito sem rugosidade) para ruptura total e instantânea corresponde $h_M = 4/9 H_0$. De um ponto de vista prático pode admitir-se $h_M = 0,5 H_0$.

Nas barragens de terra a ruptura é gradual. De acordo com o Bureau of Reclamation (EUA), os tempos de ruptura deste tipo de barragem estarão entre os seguintes limites, de acordo com um método aproximado baseado na altura da água inicial na albufeira H_0 :

$$0,015 H_0 < T_R < 0,020 H_0 + 0,25 \quad (7.9)$$

sendo H_0 a altura da albufeira (m) e T_R o tempo de ruptura (h). Nas barragens de terra, a largura da brecha é da ordem de três vezes a profundidade da brecha, indicando a experiência que a largura da brecha não excede, em geral, 150 m. A razão média entre as larguras da brecha, respectivamente no topo e na base, é da ordem de 1,3.

Em Espanha, recomenda-se que o tempo de ruptura das barragens, em abóboda e arco, possa ser considerado entre 5 a 10 minutos. No caso de barragens de gravidade em betão este tempo poderá ser de 10 a 15 minutos; a brecha terá, neste caso, uma secção rectangular, tendo a largura correspondente o maior dos seguintes valores: um terço do comprimento do coroamento ou três blocos da betonagem. Nas barragens de terra o tempo de ruptura recomendado é o seguinte:

$$T_r = 4,8 \frac{V_0^{0,5}}{H_0} \quad (7.10)$$

sendo V_0 o volume da albufeira em hm³ e H_0 a altura de água em m.

A disparidade dos valores que se obtêm com as diferentes fórmulas, deduzidas com base em diferentes casos específicos, aconselha uma grande prudência na respectiva aplicação a casos práticos.

7.4.3.3. Atenuação hidrodinâmica ao longo do vale.

O caudal de ponta e a altura máxima de água tendem a sofrer um processo de atenuação durante a propagação da cheia provocada pela ruptura da barragem. Este processo depende:

- das características geométricas e correspondentes macrorugosidades do vale;
- da capacidade de armazenamento em zonas do vale que actuando como reservatórios laterais provocam o amortecimento do caudal de ponta;
- do volume total da cheia, ou seja do volume de água da albufeira descarregado para jusante
- de singularidades locais que podem inverter o processo e aumentar localmente o caudal de ponta, em particular no caso da cheia provocar a ruptura de barragens a jusante (ruptura em cascata ou em cadeia).

Wetmore e Fread desenvolveram um método simplificado, mas ainda assim relativamente elaborado, com base numa metodologia para calculadores programáveis de bolso (método SMPDBK). O método permite o cálculo de atenuação do caudal de ponta ao longo do vale com base na altura de água a montante da barragem, volume inicial de água na albufeira e curvas de vazão no vale a jusante. O método inclui o cálculo do caudal máximo efluente na brecha, Q_M , em função das características desta. Os métodos simplificados podem ser úteis em cálculos em situações de emergência.

O cálculo da propagação das ondas de cheia ao longo de um canal prismático inicialmente seco, após a ruptura total e instantânea de uma barragem, pode também ser feito de forma aproximada a partir de ábacos, nomeadamente os elaborados por Sakkas. Estes ábacos permitem o cálculo das seguintes grandezas:

- instante de chegada da frente de onda;
- instante de ocorrência da altura máxima de água;
- altura máxima de água.

O Bureau de Reclamation propõe uma fórmula aproximada (empírica) para estimar a atenuação do caudal de ponta Q_p ao longo do vale em função da distância à barragem:

$$Q_p = \frac{Q_M}{10^{ax}} \quad (7.11)$$

sendo $\alpha = 0,0124$ e x a distância em km, medida a partir da barragem.

Com base nesta fórmula concluiria-se que o caudal de ponta só se reduziria a metade à distância de cerca de 24 km da barragem acidentada. Esta fórmula e outras metodologias aproximadas devem ser aplicadas com parcimónia a um determinado caso específico, atendendo à diversidade de factores físicos que podem afectar a propagação da onda de cheia. Distinguem-se, em particular, os casos em que a existência de extensas planícies provocam amortecimentos muito relevantes do caudal de ponta.

De acordo com a experiência, a atenuação do caudal de ponta ao longo do vale aumenta com os seguintes factores:

- menor volume de albufeira;
- vale largo e armazenamento lateral;
- declives suaves do leito do rio;
- elevada resistência hidráulica no vale;
- escoamento em regime do tipo lento.

A título de exemplo, apresenta-se um resultado obtido com um modelo computacional aplicado ao vale do rio Mondego para estudo dos efeitos da ruptura das barragens da Aguieira e da Raiva. Na Fig. 7.12 apresenta-se:

- a variação do caudal de ponta Q_p para jusante da barragem/açude da Raiva;
- o instante de chegada ou de ocorrência do caudal de ponta nas diversas secções até 35 km para jusante da referida barragem.

Dos resultados obtidos neste caso particular conclui-se que o caudal de ponta só se reduz para cerca de 65% à distância de 35 km.

7.4.3.4. Exemplo de análise de sensibilidade sistemática

Muitos autores têm apresentado resultados de análises sistemáticas efectuadas com modelos computacionais nomeadamente no âmbito de trabalhos de investigação. Em Portugal, salientam-se os trabalhos de FRANCO (1988) e VISEU (1944).

FRANCO (1988) apresenta resultados de análises sistemáticas de sensibilidade importantes no contexto da avaliação dos efeitos de diversos factores, nomeadamente o de atenuação. O autor baseou-se numa configuração de referência (Fig. 7.13). Para as condições de referência

obtiveram-se gráficos dos caudais máximos, alturas máximas e velocidades máximas ao longo do canal (em valores adimensionais).

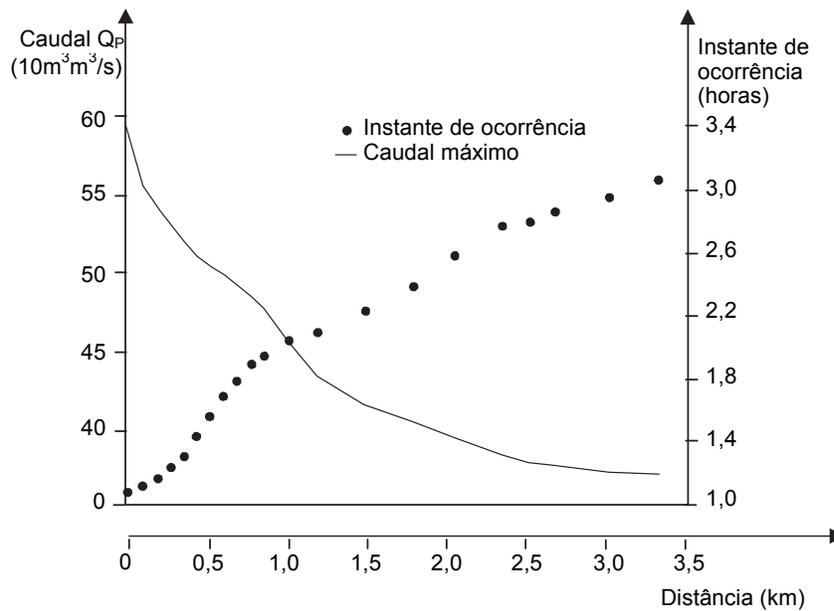


Figura 7.12 - Exemplo de atenuação do caudal de ponta de cheia com a distância (estudo da ruptura da barragem da Aguieira no rio Mondego efectuado em 1984).

A duração da abertura da brecha adoptada para a situação de referência (ruptura total), foi de 1,5 h e a rugosidade de base do leito foi caracterizada por $K_s = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. O caudal inicial no rio tem o valor de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. O passo de cálculo Δt adoptado foi de 30 s sendo as secções de cálculo afastadas de $\Delta x = 500 \text{ m}$.

A distância foi tornada adimensional relativamente à altura da barragem de referência H_{BARR} . O caudal de ponta em cada secção é apresentado relativamente ao caudal máximo teórico de referência, Q_M , correspondente à solução teórica de Ritter (expressão (7.4)) que, para a situação de referência adoptada, corresponde ao valor de $66\,370 \text{ m}^3/\text{s}$.

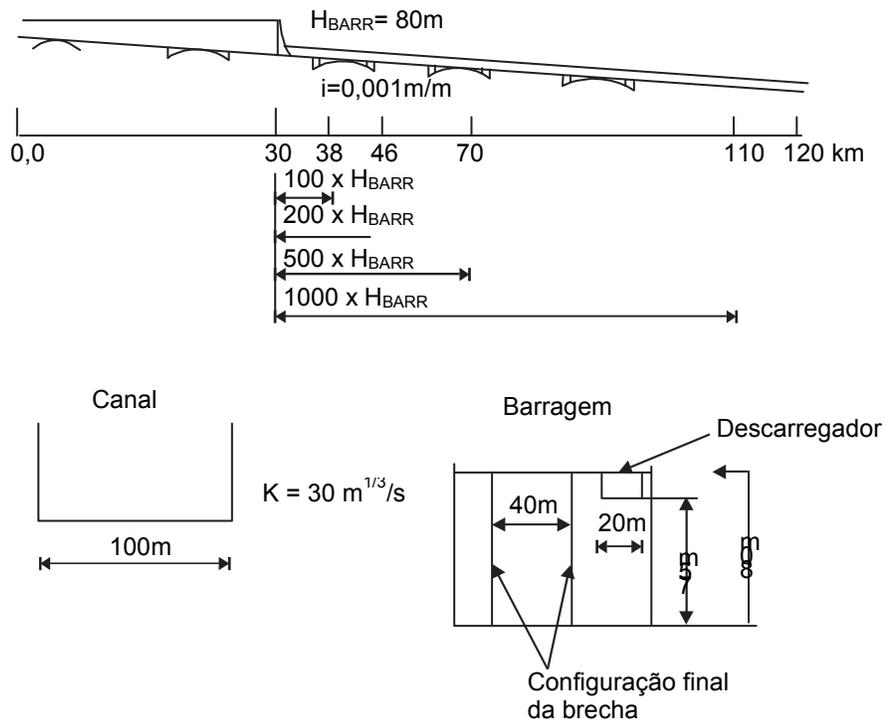


Figura 7.13 - Esquema das condições de referência para a análise de sensibilidade da atenuação da onda de cheia (FRANCO, 1988).

Nas Figs. 7.14 a 7.17 apresentam-se os resultados relativos à variação do caudal de ponta de cheia em secções do vale a determinadas distâncias, em função de diversos factores, nomeadamente: tempo de abertura da brecha (Fig. 7.14); largura final da brecha (em % de largura total da barragem - Fig. 7.15); altura da brecha (em % da altura inicial da barragem - Fig. 7.16) e rugosidade do leito (Fig. 7.17).

Resultados equivalentes são apresentados pelo mesmo autor relativamente a outro parâmetros.

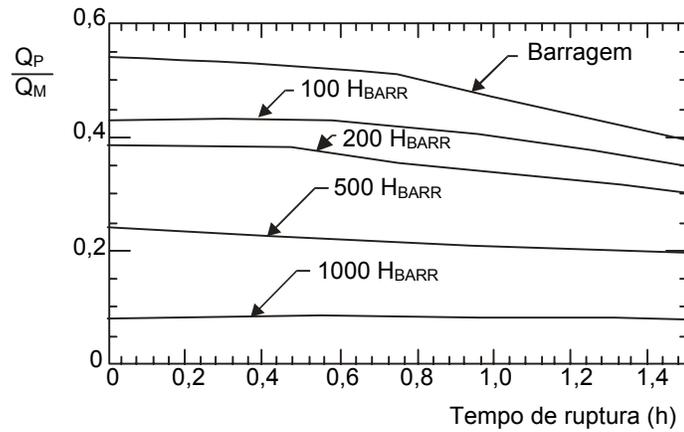


Figura 7.14 - Variação do caudal de ponta com o tempo de abertura da brecha (FRANCO, 1988).

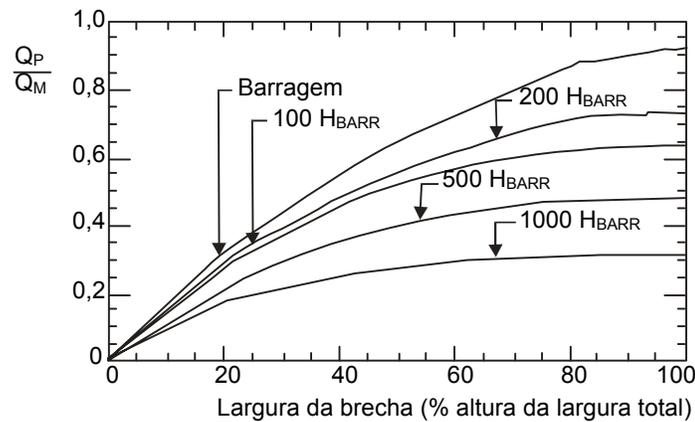


Figura 7.15 - Variação do caudal de ponta com a largura da brecha (FRANCO, 1988).

Apresentam-se algumas conclusões gerais, com base neste estudo sistemático (FRANCO, 1988), em função das variações dos seguintes factores, mantendo-se os restantes da situação de referência:

- Tempo de abertura da brecha

- na barragem, o valor de Q_p máximo corresponde a uma abertura instantânea, contudo em secções do vale a jusante (entre 100 a 200 H_{BARR}) podem ocorrer caudais superiores para rupturas graduais (resultante de menor dissipação de energia);

- a influência do tempo de abertura decresce para jusante, especialmente para distâncias superiores a $500 H_{BARR}$ (para $1\,000 H_{BARR}$ já não se nota a influência).

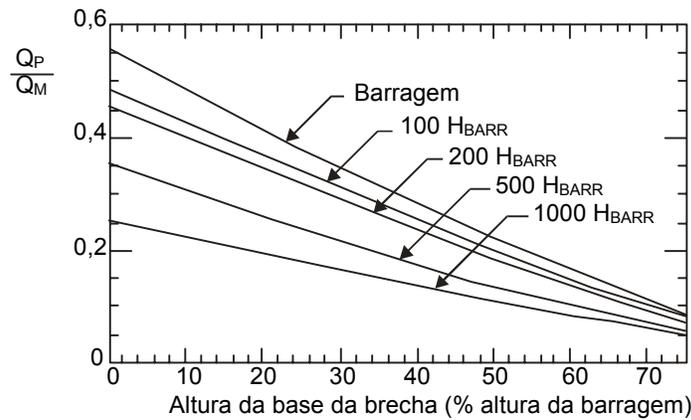


Figura 7.16 - Variação do caudal de ponta com a altura da brecha na barragem (FRANCO, 1988).

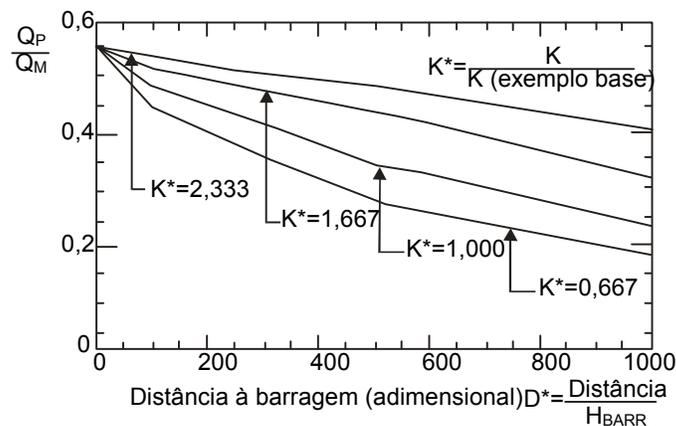


Figura 7.17 - Variação do caudal de ponta relativamente à rugosidade do vale (FRANCO, 1988).

- Largura final da brecha

- os caudais de ponta e as alturas máximas aumentam ao longo do vale com a largura final da brecha;
- para a ruptura total e $T_r = 1,5 h$, o caudal de ponta na brecha é igual a $0,91 Q_M$.

- Altura final da brecha
 - o caudal de ponta e a altura máxima decrescem com a diminuição da altura final da brecha;
 - a uma variação da altura da soleira da brecha de 0 para 75% de H_{BARR} corresponde uma variação de 55% para 8% do caudal Q_M proposto por RITTER
- Largura do vale a jusante
 - o hidrograma efluente depende da relação entre a largura do vale a jusante e a montante da barragem; o caudal de ponta efluente aumenta com esta relação;
 - a altura máxima no vale diminui com a relação referida atrás.
- Declive do vale
 - os caudais de ponta amortecem menos com o aumento do declive do vale;
 - as alturas máximas decrescem mais com o aumento do declive do vale;
 - a diminuição do declive, por diminuir a capacidade de vazão do vale, implica maiores alturas de água, maior armazenamento e menor caudal de ponta.
- Rugosidade média (equivalente) do vale
 - com o aumento de rugosidade do vale verifica-se, ao longo do canal, uma diminuição dos caudais de ponta e um aumento das alturas máximas de água.

É interessante observar que, neste exemplo, a altura máxima de água tende a diminuir fortemente (para valores da ordem de $0,4 H_{BARR}$) entre a barragem e uma secção a cerca de $100 H_{BARR}$ (8 km), passando o decrescimento da altura para jusante a ser muito mais suave.

7.4.3.5. Ruptura de barragens em série

A ruptura de uma barragem num vale pode agravar as consequências no vale no caso de existirem outras barragens a jusante que sejam também destruídas ou seriamente danificadas pela cheia proveniente do acidente a montante.

Os efeitos dependerão do número e tipo de barragem a jusante e da causa principal do acidente que pode provocar rupturas em cadeia não simultâneas ou rupturas simultâneas (e.g. provocadas por um sismo violento).

FRANCO (1988) apresenta uma análise deste problema com base na análise de duas situações: vale com duas e três barragens em série, respectivamente.

Num vale com duas barragens em série os tempos de ruptura mais desfavoráveis, em termos da amplitude da cheia gerada pelas rupturas de ambas as barragens, podem, eventualmente, não ser os que se obteriam se as barragens estivessem isoladas.

7.4.3.6. Análise da propagação da cheia ao longo do vale

A análise da propagação da cheia provocada pela ruptura de uma barragem apresenta as seguintes dificuldades:

- Leito seco: a condição de fronteira a jusante é móvel e desloca-se com a velocidade de propagação da frente de onda.
- Leito a jusante com escoamento inicial: aparecimento de uma onda de frente abrupta que se propaga ao longo do canal com velocidade diferente da celeridade das pequenas perturbações. Na zona adjacente à frente de onda há que juntar equações especiais para tornar resolúvel esta condição de fronteira móvel.
- O escoamento a jusante da barragem pode ser rápido ou lento. A resistência do leito tenderá a fazer com que o escoamento seja lento à excepção de uma zona adjacente à frente de onda no caso de leito inicialmente seco.
- No caso de o canal ser muito irregular a simulação do escoamento imediatamente após a ruptura da barragem pode ser difícil de obter.

Fora das zonas críticas junto das frentes de onda são, em geral, utilizados os métodos de cálculo adoptados para a análise dos regimes gradualmente variáveis, nomeadamente os baseados nas equações de Saint-Venant (modelo unidimensional).

As equações de Saint-Venant, na forma unidimensional em que as variáveis dependentes são a velocidade V e a altura de água h podem ser apresentadas da seguinte forma não-conservativa:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{A}{B} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (7.12)$$

- Equação da dinâmica

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g (J - i) = 0 \quad (7.13)$$

em que:

- t = variável tempo;
- x = distância medida na direcção do escoamento;
- A = secção transversal;
- V = velocidade do escoamento;
- g = aceleração da gravidade;
- h = altura de água;
- B = largura superficial da secção molhada;
- J = perda de carga unitária;
- i = declive longitudinal do canal (adimensional).

Os métodos baseados em equações básicas escritas sob a forma de conservação e resolvidos por métodos numéricos especiais permitem a simulação das ondas de frente abrupta sem a necessidade de se introduzirem equações suplementares. Estes são os métodos mais adequados à análise da propagação das cheias induzidas por rupturas de barragens.

No caso contrário será necessário identificar a condição de fronteira correspondente à onda de frente abrupta que se propaga ao longo de um canal com escoamento inicial.

As características geométricas do vale poderão aconselhar a aplicação de modelos hidrodinâmicos mais potentes; nomeadamente os modelos bidimensionais (2-D). A formação das ondas de frente abrupta poderão exigir técnicas numéricas especiais (FRANCO, 1996).

7.4.3.7. Modelação da brecha

A modelação da brecha na barragem é um aspecto fundamental na simulação computacional das cheias induzidas pelo acidente ou cenário que se pretende estudar.

Nos modelos completos e acoplados, tendo em conta, simultaneamente, o comportamento dinâmico na albufeira e no vale a jusante, a barragem e a respectiva brecha constituem uma condição de fronteira interna que depende, nomeadamente, dos seguintes factores:

- tipo de geometria variável ou modo de abertura da brecha durante a fase de abertura e na fase final;
- dimensões finais da brecha;
- duração da fase de abertura da brecha.

As características da brecha dependem, basicamente,

- do tipo de barragem;
- da causa do acidente e da ruptura.

- Em geral, considera-se que as barragens em betão do tipo arco-abóboda rompem totalmente e muito rapidamente, em particular no caso de um acidente nos encontros, contudo resistem, em geral, muito bem ao galgamento.

- Nas barragens em betão do tipo gravidade poderá ocorrer um colapso geral, no caso de uma situação de instabilidade provocada por cargas hidrostáticas e uma muito deficiente capacidade de equilíbrio global (e.g. segurança à rotação), situação resultante de erro ou deficiência no projecto ou, ainda, um problema generalizado nas respectivas fundações; admite-se, contudo, que o cenário mais provável é o da abertura da brecha por remoção sucessiva de blocos ou a ruptura da zona superior do perfil da barragem no caso de excedência de tensões limites numa zona menos espessa do perfil da barragem, para a situação de galgamento; admite-se, em geral, uma ruptura parcial e gradual.

- Nas barragens em betão com contrafortes admite-se, como cenário típico, o colapso de um contraforte ou a ruptura da zona (e.g. em arco) entre dois contrafortes; considera-se, assim, uma ruptura parcial e relativamente rápida.

- Nas barragens de aterro a ruptura é, em geral, gradual e parcial; é o tipo de barragem onde a brecha iniciada por erosão interna por percolação ou por galgamento leva mais tempo a evoluir.

Em todos os casos, a modelação das condições de abertura da brecha é ainda muito difícil. Um dos casos mais estudados, nomeadamente a partir de casos reais, é o respeitante a barragens de terra. A modelação da ruptura gradual de uma barragem deste tipo é difícil tendo em conta que as dimensões da brecha e as características do escoamento através dela são interdependentes.

O estudo das brechas de barragens de terra é o mais desenvolvido atendendo ao elevado número de barragens deste tipo e à susceptibilidade do mesmo a alguns eventos:

- galgamento e erosão do talude de jusante;

- erosão da barragem por efeito de percolação localizada;
- macro instabilidade de uma parte importante do corpo da barragem, com deslizamento de taludes;
- micro instabilidade conduzindo a aparecimento de fenómenos de erosão interna localizados.

Regra geral, o processo tem duas fases, a barragem começa por sofrer um processo de erosão na zona mais fraca com uma elevada taxa de erosão na vertical. A seguir inicia-se a erosão lateral e a brecha alarga até se atingir uma situação de equilíbrio.

Os principais métodos de modelação e análise podem ser agrupados em duas categorias:

- baseados no processo físico, usando um modelo de erosão decorrente da aplicação dos princípios de hidráulica, transporte de sedimentos e mecânica dos solos (e.g. o modelo BREACH);
- modelos paramétricos, com base na fixação das características de evolução da brecha (e.g. abertura progressiva proporcional ao tempo de uma brecha rectangular ou trapezoidal).

As características da brecha são frequentemente estimadas em função de casos de acidentes históricos.

7.4.3.8. Estudos pioneiros em Portugal

A experiência portuguesa em estudos desta natureza já é significativa. Salientam-se os estudos pioneiros na década de 80 (anteriores ao RSB) das cheias induzidas pela ruptura das seguintes barragens:

- barragem de Castelo do Bode, Rio Zêzere (ALMEIDA e HENRIQUES, 1982);
- barragem da Agueira e Açude da Raiva, Rio Mondego, envolvendo simulação bidimensional (ALMEIDA e RODRIGUES, 1984 e 1986);
- onze barragens no Rio Douro (ALMEIDA e ORNELAS, 1987);
- barragem da Meimoa, Ribeira da Meimoa (COBA, 1987);
- barragens do Funcho e Silves, Ribeira do Arade (COBA, 1986);
- barragem do Torrão, Rio Tâmega (NOGUEIRA e RIBEIRO, 1987).

Exemplo: Barragem de Castelo do Bode

A barragem de Castelo do Bode, localizada no rio Zêzere, é em betão, do tipo arco-gravidade, com 115 m de altura e 400 m de desenvolvimento no coroamento. Para o nível de pleno armazenamento o volume total da albufeira é de cerca de $1\,070 \times 10^6 \text{ m}^3$.

A jusante da barragem, o rio corre num vale encaixado com um leito definido cuja largura para caudais normais é da ordem dos 100-150 m. A confluência com o rio Tejo faz-se a cerca de 12 km da barragem, tendo o rio Zêzere neste seu trecho final um único afluente importante (o rio Nabão). A jusante do ponto de confluência, o rio Tejo escoar-se também num vale encaixado mas mais largo (largura da ordem de 400-500 m) num trecho com cerca de 5 km de comprimento (entre Constância e Tancos). A jusante deste trecho e a montante de Constância, o leito de cheia do rio Tejo pode alargar-se significativamente, para caudais elevados e não tendo em conta diques de defesa.

No que respeita a ocupação na zona a jusante próxima da barragem há a referir as localidades de Constância (na zona de confluência dos rios Zêzere e Tejo), Praia do Ribatejo, Tancos, Entroncamento e Golega bem como algumas instalações militares e industriais, com uma população estimada em cerca de 15 000 habitantes.

A caracterização aproximada do leito e da topografia foi feita com base na carta militar à escala 1:25 000.

No que concerne a hipótese de ruptura total e instantânea, o hidrograma de cheia, de acordo com a fórmula de THIRRIOT e os ábacos de RAJAR, 1973, tem as seguintes características para uma altura de água inicial na albufeira de 100 m e caudal afluente nulo:

- Caudal máximo $Q_M = 140\,000 \text{ m}^3/\text{s}$
- Instante de $Q_{M/2}$ $T_{1/2} \approx 21 \text{ minutos}$
- Duração total $T_r = 8 \text{ horas}$

Adoptando o valor $K = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para o coeficiente de Gauckler-Strickler obtiveram-se os seguintes resultados, para a secção do rio Zêzere imediatamente a montante da confluência com o rio Tejo (Constância):

- Instante de chegada da frente de onda (após a ruptura) ... 15 min
- Velocidade média de propagação da frente de onda 48 km/h
- Cota máxima de água (sem influência da confluência) 70 m
- Instante da ocorrência da cota máxima após a chegada da frente de onda 10 min

Da análise preliminar conclui-se que os tempos de chegada da frente de onda e da ocorrência da cota máxima, da água (da ordem de 25-30 minutos após a ruptura da barragem) só poderiam permitir a evacuação dos habitantes da zona de Constância e Tancos de acordo com um esquema de alarme sonoro local, desencadeado logo que ocorresse o acidente. Disposições automáticas

para afastar o tráfego rodoviário das zonas inundáveis poderiam também ser previstas. O trecho do rio Tejo referido e todo o trecho do rio Zêzere a jusante de Castelo do Bode seriam as zonas provavelmente mais críticas, atendendo ao amortecimento que a cheia sofreria nas zonas baixas a montante de Constância e a jusante de Tancos.

Exemplo: Barragem do Arade

O caso em estudo é a barragem do Arade, no Algarve. Foram realizadas simulações com modelo unidimensional e com modelo bidimensional.

O modelo unidimensional - Modelo ROTBARR - desenvolvido em FRANCO (1988) para simulação de vales irregulares. No presente caso, este modelo foi utilizado para simular o hidrograma resultante da ruptura da barragem do Arade e para propagar a cheia ao longo do vale a jusante. Os resultados foram comparados com os obtidos com o modelo bidimensional que utiliza, como condição de fronteira a montante, o hidrograma gerado por este modelo unidimensional, na secção da barragem.

O modelo bidimensional, para simulação da propagação de cheias em vales reais - Modelo BIPLAN - foi desenvolvido para complementar o modelo unidimensional nos trechos de rio onde este tipo de modelação seja insuficiente (FRANCO, 1996).

A barragem do Arade é uma barragem de terra com núcleo central de argila. Tem 50 m de altura e 246 m de desenvolvimento do coroamento. O seu nível de pleno armazenamento (NPA) situa-se à cota 58,00 e o nível de máxima cheia (NMC) à cota 61,00 a que corresponde um volume total de armazenamento de 28,4 hm³. O caudal de dimensionamento do descarregador de cheias (em poço com quatro comportas de segmento) é 500 m³/s. Os paramentos de montante e de jusante tem declives respectivamente de 1/3 e 1/2.

O tempo de ruptura foi fixado em 0,25 h (15 min) e a largura da brecha em 40 m. A altura, relativamente ao talvegue, da base da brecha, na sua configuração final, foi fixada em 6 m. No início da ruptura, o nível da água na albufeira estava à cota do coroamento. As condições iniciais no rio foram as correspondentes à cheia com um período de retorno de 100 anos (400 m³/s).

A simulação com o modelo unidimensional - ROTBARR - permitiu uma primeira simulação da propagação da cheia ao longo do trecho do rio em estudo, e a obtenção do hidrograma de caudais a jusante da barragem que foi utilizado como dado de entrada, no modelo bidimensional. Em ambas as simulações o coeficiente de Manning-Strickler utilizado foi $K_s = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

O trecho de cálculo utilizado no modelo unidimensional foi $\Delta x = 50 \text{ m}$ o que implicou 270 secções de cálculo (13,5 km, de rio incluindo a albufeira de

Silves). Foram levantadas 15 secções transversais ao longo do rio. A secção 1 está no início da albufeira, a secção 4 é a secção da barragem e a simulação termina na secção 15. O tempo máximo de simulação foi 5 000 s.

No modelo bidimensional, os trechos de cálculo considerados, Δx e Δy , foram de 25 m, tendo o domínio de cálculo uma área de $4,35 \times 5,00 = 21,75 \text{ km}^2$, o que implicou a utilização de 34 800 pontos de cálculo. Só foi levantada a topografia (cotas dos pontos de cálculo) abaixo da cota 50 por se ter verificado com base nos resultados da simulação unidimensional, que o escoamento, a jusante da barragem, nunca atingia essa cota. O passo de cálculo é variável sendo actualizado no final de cada instante de cálculo. Ao longo da simulação, com 5 000 s de duração, o passo de cálculo oscilou em torno de 0,7 s.

O hidrograma de caudais efluentes obtido com o modelo ROTBARR a jusante da barragem que foi utilizado no modelo BIPLAN. Conforme é possível verificar, em cerca de 11 minutos (660 segundos) o caudal aumenta a partir de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ até um caudal de ponta de cerca de $13\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor é cerca de 26 vezes superior ao caudal de dimensionamento do descarregador de cheias.

Na Fig. 7.18 estão apresentados os hidrogramas das alturas de água obtidas no talvegue do rio com os dois modelos, para a secção a 5,9 km da barragem.

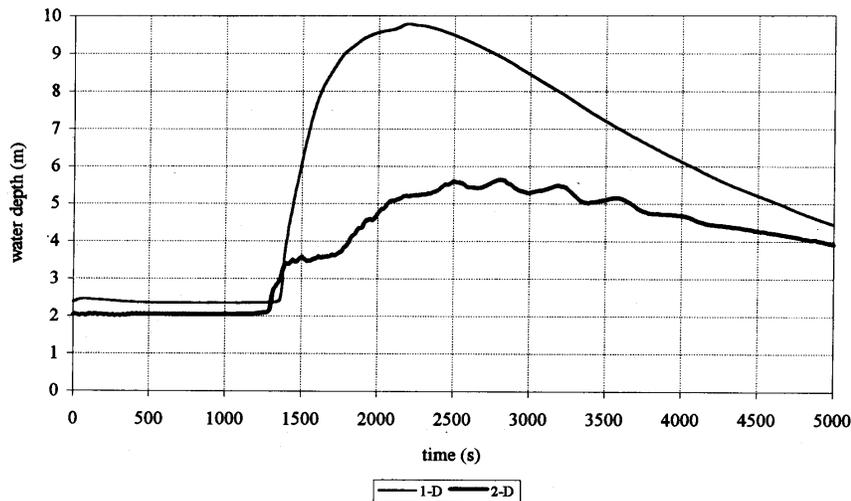


Fig. 7.18 - Hidrograma de alturas obtidos com os modelos ROTBARR (1-D) e BIPLAN (2-D) na secção ao km 5,9 a jusante da barragem (no talvegue do rio) (FRANCO, 1996).

A análise da topografia do terreno pode justificar o comportamento diferente dos dois modelos e evidencia a supremacia do modelo bidimensional na simulação de cheias em vales com curvas acentuadas, zonas de inundação fora do leito de cheia e existência de confluências. As zonas com recirculação provocadas pela configuração de certas zonas do vale é bastante visível no campo de velocidades.

7.5. CENÁRIOS POTENCIAIS DE RISCO HIDRODINÂMICO

7.5.1. Considerações gerais

No âmbito do RSB, o dono da obra deverá proceder, nas fases de projecto ou quando novas condições de segurança o exigirem, ao estudo de ondas de inundação que incluirá a determinação das alturas da água a atingir nas zonas inundáveis e dos respectivos tempos de chegada, constituindo o mapeamento dessas zonas uma carta de risco hidrodinâmico que servirá de base à definição de estratégias de protecção, nomeadamente para os planos de emergência externa. Os resultados destes estudos deverão, assim, ser comunicados ao SNPC.

A obtenção dos mapas de inundação permitirá, numa primeira aproximação, graduar o risco potencial conforme é referido no RSB (Baixo, Significativo ou Elevado) em função da ocupação das áreas inundáveis. O estudo dos cenários potenciais de risco hidrodinâmico poderão ser executados na fase de projecto logo que se conheçam as características da barragem e da albufeira e a caracterização do vale a jusante. Para o estudo completo destes cenários deverá conhecer-se a cheia de projecto. No entanto, em algumas situações esta cheia poderá vir a depender da análise dos efeitos das inundações a jusante exigindo um processo iterativo.

De acordo com o que foi exposto no ponto anterior, o estudo da onda de inundação no vale a jusante de uma barragem é um problema de escoamento em regime rapidamente variável com superfície livre e eventual formação de uma ou mais frentes de onda abruptas. As metodologias de análise podem basear-se nos seguintes tipos de modelação:

- matemática (soluções analíticas);
- computacional (numérica);
- física (modelo reduzido).

As soluções analíticas são de validade limitada, só devendo ser utilizadas para análises preliminares ou para obtenção de resultados muito aproximados, tendo em conta as condições para as quais são deduzidas. Por outro lado, o estudo do fenómeno global num modelo físico é praticamente impossível: pressupõe a adopção dum modelo de dimensões significativas para evitar que os efeitos de escala sejam relevantes. Em casos excepcionais, os modelos físicos podem ser utilizados em conjugação com os modelos computacionais, quer para a aferição destes últimos, quer para melhorar o conhecimento de alguns aspectos da propagação da cheia, como, por exemplo, o estudo de singularidades e de condições de fronteira especiais, a ocorrência e alternância de regimes rápidos e lentos (com formação de ressaltos hidráulicos móveis) e os efeitos bidimensionais em zonas de planície. Exemplo de um modelo físico para o estudo da propagação da onda de inundação é o modelo, actualmente construído no LNEC de uma zona do vale do rio (a jusante das barragens de Funcho e Arade), no sul de Portugal (ver Fig. 7.19)



Figura 7.19 - Modelo físico do rio Arade construído no LNEC (Projecto NATO).

Os modelos computacionais, tendo em conta a actual capacidade informática, constituem a metodologia mais adequada para a análise da maioria dos casos.

No presente ponto apresentam-se alguns critérios e recomendações relativos ao documento **Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico** a elaborar pelo dono da obra no âmbito do RSB.

7.5.2. Modelação computacional da cheia

A modelação computacional da inundação no vale compreende **duas fases**: a caracterização da cheia na secção da barragem acidentada e a caracterização da propagação das perturbações tanto para montante desta secção como para jusante.

No que respeita à **primeira fase**, de acordo com exposto no ponto 7.4, constata-se que o hidrograma de cheia efluente da barragem em ruptura é influenciado pelas características da brecha: geometria, dimensões e duração da respectiva formação (tempo de ruptura).

A **segunda fase** consiste na propagação da onda de inundação (ou da cheia induzida pelo acidente) que deverá possibilitar o traçado dos mapas de inundação e o conhecimento, tanto quanto possível rigoroso, dos parâmetros que caracterizam a cheia (onda de inundação), nomeadamente:

- caudal máximo;
- nível máximo (altura máxima de águas);
- velocidade máxima;
- instante de ocorrência do nível máximo;
- tempo de chegada do início da cheia após a ruptura.

Diversos factores influenciam os resultados da modelação computacional de uma cheia induzida pela ruptura total ou parcial da barragem num determinado vale. Saliem-se, pela sua importância, os seguintes:

- cenários iniciais de ruptura da barragem;
- tipo de modelo computacional adoptado;
- caracterização da geometria e da rugosidade do vale.

7.5.3. Cenários e parâmetros de simulação

• CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Nos estudos a realizar no âmbito de uma análise de risco e de planeamento de emergência, para aplicação do RSB, não se pode garantir qual será o tipo de ruptura da barragem. Nesta conformidade, a estimativa das

áreas a jusante em risco é feita com base no cálculo (simulação de propagação e inundação) de cheias correspondentes a cenários de ruptura convencionados.

Na aplicação corrente do RSB, a avaliação das zonas ou áreas de risco a jusante de barragens deverá balancear o rigor adequado, compatível com o levantamento topográfico disponível e o modelo matemático seleccionado, com a eficácia, não se devendo multiplicar desnecessariamente o número de cenários a simular. Assim, aconselha-se que o número de cenários não exceda quatro, sendo dois correspondentes a hipotéticos cenários de ruptura, um correspondente a uma situação de emergência sem ruptura e, por fim, um conjunto de sub-cenários especiais para melhor conhecer o comportamento do sistema hidráulico:

- **Cenário 1 ou Cenário extremo de ruptura;**
- **Cenário 2 ou Cenário de ruptura mais provável;**
- **Cenário 3 ou Cenário de operação normal extrema;**
- **Cenário 4 ou Cenários de operação anómala.**

No contexto do RSB os cenários 1 e 2 são os considerados fundamentais para o estabelecimento do plano de emergência externo. Os cenários 3 e 4 tenderão a ser mais úteis para o plano de emergência interno.

• **PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO**

Tendo em conta o interesse em uniformizar os critérios que estão na base da realização de estudos de propagação da cheia provocada por uma hipotética ruptura de barragem, no âmbito do RSB, propõem-se determinados valores para os seguintes diferentes parâmetros:

- condições iniciais, dimensões da brecha e tempo de ruptura;
- fronteira de jusante;
- rugosidade do leito;
- escala de mapeamento.

- **Condições iniciais**

As condições iniciais a estabelecer incluem os caudais afluentes à albufeira e o nível inicial nesta. Desta forma, se se considerar a ruptura por galgamento, o nível inicial na albufeira deve ser pelo menos o NMC (e.g. no caso de assentamento anómalo da barragem) ou um nível máximo a uma cota superior à cota de coroamento da barragem.

Para uma brecha provocada por um sismo ou por erosão interna as condições iniciais na albufeira devem corresponder ao nível de pleno armazenamento (NPA). Um terceiro caso deve ser considerado quando se

simula a inoperacionalidade parcial do descarregador, quando uma cheia inferior à de dimensionamento pode resultar no galgamento da barragem.

É importante definir para os cenários que venham a ser adoptados duas **situações iniciais** completamente distintas:

- acidente com ruptura no contexto de uma cheia em curso, nomeadamente a cheia de projecto ou superior, que conduza a uma situação de galgamento por excedência da capacidade dos órgãos de descarga;
- acidente com ruptura no contexto de uma situação meteorológica normal (sem cheias), como pode acontecer em resultado da acção de um sismo, de uma erosão interna numa barragem de aterro, ou no caso de uma barragem móvel ou de uma ruptura de fundação; nesta situação, o leito a jusante poderá ser considerado como estando seco ou com um caudal mínimo.

- Geometria e dimensões da brecha

Na maioria dos casos práticos, no âmbito de uma análise de risco, a brecha na barragem é simplificada e caracterizada a partir de uma geometria convencional (trapezoidal ou triangular, como caso particular), das respectivas dimensões e da duração de ruptura. Estes parâmetros deverão ser definidos em função do tipo de barragem e do cenário a simular. Para os Cenários 3 e 4, que não incluem ruptura, não é necessário estabelecer critérios para as dimensões da brecha e tempo de ruptura. Para os cenários 1 e 2, que correspondem a ruptura da barragem, os valores a adoptar podem ter por base as rupturas históricas referidas na literatura⁴.

As características das brechas influenciam os valores de caudais, cotas de água e tempos de chegada da onda (bem como o intervalo de tempo disponível para uma eventual evacuação). Deve ter-se presente que, para locais situados relativamente perto da barragem, a largura da brecha e, principalmente, o tempo de ruptura influenciam dramaticamente os valores dos caudais e dos níveis máximos. Das três características da brecha, a geometria da mesma é a que menos influência tem no escoamento efluente.

A definição das características da brecha perde relevância quando se pretende analisar os trechos do vale situados muito a jusante da barragem. Nestes casos, é o próprio processo de propagação da onda que é mais determinante, nomeadamente os efeitos de rugosidade, armazenamento em

⁴ Por exemplo, em SINGH e SCARLATOS (1988) e MACDONALD e LANGRIDGE-MONOPOLIS (1984).

zonas laterais e atenuação dos caudais máximos. Contudo, ao contrário dos valores de caudais e níveis máximos, o tempo de chegada da onda é sensível a mudanças nos parâmetros das brechas.

Nas barragens de terra, e tendo em vista o rigor na caracterização do hidrograma efluente e do caudal máximo ou de ponta, têm sido desenvolvidas metodologias para a simulação computacional da evolução da brecha, envolvendo, conjuntamente, o processo hidrodinâmico e o processo de erosão e transporte do material sólido. De entre estes modelos, o mais conhecido é o BREACH de Fread, elaborado nos anos oitenta. Em ALMEIDA e FRANCO (1994) podem ser encontradas referências sobre estes modelos de informação automática de brechas em barragens de terra.

- Fronteira de jusante

Uma das questões a considerar quando se pretende simular a propagação da cheia e determinar as áreas de inundação é a de definir a secção correspondente à fronteira de jusante do domínio do vale a considerar em cada estudo particular. Podem considerar-se diversos critérios para estabelecer até onde se deve realizar o cálculo, nomeadamente:

- a foz do rio;
- a confluência com outro rio;
- uma secção em que as alturas de água da cheia simulada sejam da ordem de grandeza das correspondentes a cheias com um período de retorno definido ou da maior cheia natural conhecida;
- uma secção a partir da qual se verifiquem alturas de água inferiores a um dado valor fixado (por exemplo 1 m);
- uma secção a partir da qual se estabeleça um grau de risco que se considere aceitável.

- Escala de mapeamento

Na maior parte dos países onde são realizados mapeamentos das áreas de inundação utiliza-se a escala 1:25 000, sendo de facto e de uma forma geral, esta a maior escala que cobre a totalidade do território. No entanto, em alguns países, como por exemplo a França, aconselha-se o refinamento da escala, através de levantamentos topográficos específicos e por fotogrametria aérea, principalmente em zonas muito planas e zonas urbanas. Apesar de constituírem medidas caras, são indispensáveis para uma caracterização adequada destas zonas mais sensíveis.

Em alguns países considera-se inadequada a escala 1:25 000. A experiência italiana conduziu, por exemplo, à rejeição dos estudos conduzidos a esta escala, considerando-se que esta escala só será apropriada quando o

caudal máximo é, pelo menos, 10 vezes superior ao caudal de ponta de cheia com o período de retorno $T = 1000$ anos.

Por outro lado, há países que adoptaram como escalas de trabalho normalizadas escalas menores que a 1:25 000. No Canadá, país com vastas zonas quase desérticas, a escala 1:50 000 é considerada apropriada.

- Rugosidade do leito

A escolha das características de rugosidade hidráulica do vale, concretizadas por coeficientes e parâmetros empíricos é delicada. Estes coeficientes terão que englobar não só a rugosidade dos terrenos inundáveis, como a rugosidade de forma do vale e os coeficientes correspondentes a singularidades. No entanto, torna-se muito difícil ou mesmo impossível calibrar com as cheias naturais a rugosidade de zonas que nunca foram inundadas.

Em BISTER *et al.* (1996) apresenta-se uma tabela, onde os valores do coeficiente de Strickler variam entre 15 e $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, tendo em conta determinadas características do vale, nomeadamente: o relevo, a natureza e densidade da vegetação e a presença de aglomerados de maior ou menor densidade de ocupação.

Atendendo às incertezas nos valores que caracterizam as macrorugosidades do vale, devem ser executadas análises de sensibilidade, variando (para mais ou menos) o valor do parâmetro que caracteriza a rugosidade.

7.5.4. Modelos de análise ou de simulação

Os modelos computacionais baseados em esquemas numéricos, tendo em conta as actuais capacidade de cálculo automático, constituem a metodologia de análise adequada aos casos mais complexos (vales irregulares ou com singularidades relevantes) ou mais importantes (atendendo aos potenciais danos a jusante). Estes modelos simulam melhor a realidade física. Existem diversos modelos numéricos para simulação dos escoamentos ou cheias provocados pela ruptura de barragens, diferindo no âmbito específico de aplicação, precisão, robustez de cálculo, estabilidade e complexidade de operação. Os modelos computacionais de simulação do escoamento podem ser divididos em três tipos (ALMEIDA e FRANCO (1993)). Tem-se, por ordem crescente de precisão:

1. Modelos simplificados;
2. Modelos hidrodinâmicos uni-dimensionais (1-D);
3. Modelos hidrodinâmicos bi-dimensionais (2-D).

A selecção do modelo deverá depender das características específicas de cada caso, incluindo a complexidade e ocupação do vale a jusante, a importância da barragem, a escala do levantamento topográfico de base e do mapeamento das zonas inundáveis entre outras.

7.5.5. Barragens em série ou em cascata

• Critérios gerais

De acordo com o referido nas Normas de Projecto de Barragens (artigo 58º) o estudo deve ter em conta a possível existência de barragens em cascata no vale ou na bacia hidrográfica a montante.

Uma metodologia possível é a seguinte:

- Para a aplicação do RSB à barragem mais a montante aplicar-se-ão os cenários adoptados e já referidos e serão analisados os efeitos no vale a jusante, incluindo nas albufeiras e barragens aí existentes;
- Os efeitos nas albufeiras e barragens podem ser caracterizados do seguinte modo:
 - a albufeira a jusante absorve a cheia induzida pela ruptura a montante sem risco de galgamento, passando para jusante um caudal da ordem de grandeza da do caudal de projecto do descarregador de cheias;
 - a albufeira a jusante não tem capacidade disponível para absorver a cheia proveniente da ruptura da barragem de montante, excedendo-se a capacidade de descarga dos órgãos de segurança; nesta situação podem adoptar-se os seguintes critérios:
 - 01 - A barragem é em betão e admite-se o galgamento da mesma pela cheia excedente que deverá ser tida em consideração na propagação para o vale a jusante.
 - 02 - A barragem é em betão e admite-se a respectiva ruptura ou é em aterro e a respectiva ruptura será mesmo inevitável. Nesta opção serão adoptados os procedimentos já referidos de caracterização e de modelação da brecha, admitindo que o nível inicial na albufeira atinge a cota do coroamento ou outra cota de referência para início de ruptura.
- No caso do cenário inicial corresponder à situação sem cheia inicial, o nível inicial das albufeiras pode ser o respectivo NPA.

- No caso do cenário inicial corresponder à situação com cheia inicial, o nível inicial das albufeiras a jusante pode estar compreendido entre o NPA e respectivo NMC, no caso de ser admissível a condição de cheia simultânea em todo o trecho do vale a jusante. No caso contrário, as albufeiras mais a jusante poderão ter o nível inicial correspondente ao respectivo NPA.
- No caso de um cenário de ocorrência de um sismo de intensidade elevada e âmbito regional deverá considerar-se que todas as barragens do vale possam sofrer a ruptura, sem cheia inicial e com as albufeiras com o nível inicial correspondente aos respectivos NPA.

Para a elaboração do plano de emergência externo ou do vale a jusante as autoridades da protecção civil deverão receber resultados dos diferentes estudos de Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico elaborados pelos responsáveis das sucessivas barragens em série, incluindo, em cada um dos estudos, os efeitos a jusante.

Contudo, a combinação de cenários e de situações, nomeadamente a análise da condição mais severa, incluindo barragens em diversos afluentes, poderá exigir estudos ou análises complementares envolvendo a totalidade ou parte das barragens existentes no vale ou na bacia hidrográfica. A coordenação deste estudo integrado não está explicitamente definida, mas deverá envolver as autoridades de protecção civil (responsáveis pelos planos de emergência externa), a Autoridade e os donos da obra das barragens em cascata. Com efeito, conforme se mostra em FRANCO (1988) os efeitos a jusante de barragens em cascata dependem de diversos factores nomeadamente:

- distância entre barragens;
- tempo de ruptura de cada barragem;
- modo de ruptura simultâneo ou em cadeia.

A influência destes e de outros factores na caracterização das zonas inundáveis a jusante de cada barragem deverá exigir uma análise de sensibilidade e de maximização.

Nestas situações, envolvendo barragens em série suficientemente próximas para interagirem, a actualização de modelos hidrodinâmicos completos abrangendo os trechos dos rios e as albufeiras parece ser incontornável. Ponto importante é a fixação do critério de ruptura ou não ruptura de cada barragem, em função da cota máxima de água na respectiva albufeira (incluindo a altura de escoamento crítica sobre o coroamento).

7.5.6. Mapa de inundação e carta de risco hidrodinâmico

Uma vez efectuada a simulação da propagação da cheia provocada pela ruptura da barragem, está-se em condições de efectuar o mapeamento das áreas inundáveis que podem servir de base ao sistema de aviso e alerta e à elaboração do plano de emergência do vale. O zonamento das áreas inundáveis pode ser definido em função das características hidrodinâmicas, nomeadamente:

- as máximas alturas (ou cotas dos níveis) de água;
- os instantes de chegada da frente de onda ou da cheia e da altura máxima de água;
- o valor máximo do produto da velocidade v pela altura h de água (potência hidráulica unitária);
- a velocidade máxima do escoamento (que pode caracterizar a capacidade destrutiva);
- a duração das submersões (que permite avaliar os custos materiais e o tempo de recuperação);
- a existência a jusante de aglomerados populacionais, infra-estruturas, etc..

À semelhança do que ocorre em alguns países, pode-se adoptar um zonamento de risco hidrodinâmico com três níveis. As áreas inundáveis e as características hidrodinâmicas podem corresponder à simulação do cenário mais severo (cenário de ruptura catastrófica). Em VISEU e MARTINS, 1998 este critério é aplicado a diferentes exemplos de casos de ruptura:

1. zona vermelha, zona de alto perigo, atingida pela onda em menos de meia hora ou onde $Uh > 1 \text{ m}^2/\text{s}$, caso existam aglomerados populacionais ou edificações dispersas permanentes ou não;
2. zona amarela, zona de perigo médio, atingida em mais de meia hora ou onde $Uh > 1 \text{ m}^2/\text{s}$, caso existam aglomerados populacionais ou edificações dispersas permanentes ou não;
3. zona verde, zona de baixo perigo onde $Uh < 1 \text{ m}^2/\text{s}$.

7.5.7. Classificação de barragens em função do risco

No RSB as barragens deverão ser classificadas de acordo com os riscos potenciais, ou seja de acordo com as perdas em vidas humanas e bens materiais. Esta avaliação só poderá ser efectuada com base nos mapas de zonas de inundação e na ocupação das mesmas. Recorda-se que esta classificação irá determinar alguns dos procedimentos de segurança das barragens.

A graduação prevista no RSB baseia-se na distinção entre a “ausência de perdas de vidas humanas e custos materiais reduzidos” (risco baixo), “perda de algumas vidas humanas e custos materiais relativamente importantes” (risco significativo) e “perda de um número apreciável de vidas humanas e os custos materiais sejam altos” (risco elevado). Não deixa margem para dúvidas a dificuldade prática de definir as perdas com rigor objectivo. Em outros países, os regulamentos tentam ser mais precisos no sentido de facilitar a classificação.

Em Espanha, o Guia Técnico tenta ultrapassar a base qualitativa da classificação do RSB:

Categorias RSB	Categorias do R. Espanhol
Baixo	C
Significativo	B
Elevado	A

O regulamento espanhol é relativamente mais preciso na definição das categorias:

Categoria A - inclui a hipótese de afectar gravemente núcleos urbanos ou serviços (entenda-se infra-estruturas) essenciais.

Categoria B - inclui danos materiais ou ambientais importantes ou sobre um reduzido número de habitações.

Categoria C - inclui danos materiais prováveis de moderada importância e só incidentalmente com perda de vidas humanas.

O Guia Técnico espanhol propõe a definição de núcleos urbanos como sendo agrupamentos com mais de dez edifícios de habitação ou quando a população seja superior a 50 habitantes. Um reduzido número de habitações é considerado como inferior ou igual a cinco. Os danos materiais no guia

espanhol incluem os seguintes tipos de bens: indústrias e polígonos industriais, propriedades rústicas, zonas cultivadas e infra-estruturas.

Nos danos ambientais inclui-se o património histórico e cultural e as zonas de protecção ambiental (parques naturais).

É de referir que, em Espanha, a classificação do risco potencial é sujeita a uma aprovação prévia das autoridades.

7.6. PLANOS DE EMERGÊNCIA

7.6.1. Considerações gerais

Entende-se ser adequado considerar dois tipos de planos de emergência, não obstante tal não estar explicitamente referido no RSB. No entanto, a experiência internacional e a natural distinção de competências técnicas exigidas no controlo de emergências nas barragens e nas albufeiras, respectivamente. Assim, e na sequência do que foi descrito no ponto referente à gestão do risco, propõe-se que o plano de emergência, em sentido geral, seja constituído pelos seguintes dois planos específicos:

- Plano de Emergência Interno, referente à barragem, albufeira e zona próxima do vale a jusante.
- Plano de Emergência Externo, referente à protecção do vale a jusante afastado da barragem.

Caberá ao dono da obra, através de uma equipa técnica especializada, elaborar o Plano de Emergência Interno tendo em conta as Normas de Exploração de Barragens.

Caberá às autoridades de protecção civil a elaboração do Plano de Emergência Externo, tendo em conta o documento relativo aos Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico elaborado pelo dono da obra.

7.6.2. Plano de Emergência Interno

7.6.2.1. Filosofia e objectivo

O Plano de Emergência Interno poderá complementar a aplicação das Normas de Exploração de Barragens devidamente adaptada a cada barragem através das normas de segurança específicas do aproveitamento, definidas no artigo 32º do RSB e constituídas por normas de:

- exploração da albufeira;
- operação e conservação dos órgãos de segurança e exploração.

O dono da obra deve garantir o cumprimento das normas de segurança gerais e das específicas do aproveitamento.

O Plano de Emergência Interno ou PEI tem um objectivo muito especial: estruturar e ajudar as operações de controlo da segurança da barragem em períodos ou situações críticas.

A estrutura do PEI pode ser definida com base em exemplos adoptados em alguns países (EUA, Canadá, Austrália, Espanha, entre outros).

Em primeiro lugar, deve compreender-se a filosofia do conceito e do formato deste documento:

- As barragens estão sempre sujeitas a potenciais acções que colocam em perigo a própria segurança estrutural ou do vale a jusante.
- Podem, assim, ocorrer situações, com maior ou menor probabilidade, que exijam acções oportunas e eficazes, por parte do pessoal técnico responsável pela exploração do aproveitamento, nomeadamente na operação do equipamento hidromecânico de segurança.
- Caberá à equipa técnica que elaborará o PEI seleccionar o conjunto de situações adversas ou perigosas consideradas como possíveis de ocorrer, independentemente da respectiva probabilidade, e estudar a melhor resposta às referidas situações por forma a evitar, o mais possível, um acidente grave na barragem, nomeadamente o respectivo galgamento ou a eventual ruptura total ou parcial.
- O PEI deverá ter por base o estudo de acções admitindo que alguns dos pressupostos ou condições de projecto não se verificarão ou que poderão falhar equipamentos previstos no projecto.

Assim, o PEI tem por **objectivo principal** o controlo de uma eventual crise, enquadrando e orientando as principais acções a tomar na barragem, face a cada situação anómala ou perigosa que venha a ser detectada, por forma a garantir a intervenção humana mais correcta sob grande pressão psicológica, sem a necessidade de elaboração de estudos ou análises de base aprofundados ou a tomada de acções ou inconsequentes.

7.6.2.2. Estrutura e constituição

Como sugestão, o PEI deve conter as seguintes partes principais:

1 - Introdução, com a identificação da barragem (localização e aspectos gerais).

2 - Responsabilidade e Autoridade, identificação do dono da obra e das principais autoridades sobre a exploração da barragem; identificação do técnico responsável pela segurança da barragem e pela aplicação do PEI.

3 - Desenvolvimento da Acção, o que implica a **identificação** das potenciais situações anómalas que constituem riscos à segurança da barragem.

4 - Sistema de comunicações, para ser possível por em operação o PEI e o desencadeamento das acções consistentes com o nível de emergência definido, há que prever a barragem com um sistema de comunicações (internas e externas) fiável e operacional.

5 - Acções mitigadoras ou de segurança, de acordo com o tipo de situação detectada e o nível de emergência fixado, o PEI deverá indicar as principais **acções a tomar**, incluindo prioridades e condicionamentos (e.g. manobras de comportas). Neste aspecto, as acções definidas pelo PEI poderão estar incluídas em anexos específicos actualizáveis com a experiência ou sucessivamente acrescentadas com novas recomendações.

6 - Organização interna, indispensável para um controlo de crise eficaz incluirá a existência de um centro (sala) de actuação ou de controlo com a informação indispensável (arquivo técnico) e sistemas de transmissão internos e externos fiáveis; o isolamento da área da barragem e a segurança interna deve estar previsto no PEI por forma a evitar que a eficácia da gestão da crise seja posta em causa por interferência estranha à cadeia de decisão e operação.

7 - Informação à comunicação e ao público, caso esteja previsto, em função do nível de emergência, deverão estar bem definidos os canais de informação a partir da barragem os quais deverão estar coordenados com o controlo de informação que vier a ser estabelecido a um nível mais elevado (e.g. pela protecção civil). Salienta-se a informação (sistema de alerta e de aviso) às populações no trecho do vale a jusante próximo da barragem.

8 - Relatórios de Acidentes e Incidentes, passados incluindo consequências, medidas tomadas nas situações de emergência e recomendações para alteração de procedimentos ou proposta de novos procedimentos operacionais.

9 - Formação, Treinos, Actualização e Revisão, deverão ser previstos os procedimentos a seguir na barragem durante os exercícios para treino operacional do pessoal técnico da barragem, em conjugação com a Autoridade (INAG). Estes treinos servirão de base a eventuais actualizações ou revisões

do PEI. Os exercícios servirão também para formação ou refrescamento do pessoal responsável pela exploração e segurança da barragem.

10 - Documento dos Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico, elaborado pelo dono da obra deverá ser anexado ao PEI por forma a ser possível um adequado entendimento entre os responsáveis pela gestão da crise na barragem e no vale a jusante, respectivamente.

7.6.2.3. Níveis de alerta ou emergência

De acordo com a experiência existente em diferentes países o número de níveis deverá ser três ou quatro. Assim, a título de exemplo, podem ser considerados os seguintes níveis:

- Nível 0 (nível normal ou de rotina), correspondente às condições normais de exploração, com o equipamento operacional e a estrutura em condições de segurança, não sendo previsíveis condições ambientais adversas. Este é um nível de referência que não constitui qualquer estado de alerta ou emergência, mantendo-se, contudo, os dispositivos normais de vigilância e detecção previstos para cada barragem específica.

- Nível 1 (nível de alerta interna ou de prevenção), corresponde a uma primeira mobilização de atenção face a uma potencial situação adversa (e.g. meteorológica) que seja prevista ou esteja em desenvolvimento; os meios normais de operação devem ser mobilizados para uma eventual actuação caso a situação venha deteriorar-se; trata-se de um nível de âmbito interno o que significa que a cadeia de notificação pode ficar, numa primeira fase, restrita à equipa e à organização interna da exploração da barragem.

O sistema de comunicações deve ser testado. Neste nível pode ocorrer a necessidade de proceder a descargas preventivas para jusante, devendo, então, ser activada a cadeia de informação (para o vale a jusante) adequada e prevista nas normas de exploração e no PEI.

- Nível 2 (nível de alerta geral), corresponde a um agravar da situação precedente incluindo a ocorrência de algum evento muito adverso ou um incidente inesperado. Nesta situação considera-se que a segurança da barragem e/ou a segurança do vale a jusante podem ficar sujeitas a uma ameaça grave. O PEI deve enquadrar e definir os procedimentos de gestão do risco interno exigidos ao mais alto nível de competência e qualificação por forma a diminuir a probabilidade de acidente grave na barragem face à situação perigosa presente. Este nível corresponde à constatação de que o controlo da segurança pode vir a deteriorar-se existindo mesmo uma elevada probabilidade de ficar fora do controlo operacional.

A cadeia de notificação deverá, nestas circunstâncias, ser corrida em toda a sua extensão pois poderá vir a ser necessário mobilizar o Plano de Emergência Externo no vale a jusante. O aviso, na zona do vale próxima da barragem, poderá ser desencadeado pelo responsável da segurança da barragem.

Neste nível de alerta, que constitui uma autêntica emergência, deverão ser tomadas decisões a nível interno com repercussões possíveis a nível externo, no vale a jusante, que dependerão, entre outros factores, do tipo de barragem. A comunicação entre o responsável pela situação ou pelo controlo da barragem e dos órgãos da mesma e o responsável pelo controlo da segurança no vale a jusante (protecção civil) é vital para o controlo integrado do risco. Com efeito, as populações nas zonas previamente identificadas como em maior risco (através dos cenários potenciais de risco hidrodinâmico anexos aos planos de emergência) devem ser avisadas ou colocadas em prevenção rigorosa, de acordo com procedimentos previamente estabelecidos, e prontas a evacuar as zonas críticas caso a situação venha a piorar.

- Nível 3 (nível de catástrofe), corresponde à constatação que a situação de segurança vai deixar ou deixou de ser controlável a nível interno (na barragem), nomeadamente: que a probabilidade de ocorrer um acidente grave provocando uma cheia catastrófica para jusante é muito elevada; que é inevitável a ruptura da barragem; que o processo de ruptura já se iniciou; ou que a barragem rompeu. A cadeia de notificação deve funcionar em pleno. As acções de gestão de risco interno terminam e o risco, a nível externo, só poderá agora ser controlado pelas actuações enquadradas e previstas pelo Plano de Emergência Externo, incluindo a aplicação do plano de evacuação e de resposta previamente preparado, tendo em conta a carta de risco hidrodinâmico e os procedimentos definidos em função dos tempos de chegada da frente da onda de cheia e do grau de perigosidade hidrodinâmica nas áreas inundáveis. Nas barragens a jusante, os responsáveis pela segurança das mesmas deverão de preparar, por sua vez, as medidas de segurança necessárias e declarar o nível de alarme ou de emergência que considerarem mais adequado, tendo em conta as previsões dos cenários de risco hidrodinâmico, incluindo o efeito da cheia induzida pela barragem em ruptura nas albufeiras e barragens a jusante. A este nível corresponderá a efectivação máxima do sistema de aviso, em toda a área em risco, por forma a desencadear e concluir, com o maior êxito possível, a evacuação das populações para as posições seguras previamente seleccionadas.

7.6.3. Plano de Emergência Externo

7.6.3.1. Âmbito e objectivo

O Plano de Emergência Externo (PEE) constitui o componente do plano de emergência, previsto no RSB, relativo ao vale a jusante da barragem excluindo a zona próxima à mesma. Tal como o PEI, este plano constitui um instrumento de organização, orientação e enquadramento de acções eficazes no caso de ocorrer uma emergência.

O principal objectivo é o de diminuir o número de vítimas no caso de ocorrer um acidente numa ou mais barragens a montante, incluindo descargas anormais resultantes da tomada de medidas no âmbito do PEI.

O PEE visa, fundamentalmente, a protecção de vidas humanas sendo, assim, um instrumento específico da protecção civil. Nesta conformidade, compreende-se que o RSB (artigo 44º) defina que o “plano de emergência” (entendido aqui como sendo o externo) seja elaborado com **intervenção directa** do centro operacional de protecção civil distrital e do dono da obra (basicamente através da elaboração do documento com os Cenários Potenciais de Risco Hidrodinâmico já referido no ponto 7.5.

De acordo com o RSB, o plano de emergência é um “documento vinculativo que determina as ligações hierárquicas e funcionais de todos os intervenientes, atribuindo-lhes as respectivas missões e garantindo a coordenação e o empenhamento progressivo e meios e recursos para fazer face às consequências de um acidente ou de uma catástrofe”. Não obstante esta característica geral do plano de emergência definida no RSB ser também aplicável ao plano interno é, fundamentalmente, importante ao nível do plano externo.

O plano será submetido a parecer da Comissão de Segurança de Barragens e a aprovação conjunta do SNPC e da Autoridade.

7.6.3.2. Contexto e articulação do Plano de Emergência Externo

Não obstante o RSB solicitar a elaboração de um plano de emergência por cada barragem, na prática este instrumento deve estar inserido num conjunto mais vasto de instrumentos ou planos de protecção civil referentes, nomeadamente:

- a cada vale ou bacia hidrográfica e aos respectivos perigos ou factores de risco específicos, em particular todos os tipos de cheias;
- a cada nível territorial abrangido (municipal, distrital, nacional).

Assim, por razões de eficácia operacional, em particular no que concerne a capacidade de identificação e mobilização de recursos extraordinários bem como o exercício da autoridade na área abrangida pela catástrofe, o PEE deve ser elaborado de forma integrada pelos órgãos competentes do sistema de protecção civil, supervisionados e apoiados pelo SNPC.

7.6.3.3. Estrutura do Plano de Emergência Externo

O Plano de Emergência Externo (PEE) deverá ser elaborado “com intervenção directa do centro operacional de protecção civil distrital” (artigo 44º do RSB), segundo uma estrutura que está em fase de definição (1999). A intervenção do dono da obra materializa-se, basicamente, pela elaboração do documento relativo aos cenários potenciais de risco hidrodinâmico.

Tendo em conta a experiência de outros países e os estudos em curso em Portugal⁷, o PEE poderá ser elaborado por **vales ou por bacias hidrográficas** e poderá ter uma estrutura do seguinte tipo:

- **Introdução**
- **Caracterização dos Riscos**
 - **Actuação em Fase de Emergência**
 - 1 - Execução do Plano**
 - **Âmbito de actuação** (medidas e acções a tomar pelo responsável do PEE, para garantir a eficácia das operações de protecção, aviso, evacuação, socorro e restabelecimento das condições de recuperação)
 - **Organismos de apoio e intervenção** (a definir pelo SNPC para cada vale, bacia hidrográfica ou distrito)
 - **Missões dos agentes de protecção civil** (a definir pela SNPC)
 - 2 - Situação Normal (Nível 0)**
 - Sistema de Acompanhamento de Cheias (sistema suposto operacional na bacia hidrográfica, com ou sem barragens, mas que deve ser consistente com os sistemas de previsão e de vigilância regionais e locais; depende das características da

⁷ Nomeadamente o estudo conjunto da equipa do projecto NATO PO-FLOODRISK, o SNPC e o INAG e a Directiva para elaboração de planos de emergência de protecção civil, aprovada em 15/06/94 pela Comissão Nacional de Protecção Civil, para a estrutura de planos especiais de cheias a nível distrital. A estrutura final ainda não está definida nem aprovada (1999).

bacia e das barragens, caso existam; a definição e caracterização destes sistemas devem constituir um anexo técnico específico do plano).

- Definição dos níveis de alerta e emergência (níveis de prontidão e de actuação em função das potenciais situações previsíveis a nível da bacia hidrográfica ou de uma barragem) ou declarada pelo responsável da segurança de uma das barragens da mesma bacia em correspondência com o respectivo PEI)
- Testes do Plano (definição e caracterização dos exercícios periódicos a realizar para análise da eficácia organizacional, do grau de prontidão e resposta dos agentes de protecção civil e da fiabilidade dos meios de comunicação; inclui o envolvimento concentrado dos responsáveis pela segurança das barragens)

3 - Situações de Alerta e de Emergência (Níveis 1, 2 ou 3)

- Fase de mobilização (nível de alerta ou de potencial emergência declarado pelo responsável da segurança de uma das barragens da bacia hidrográfica, em correspondência com o respectivo PEI ou pelo responsável do PEE no caso de previsão de situação perigosa a nível da bacia hidrográfica)
- Alerta do Sistema de Protecção Civil (activação da cadeia de notificação previamente definida neste item)
- Medidas específicas de actuação no âmbito do Sistema de Protecção Civil (previstas em função do nível de alerta ou emergência)
- Aviso às populações (medidas e meios previstos, conteúdo da comunicação em função do nível de alerta ou emergência)

4 - Fase de emergência mais elevada (níveis mais elevados de alerta ou emergência exigindo as medidas extremas de protecção e de intervenção)

- Plano de evacuação de populações (medidas previstas para aplicação do plano de evacuação, tendo em conta os cenários potenciais de risco hidrodinâmico, e as características locais ao longo dos vales da bacia hidrográfica em causa)

5 - Fase pós-emergência (acções de apoio e reabilitação, análise da eficácia do plano e proposta de eventuais melhorias no mesmo)

6 - Definição de responsabilidades operacionais e institucionais
na execução do plano e na interacção com outras entidades

7 - Coordenação das acções (instruções específicas)

8 - Administração e Logística

9 - Sistema de Comunicações (descrição, localização, testes de fiabilidade e manutenção)

10 - Informação pública (coordenação, responsabilidade e interface, conteúdo das informações, selecção de meios, preparação das mensagens em situação de risco, divulgação das medidas de alerta e evacuação)

• **Anexos Técnicos (anexos específicos para barragem, vale ou bacia hidrográfica)**

Esta estrutura para o PEE é uma das possíveis tendo em conta os objectivos e o âmbito esperado para este plano. A estrutura definitiva dependerá: da experiência que venha a ser adquirida com a aplicação sistemática deste tipo de plano às barragens, vales e bacias nacionais; da organização que venha a ser implementada pelas instituições e autoridades envolvidas na protecção civil e na segurança de barragens.

Os planos de emergência externos devem ser elaborados ao longo dos vales e modificados de acordo com as alterações no mesmo, em particular a construção de novas barragens.

7.6.3.4. Definição das zonas próximas e afastadas do vale

Conforme já foi referido, uma zona do vale mais próxima da barragem deve ser definida como estando incorporada na própria barragem, em termos de segurança e de procedimentos em face de emergência.

A metodologia para a fixação da separação entre as duas zonas não pode ser definida de modo rígido. A zona próxima é aquela onde a intervenção eficaz das autoridades da protecção civil e do sistema planeado para o vale é operacionalmente impossível. Por seu turno, a zona mais próxima é aquela onde a severidade da cheia é mais forte e a vulnerabilidade do vale tende a ser maior. A urgência na aplicação dos procedimentos de emergência, aviso e evacuação, aconselha a que os mesmos sejam desencadeados e implementados pelo responsável da segurança da barragem, de acordo com o plano de emergência interno.

Os factores a considerar na fixação de zona próxima dependem das características do cenário e do acidente, do vale e da respectiva ocupação. Do ponto de vista prático a divisão pode ser baseada em:

- distância fixada pela Autoridade caso a caso ou em geral (10, 15 ou 25 km);
- tempo disponível em função da velocidade de propagação da onda de cheia (e.g. na Suíça, a zona próxima corresponde à distância percorrida pela onda, após a ruptura, em 2 h).

WISEU e MARTINS, 1998, propõem uma metodologia para aplicação em pequenas barragens, baseado no valor do produto $(uh)_{Max}$. Neste contexto, consideram que a zona é de alto risco no caso deste produto ser superior a $1 \text{ m}^2/\text{s}$. A influência de diversos factores (declive do leito do rio, largura do vale, tempo de abertura da brecha e ruptura parcial ou total) foi tida em conta. Os autores concluíram que até 5 km de barragem a zona tende a ser sempre de alto risco.

7.7. ESTIMATIVA DOS DANOS A JUSANTE

7.7.1. Introdução

Não obstante os elevados níveis de segurança estrutural e hidráulico-operacional actualmente atingidos nas barragens mais importantes, em particular nas designadas grandes barragens, o risco residual de acidentes não é nulo e a experiência mostra que têm ocorrido acidentes com ruptura de barragens e danos a jusante.

No âmbito dos estudos de risco e de emergência risco (ERE) que têm vindo a ser objecto deste texto e, em particular na aplicação do RSB, da preparação do plano de emergência externo (PEE) e da organização dos procedimentos de protecção civil, torna-se incontornável adoptar metodologias para avaliação dos efeitos provocados no vale a jusante pelas cheias resultantes de acidentes em barragens.

Em termos históricos é difícil ter conhecimento dos danos totais já ocorridos atendendo a que as informações são, por vezes, incompletas, à dificuldade em homogeneizar os dados referentes a épocas e situações muito diferentes e, ao facto de um elevado número de acidentes em pequenas barragens (provavelmente o grupo com mais acidentes) não ser considerado nas estatísticas oficiais.

Neste capítulo, os danos a jusante são agrupados do seguinte modo: perdas de vidas humanas e perdas de bens materiais.

7.7.2. Perdas de vidas humanas

7.7.2.1. Experiência histórica

De acordo com diversas fontes recolhidas pelo autor, o número total de perdas de vidas humanas resultantes de acidentes em barragens nos últimos 150 anos será superior a um valor da ordem de 20 000. O número real poderá ser significativamente superior atendendo a que não existe qualquer informação sobre o número de vítimas em, pelo menos, 27 acidentes registados em África e na Ásia no presente século. Salienta-se a destruição na China (1975) de duas barragens (Banqias e Shimantan) causada por galgamento induzido por um tufão provocando um número total de 80 000 vítimas (26 000 na zona de inundação próxima). As vítimas indirectas por problemas de epidemias fizeram aumentar o número total de vítimas para cerca de 230 000.

Regista-se, também, como é natural face às diferentes vulnerabilidades dos vales e condições dos acidentes registados nas estatísticas, uma grande variação no número de vítimas de acidente para acidente.

Nos EUA (país onde a informação é das mais completas e acessíveis) ocorreram entre 1960 e 1996, 23 acidentes com barragens provocando pelo menos uma vítima mortal (GRAHAM, 1997). O número total de vítimas correspondente a estes acidentes é de 318. Graham apresenta as seguintes conclusões gerais retiradas da análise destes acidentes:

- Influência da altura das barragens
 - a ruptura de barragens com altura inferior a 6 m provocou 2% das vítimas;
 - a ruptura de barragens com altura entre 6 m e 15 m provocou 86% das vítimas.
- Influência da localização das pessoas no vale a jusante
 - 50% das vítimas mortais estavam localizadas a distâncias inferiores a 4 800 m da barragem acidentada;
 - 99% das vítimas mortais estavam localizadas a distâncias inferiores a 24 km da barragem acidentada (informação baseada em 16 dos 23 acidentes que provocaram 87% do número total de vítimas reportado por Graham).

- Influência do período em que ocorre o acidente

Período de tempo	Número de vítimas/ano (EUA)
1960 - 1979	15
1960 - 1996	9
1980 - 1996	1

- Risco estatístico

- média de vítimas mortais por ano resultantes de acidentes em barragens dos EUA: nove; ou seja, para 23 700 barragens existentes nesse país em 1997, 0,00038 (ou $3,8 \times 10^{-4}$) vidas/ano/barragem;
- de acordo com a base de dados de referência (37 anos) existe, aproximadamente, a probabilidade de 1 em 38 000 que uma barragem de alto risco ou risco significativo tenha uma ruptura e provoque uma ou mais vítimas.

Mais recentemente, e de acordo com a Association of State Dam Safety Officials dos EUA, entre 1995 e 1994 ocorreram nesse país 400 acidentes de barragens com ruptura provocando, no total, sete vítimas (98% dos acidentes não provocaram vítimas).

Esta última informação pode, entre outros factores, reflectir o elevado grau de eficiência de gestão de risco (interno e externo) já em operação nos EUA.

7.7.2.2. Metodologias para estimar o número de vítimas

Número total de pessoas em risco

Para aplicação dos novos regulamentos de segurança de barragens baseados na classificação das mesmas a partir dos potenciais efeitos ou danos no vale a jusante, para organização das medidas de protecção civil baseados nos mapas de inundação e nos planos de emergência externos (PEE) e para aplicação dos métodos de projecto e decisão baseados de análise de risco das barragens, é de maior importância conhecer metodologias que permitam estimar o número de vítimas no caso de um eventual acidente.

Após a selecção dos cenários de ruptura e a obtenção dos mapas de inundação correspondentes será possível estimar, de um modo aproximado, o número total de pessoas potencialmente em risco (*NPR*). Este número corresponderá ao número de habitantes (população residente mais população flutuante ponderada) nas áreas correspondentes às zonas inundáveis de acordo com os mapas de inundação e os cenários. Naturalmente, este número irá variar com o tempo de acordo com a evolução sócio-demográfica do vale, a época do ano e o período do dia.

Este número de pessoas (*NPR*) **deverá** ser o considerado nas acções de mitigação, no âmbito da gestão do risco externo, no organização do plano de emergência externo (PEE), nomeadamente nos planos e evacuação que venham a ser preparados no âmbito desse plano, em particular na preparação das medidas de emergência a aplicar no vale em situação de crise declarada (aviso às populações, áreas de condução de evacuados, isolamento de estradas principais, tempos mínimos de actuação e âmbito da informação pública).

Contudo, este número *NPR* **não deverá** ser o considerado na estimativa do número de vítimas para acções de análise, avaliação do risco e classificação da barragem no âmbito de gestão do risco (interno e externo). Ao considerar o número *NPR* como o número potencial de vítimas está-se a aplicar uma metodologia muito pessimista que pode penalizar o projecto e a construção da barragem, nomeadamente no que concerne a discussão de soluções alternativas ou a discussão pública do risco efectivo estimado em confronto com o risco socialmente aceitável.

Número expectável de vítimas mortais

Existem suficientes factos reais que podem sustentar esta tese: o número expectável de vítimas mortais pode ser significativamente inferior ao número de pessoas potencialmente em risco. Com efeito, de acordo com a experiência recolhida nos EUA, relativa aos acidentes ocorridos entre 1960 e 1996 (base de dados elaborada por Graham), foi possível efectuar uma análise aos resultados registados e obter seguintes conclusões:

- Percentagem do número real de vítimas mortais relativa a *NPR* (sem tempo de aviso)
 - Em barragens de aterro o colapso por erosão interna resultou em valores da ordem de 1 a 2% (para *NPR* > 50 habitantes).
 - Em acidentes provocados por galgamento os valores obtidos são da ordem de 15 a 25%.

- Em alguns casos específicos o valor da NPR era bastante elevado mas o número de vítimas foi muito reduzido (1 a 5 vítimas).
- Possível efeito do tempo de aviso no valor da percentagem
- Ruptura da barragem de Baldwin Hills (1963), por erosão interna; tempo de aviso: 1 h e 18 min; a relação foi de 5/16 500 ou seja 0,03%.
 - Ruptura da barragem de Teton (1976), por erosão interna; tempo de aviso: 1 h e 15 min; a relação foi de 11/25 000 ou seja 0,04% (sendo 5 das 11 vítimas motivadas por causas colaterais e não pelo efeito da inundação).
 - Colapso de uma barragem em Delta (Utah) em 1983, por colapso estrutural; tempo de aviso: superior a 1 h; a relação foi de 1/500 ou seja 0,2%.

O tempo de aviso às populações é um dos factores mais relevantes a ter em conta no cálculo do número estimado de vítimas resultantes da ruptura de uma barragem; o outro factor é obviamente a causa do acidente.

O efeito da altura de água atingida é um parâmetro muito importante, em particular no caso de não existir um sistema de aviso ou de o tempo de aviso ser manifestamente insuficiente. Casos reais de inundação quase estática (nos Países-Baixos) indicam que, em geral, para $h > 3,5$ m as pessoas atingidas não sobrevivem; para $h < 3,0$ m 5% da população atingida provavelmente não sobrevive; para $h < 2,0$ m existe uma forte probabilidade de sobrevivência. No entanto o factor velocidade do escoamento, no caso de rupturas de barragens, é muito condicionante: uma regra empírica assinala que a sobrevivência só é possível para $(h \times v)_{Max} < 1$ (com h em (m) e v em (m/s)).

O tempo eficaz de aviso que permite às pessoas e às organizações prepararem a mobilização de meios e a evacuação das zonas mais sensíveis é, talvez, o factor mais importante na mitigação dos efeitos das cheias ao longo do vale (PLATE, 1997). De acordo Von Thun e estudos efectuados em 1987, (referido por PLATE, 1997), o número expectável de vítimas mortais (NEV) pode ser mínimo ou mesmo nulo para tempo de aviso superiores a 1,5 h. Na ausência de aviso prévio a relação empírica pode ser caracterizada pelos seguintes valores:

NPR	$(NEV)_0$
150	50 (33%)

500	150 (30%)
5 000	400 (8%)

Percentualmente, a relação $NPR (NEV)_0$ tende a diminuir com o aumento do NPR. De acordo com os casos analisados por Von Thun, o valor de NEV com tempos de aviso da ordem de 1,5 h tende a ser $0,3 (NEV)_0$.

O Bureau of Reclamation adoptava, em 1989, um critério baseado na experiência adquirida relativamente ao efeito do tempo de actuação $T_A = T_c - T_{Av}$, sendo T_{Av} o instante do primeiro aviso e T_c o instante de chegada da cheia ou onda de inundação, no cálculo do número expectável de vítimas (NEV):

- Para $T_A < 15 \text{ min}$

$$NEV = 0,5 NPR$$

- Para $15 \text{ min} < T_A < 90 \text{ min}$

(7.14)

$$NEV = (NPR)^{0,6}$$

- Para $T_A > 90 \text{ min}$

$$NEV = 0,0002 NPR$$

O valor de T_A deve corresponder ao tempo de actuação eficaz que depende da distância de cada sub-área de inundável à barragem acidentada (obtida pelo mapa de inundação) e do instante de chegada da onda de inundação após a ruptura (obtido pela carta de riscos hidrodinâmicos). Este aspecto é importante pois pode não ser correctamente interpretado pelos decisores no âmbito da gestão do risco externo ou na preparação do PEE.

Mais recentemente, DeKay e McClelland executaram estudos na Universidade do Colorado sobre este assunto, financiados pelo Bureau of Reclamation, e propuseram, em 1993, novas equações **empíricas** para o cálculo aproximado do número efectivo de vítimas mortais (NEV):

- Para vales apertados

$$NEV = \frac{NPR}{1 + 5,207 (NPR^\alpha) e^{-\beta T_A}} \quad (7.15)$$

com $\alpha = 0,513$ e $\beta = 3,838 T_A - 4,012$

- Para vales abertos (planícies)

$$NEV = \frac{NPR}{1 + 5,207 (NPR^\alpha) e^{-\beta T_A}} \quad (7.16)$$

com $\alpha = 0,513$ e $\beta = 0,822 T_A$

Em ambas as equações o valor de T_A é em horas. No caso de $T_A < 0$ (a onda chega antes do sinal de aviso) deve ser considerado $T_A = 0$.

Estas equações podem constituir modelos de cálculo fáceis de introduzir nos sistemas automáticos de apoio à decisão no âmbito da gestão de risco (interno e externo).

De acordo com índice de vulnerabilidade sócio-económica do vale, em particular, no que respeita a resposta individual à situação de crise (e.g. a dimensão psico-social), o valor do tempo de aviso ou do tempo de actuação T_A pode ter um efeito diferente consoante o modo como o aviso é recebido e entendido. Por seu turno a eficácia do aviso depende também de outros **factores objectivos** (hora do dia e dia do ano, caminhos de fuga ou evacuação conhecidos ou possíveis e informação do público sobre os procedimentos correctos em situação de crise). Para atender a estes factores, FUNNEMARK *et al.* (1998) apresentam uma metodologia baseada na seguinte expressão geral:

$$NEV = NPR \left[\beta (1 - \alpha) + (1 - \beta) (1 - \alpha') \right] \quad (7.17)$$

sendo:

- α = parâmetro que depende dos factores objectivos acima referidos;
- β = percentagem de número de pessoas que é avisada pessoalmente ou oficialmente;
- α' = percentagem de número de pessoas que não é abrangida pelo aviso oficial mas que, sendo avisada por vizinhos ou vendo a onda de inundação consegue fugir e sobreviver.

De acordo com a expressão de Funnemark,

$NPR \beta (1 - \alpha)$ = número expectável de vítimas mortais entre as pessoas que são avisadas de acordo com o sistema de aviso organizado;

$NPR (1 - \beta)(1 - \alpha')$ = número expectável de vítimas entre as pessoas que não são avisadas pelo sistema de aviso organizado.

Como nas metodologias precedentes, é sempre necessário considerar sub-áreas inundáveis, com base no mapa de inundação, de acordo com um critério adequado a cada caso, nomeadamente em função do tempo de chegada da onda de inundação ou da cheia provocada pela ruptura. Para esta fase é necessário, para além do mapa de inundação e da carta de riscos hidrodinâmicos, um mapa com a ocupação do solo e informação sobre o número de habitantes nas diferentes sub-áreas.

Para aplicação da fórmula de Funnemark, há que seleccionar valores para os parâmetros α , α' e β . Para o parâmetro α os autores referidos propõem uma tabela (Quadro 7.13).

Quadro 7.13 - Valores de α para uma situação de referência
(adaptado de FUNNEMARK *et al.*, 1998)

T_A (min)	α (S. ideal)	Factores de Ajustamento da S. Ideal			
		Inverno	Noite	Caminhos de fuga difíceis	Desc. ou Inexist. de p. de evac.
5	0,6	0,8	0	0,1	0,3
10	0,8	0,82	0,4	0,3	0,4
15	0,9	0,84	0,6	0,4	0,5
20	0,95	0,85	0,8	0,5	0,6
30	0,96	0,89	1	0,53	0,7
40	0,97	0,93	1	0,56	0,8
50	0,97	0,96	1	0,59	0,85
60	0,98	1	1	0,62	0,9

Como exemplo de aplicação, apresenta-se o incluído no trabalho de FUNNEMARK *et al.* (1998):

- Situação do cenário considerado para a ruptura da barragem:
 - Verão (não há cheia, o leito está quase seco) – factor 1,0
 - Noite (as pessoas estão em casa, provavelmente a dormir) – factor 0,8
 - Existem estradas perto para fuga rápida para zonas seguras (deveriam estar indicadas no PEE) – factor 1,0
 - Infelizmente não é conhecido ou não existe um plano de evacuação para o vale – factor 0,6
 - De acordo com o cenário do acidente, a população da sub-área em causa terá um tempo de aviso tal que $T_A = 20$ min
- De acordo com a tabela o valor α será calculado do seguinte modo:

$$\alpha = 0,95 \times 1 \times 0,8 \times 1,0 \times 0,6 = 0,46$$

O valor do parâmetro β dependerá da eficácia do sistema de aviso, incluindo a respectiva fiabilidade e capacidade de redundância ou de improvisação no caso de falhar o sistema principal. No caso de o sistema de aviso ser eficaz, no sentido de poder abranger a população (NPR) da sub-área em causa, $\beta = 1$. Para cada caso específico, o gestor do risco externo ou o responsável pelo PEE deverá estimar um valor para este parâmetro (neste caso $\beta < 1$).

O valor de α' dependerá, também, muito de cada caso específico mas os autores do modelo aconselham como referência $\alpha' = 0,5 \alpha$.

Assim, no caso do exemplo referido admitindo uma eficácia de 50% ao sistema de aviso ($\beta = 0,5$) e $\alpha' = 0,5 \times 0,46 = 0,23$, o número expectável de vítimas seria, em função do NPR , o seguinte:

$$NEV = NPR [0,5 (1 - 0,46) + 0,5 (1 - 0,23)] = 0,655 NPR \quad (7.18)$$

Considera-se que as metodologias apresentadas (Bureau of Reclamation, Dekay e McClelland e Funnemark) constituem uma base suficiente para se efectuarem os cálculos para obtenção do número expectável de vítimas mortais no vale a jusante de uma barragem tendo em conta o cenário de ruptura considerado.

7.7.3. Perdas de bens materiais

As perdas de bens materiais resultam, em geral, da destruição de edifícios, do corte de vias de comunicação, da danificação ou destruição de outras infra-estruturas estratégicas e dos prejuízos decorrentes da interrupção de actividades económicas ou sociais no vale. A maioria dos custos decorrentes da cheia depende dos factores de agressividade da cheia (caracterizados na carta de risco hidrodinâmico) e das características específicas das infra-estruturas e das actividades económicas instaladas em cada vale.

De acordo com as diversas fontes de informação possíveis e as estimativas aproximadas que dependem de diversos factores, o custo total dos prejuízos materiais resultantes dos acidentes importantes em barragens em todo o mundo, não considerando os prejuízos inferiores a 5 milhões de US\$ (1992) por acidente, no período entre 1900 e 1970, poderá ser da ordem de 100 000 milhões de US\$ (1992).

Em Portugal, num estudo pioneiro realizado por Francisca Pacheco em 1985, foi desenvolvido um modelo computacional de análise dos custos (prejuízos económicos) provocados pela ruptura de uma barragem. O modelo baseia-se na sub-divisão em quadrículas da área inundável a partir dos mapas de inundação e dos mapas de ocupação do solo. O parâmetro hidrodinâmico adoptado foi $(v^2 \times h)_{Max}$. As variáveis base do modelo caracterizam, para cada quadrícula:

- Zonas agrícolas (tipo e número de áreas da cultura, de cabeças de gado, de máquinas e alfaías agrícolas e de prédios rústicos).
- Zonas florestais (tipo de área florestal e prédios rústicos).
- Zonas residenciais (número de casos térreos, de um andar ou de mais andares, edifícios que podem agrupar um conjunto grande de pessoas).
- Zonas industriais (tipo de fábricas).
- Zonas comerciais (tipo de empresas).
- Zonas de infra-estruturas (estradas, redes de electricidade, caminhos de ferro, escolas, hospitais, zonas públicas).
- Zonas especiais (depósitos de produtos tóxicos, inflamáveis, entre outros).

No modelo são considerados três tipos de custos: de destruição, directo de inacção e indirecto de inacção. A aplicação sistemática do programa com base na fixação de limites de destruição total e um modelo de geração aleatória de % de destruição associada à aplicação das expressões do cálculo dos custos dos danos por variável (tipo de actividade ou bem) e por quadrícula

possibilita o cálculo dos custos totais estimados no vale a jusante para cada cenário de ruptura.

7.7.4. Tempos de actuação no vale a jusante

Conforme foi referido, o tempo de actuação para aviso e eventual evacuação da população no vale a jusante depende de dois factores:

- Instante do primeiro aviso às populações (T_{Av}), através do sistema de aviso implementado e organizado conforme o previsto no Plano de Emergência Externo;
- Instante de chegada da cheia induzida pela ruptura da barragem (T_c), prevista a partir da análise da propagação da cheia ao longo do vale, nomeadamente através da realização de simulações computacionais, conforme a caracterização apresentada no documento cenários potenciais de ruptura e risco hidrodinâmico.

O tempo de actuação efectiva $T_A = T_c - T_{Av}$ depende, assim, da causa do acidente, das características da barragem, em particular das características geométricas e de abertura da brecha e, finalmente, das características hidrodinâmicas da propagação da frente da onda de cheia ao longo do vale.

Os valores de T_c para cada secção ou ponto das áreas inundáveis ao longo poderão ser obtidos ou estimados através do cálculo da propagação da cheia para cada vale específico.

Ensaio em modelo reduzido realizados pela EDF para diversos vales naturais constituem uma fonte de informação: no estudo da ruptura da barragem de Laouzas, por exemplo (Fig. 7.20), registam-se velocidades de propagação médias da frente de onda diferentes ao longo do vale: 36 km/h nos primeiros 40 km a jusante da barragem, com alguns trechos intermédios onde a velocidade de propagação pode atingir valores da ordem de 50 a 55 km/h; em zonas singulares, a distâncias entre 40 e 50 km, a velocidade de propagação atingiu valores máximos da ordem de 90 km/h; para distâncias da ordem de 70 a 90 km a velocidade de propagação média diminui significativamente para valores da ordem de 7 km/h. Este exemplo mostra que nos casos específicos a velocidade de propagação da frente de onda, apesar de tender a diminuir para jusante, pode apresentar em zonas singulares dos vales (estreitamentos) aumentos súbitos. O valor do tempo de abertura da brecha na barragem não parece influenciar os resultados no caso desse valor manter-se inferior a valores da ordem de 15 s (neste exemplo específico).

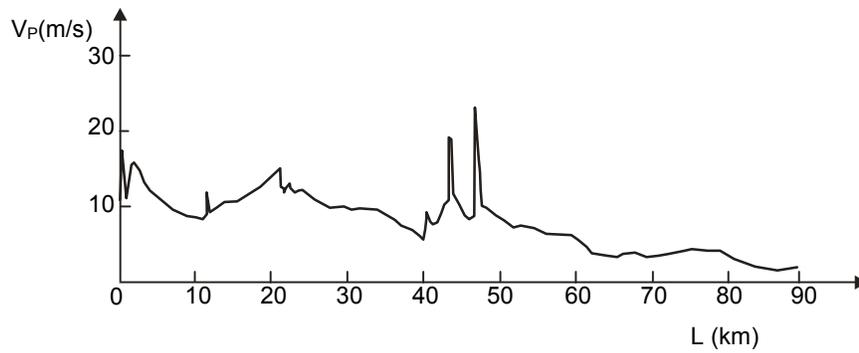


Figura 7.20 - Variação da velocidade de propagação da frente de onda. Resultados obtidos em modelo físico (barragem de Laouzas).

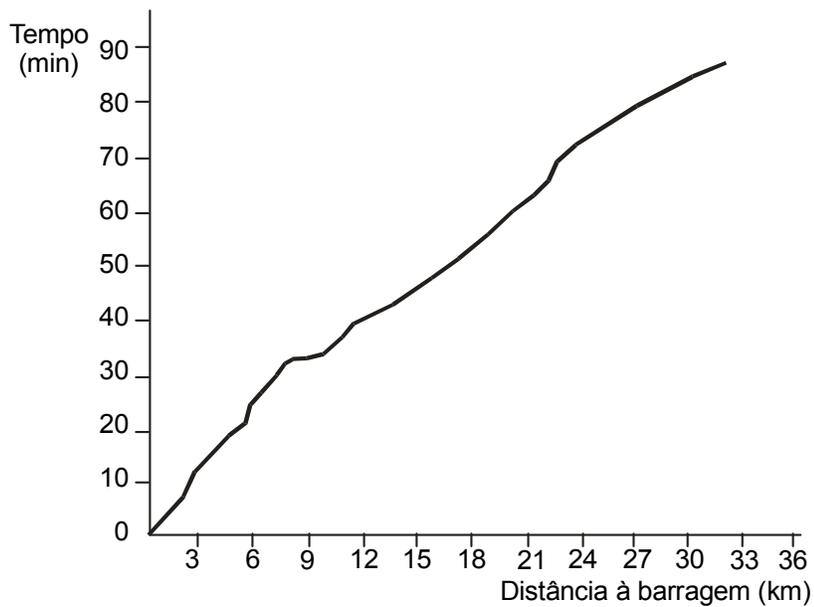


Figura 7.21 - Propagação da frente de onda (estudo da ruptura da barragem da Aguieira).

RAJAR (1973) apresenta resultados comparativos, entre os modelos computacional e físico, envolvendo duas hipóteses diferentes: leito seco a jusante e escoamento a jusante com uma barragem a jusante. A velocidade de propagação média obtida é da ordem de 84 km/h nos primeiros 8 km (comum às duas hipóteses e modelos). Mais para jusante, a velocidade de propagação

diminui: para velocidades médias da ordem de 30 km/h (leito seco a jusante) e de 48 km/h (leito com escoamento a jusante).

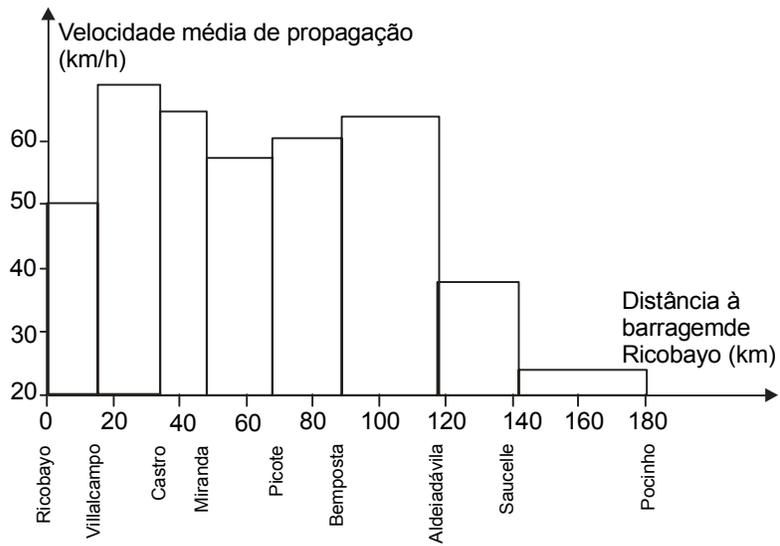
É ainda importante realçar o facto da chegada da frente de onda não coincidir, em geral, com a ocorrência da cota máxima de água. Nas simulações computacionais efectuadas, em 1987, para o rio Douro a diferença entre estes dois instantes ronda entre 1,3 h e 2,0 h com alguns casos excepcionais onde este valor atinge 0,3 h (mínimo) e 3,8 h (máximo).

No que respeita o valor da velocidade de propagação média, a experiência que se pode recolher de alguns exemplos de trabalhos realizados em Portugal pode sintetizar-se do seguinte modo:

Barragem	V_p médio (km/h)	Distância percorrida (km)
Castelo do Bode (1982) (ruptura parcial)	48 - 50	12
Aguieira (1984/86) - Fig. 7.21	21	32
Sistemas de barragens no rio Douro nacional e afluentes (1987), com rupturas em cascata de acordo com dois cenários: Cenário I: ruptura de Ricobayo, Villal-campo, Castro, Miranda e Saucelle (galagamento das restantes barragens) - Fig. 7.22	60 (entre Villalcampo e Aldeadavila)	100
	50 (entre Ricobayo e Villalcampo)	18
	38 (entre Aldeadavila e Saucelle)	25
Cenário II: ruptura de Almendra, Aldeadavila e Saucelle (galgamento das restantes barragens) - Fig. 7.22	120 (entre Almendra com $H_0 = 200$ m e Aldeadavila)	45

	60 (entre Aldeadavila e Saucelle)	25
	38	40

a) Cenário I



b) Cenário II

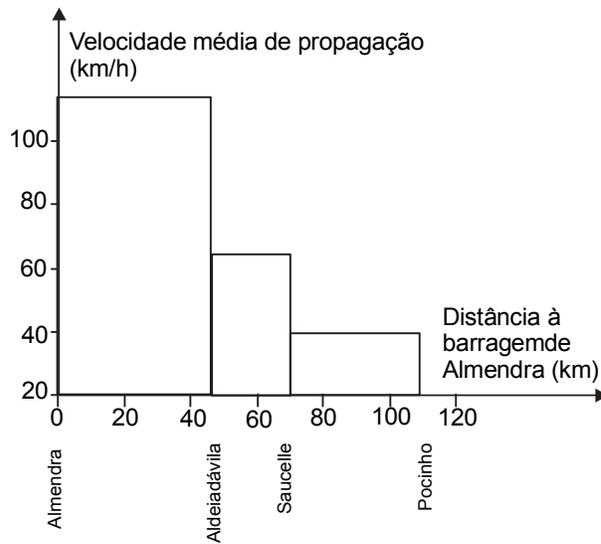


Figura 7.22 - Velocidades médias da propagação da onda de cheia no rio Douro (Estudo de ruptura de barragens - Cenário I e Cenário II).

W. Graham estimou as seguintes velocidades de propagação da onda de inundação em alguns casos de acidentes reais que ocorreram nos EUA. Apresentam-se seguidamente alguns dos valores obtidos:

Barragem	Velocidade de propagação média (km/h)
Williamsburg (1874)	13
South Fork (1889)	22
Austin Dam (1909)	9 a 13
S. Francis Dam (1928)	30 a 10
Buffato Creek (1972)	8
Teton (1976)	20

Do exposto conclui-se ser difícil conhecer valores das velocidades de propagação que sejam válidos para todas as situações específicas, mas, de uma forma muito aproximada, e em primeira aproximação, poderemos considerar valores entre 50 e 80 km/h, nos primeiros 10 - 20 km.

Uma melhor capacidade de previsão das velocidades de propagação da onda de cheia será muito importante na preparação dos planos de evacuação e na organização dos sistemas de aviso.

7.8. SISTEMAS DE ALARME E AVISO

O sistema de aviso às populações no vale a jusante é um dos componentes mais importantes da gestão do risco externo e, em particular dos planos de emergência nos vales. Um sistema será tanto mais adequado quanto permita diminuir o número expectável de vítimas potencialmente vulneráveis às cheias resultantes de acidentes em barragens.

De um modo geral, um sistema de aviso contra um perigo reconhecido deverá possuir as seguintes características e potencialidades:

- obter informação sobre uma emergência iminente;
- comunicar a informação aos que dela necessitam;
- proporcionar decisões correctas e respostas ou reacções em tempo oportuno.

O sistema de aviso deverá integrar aspectos científicos e tecnológicos, as instituições e organizações locais e, fundamentalmente, o público a quem se dirige, podendo integrar os seguintes subsistemas:

- Detecção;
- Gestão;
- Resposta.

incluindo as apropriadas relações entre eles.

Subsistema de Detecção - baseado no sistema de vigilância e monitorização das condições ambientais envolventes, do comportamento estrutural e hidráulico e da resposta da barragem a factores físicos actuantes.

Subsistema de Gestão - baseado na tomada de decisão do responsável pela segurança da barragem e na mobilização dos agentes locais e regionais de emergência (protecção civil):

- interpreta a informação em termos de potenciais perigos, vítimas ou perdas;
- decide se a situação justifica ou exige um aviso público generalizado ou alarme de acordo com critérios pré-especificados;
- deve acompanhar ou monitorizar a resposta e o comportamento do público logo que o alarme é desencadeado.

Este subsistema está fortemente relacionado com o plano de emergência do vale (plano de emergência externo da barragem) e com o sistema de gestão do risco do vale.

Os subsistemas de detecção (baseado no sistema de vigilância) e de gestão (baseado na tomada de decisão considerada adequada) constitui o componente fundamental do dispositivo de alarme que deve preceder, orientar e sustentar as acções de aviso. Este dispositivo deve ser delineado e organizado por forma a ser:

- **Eficaz;**
- **Robusto;**
- **Credível.**

A **eficácia** estará relacionada o grau de protecção e o número de pessoas potencialmente protegidas pelo sistema. A eficácia dependerá, fundamentalmente, da consistência da actuação do dispositivo ao longo da vida da obra; do risco de acção previsto para o sistema; e do conteúdo da mensagem preparada para os diversos níveis de actuação ou de emergência.

A **robustez** do dispositivo de alarme dependerá basicamente da concepção e características do esquema adoptado incluindo, nomeadamente:

- resistência a intempéries, a alterações ambientais significativas e a actos de vandalismo;
- qualidade e durabilidade do equipamento seleccionado;
- grau de redundância e de auto-verificação ou confirmação.

A robustez do dispositivo montado vai ainda depender das rotinas de manutenção e verificação definidas, bem como do estabelecimento e cumprimento de análises periódicas, tendo em vista a eventual necessidade de introduzir alterações ou adequações a novas condições.

Para ser **credível**, o dispositivo deve ter uma elevada fiabilidade o que aconselha uma interligação do sistema de vigilância e monitorização com os sistemas de interpretação e decisão. No caso do sistema de tomada de decisão ser automatizado, o respectivo sistema lógico deve incluir um adequado grau de redundância que confirme, com o mínimo possível de dúvidas o tipo de evento ou de emergência que estes a ser previsto pelo sistema de vigilância e de previsão.

A intervenção humana na tomada de decisão, ou seja na apreciação da situação que está a ser prevista e na declaração do nível de emergência adequado é, em geral, defendida como sendo incontornável para se evitar erros na resposta dos autómatos. Um meio eficaz de intervenção humana, mesmo como último elo da cadeia de detecção, alarme e aviso em barragens de exploração abandonada, pode ser a utilização de dispositivos de vídeo com visionamento remoto, como forma de confirmação última de eventuais cenários extremos previstos pelo dispositivo automático. A fiabilidade do sistema deverá evitar os falsos alarmes que prejudicarão de forma relevante a credibilidade e a eficácia do sistema de aviso. Os testes periódicos para validação da lógica e adaptação do mesmo ou da estrutura do sistema à evolução das condições são essenciais.

O factor crítico para um alarme eficaz e um sistema de aviso eficaz é a capacidade de garantir um Tempo de Avanço de Alarme (TAA) o mais dilatado possível. Este intervalo de tempo é definido do seguinte modo:

$$TAA = TDI + TIR + TFR$$

sendo:

- TDI - o tempo de detecção e interpretação do evento perigoso e consequente risco de acidente grave;
- TIR - o tempo de início do processo de ruptura;
- TFR - o tempo de formação definitiva da brecha.

A capacidade de dilatar o valor de TAA dependerá do tipo de barragem e do evento agressor. Em muitos casos, contudo, o valor TDI poderá corresponder a um intervalo de tempo muito superior (e.g. uma ou duas dezenas de horas) ao tempo do processo de ruptura da barragem. Esta situação pode ocorrer com elevada probabilidade nas situações de risco por galgamento.

Subsistema de Resposta - baseado nas interpretações e acções das pessoas visadas, incluindo os efeitos de avisos não-oficiais:

- depende de como os factores singulares (idade, sexo) e o comportamento do público interactivam na resposta ao alarme ou aviso;
- depende do processo psico-social que é seguido durante a situação de alarme desde o primeiro sinal até ao início da resposta das pessoas;
- deve ter em conta as razões pelas quais as pessoas pensam e fazem coisas diferentes como resposta aos avisos ou alarmes.

O aspecto importante é o de saber aplicar os conhecimentos sobre a previsão da resposta do público nas condições específicas de emergência ao conceber e implementar os sistemas de aviso.

Em resultado do primeiro sinal de aviso desencadeiam-se comportamentos diversos. O processo é moldado pelos factores de **emissor** e de **receptor**. Impõe-se, entre outros aspectos, tentar garantir que a população **oiça** o aviso ou o alarme não só fisicamente mas, também, psicologicamente. Há que tentar garantir que a população compreende o sentido da mensagem:

- como garantir que se acredita que o aviso é real e rigoroso;
- como garantir que o destinatário personaliza o aviso;
- como garantir que o destinatário tenha a resposta acertada.

Factores da Mensagem de Aviso, tendentes a melhorar a eficácia do sistema de aviso:

- A origem da mensagem deve ser bem **identificada**.
- O **perigo** em causa deve ser bem identificado sem ambiguidade.
- A mensagem deve incluir **indicações** sobre o que fazer para incrementar a segurança ou diminuir a probabilidade de ocorrência de vítimas.
- A mensagem deverá identificar a **localização** do perigo e as zonas em perigo.
- Os avisos ao público deverão incluir o **tempo** disponível para a população se por a salvo.
- As mensagens repetitivas devem evitar **inconsistências**.
- A mensagem deve ser elaborada com clareza, rigor e firmeza.

Factores do Receptor da Mensagem, tendentes a contribuir para uma adequada resposta à mensagem por parte do destinatário:

- Atributos físicos (distância, capacidade de audição, etc.)
- Atributos sociais
 - . Família e comunidade
 - . Recursos económicos
 - . Cultura
 - . Actividade profissional
 - . Estatuto social
- Atributos psicológicos
 - . Conhecimento (dos perigos, dos planos de acção, etc.)
 - . Cognição (optimismo, fatalismo, stress, etc.)
 - . Experiência
- Atributos fisiológicos
 - . Deficiências físicas ou mentais

Concluindo, um sistema de aviso eficaz não pode ser definido unicamente em termos do fenómeno ou evento específico e do respectivo diagnóstico ou predição mas, também, em termos das características do envolvimento e das percepções dos que estão potencialmente em perigo.

Deve pois considerar-se que a eficácia do processo de alarme e do sistema de aviso dependerá das características do:

- Tipo de acidentes e respectivas causas;
- Sistema de vigilância e monitorização (detecção, interpretação e decisão);
- Sistema de aviso;
- Sistema social afectado ou em risco;
- Sistema de protecção civil.

A estas características junta-se a necessidade de informação, preparação e treino, para além da organização consubstanciada nos planos de emergência.

7.8.1. Estratégias de disseminação da mensagem de aviso

São possíveis diversos canais para disseminação da mensagem de aviso, incluindo a indicação de evacuação de determinadas zonas sob risco de catástrofe iminente. Atendendo ao tipo de acidente, os canais de disseminação terão de ser prioritariamente de âmbito local e regional, nomeadamente através das forças de polícia, corporação de bombeiros ou outros grupos de agentes de protecção civil ou autoridades reconhecidas que, nas localidades ameaçadas poderão passar a mensagem porta a porta, incluindo, nomeadamente, o uso de

viaturas ou helicópteros com sistemas de alti-falantes. O uso de rádios locais é particularmente indicada e, tendo em conta a dimensão nacional de Portugal, o uso de cadeias nacionais de rádio e televisão.

Para além dos canais desencadeados e enquadrados oficialmente pelo sistema de protecção civil, previstos nomeadamente nos planos de emergência interna e externa, há a considerar os canais de livre iniciativa para a passagem da mensagem, incluindo o uso dos tele-móveis.

O aviso poderá ser materializado pelo uso de sinais sonoros (sirenes) com características previamente definidas consoante o nível ou tipo de emergência e divulgadas por toda a população e zonas públicas (caso da Suíça), ou pelo uso de mensagens faladas e transmitidas por agentes da protecção civil e autoridades locais ou por sistemas de base técnica, nomeadamente o uso dos telefones pessoais através de chamadas automáticas controladas por um sistema de apoio à decisão interligado com o sistema de vigilância e pelo responsável da protecção civil ou da segurança da barragem.

Os treinos periódicos deverão possibilitar a actualização do sistema e permitir melhorar o mesmo detectando os eventuais pontos fracos.

7.9. COOPERAÇÃO ENTRE ENGENHARIA DE BARRAGENS E CIÊNCIAS SOCIAIS NA GESTÃO DO RISCO E DE EMERGÊNCIA

7.9.1. Considerações gerais

Argumentos e metodologias puramente técnicos, independentemente do seu valor científico, sofisticação e adequabilidade, não podem por si só resolver o problema da comunicação dos riscos diferidos ou de 3ª ordem referentes a impactes extremos de baixa probabilidade.

A construção de uma barragem num vale envolve alterações no comportamento físico-ambiental (regime de caudais e de cheias) e no estado de espírito dos habitantes. Este último aspecto justifica a cooperação com as ciências sociais.

Com efeito, a percepção pública e os sentimentos humanos sobre alterações e os riscos associados precisam de ser mais bem conhecidos e respeitados.

A engenharia contribui para a gestão deste problema de interface uma extraordinária capacidade para atingir objectivos técnicos e científicos e elevados níveis de segurança para as barragens. No caso de grandes barragens, estes níveis de segurança são, actualmente, dos mais elevados no que respeita as estruturas de engenharia civil. Contudo:

- Há uma falha de entendimento ou reconhecimento destes níveis de segurança porque há uma “falha” severa ou fosso entre os conceitos do público e dos especialistas;
- Na sociedade actual, cada pessoa tende a aceitar facilmente um novo produto técnico e apreciar os seus benefícios se tiver a capacidade de o adquirir, controlá-lo e consumi-lo; uma atitude diferente ocorrerá no caso do novo produto o projecto estar fisicamente fora do controlo de cada indivíduo ou comunidade.

Um primeiro passo no estudo da percepção social consiste em conhecer os sentimentos dos que vivem a jusante das barragens, baseado em estudos de campo e inquéritos de sócio-psicologia⁹.

Nesta cooperação, as ciências sociais (sociologia e psicologia social) deverão aplicar metodologias passivas (explicação e caracterização) mas também activas (preditivos). Este último aspecto é muito importante na preparação e implementação das estratégias de comunicação do risco entre especialistas ou técnicos, autoridades e público em geral.

Torna-se, assim, também necessário reconhecer o conceito de risco como sendo, simplesmente, qualquer situação que as pessoas sentem como podendo induzir algo que elas não desejam. Este conceito é claramente baseado em sentimentos subjectivos (percepção pública).

Acceptar, respeitar e compreender esta dimensão social, atitude ou resposta é fundamental tendo em vista a obtenção de um compromisso ou uma **responsabilidade partilhada** entre os diferentes actores: dono da obra, autoridades e público.

7.9.2. Percepção do risco

O conceito de percepção do risco foi introduzido pelos cientistas sociais como um meio para compreender as diferenças entre os discursos dos especialistas e o público em geral como ambos os grupos se referem ao risco.

⁹ Bibliografia sugerida:

- LIMA, M.L., “Dam Failure versus Flood Risk Perception”.
- SILVA, D.S., “Social Sciences Involvement in Dams and Safety Management at Downstream Valleys: A First Approach to Arade and Funcho’s Dam Break Flood Risk Perception”.
- SILVA, S.A. and LIMA, M.L., “Positive Illusions Related to Dam Risks”.
 . Publicados em Dams and Safety Management at Downstream Valleys, Edição de A. Betâmio de Almeida e Teresa Viseu, Balkema, 1997.

A percepção do risco envolve as crenças, as atitudes, os juízos e os sentimentos, bem como, de uma forma mais ampla, os valores sociais e culturais e as disposições das pessoas perante os perigos e os benefícios resultantes.

Uma solução integrada deve reconhecer que uma solução eficaz deve também ter em conta, as necessidades, as expectativas, os valores e os comportamentos do público. Esta solução exigirá, portanto, a consideração da percepção do público como um dos elementos de base.

7.9.3. Informação e participação públicas

Um risco pode ser considerado como inaceitável pela população simplesmente pelo facto da decisão ter sido tomada sem uma consulta adequada às autoridades locais e ao público.

Pode também acontecer que a não aceitação do risco futuro ou a rejeição da proposta tenha como origem a ideia que as propostas do público tenham sido ignoradas durante o processo de decisão.

Finalmente, uma outra razão pode ser a sensação de o processo de decisão não ter sido claro, justo ou transparente.

A tomada de decisão sobre a construção de uma barragem e a implementação de um sistema de segurança consistente com o grau de gestão do risco pretendido para o vale terá assim de ter em conta os seguintes factores:

- Valores pessoais e culturais;
- Percepção dos actores;
- Ética.

A informação recebida será apreciada e julgada pelo público de acordo com a respectiva percepção decorrendo daí as respostas individuais, colectivas e institucionais.

O objectivo é o de conseguir uma partilha aceitável da responsabilidade pelos três actores que tornarão estável o resultado do processo. Para este objectivo torna-se necessário garantir a participação pública (e a intervenção dos media) por forma a “ancorar” o público a uma solução aceite conscientemente.

As soluções puramente técnicas e estruturais são avaliadas em termos de critérios de engenharia; a população em risco tende a ser considerada como um alvo ou objectivo no projecto final; a comunicação sobre o processo e os métodos são concebidos do ponto de vista do especialista projectista. Estas soluções tendem a promover baixos níveis de informação ao público em risco.

7.9.4. Considerações finais

A metodologia psico-social integrada pode ser aplicada em diferentes acções:

- Informação pública durante o desenvolvimento do projecto e discussão, incluindo:
 - . Estratégias de discussão com as autoridades e representantes do público incluindo processos de compensação.
 - . Informação do público depois da barragem construída, incluindo as potenciais situações anormais ou situações de crise.
 - . Resposta eficaz do público a avisos de cheias.
 - . Participação activa do público na gestão de risco do vale, incluindo a aceitação do zonamento de risco e as consequentes restrições à ocupação.
 - . Conhecimento da existência do plano de emergência e participação nos exercícios periódicos.

- A percepção do risco e a resposta aos riscos são factores da maior importância:
 - . Ilusões positivas (estratégias de negação do risco) são técnicas eficazes de gerir o perigo na medida em que protegem a auto-imagem em situações potencialmente difíceis.
 - . Os residentes vivendo perto de barragens tendem a exibir níveis mais elevados de ilusões positivas do que aqueles vivendo em locais mais distantes.
 - . A minimização inconsciente do risco pelas populações, não obstante ser útil em termos de gestão do “stress” da população, pode conduzir a uma sensível falta de interesse pelas acções preventivas no vale.
 - . Viver com o perigo é, contudo, usualmente relacionado com mudanças cognitivas e comportamentais das pessoas vivendo numa zona inundável.
 - . A construção de uma barragem pode dar aos habitantes a jusante um falso sentimento de maior segurança. Assim, as barragens

podem, paradoxalmente, aumentar a vulnerabilidade das populações a jusante.

- . Os sentimentos de injustiça são, em geral, muito difíceis de superar e podem ameaçar a credibilidade das autoridades, do governo e dos cientistas/engenheiros, podendo fazer abortar um processo de informação ou de discussão. Melhorar a participação pública estruturada é uma forma de evitar fenómenos de percepção de injustiça.

7.10. SISTEMA DE INFORMAÇÃO PARA APOIO À GESTÃO DO RISCO NOS VALES¹⁰

7.10.1. Introdução

Um sistema eficaz de apoio à gestão da segurança de barragens e, em particular à gestão de crises deverá intervir na previsão de situações críticas, no aviso dos serviços responsáveis pela gestão da segurança de barragens e pela protecção civil e na actuação dos agentes de protecção civil e dos serviços de emergência. Um sistema de informação orientado para esta finalidade constitui uma importante ferramenta de apoio à gestão, que pode minimizar eventuais perdas de vidas humanas.

Para ser útil, tal sistema deve conjugar, de forma eficaz, o acesso ao sistema de vigilância implementado na barragem e a outra informação genérica relativa à caracterização fisiográfica e sócio-económica da bacia hidrográfica, sobretudo do vale e da área a jusante das barragens, com modelos de previsão climatológica, hidrológica e hidráulica capazes de prever, com alguma antecedência, a velocidade e energia da onda de cheia bem como as áreas inundáveis. No caso de vales com barragens, o sistema deve conter informação relevante sobre a barragem e os respectivos órgãos de segurança, bem como sobre o sistema de observação e vigilância das barragens. Finalmente, o sistema deve ainda fornecer indicações úteis que ajudem a aplicação dos Planos de Emergência Interno e Externo.

O sistema que se descreve decorre da actividade desenvolvida no âmbito do projecto PO-FLOODRISK e baseia-se em desenvolvimentos recentes na área das tecnologias de informação e da comunicação de dados (SANTOS *et*

¹⁰ Adaptado da comunicação Sistema de Apoio à Gestão de Cheias apresentada na Jornada organizada pelo projecto NATO PO-FLOODRISK “Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens”, LNEC, Novembro de 1997 da autoria de M. Alzira Santos, J. Palha Fernandes, L. Viseu e Miguel Gamboa.

al., 1997). Um sistema geral de apoio à segurança das barragens foi elaborado para o INAG (DAMSAFE) inclui uma base de dados com características das barragens nacionais e dos vales onde se localizam. Por seu turno, o sistema DamSupport é apresentado como um exemplo de estrutura possível do sistema de informação de apoio específico na gestão dos riscos no vale a jusante de barragens.

A sua aplicação prioritária é na gestão de crises em caso de ocorrência de cheias induzidas por ruptura de barragens, mas pode ser usado em qualquer outra catástrofe que tenha no lugar no vale em causa (cheias naturais, deslizamento, sismo ou acidente ambiental) desde que o módulo de aquisição de dados e modelos a permita simular e prever.

7.10.2. Princípios componentes do sistema

O sistema geral de apoio Dam Support é constituído por três subsistemas responsáveis pelo alerta e pelo apoio específico à gestão de uma emergência ou crise.

Este sistema inclui o que habitualmente se designa por sistema de aviso e alerta e tem, também uma componente de apoio às entidades envolvidas no socorro às potenciais vítimas do acidente.

O **sistema de informação** (DamInfo e DamInfo Light) é composto por uma interface para introdução dos dados e consulta às duas bases de dados subjacentes ao sistema: uma base de dados alfanuméricos e um sistema de informação geográfica, que devem conter informação pertinente sobre a barragem e o vale a jusante, além de informação sobre os Planos de Emergência, e as instituições envolvidas na respectiva implementação.

O **sistema de alerta** (DamAlert) integra um conjunto de módulos indispensáveis à caracterização da situação que poderá gerar a crise e deve incluir mecanismos de chamada de atenção dos responsáveis pela obra, em primeiro lugar, e das várias autoridades responsáveis pela segurança das barragens e pela protecção civil, posteriormente.

O **sistema de gestão de emergência** (DamAid) é responsável pelo aviso à população e por apoiar o socorro às potenciais vítimas, fornecendo indicações precisas sobre meios e infra-estruturas disponíveis.

Os três subsistemas descritos atrás dependem em larga medida de um sistema de comunicações, que deve ser robusto e assegurar a ligação entre as diferentes entidades envolvidas.

7.10.3. Meios de comunicação

Existem diversos meios de comunicação alternativas cuja descrição e indicação de vantagens e desvantagens pode ser encontrada em SANTOS (1997): linhas analógicas, RDIS, linhas dedicadas, comunicações via satélite, X.25, Frame-Relay, SMDS, ATM ...

7.11. TREINOS E EXERCÍCIOS

A operacionalidade do sistema de gestão do risco deve ser mantida, verificada ou testada e ajustada ao longo do tempo. Neste sentido a Autoridade procederá a inspecções e à execução de treinos e exercícios internos ou externos em conjunto com o SNPC.

Os objectivos são os seguintes:

Objectivo 1 - testar o sistema de vigilância, incluindo a capacidade de transmissão e o sistema de análise de informação, nomeadamente no que concerne a consistência das conclusões.

Objectivo 2 - testar a capacidade de avaliação da situação e de tomada de decisão. Verificação da operacionalidade e eficácia da cadeia de notificação.

Objectivo 3 - verificar a cadeia de informação e a capacidade de mobilização e da entrada em acção dos responsáveis; verificação do grau de eficácia na aplicação dos planos de emergência.

Objectivo 4 - verificação da capacidade de coordenação e resposta dos agentes e autoridades intervenientes.

Sistemas de apoio especiais poderão ser desenvolvidos para treino de técnicos ou para geração de situações não previsíveis para enquadramento e orientação dos testes e exercícios.

7.12. A GESTÃO DO TERRITÓRIO FACE AO RISCO DE RUPTURA DE BARRAGENS¹¹

7.12.1. Cartas de risco e ocupação do solo

¹¹ Adaptado da comunicação Gestão do Território em Vales a Jusante de Barragens apresentada na Jornada organizada pelo projecto NATO PO-FLOODRISK “Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens”, LNEC, Novembro de 1997, da autoria de Paula Farrajota e Vítor Campos.

A ocupação do solo é um processo dinâmico. A exposição ao risco das áreas a jusante da barragem e a ordem de grandeza desse risco varia também no tempo, com as alterações da ocupação do solo. Consequentemente, uma barragem pode, na altura da sua construção - ou na altura da aplicação do RSB, no caso das barragens já existentes -, ser classificada como de risco potencial baixo, e ao fim de alguns anos, devido à dinâmica da ocupação do solo, esse risco potencial ter passado de facto a ser significativo ou mesmo elevado. A gestão do risco externo tem por objectivo controlar o nível de risco acordado em cada caso.

Actualmente existe uma desarticulação entre o regime legal que rege a segurança de barragens, concretizado no Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) e seus diplomas regulamentares, e os regimes legais que regulam outros domínios directamente concorrentes ou correlativos, nomeadamente:

- Lei de Bases de Protecção Civil;
- Regime dos Planos de Recursos Hídricos;
- Regime dos Terrenos no Domínio Público Hídrico;
- Regime dos Estudos de Impacte Ambiental.

RSB estabelece (artº 12º/e e artº 42º/2), que a carta de riscos tem por objectivo a elaboração de um plano de emergência, não fazendo referência expressa a qualquer outra finalidade desse documento.

O diploma é também omissivo quanto aos efeitos legais da carta de riscos, não estabelecendo quaisquer correlações com os outros regimes jurídicos que condicionam a localização de actividades e o uso e ocupação do solo.

Sendo inequívoco que a consideração do risco de cheia por ruptura, de barragens nas decisões quotidianas sobre o ordenamento do território e a localização de infra-estrutura e equipamentos urbanos fundamentais é um objectivo a atingir, e que essa consideração constitui a principal garantia de que a exposição ao risco não se irá agravar, o RSB devia especificar claramente os seguintes aspectos:

- Os efeitos legais e técnicos do zonamento de risco sobre a ocupação do solo, tanto presente como prevista;
- A competência pela fiscalização da aplicação do zonamento de risco;
- A responsabilidade pela actualização do zonamento de risco;
- A responsabilidade pela revisão periódica da classificação da barragem face ao risco potencial.

7.12.2. Os estudos de impacte ambiental e a carta de riscos

No preâmbulo do Decreto-Lei nº 186/90, de 6 de Junho, que rege a elaboração dos Estudos de Impacte Ambiental (EIA), transpondo para o Direito Português uma Directiva Comunitária de 1985, é salientado o papel destes instrumentos como «forma de protecção da saúde humana e de promoção da qualidade de vida das populações». O artº 2º/1 do diploma estabelece que a «aprovação de projectos que pela sua natureza, localização ou dimensão, se considerem susceptíveis de provocar incidências significativas no ambiente ficam sujeitos a um processo prévio de avaliação do impacte ambiental (AIA).»

Nos termos do Ponto 4.1 do Anexo ao Decreto Regulamentar nº 38/90, de 27 de Novembro, as «barragens com altura superior a 15 m ou com um volume de armazenamento superior a 100 000 m³, ou área de albufeira superior a 5 ha, ou desenvolvimento do coroamento superior a 500 m ou, ainda, cuja importância ou dimensão da obra sejam susceptíveis de ter condições especiais de fundações ou possam por em risco populações a jusante» estão submetidas a AIA.

O EIA deve fazer a «análise dos riscos para o ambiente e populações decorrentes de acidentes graves e respectivas medidas de prevenção e planos de emergência» (Artº 2º/c do Decreto Regulamentar nº 38/90).

O cenário de ruptura a considerar no estudo dos riscos é especificado no RSB mas não o é na legislação sobre EIA, sendo que esta não remete para o RSB. Em nenhum dos dois diplomas se especifica, todavia, qual a extensão para jusante da barragem que deve ser objecto do estudo dos riscos. As Dam Safety Guidelines do Canadá recomendam como valor mínimo, a área afectada até três horas após a ruptura do cenário de referência.

O processo de AIA está sujeito a consulta do público, considerando-se como público interessado, no caso dos projectos constantes no Anexo III do Decreto Regulamentar nº 38/90 (caso das barragens), «as freguesias o de se localize o empreendimento ou por onde ele passe, bem como as que lhes sejam limítrofes, se por ele puderem ser afectadas, os cidadãos nelas residentes e suas organizações representativas, nomeadamente as associações de defesa do ambiente».

De acordo com informação prestada pelo IPAMB, as freguesias a jusante da barragem só são consultadas no caso de afectação directa sobre sistemas de rega ou praias fluviais. O risco de inundação por ruptura da barragem não é considerado na consulta pública e deveria sê-lo. Se fosse considerado, o conceito de afectação adoptado no texto regulamentar seria suficiente para

garantir a audição das autoridades e das populações na área de risco a jusante da barragem.

Outro aspecto importante é o da consideração dos riscos de ruptura das barragens no projecto e na execução de grandes infra-estruturas e equipamentos fundamentais.

Os projectos de outras infra-estruturas ou empreendimentos sujeitos a EIA deveriam verificar, obrigatoriamente, se encontram ou atravessam áreas afectadas por ondas de inundação. Esta obrigatoriedade poderia ser estipulada na legislação que regula o EIA, na forma de uma disposição dirigida à consideração dos riscos em geral.

7.12.3. O regime dos terrenos no domínio público hídrico e a carta de riscos

O regime dos terrenos abrangidos no domínio público hídrico, que data de 1971, constituiu durante muito tempo o único exemplo de integração do risco de cheia no ordenamento do território em Portugal.

O Decreto-Lei nº 468/7 I, de 5 de Novembro, publicado na sequência das cheias ocorridas na região de Lisboa em Novembro de 1967, introduziu diversos conceitos operativos novos, destinados a permitir estabelecer com maior clareza as áreas sujeitas a restrições de usos e ocupação do solo.

Entre estes conceitos ficaram as noções de *zona adjacente e de zona ameaçada pelas cheias*. Nas zonas adjacentes, o diploma fez depender de parecer prévio da Direcção Geral dos Serviços Hidráulicos, a aprovação de planos urbanísticos ou de contratos de urbanização, bem assim como o licenciamento de operações de loteamento urbano. O licenciamento de obras de construção fora das áreas abrangidas pelos planos aprovados passou também a depender de parecer daqueles Serviços.

Esta abordagem foi desenvolvida com o Decreto-Lei nº 89/87, de 26 de Fevereiro, publicado na sequência das cheias que em Novembro de 1983 afectaram novamente a região de Lisboa, com elevados prejuízos materiais. Dentro das zonas adjacentes passaram a ser delimitadas *áreas de ocupação edificada proibida e áreas de ocupação edificada condicionada*. Esta disciplina acompanha de certo modo a doutrina das «*cartas tricolores*» adaptadas em França no âmbito do zonamento de risco aplicado ao ordenamento do território. A implantação de infra-estruturas nas zonas adjacentes passou também a depender de parecer vinculativo da DGOT e da DGRN.

As zonas adjacentes fazem parte da Reserva Ecológica Nacional e são, por essa via, obrigatoriamente incluídas nos instrumentos de ordenamento do território.

No caso dos vales a jusante de barragens, o Decreto-Lei nº 89/87, deveria sofrer adaptações, de forma a prevenir não apenas o risco de cheias naturais, mas, também o risco de cheias provocados por necessidades de operação, por acidente e por ruptura das barragens. Assim:

- Nos termos do diploma, a zona adjacente é delimitada tendo por critério o nível alcançado pela cheia com período de retorno de 100 anos. Nos vales a jusante de barragens e no que respeita à localização de áreas urbanizadas e urbanizáveis e de infra-estruturas e equipamentos urbanos fundamentais, seria de considerar, em vez da cheia dos 100 anos, a cheia resultante da descarga máxima do descarregador;
- A carta de riscos deveria servir para definir zonas de edificação proibida e condicionada, classificadas em função do uso e ocupação do solo e dos tempos de aviso.

7.12.4. Integração da carta de riscos nos Planos de Bacia Hidrográfica

Os planos de bacia hidrográfica (PBH) foram criados pelo Decreto-Lei nº 45/94, de 22 de Fevereiro, que regula o processo de planeamento de recursos hídricos e a elaboração e aprovação dos planos de recursos hídricos. Este diploma determina a elaboração de um Plano Nacional da Água (PNA) e de 15 PBH, admitindo ainda a elaboração de outros planos deste tipo em pequenos cursos de água quando tal se justifique por razões ambientais.

O diploma prevê a possibilidade da criação de zonas de protecção, através da classificação de *«determinadas zonas, nomeadamente bacias ou partes de bacias, aquíferos ou massas de água que pelas suas características naturais e valor ambiental, económico social assumam interesse público»*.

«A identificação de zonas e situação de risco, nomeadamente cheias, erosão e contaminação deve constar dos PBH, bem assim como «a definição de zonas a sujeitar a um ordenamento específico», «a proposta de classificação das zonas de protecção» e «as acções de regularização e controlo das cheias» (artº 6º do diploma). No artº 13º estabelece-se ainda de forma expressa que «as acções e medidas definidas nos planos de recursos hídricos devem ser previstas em todos os instrumentos de planeamento que definam ou determinem a ocupação física do solo, designadamente planos regionais e municipais de ordenamento do território».

A partir destas regras básicas, a consideração do risco de cheia por ruptura de barragens nos PBH não deveria apresentar dificuldade. Deve salientar-se, todavia, que não resulta claro e inequívoco da leitura do diploma

que o legislador tenha tido em mente também o risco de cheias associadas à operação e à ruptura de barragens. Logo, também não é claro que os Serviços encarregados de fazer aplicar o diploma disso tenham consciência e, portanto, incluam essa vertente na sua actuação.

7.12.5. O carácter sigiloso da carta de riscos

No seu artº 42/3, o RSB determina expressamente que os resultados dos estudos das zonas de inundação, a comunicar ao Serviço Nacional de Protecção Civil (SNPC), sejam de carácter reservado.

Esta disposição está em flagrante contradição com Lei de Bases da Protecção Civil, que no seu artº 8/1 estabelece expressamente o direito dos cidadãos «à informação sobre os riscos graves, naturais ou tecnológicos, aos quais são sujeitos em certas áreas do território e sobre as medidas adoptadas ou a adoptar com vista a minimizar os efeitos de acidente grave, catástrofe ou calamidade».

Aliás, subjacente à Lei de Bases está o reconhecimento da importância da informação, da participação e da formação da população como meios para se obter uma política eficaz de protecção civil.

O carácter sigiloso atribuído pelo RSB ao zonamento de risco é além disso absurdo do ponto de vista da utilidade prática do instrumento. O conhecimento dessa informação é essencial, pois ela deve ser permanentemente tida em consideração, tanto pelas entidades responsáveis pela tomada de decisões sobre a ocupação do solo nos vales a jusante das barragens, como pelas populações sujeitas ao risco.

7.13. ESTUDO ESPECIAL (PROJECTO NATO)

Em Portugal teve lugar o desenvolvimento de um projecto no âmbito do Programa “Science for Stability” da NATO, subordinado tema “Dam Break Floodrisk Management in Portugal”. As instituições responsáveis pela execução do projecto são o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (IST). O projecto contou, ainda, com o apoio do Instituto da Água (INAG), da Electricidade de Portugal (EDP) e do Serviço Nacional de Protecção Civil (SNPC).

O projecto compreende cinco sub-projectos temáticos:

- Análise Hidráulica e Simulação Computacional
 - . desenvolvimento de modelos de análise
 - . estudos em instalações experimentais

. construção e exploração de modelos físicos

- Análise de Segurança de Barragens e Albufeiras

- . normas de segurança
- . critérios de projecto

- Impacte Social do Risco de Acidentes em Barragens

- . estudos de psicologia social
- . gestão da ocupação do solo
- . informação e participação públicas

- Sistema Integrado de Emergência e Treino

- . preparação de planos de emergência
- . execução de exercícios e treinos

O projecto inclui um caso de estudo num vale localizado no Sul de Portugal (vale do Arade) com duas barragens: Funcho e Arade.

O caso de estudo compreendeu cinco fases:

• **Fase 1** - Mapeamento da área inundável (mapas de inundação) correspondentes aos cenários de ruptura adoptados. Utilização de modelos hidrodinâmicos uni e bi-dimensionais e um modelo físico em escala reduzida. A cheia é caracterizada por factores de perigosidade hidráulica (velocidades máximas, altura de água máximas, potência hidráulica específica, tempo de chegada da frente de onda, entre outras).

• **Fase 2** - Caracterização demográfica e da ocupação do solo nas zonas inundáveis. Definição de vulnerabilidades face ao evento cheia e localização de infra-estruturas estratégicas ou especialmente perigosas. As Fases 1 e 2 poderão conduzir à elaboração de uma carta de risco com a hierarquização de intervenção (evacuação) em caso de acidente.

Os principais factores de vulnerabilidade considerados são: o tempo de aviso, a dimensão da comunidade, a distribuição etária da população, o grau de instrução e o tipo de edifícios.

• **Fase 3** - Identificação dos actores locais e dos discursos sobre a segurança das barragens no vale e uma análise qualitativa do risco. O resultado das entrevistas directas conduziu, entre outras, a conclusões interessantes:

- as barragens no vale em estudo são percebidas pela população de um modo muito positivo;

- os benefícios resultantes das barragens são muito bem aceites, em particular para aqueles mais vulneráveis aos efeitos de um acidente;
- não há reivindicação de um sistema de aviso (resignação passiva e confiança cega noutros).

• **Fase 4** - Descrição da percepção do risco relativo à segurança das barragens com base num levantamento sistemático. Entre outras salientam-se as seguintes conclusões principais:

- a níveis de exposição ao risco mais elevados associa-se uma negação de risco como defesa;
- manifesta-se um padrão de confiança diferente entre as comunidades rurais e menos instruídas (confiança na segurança das próprias barragens) vivendo perto das barragens e as comunidades mais instruídas vivendo na cidade do vale mais próxima (confiança no sistema de segurança e de protecção civil e nos especialistas). Uma eventual ruptura de barragem é percebida como um evento muito mais aterrador, menos conhecido e menos controlável. A idade da barragem parece ser um critério importante de apreciação.

Nesta fase o inquérito foi baseado em 302 residentes e procurou-se proceder à análise das crenças sobre a segurança de barragens e como as mesmas eram percebidas pelos residentes nos vales.

• **Fase 5** - Tem por objectivo principal definir o processo de comunicação do risco tendo em vista a implementação do sistema de aviso. Conclui-se dever este sistema abranger também outros tipos de eventos, nomeadamente cheias normais. Uma resposta eficaz exige que o processo de decisão dos diversos tipos de indivíduos seja compreendido e que os residentes estejam informados sobre o risco e procedimentos previstos, de acordo com metodologias adequadas de abordagem e comunicação. A distinção entre urbano e rural é importante e o envolvimento das autoridades locais é um factor chave.

7.14. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 - Uma barragem construída num vale é uma fonte de benefícios reconhecidos e de custos. Alguns destes últimos são objectivamente identificados e quantificados e outros, nomeadamente os sociais e os ambientais, estão incobertos pela incerteza. Está neste último caso o custo resultante de acidentes que ponham em causa a segurança da barragem e do vale.

Entre os diversos potenciais custos resultantes de danos materiais ou da perda de benefícios directos, a perda de vidas humanas é, na escala dos danos a perda maior.

2 - O risco associado a cada barragem pode ser caracterizado de duas formas distintas:

- de forma objectiva e quantitativa, como sendo o custo expectável em perdas resultantes de acidentes ou disfunções graves da barragem;
- de forma subjectiva e emocional, como sendo o sentido de maior ou menor confiança pessoal ou colectiva na segurança da barragem e da vida no vale a jusante.

A primeira forma, ou risco efectivo, baseia-se em combinações de estimativas de probabilidades de ocorrência de cenários ou de danos que conduzem, frequentemente, a valores com ordens de grandeza com pouco ou nulo significado para o cidadão comum. Pelo contrário, a segunda forma pode sustentar reacções aparentemente não racionais ou insólitas.

3 - A Combinação das duas formas de caracterizar o custo expectável induzido por potenciais acidentes em barragens conduz, ou deve conduzir, a um nível de risco aceitável nos vales que deverá ser garantido ou controlado. Com este objectivo, a Sociedade organizou diversos sistemas de segurança, nomeadamente regulamentos, normas, critérios e procedimentos especiais de controlo como as inspecções e os sistemas de observação das estruturas. Como complemento dos sistemas já existentes, tem emergido, nas últimas duas décadas, a componente de controlo de síntese e de organização dos procedimentos face a situações de emergência tendo em vista a mitigação dos riscos, através da melhoria acrescida da resistência das barragens e da adequada resposta hidráulico-operacional aos eventos desfavoráveis ou perigosos, por um lado, e pela implementação de dispositivos de protecção não-estruturais no vale que possibilitem a diminuição efectiva do número expectável de vítimas no caso de ocorrer um acidente, independentemente da respectiva probabilidade de ocorrência (risco potencial).

4 - A gestão do risco deve utilizar metodologias consistentes aplicáveis nas diversas fases da obra: projecto, construção, exploração e abandono. No controlo do risco e das situações de emergência ou de crise é fundamental a eficácia da organização dos procedimentos de segurança aplicados à barragem e os procedimentos específicos de protecção relativos ao vale.

Para garantir uma maior eficácia a gestão do risco e os planos de emergência contra cheias devem integrar não só os eventos extraordinários de baixa probabilidade como as cheias normais ou frequentes. Salienta-se, neste

aspecto, a gestão da ocupação do solo em particular das zonas inundáveis ou de risco.

5 - Independentemente dos sistemas de segurança que sejam implementados a nível nacional, a eficácia da intervenção humana na gestão de uma situação de crise ou de emergência ou na prevenção da ocorrência de tal situação é decisiva. Na cadeia de intervenção e de responsabilidades salienta-se o técnico responsável pela segurança da barragem e o responsável pela protecção civil do vale. A preparação técnica, os treinos e exercícios e o apoio das novas tecnologias, aplicadas a sistemas de previsão, vigilância e aviso, podem aumentar significativamente o nível de protecção e de controlo do risco da barragem.

NOTA FINAL

Os conceitos e metodologias descritas neste texto resultam directa ou indirectamente do trabalho em equipa que tem vindo a ser realizado no âmbito do projecto NATO PO-FLOODRISK, nomeadamente de resultados já publicados, e de outros trabalhos e estudos realizados anteriormente sobre a coordenação ou orientação do autor. Na elaboração do texto, o autor agradece e realça a colaboração da Engenheira Teresa Viseu, em particular na preparação do ponto 7.5, e do Professor Bento Franco, em particular através da cedência de elementos da respectiva dissertação de mestrado e numa revisão do texto.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, A. B. (1983) - *Rotura de Barragens. Introdução e Estudo Hidráulico*. IST, CEHIDRO, Publicação 1/83, Lisboa.

ALMEIDA, A. B.; FRANCO, A. B. (1993) - *Modeling of Dam-Break Flow*. NATO-ASI Lecture, W.S.U., Pullman, USA.

ALMEIDA, A. B.; HENRIQUES, A. G. (1982) - *Análise do Impacto da Rotura de Barragens com Albufeira*. Aplicação ao Caso de Castelo do Bode. Simpósio "A Bacia Hidrográfica do Rio Tejo", APRH, Lisboa.

ALMEIDA, A. B.; ORNELAS, R. (1987) - *Simulação de Cenários de Rotura de Barragens do Rio Douro*. Conferência Ibero Americana sobre Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa.

ALMEIDA, A. B.; RODRIGUES, D. (1986) - *Modelos Matemáticos 1-D/2-D para Simulação de Cheias Provocadas por Roturas de Barragens*. II Simpósio Luso-Brasileiro sobre Hidráulica e Recursos Hídricos, APRH-ABRH, Lisboa.

ALMEIDA, A. B.; RODRIGUES, D. (1989) - *Dam Failure Flood. A Case Study: Aguieira Dam*. Proc. of the Int. Conference on Safety Dams, Coimbra (paper C1.4).

BOSS DAMBRK (1991) - *User's Manual* - Boss Corporation.

BUREAU OF RECLAMATION (1983) - *Safety Evaluation of Existing Dams*. Denver.

CHATERJEE, S. e BISWAS, A. K. - The Human Dimensions of Dam Safety. Water Power, Vol. 24, Nº 1, 1972.

COBA (1986) - *Modelação Matemática da Onda de Cheia Provocada pela Ruptura das Barragens de Funcho e Silves*.

COBA (1987) - *Modelação Matemática da Onda de Cheia Provocada pela Ruptura da Barragem da Meimoa*.

Dam Break Flood Risk and Safety Management at Downstream Valleys. A Portuguese Research Project, A. Betâmio de Almeida *et al.*, ICOLD, 19th Congress, Florence, 1997, Q.75, R.25.

Dams and Safety Management at Downstream Valleys, Ed. A. Betâmio de Almeida e Teresa Viseu A. A. Balkema, 1997.

DEKAY, M. L.; McCLELLAND, G.H. (1993) - *Predicting Loss of Life in Cases of Dam Failure and Flash Flood*. Risk Analysis, Vol. 13, N.2.

FERNANDES, J. P. (1997) - *A Database for Dam Safety Management* in ALMEIDA, A. B.; VISEU, T. (ed.) - *Dams and Safety Management at Downstream Valleys*. Roterdão (holanda), A. A. Balkema, pp. 179-185.

FRANCO, A. B. (1988) - *Simulação Numérica de Cheias Provocadas por Roturas de Barragens em Série*. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST, Lisboa.

FRANCO, A. B. (1996) - *Modelação Computacional e Experimental de Escoamentos Provocados por Rupturas de Barragens*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

FROEHLICH, D. C. (1995) - *Peak Outflow from Breached Embankment Dam*. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 121, N° 1, pp.90-97.

FUNNEMARK, E. *et al.* (1998) - *Consequence Analysis of Dam Breaks*, Dam Safety, Volume 1, Ed. L. Berga, Balkema, pp. 329-336.

GAMBOA, M.; SANTOS, M. A. (1997) - *A GIS for Dam and Valley Safety Management* in ALMEIDA, A. B.; VISEU, T. (ed.) - *Dams and Safety Management at Downstream Valleys Roterdão (Holanda)*, A. A. Balkema, pp. 173-178.

GRAHAM, W. J. (1997) - *A Procedure for Estimating Loss of Life due to Dam Failure*, ASDSO Annual Conference,

HAGEN, V. K. (1982) - *Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety*. 14º Congresso das Grandes Barragens, Q.52, Rio de Janeiro.

HIRSCHBERG *et al.* (1996) - *Severe Accidents in the Energy Sector* (Draft Report). PSI.

ICOLD (1992) - *Selection of Design Flood*. Current Methods, Bulletin 82.

ICOLD (1995) - *Ruptures de Barrages*. Bulletin 99.

ICOLD (1997) - *Dams Less Than Thirty Metres High*. Bulletin 109.

- KATAPODES, N.; STRELKOFF, T. (1978) - *Computing Two - Dimensional Dam - Break Flood Waves*. Journal of the Hydraulics Division ASCE, HY9.
- LIMA, M. L.; FAISCA, L. M. (1992) - *Contribuição das Ciências Sociais para o Estudo dos Impactes das Cheias*. LNEC, ITECS 13.
- LOU, C. (1981) - *Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches*. Colorado State University, Fort Collins.
- MACDONALD, T. C.; LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. (1984) - *Breaching Characteristics of Dam Failures*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(5), pp. 567-586.
- MARTINS, R. (1991) - *Questões Relacionadas com a Segurança Operacional de Barragens* - Notas de um curso na Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- MARTINS, R.; VISEU, T. (1994) - *Aspectos Hidráulicos da Segurança de Barragens* - Relatório LNEC 248/94.
- MUSKATIROVIC, J.; KAPOR, R. (1997) - *Public Perception in Case of Dam Failure - Reality or Not?*, 19º Congresso ICOLD, Florença, Q.75, R.26.
- NOGUEIRA, A. A.; RIBEIRO, V. (1987) - *Análise da Propagação de Ondas de Cheia Resultantes de Roturas de Barragens*. Conferência Ibero-Americano sobre Aproveitamentos Hidráulicos, Lisboa.
- OOSTHUIZEN, C; ELGES, H. F. W. K. (1998) - *Risk Analysis of Dams in South Africa - 13 Years On*. Dam Safety, vol. I, ed. L. Berge, Balkema, p. 337-344.
- PACHECO, F. D. (1985) - *Modelo de Simulação e de Análise dos Custos de Ruptura de uma Barragem*. ITI 42, LNEC.
- RAJAR, R. (1973) - *Modèle Mathématique et Abaques sans Dimensions pour la Détermination de l'Écoulement qui suit la Rupture d'un Barrage*. 11º Congresso das Grandes Barragens, Q.40, R.34, Madrid.
- SAKKAS, J. G. (1974) - *Dimensionless Graphs of Floods from Ruptured Dams*. Hydrologic-Engineering Center, United States Corps of Engineers, Davis, Califórnia.

- SALMON, G. M.; HARTFORD, D. N. D. (1995) - *Risk Analysis for Dam Safety* (Part. II), International Waterpower.
- SILVA, D. (1997) - *Considerações sobre Planeamento e Gestão de Crises Provocadas por Cheias* - Jornada Técnica sobre “Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens”, LNEC, Lisboa.
- SILVA, D. S. (1997) - *Os Desastres não são Fatalidades Incontornáveis: Considerações sobre Planeamento e Gestão de Crises - O Caso de Ruptura de Barragens*. Publicado em Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens. Ed. de M. Alzira Santos e Delta Silva, Jornada Técnica, NATO PO-FLOODRISK.
- SINGH, V. P.; SCARLATOS, P. D. (1988) - *Analysis of Gradual Earth-Dam Failure*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, Nº 1, January, pp. 21-42.
- SLOVIC, P. (1987) - *Perception of Risk*. Science, 236.
- SU, S. T.; BARNES, A. H. (1970) - *Geometric and Frictional Effects on Sudden Releases*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, HY11.
- TAVARES, L. V. (1997) - *On Risk Perception and Cost Negotiation for Downstream Valleys*. Dams and Safety Management at Downstream Valley, A. Betâmio de Almeida e T. Viseu (ed.), Balkema.
- TAW (1990) - *Probabilistic Design of Flood Defences* Rel. 141, Países-Baixos.
- WISEU, T. (1994) - *Simulação Computacional do Escoamento em Regime Variável através de Barragens em Ruptura* - Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, IST, Lisboa.
- WISEU, T.; MARTINS, R. (1997) - *Controlo de Segurança de Barragens* - Jornada Técnica sobre “Risco e Gestão de Crises em Vales a Jusante de Barragens”, LNEC, Lisboa.
- WISEU, T.; MARTINS, R. (1998) - *Safety Risks of Small Dams*. Dam Safety, Volume 1, Ed. L. Berga.
- WATER WAVES, J. J. (1957) - *The Mathematical Theory with Applications*. Interscience.

