APLICAÇÃO DA *FMEA/FMECA* A UMA BARRAGEM DE RETENÇÃO DE REJEITADOS

Case Study of an application of *FMEA/FMECA* to a Tailing Dam

Ricardo N. C. dos Santos*
Laura M. M. S. Caldeira**
João P. Bilé Serra***

RESUMO – Neste artigo apresenta-se um enquadramento geral das análises de riscos em Geotecnia, perspectivando-se os seus objectivos e os respectivos domínios de aplicação. Referem-se, em pormenor, os seguintes métodos de análise de risco: análise dos modos de rotura e seus efeitos *(FMEA)* e análise dos modos de rotura, seus efeitos e sua criticalidade *(FMECA)*. Aplicam-se a *FMEA* e a *FMECA* a uma barragem de aterro convencional para retenção de rejeitados. A utilização de análises de riscos em Geotecnia permite detectar e controlar atempadamente os eventuais problemas e gerir os riscos, reduzindo-os, tão cedo e tão eficientemente quanto possível. Reconhecidas as vantagens das análises de riscos, admite-se que estas possam vir a desempenhar uma função central das actividades desenvolvidas em programas de segurança de obras geotécnicas importantes.

SYNOPSIS – In this work, the objectives and the applications to risk analysis in Geotechnical Engineering are presented. The following risk analysis methods are referred in detail: Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), and Failure Modes Effects and Criticality Analysis *(FMECA)*. *FMEA* and *FMECA* are applied to a tailing dam. Risk analysis allows one to detect and control eventual problems and managing the risks to reduce them in an early stage as efficiently as possible. Once recognized the advantages of risk analysis, they play a major role in the activities of programs of safety of important geotechnical structures.

PALAVRAS CHAVE – Análises de riscos, *FMEA, FMECA,* barragem de aterro, retenção de rejeitados.

1 – INTRODUÇÃO

O estudo, aqui apresentado, insere-se nos trabalhos desenvolvidos no âmbito da dissertação de mestrado do primeiro autor (Santos, 2006), galardoada com o prémio da Sociedade Portuguesa de Geotecnia *(SPG)* para a melhor tese mestrado no biénio 2006-2007.

Tradicionalmente, as obras são consideradas seguras quando projectadas e construídas de modo a respeitarem determinados regulamentos técnicos de engenharia. Porém, todas as estruturas cons - truídas pelo Homem têm inerente um potencial risco associado que pode ser analisado, apreciado e gerido. Da ocorrência de um comportamento anómalo numa estrutura geotécnica podem resultar consequências indesejáveis de diferentes graus de severidade, nomeadamente, ao nível dos impactes económicos, ambientais, na saúde e segurança de pessoas, na opinião pública e no descrédito téc - nico e político. O conceito de risco está intrinsecamente relacionado com todos esses aspectos.

A análise de riscos consiste no exame de como os diferentes factores em jogo podem interagir, quais os cenários que deles podem resultar e que prejuízos podem provocar. Este processo propor - ciona assim a possibilidade de identificar o modo como as incertezas se podem combinar e como dessa combinação resultam cenários desfavoráveis (Maranha das Neves, 2002).

* Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: ricardos@lnec.pt.
** Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: laurac@lnec.pt.
*** Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: biles@lnec.pt.

Este tipo de análise providencia uma técnica consistente de comparação da segurança relativa das estruturas e permite formalizar os critérios para o estabelecimento de prioridades visando o aumento da segurança estrutural. Em estruturas em que a perda de funcionalidade seja determinante, fornece um meio para a programação de operações de manutenção, de observação, de eventuais reparações e a concepção de equipamentos complementares ou alternativos. Para os problemas de maior complexidade, necessita do envolvimento de equipas de especialistas de diferentes disciplinas, trabalhando em sinergia, que incluam, entre outros, geotécnicos, geólogos, sismólogos, geofísicos, hidrologistas, estruturalistas, hidráulicos, sociólogos, geógrafos, ambientalistas, economistas e, naturalmente, especialistas em metodologias de análises de riscos.

As análises de riscos têm conquistado relevância como um meio para tratar as incertezas associadas à resposta das estruturas geotécnicas, obrigando os investigadores a confrontarem-se directamente com estas e a usarem, na previsão do seu desempenho, as melhores estimativas das condições do terreno e dos parâmetros dos materiais.

As análises de risco podem ter uma aplicabilidade privilegiada para os seguintes tipos de estruturas geotécnicas: barragens de aterro, túneis, estruturas de suporte, canais e condutas, vias de comunicação rodoviárias e ferroviárias, bem como fundações em geral. Refere-se ainda o seu interesse na Geotecnia Ambiental e na Engenharia Sísmica (Baecher e Christian, 2000).

Em Portugal, ao contrário de outros países mais industrializados como os *EUA,* o Canadá e a Austrália, não existe uma prática corrente na realização de análises de riscos na engenharia geotécnica. De referir os estudos relevantes efectuados por Mineiro (1991), enquadrados no âmbito da 7ª Lição Manuel Rocha, a propósito da barragem de *Al Wahda* (situada em Marrocos) e por Pimenta *et al*., (2005), relativa à aplicação de uma metodologia simplificada de análise de riscos da ensecadeira da barragem de Odelouca. De referir, ainda, o contributo de Caldeira (2006) para o desenvolvimento e a divulgação dos conhecimentos na área de análise de riscos e para o estabelecimento das vantagens e das desvantagens destas abordagens e das condições de aplicabilidade à Geotecnia, em geral, e às barragens de aterro, em particular.

2 – CONCEITOS E PRINCÍPIOS BÁSICOS DAS ANÁLISES DE RISCOS

De acordo com a Comissão Internacional de Grandes Barragens (*ICOLD*, 1998) "*risco* é uma medida da probabilidade e da severidade de um efeito adverso para a vida, para a saúde, para os bens materiais ou para o ambiente. O risco é estimado pela esperança matemática das consequências de um evento adverso (*e.g.,* o produto da probabilidade de ocorrência e das suas consequências) ou, alternativamente, pela conjugação de todos os conjuntos de três elementos constituídos pelo cenário, pela probabilidade de ocorrência desse evento e pelas consequências associadas". Assim, o risco depende da probabilidade de rotura, bem como das suas consequências.

Em Portugal, o Regulamento de Segurança de Barragens (*RSB*, 2007) considera o conceito de risco de acidente ou de incidente. O *risco de acidente ou de incidente* é o produto dos danos potenciais pela probabilidade de ocorrência do acidente ou do incidente a eles relacionado. Os *danos potenciais* correspondem às consequências de um acidente, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, as quais podem ser graduadas de acordo com as vidas humanas, bens e ambiente afectado. O *RSB* (2007) considera um *acidente* como uma ocorrência excepcional cuja evolução não controlada é susceptível de originar uma onda de inundação e um *incidente* como uma anomalia susceptível de afectar, a curto ou a longo prazo, a funcionalidade da obra e que implica a tomada de medidas correctivas. Por sua vez, o *ICOLD* (1995) define *acidente* como um evento que afecta a segurança da barragem, mas que não evolui para rotura pela tomada de medidas de controlo imediatas. Considera três categorias de acidentes, consoante a fase da vida da obra em que ocorrem: *acidente do tipo 1* (A1) – um acidente numa barragem em exploração há já algum tempo; *acidente do tipo 2 (A2)* – um acidente numa barragem em observação durante o primeiro enchimento;

acidente do tipo 3 (A3) – um acidente durante a fase construtiva (por exemplo, um assentamento da fundação ou uma instabilidade de taludes) que tenha sido detectado previamente a qualquer enchimento da albufeira e cujo posterior enchimento tenha ocorrido em segurança.

Os Eurocódigos directamente aplicáveis em Geotecnia, em particular, a *EN 1990* (Bases de projecto) e a *EN 1997* (Projecto geotécnico), não referem de forma explícita o conceito de risco. A abordagem por eles considerada contempla diferentes níveis de exigência de segurança *(graus de fiabilidade)* das obras em função das respectivas consequências expectáveis (Caldeira, 2003).

Por vezes, é útil a subdivisão do risco em função da sua natureza, da sua incidência e da possibilidade da sua medição. O risco pode provir de diferentes origens, quer seja de fenómenos naturais, quer tecnológicos. Pode incidir sobre a vida de pessoas, de forma individual ou societal, ou sobre o ambiente. Relativamente à sua medição, o risco pode ser tangível ou intangível. Os primeiros podem ainda ser subdivididos em comensuráveis ou em incomensuráveis.

O *risco individual* define-se como o incremento de risco imposto a um indivíduo pela existência de uma obra potencialmente perigosa. O *risco societal,* quando materializado, assume consequências de grande escala ou abrangência que implicam uma resposta do meio social e político, através de discussão pública e de mecanismos de regulação. Riscos desta dimensão estão, em geral, distribuídos de forma desigual, assim como os respectivos benefícios esperados. O *risco ambiental* está associado à alteração dos ecossistemas naturais no que respeita à sua sustentabilidade ou à amenidade da natureza. Os *riscos tangíveis* são aqueles que, se ocorrerem, terão consequências detectáveis e, em geral, mensuráveis. Por exemplo, a destruição de casas é uma consequência tangível, enquanto que o sofrimento e o trauma são consequências intangíveis. Quando os riscos podem ser mensuráveis por padrões idênticos diz-se que são *riscos comensuráveis*. Nas análises de riscos estes referem-se, habitualmente, a consequências avaliadas em termos monetários.

Os riscos podem ser assumidos de modo *voluntário* ou serem impostos *(involuntários)*. O *risco voluntário* é aquele que um indivíduo assume voluntariamente, perspectivando obter algum benefício. Por oposição, o *risco involuntário* é aquele imposto por uma entidade de controlo e não assumido como uma livre escolha pela população em risco *(PAR – Population at Risk)*.

No contexto da segurança estrutural (incluindo estruturas geotécnicas), a *rotura* está, em geral, confinada a aspectos de integridade estrutural, e em alguns contextos, inclui o caso especial do colapso ou do movimento global ou parcial da estrutura. Porém, no caso geral das análises de riscos, define-se *rotura* como a perda de capacidade de uma estrutura, ou parte dela, de funcionar como o previsto.

A *rotura de uma barragem* é definida pela *ICOLD* (1995) como o colapso ou movimento de parte da barragem ou da sua fundação de tal modo que ocorra perda de capacidade de retenção de água da albufeira. Em geral, uma rotura resulta na libertação de grandes volumes de água, impondo riscos em pessoas e bens a jusante da barragem. A *ICOLD* (1974) considera duas categorias de roturas: *rotura do tipo 1* (R1) – rotura importante envolvendo o abandono completo da barragem; *rotura do tipo 2* (R2) – rotura que, embora severa, permita uma reparação bem sucedida da zona afectada, podendo a barragem ser colocada novamente em exploração.

Um *incidente* numa barragem é definido pela *ICOLD* (1995) como uma rotura ou um acidente que requeira reparações importantes.

No que se refere às análises de riscos, as *consequências* constituem os resultados da concretização de um perigo, expressos qualitativamente ou quantitativamente, em termos de perdas (desvantagens ou benefícios) e ferimentos ou perda de vidas. Num contexto de segurança de barragens, constituem os impactes nas zonas a jusante resultantes da rotura da barragem e incluem o número previsto de pessoas mortas e feridas, a extensão dos prejuízos materiais e os custos de desorganização da actividade económica em consequência da rotura.

Em Geotecnia, as consequências mais relevantes resultantes de uma rotura de uma obra são as seguintes (Santos, 2006): consequências económicas, consequências ambientais, consequências sociais e consequências para a saúde e para a segurança de pessoas.

Uma vez averiguada a natureza dos perigos e as vulnerabilidades associadas, para o desenvolvimento dos processos de análise de riscos é necessário definir o sistema em análise.

O *sistema* é uma entidade constituída por elementos discretos identificáveis (ou subsistemas) e por um grupo de interligações, dependências e interacções entre as várias partes envolvidas. É um arranjo ordenado desses elementos (*e.g.,* área espacialmente limitada, estruturas e componentes de equipamentos mecânicos e eléctricos) concebido para evidenciar a inter-actuação entre os vários elementos no desempenho do sistema.

A definição do sistema condiciona o caminho pelo qual a análise de riscos é orientada e deve permitir modelar todas as zonas susceptíveis de sofrer impactes devido à rotura do sistema. Nestes termos, rotura do sistema significa a cessação do funcionamento (ou desempenho) para o qual foi concebido como um todo. O objectivo último de uma análise de riscos é a quantificação das probabilidades e das consequências da rotura do sistema, ou seja, do *risco do sistema*.

Um sistema composto por diversos elementos (ou subsistemas) pode ter diferentes *modos de rotura*. Estes são descritos pelos processos que traduzem o modo como as roturas dos elementos devem ocorrer para provocar a perda de funcionalidade do sistema ou de algum dos subsistemas em análise. Um elemento pode ter vários modos de rotura e cada um deles pode ter diferentes mecanismos de rotura. Um *mecanismo de rotura* é descrito pelos processos e estados físicos que devem ocorrer de acordo com as leis da natureza que regem a progressão do modo de rotura, desde a causa iniciadora até à realização do último efeito da rotura em análise. Para se efectivar um mecanismo de rotura é necessário existir um cenário propício à sua ocorrência – *cenário de rotura*. Este define a combinação de circunstâncias com interesse para uma apreciação do risco (*e.g.,* nível da albufeira, velocidade do vento e pluviosidade).

Na Figura 1 ilustram-se quatro possíveis modos de rotura num dique para dois cenários de rotura distintos e os seus mecanismos de rotura.

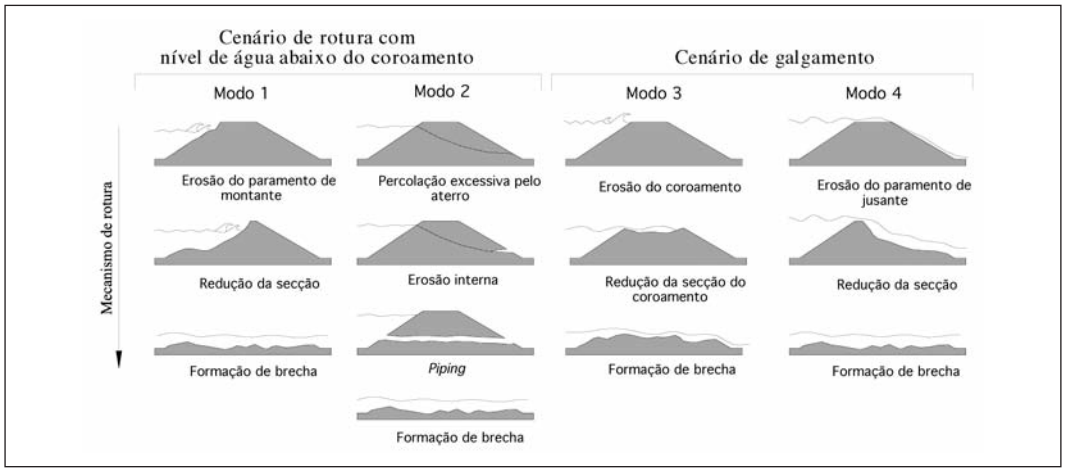

Fig. 1 – Ilustração de possíveis modos de rotura para um sistema associado a um dique (Santos, 2006).

3 – BREVE ENQUADRAMENTO DE UMA ANÁLISE DE RISCOS NUM PROCESSO DE GESTÃO DE RISCOS

Os processos de *gestão de riscos* consistem na aplicação sistemática de políticas, procedimentos e práticas de gestão às tarefas de *identificação,* de *avaliação,* de *mitigação* e de *controlo de riscos*. Englobam também a realização de *análises custo-benefício* das medidas tendentes à *redução do risco*.

A *identificação de riscos* inicia-se pela percepção inicial de eventuais problemas associados à segurança ou à funcionalidade de uma obra. De uma maneira geral, esta etapa inclui: i) a descrição, em traços gerais, do problema em análise; ii) a identificação genérica dos perigos; iii) a indicação de quem e/ou do que se pode encontrar em risco; iv) e a identificação dos possíveis constrangimentos à resolução do problema.

A *avaliação de riscos* envolve a análise e a apreciação de riscos e possibilita a tomada de decisões no decurso de um processo de gestão de riscos. Permite que todas as partes envolvidas nestes processos reconheçam quais os riscos envolvidos e, consequentemente, obriga a que os Donos de Obra tenham de lidar efectivamente com as potenciais consequências de eventos indesejáveis. No âmbito de uma gestão de riscos, inclui as etapas de *análise de riscos* e de *apreciação de riscos*.

Uma *análise de riscos* consiste na utilização de um conjunto de informação disponível para estimar os riscos relativamente a indivíduos ou a populações, a bens ou ao ambiente, devido a perigos. A análise de riscos incorpora a identificação dos eventos indesejáveis que conduzem à materialização dos riscos, a análise dos mecanismos pelos quais esses eventos podem sobrevir e a estimação da extensão, da amplitude e da probabilidade de concretização dos efeitos dos perigos. As análises de riscos podem ter um largo campo de aplicação, atravessando todas as fases de desenvolvimento de uma determinada obra, desde o planeamento, aos estudos de viabilidade, à comparação de diferentes soluções de projecto, à selecção das exigências e à elaboração do projecto, à escolha do contrato de adjudicação de uma obra, ao plano de controlo de qualidade de construção, à fase de serviço ou de exploração, até à definição das politicas de reabilitação ou de abandono.

Entende-se como *apreciação de riscos,* o processo de ponderação e de julgamento do significado dos riscos avaliados nas análises de riscos. Este é efectuado com base em juízos de valor, ou seja, em julgamentos cujo resultado depende dos valores éticos da pessoa ou da sociedade que os aprecia. A apreciação de riscos aborda aspectos tão diversos como os objectivos do dono de obra, os valores sociais, a legislação, os regulamentos e as orientações normativas. Os resultados da análise de riscos entram no processo de decisão, explícita ou implicitamente, formulando-se considerações sobre a importância relativa dos riscos calculados, com o objectivo de identificar e analisar o leque de alternativas que se colocam no âmbito da gestão de riscos. Uma das dificuldades da avaliação de riscos reside na aceitabilidade dos riscos.

Visando assegurar a verificação de todos os critérios de aceitabilidade dos riscos avaliados, pode ser necessário realizar procedimentos tendentes à elaboração de recomendações de *apoio à decisão e ao controlo de riscos*. É usual a utilização do princípio *ALARP (As Low As Reasonably Practical)*. Este princípio estabelece que os riscos superiores a um limite de aceitabilidade, só são toleráveis se a sua redução for impraticável ou se os custos associados a esta redução forem fortemente desproporcionados relativamente aos benefícios daí decorrentes (Caldeira *et al*., 2005).

A *tomada de decisões,* estruturada ou não, pode envolver a interacção entre o decisor e a equipa responsável pela apreciação de riscos, de modo a que ambos compreendam devidamente o contexto da decisão e tenham em conta os valores e as preferências do decisor na apresentação dos resultados da apreciação do risco.

O *controlo de riscos* refere-se à implementação de medidas para eliminar ou mitigar o risco e à reavaliação periódica da sua eficácia. As *medidas de mitigação de riscos* consistem na aplicação selectiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para atenuar a verosimilhança de uma ocorrência *(medida preventiva)* ou a severidade das suas consequências adversas *(medidas de protecção)* ou ambas.

Em geral, não é possível nem prática a eliminação completa dos riscos das obras geotécnicas. Assim, devem ser identificados quais os riscos a gerir, a mitigar ou a controlar. As *medidas de mitigação* baseiam-se em estudos específicos, podendo ser de índole estrutural, não estrutural, educacional e organizacional. A título de exemplo, referem-se as acções de reabilitação, as restrições à exploração e ao ordenamento do território, a adopção de sistemas de observação e de aviso e alerta e os planos de emergência.

Seguidamente, apresentam-se os conceitos fundamentais de dois métodos de *análise de riscos,* as análises dos modos de rotura e seus efeitos *(FMEA)* e sua criticalidade *(FMECA),* que são aplicadas, respectivamente, nas Secções 5 e 6, a uma barragem de aterro convencional de retenção de rejeitados.

4 – ANÁLISE DOS MODOS DE ROTURA E SEUS EFEITOS *(FMEA)* E SUA CRITICALIDADE *(FMECA)*

FMEA é o acrónimo na língua inglesa para *Failure Modes and Effects Analysis*. A aplicação deste método inicia-se pela definição do sistema, seguindo-se-lhe a identificação para cada compo - nente constituinte do sistema das respectivas funções e dos potenciais modos de rotura e terminando com a avaliação dos seus efeitos na componente em análise e no comportamento global do sistema. O método procura ainda explicitar os procedimentos para detecção das roturas e para o controlo dos seus efeitos no sistema. Diferencia-se dos restantes tipos de análises de riscos pelo facto de o elo de ligação entre as diferentes componentes do sistema ser estabelecido em termos da função exercida e da respectiva participação no desempenho global do sistema.

A *FMEA* aplica-se, essencialmente, para avaliações preliminares visando, sobretudo, a melhoria do conhecimento acerca do funcionamento e do desempenho dos sistemas. De entre as metodologias disponíveis (Caldeira, 2005), a *FMEA* permite a ilustração dos aspectos relevantes de aplicação deste tipo de análises, servindo de base a desenvolvimentos futuros através de abordagens mais complexas, como por exemplo, a análise de árvores de eventos *(ETA – Event Tree Analysis)* ou a análise de árvore de falhas *(FTA – Fault Tree Analysis)*.

Admite-se que ocorre uma rotura da componente sempre que esta cessa de desempenhar adequadamente as funções para as quais foi concebida, assumindo-se, no entanto, que todos os restantes elementos constituintes do sistema funcionam adequadamente.

A FMEA segue uma estrutura básica, perfeitamente definida, com seis etapas básicas:

i) Estruturação do sistema.

ii) Definição das funções/requisitos de cada componente do sistema.

iii) Identificação dos modos potenciais de rotura associados a cada função de cada componente.

iv) Identificação das causas potenciais.

v) Descrição dos efeitos directos, nas demais componentes e no sistema.

vi) Identificação das medidas disponíveis para a detecção das causas ou dos modos de rotura e para o controlo dos seus efeitos.

A *estruturação do sistema* inclui, para além da identificação dos elementos constituintes da própria obra, a consideração de todos os elementos que afectam o desempenho da estrutura ou que podem ser afectados pela sua perda de funcionalidade ou pelo seu colapso.

Em barragens de aterro, a extensão dos danos a jusante causados por uma eventual onda de cheia associada à formação de brecha na barragem e a eventual contaminação da água na albufeira, devido, por exemplo, à submersão de minas, implicam a consideração de fronteiras bastante mais alargadas do que as que resultariam da mera consideração da própria estrutura.

O sistema é progressivamente subdividido até se atingir um nível onde seja possível obter uma compreensão e descrição adequadas do seu funcionamento e uma identificação correcta dos respectivos modos de rotura. Adicionalmente, admite-se que os efeitos de um modo de rotura de uma componente são responsáveis por modos de rotura de subsistemas de nível superior na cadeia hierárquica (Hartford e Baecher, 2004). As componentes de detalhe mais elevado são designadas por componentes básicas. As *componentes básicas* devem desempenhar *funções* perfeitamente definidas para o correcto desempenho dos subsistemas de nível superior, dos sistemas principais e, em última análise, do próprio sistema.

Os *modos de rotura* das componentes básicas podem ser descritos em termos de roturas funcionais. A sua ocorrência é provocada pelas *causas iniciadoras,* que podem ter origem em fenómenos naturais, num processo físico, químico ou biológico, em deficiências de construção, na deficiente qualidade dos materiais, em falhas operacionais e em acções humanas. Os modos de rotura de subsistemas, que não componentes básicas, podem ser causados por efeitos de modos de rotura de subsistemas de níveis inferiores e por causas iniciadoras.

Os *efeitos dos modos de rotura* traduzem as consequências, em termos do desempenho das componentes básicas, dos subsistemas e do sistema global. Podem classificar-se em três grandes grupos: *efeitos imediatos, efeitos próximos* e *efeitos finais*. Os *efeitos imediatos* referem-se às consequências na componente em análise, enquanto os *efeitos próximos* relatam os efeitos em subsis - temas adjacentes de nível superior. À medida que se prossegue na cadeia de acontecimentos, pode ocorrer uma sequência de efeitos em componentes de subsistemas de nível sistematicamente superior, conduzindo, por fim, aos efeitos finais no sistema como um todo – *efeitos finais*.

A análise é completada com a descrição dos meios e dos métodos disponíveis em obra capazes de *detectar* as causas iniciadoras dos modos de rotura e, caso estes se iniciem, de *controlar* a progressão dos seus efeitos no sistema.

Para a apresentação detalhada dos resultados de uma forma sistemática, estruturada e concisa, com vista à sua futura revisão ou actualização, recorre-se, em geral, a tabelas (Santos, 2006).

A *FMEA* é apenas descritiva e não aborda de uma forma directa o conceito de risco, o que limita a interpretação dos resultados. Num contexto de análise de riscos é fundamental dispor de uma ferramenta que permita conhecer qual a importância relativa de cada componente no funcionamento global do sistema. Para tal, é necessário complementar a *FMEA* com uma forma de descrever e avaliar a influência combinada dos modos de rotura e a severidade das suas consequências, isto é, avaliar a criticalidade do risco associado a cada modo de rotura.

A análise dos modos de rotura, seus efeitos e criticalidade *(FMECA)* pode ser considerada como uma extensão do processo da *FMEA,* permitindo ordenar os vários modos de rotura por criticalidade para assim intervir nos itens mais críticos.

Uma limitação desta metodologia reside na dificuldade de modelar e analisar as redundâncias do sistema. De facto, a perda de funcionalidade de componentes individuais pode não implicar a rotura do sistema e, até mesmo, nem lhe causar efeitos observáveis, já que pode ser compensada pelo funcionamento de outro elemento do sistema. No método examinam-se unicamente os modos de rotura associados a cada componente individual, não considerando os efeitos combinados de modos de rotura de diferentes componentes do sistema. Assim, poderão ser, inadvertidamente, negligenciados determinados cenários de rotura. Outra desvantagem relevante da *FMEA*/*FMECA* é a dificuldade de consideração do factor tempo, designadamente, a incapacidade de modelar estádios intermédios.

5 – APLICAÇÃO DA *FMEA* A UMA BARRAGEM DE ATERRO DE RETENÇÃO DE REJEITADOS

Nesta secção efectua-se uma análise de riscos do sistema geotécnico associado a uma barragem de aterro convencional para retenção de rejeitados – a barragem de Cerro do Lobo – através da análise dos modos de rotura e seus efeitos *(FMEA)*. Na secção 6 apresenta-se a extensão da *FMEA* efectuada para atender à criticalidade dos modos de rotura identificados *(FMECA)*.

5.1 – Descrição sucinta da obra

A barragem de Cerro do Lobo, integrada no complexo mineiro da Sociedade Mineira de Neves-Corvo *(SOMINCOR),* destina-se ao armazenamento sub-aquático dos rejeitados resultantes do processo de concentração de minérios de cobre e de estanho (Figura 2). Com vista à minimização

dos impactes ambientais, a barragem foi concebida com a filosofia de descarga nula (*HIDROPROJECTO*, 2002).

As sucessivas configurações da barragem foram ditadas pelas necessidades crescentes de armazenamento (ver Quadro 1).

À data da análise, a estrutura de retenção era constituída por quatro corpos: barragem principal *(BP)*, duas portelas na margem esquerda *(ME1 e ME2)* e uma portela na margem direita *(MD)* (Figura 2).

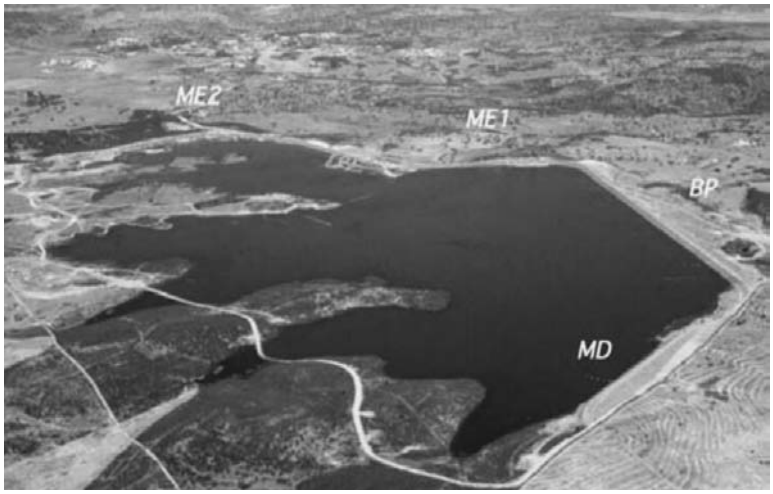

Fig. 2 – Fotografia aérea da barragem de Cerro do Lobo (fonte: *SOMINCOR*).

Na primeira fase construtiva, o perfil transversal da barragem era composto por um aterro zonado, com núcleo central argiloso proveniente da alteração de xistos e maciços estabilizadores de materiais granulares rejeitados (enrocamento) da mina e, complementarmente, de material de uma pedreira.

Quadro 1 – Cota do coroamento dos aterros e características de exploração da albufeira para cada fase construtiva da barragem.

Fase construtiva	Cota coroamento (m)	NPA (m)	Folga de projecto (m)	Volume de armazenamento (dam^3)
1ª	244,00	243,00	1,00	6
2ª	248,00	246,75	1,25	11
3ª	252,00	250,50	1,50	15
4ª	255,00	253,50	1,50	20

A construção decorreu segundo o processo de alteamento a jusante (Vick, 1990), tendo sido mantidas as inclinações dos paramentos dos maciços estabilizadores (Figura 3).

A *estanqueidade do corpo da barragem* a cotas superiores a (244) (cota de implantação do coroamento do núcleo) é garantida através da instalação, no prolongamento do núcleo argiloso, de *geomembranas rugosas,* devidamente seladas por intermédio de uma mistura de areia e bentonite compactada. Nas zonas em que a cota da fundação é superior a (244) o sistema de impermeabilização é apenas composto pela geomembrana. A ligação desta cortina à fundação e aos encontros foi materializada através de um plinto em betão armado.

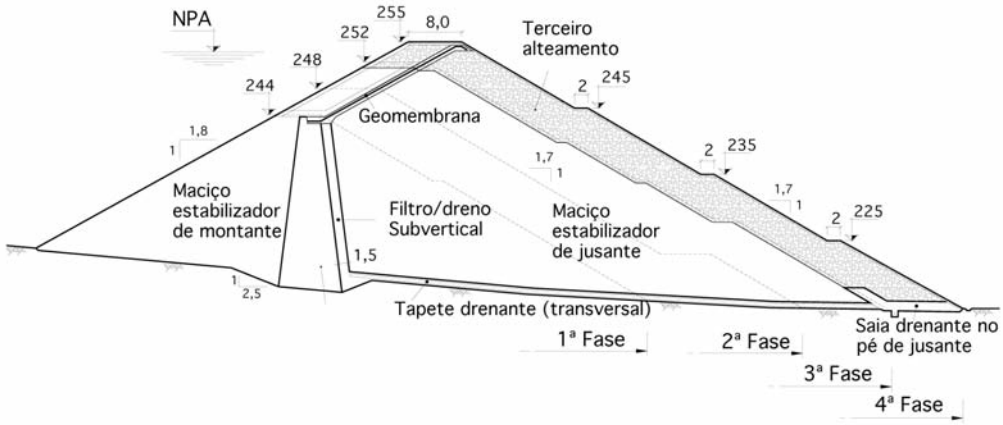

Fig. 3 – Perfil transversal de altura máxima da barragem principal (*HIDROPROJECTO*, 2002).

O *sistema de drenagem* da barragem principal *(BP)* é constituído por um filtro sub-vertical e um tapete drenante localizado no fundo do vale (Figura 4). Para captação da água percolada na zona superficial da fundação, a barragem dispõe ao longo de todo o seu perímetro de jusante de uma saia drenante. A jusante foram instalados poços (*IBR* – Infiltração Barragem de Rejeitados) onde as águas são colectadas e bombeadas de retorno para a albufeira.

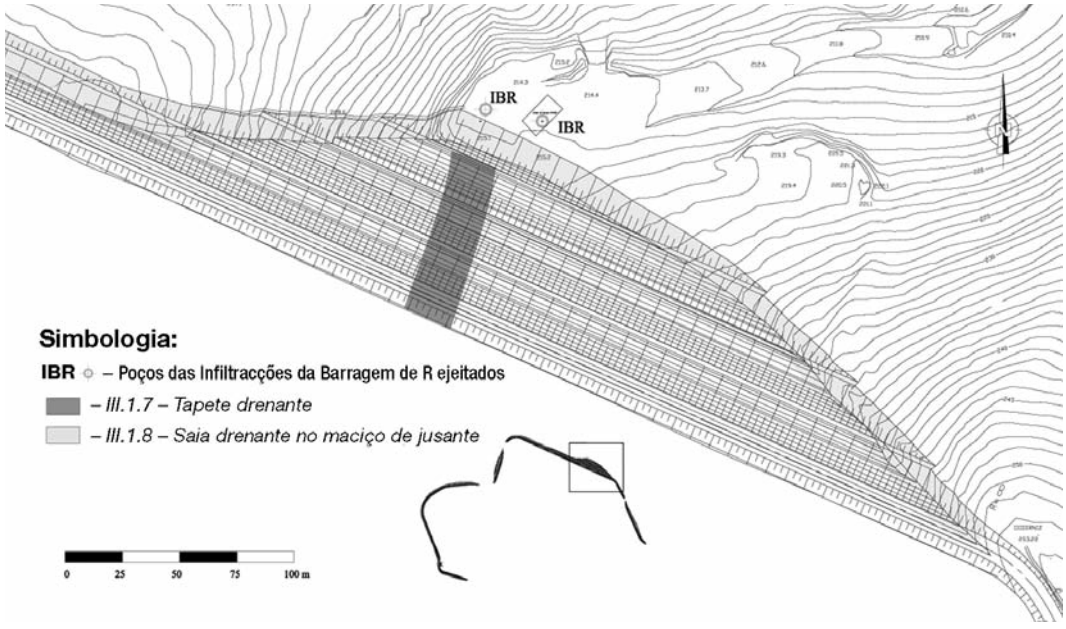

Fig. 4 – Sistema de drenagem e poços IBR da BP (*HIDROPROJECTO*, 2002).

Não obstante a filosofia de projecto de descarga nula, a barragem dispõe de um *descarregador de cheias* em degraus localizado na parte terminal da portela *ME2*.

A *fundação* é constituída por camadas alternantes de grauvaques e de xistos e foi objecto de um saneamento superficial, com cerca de meio metro de profundidade.

5.2 – Âmbito da análise

A presente análise incide sobre a *fase da vida da obra* relativa à exploração entre o último alteamento (terceiro) e o previsível encerramento da exploração da albufeira.

A situação de referência do sistema é definida com base em *variáveis de estado* que caracterizam os aspectos capazes de influenciar a ocorrência de determinados acontecimentos ou a sua verosimilhança ou, ainda, a severidade dos seus efeitos globais no sistema.

Para a presente análise entende-se como suficiente a definição de duas variáveis de estado – o *nível do sobrenadante* e o *nível dos rejeitados*. Pressupõe-se a invariabilidade das variáveis de estado do sistema.

Verifica-se que quanto maior for a cota do sobrenadante maior será a carga hidráulica sobre a barragem e mais intensas serão as acções e a verosimilhança da ocorrência de problemas de segurança. Por outro lado, os rejeitados são constituídos por materiais com uma significativa percentagem de finos, pelo que a sua densificação poderá diminuir a permeabilidade do fundo da albufeira e colmatar descontinuidades geológicas do terreno, atenuando os problemas associados à percolação pela fundação. Os benefícios daí decorrentes serão tanto maiores quanto mais elevada for a cota de rejeitados.

Em face do exposto, adopta-se como situação de referência para o nível da fase líquida a correspondente ao Nível de Pleno Armazenamento *(NPA)* e para o nível da fase sólida a cota correspondente ao levantamento batimétrico de Maio de 2005 (cota 248) (Figura 5).

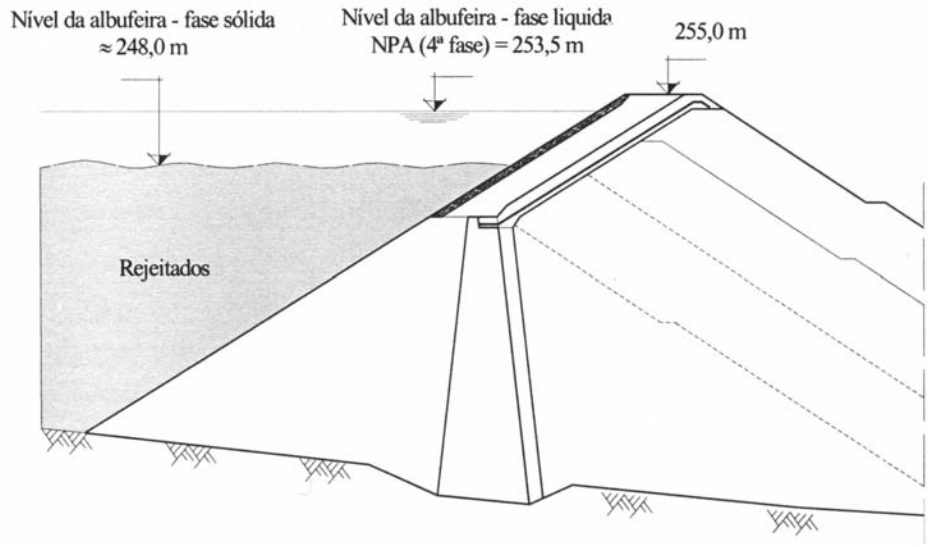

Fig. 5 – Variáveis de estado – níveis das fases sólida e líquida (Santos et al., 2006).

5.3 – Definição do sistema

O *sistema* deve ser definido de modo a contemplar todas as partes de interesse capazes de sofrerem ou causarem danos derivados dum incorrecto funcionamento estrutural, hidráulico ou ambiental de qualquer elemento associado à obra. Assim, para além da estrutura geotécnica *per si,* deve ser incluída no sistema toda a sua zona de influência.

A definição do *sistema* funde duas etapas indissociáveis e fundamentais do processo da FMEA: *a identificação e a estruturação das componentes básicas* que formam o sistema em subsistemas dispostos de forma hierárquica e a *definição das funcionalidades* ou dos requisitos de operacionalidade que cada uma delas deve satisfazer para o normal desempenho do sistema.

A definição do sistema inicia-se com a identificação dos s*istemas principais*. Na Figura 6 esquematiza-se o sistema global referente à barragem de Cerro do Lobo, estruturado em nove sistemas principais numa forma conveniente para a análise de forma a descrever o funcionamento global do sistema através do processo da *FMEA*. Aqueles, por sua vez, estão subdivididos sucessivamente em subsistemas, num máximo de dois níveis, até se atingirem as componentes básicas. A configuração final apresentada resultou de um processo iterativo que se desenvolveu à medida que a análise foi progredindo, de modo a serem identificados e contemplados todos os possíveis riscos associados à obra. A representação das componentes na forma hierárquica (Figura 6) foi efectuada recorrendo ao módulo *FMEA/FMECA* do programa *ITEM Toolkit* © (*ITEM Toolkit Software,* 2001).

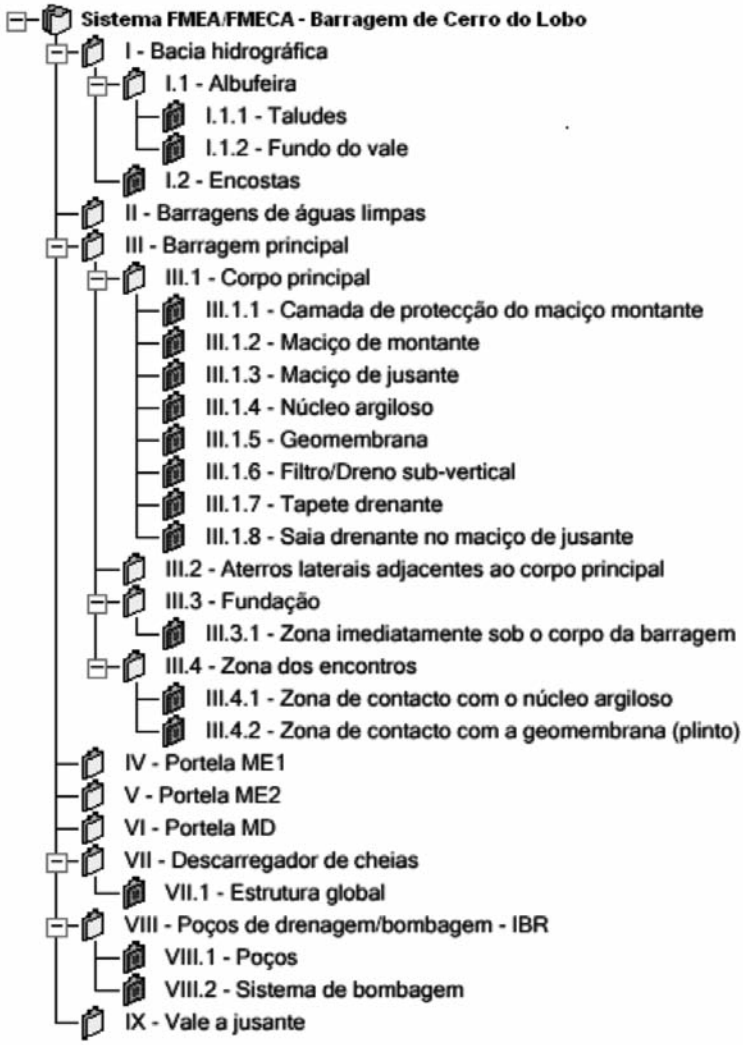

Fig. 6 – Estrutura hierárquica do sistema associado à barragem de Cerro do Lobo.

De todos os sistemas principais considerados, alguns não representam fisicamente a barragem de aterro na qualidade de estrutura geotécnica. Nesse conjunto englobam-se, por exemplo, os sistemas principais: *I – Bacia hidrográfica* e IX – *Vale a jusante*. No entanto, a consideração destes elementos é absolutamente fundamental para a relevância e o sucesso da análise, pois têm um reflexo significativo ou podem ser afectados pelo funcionamento do sistema.

Não são efectuadas quaisquer análises dos sistemas principais associados às várias portelas, ou seja, *IV, V* e *VI,* e ao subsistema de primeiro nível *III.2*. A sua consideração conduziria a um volume excessivo de informação que, essencialmente, seria uma repetição do apresentado para o subsistema *III.1 – Corpo principal,* desviando as atenções do objectivo fundamental da análise – aplicação prática da *FMEA* a um sistema geotécnico.

No Quadro 2 encontram-se resumidas as *funcionalidades* de todas as componentes básicas consideradas para o sistema relativo à barragem de Cerro do Lobo, assim como os respectivos códigos de identificação em concordância com a estrutura hierárquica (ver Figura 6).

Quadro 2 – Funcionalidade das componentes básicas do sistema considerado na Figura 6.

ID	Descrição da componente	Funcionalidades ou requisitos de operação
I.1.1	Taludes	Garantir a retenção da água e rejeitados na albufeira
I.1.2	Fundo do vale	Garantir a retenção da água e rejeitados na albufeira e impermeabilizar o fundo da albufeira
I.2	Encostas	Captar as águas para a albufeira
III.1.1	Camada de protecção do maciço montante	Proteger o maciço de montante
III.1.2	Maciço de montante	Conferir estabilidade mecânica
III.1.3	Maciço de jusante	Conferir estabilidade mecânica
III.1.4	Núcleo argiloso	Reduzir a condutividade hidráulica na zona inferior do corpo da barragem
III.1.5	Geomembrana	Impermeabilizar a zona superior do corpo da barragem (alteamentos)
III.1.6	Filtro/dreno sub-vertical	Evitar a erosão do núcleo e drenar o fluxo de água percolado através dos órgãos impermeabilizantes
III.1.7	Tapete drenante	Filtrar e drenar a fundação subjacente e escoar a água do filtro sub-vertical
III.1.8	Saia drenante no maciço de jusante	Drenar a água recolhida na camada superficial da fundação e, acessoriamente, nos tapetes drenantes e conduzi-la para os poços IBR
III.3.1	Zona imediatamente sob o corpo da barragem	Garantir capacidade de suporte do corpo da barragem, reter água na albufeira e evitar contaminação do aquífero
III.4.1	Zona de contacto dos encontros com o núcleo argiloso	Garantir capacidade de suporte do corpo da barragem e reter água na albufeira
III.4.2	Zona de contacto dos encontros com a geomembrana (plinto no maciço)	Garantir capacidade de suporte do corpo da barragem e reter água na albufeira
VII.1	Estrutura global do descarregador de cheias	Assegurar o escoamento de água em condições excepcionais de afluências
VIII.1	Poços de bombagem	Recolher o caudal percolado pela barragem
VIII.2	Sistema de bombagem	Bombear para a albufeira o caudal que aflui aos poços

5.4 – Modos potenciais de rotura e causas iniciadoras

Os *modos de rotura* foram definidos atendendo às possíveis perdas de funcionalidade das componentes básicas com causas iniciadoras (*"root causes"* não associadas a modos de rotura de outros subsistemas) e de acordo com os seguintes critérios: (i) adopção de modos de rotura concebíveis para a barragem de Cerro do Lobo na fase da vida da obra em análise, e (ii) a efectivação destes modos conduz a consequências no sistema com severidade não desprezável.

No Quadro 3 apresentam-se todos os *modos de rotura* das componentes identificadas e estruturadas no ponto anterior considerados como relevantes para a análise de riscos. Para facilitar a correlação entre os modos potenciais de rotura e a componente onde podem ocorrer, aqueles são identificados através do código da componente, ao qual é acrescentado, entre parênteses, o número de ordem correspondente ao modo de rotura considerado. Nesse Quadro indicam-se igualmente quais as suas eventuais *causas iniciadoras*.

Em Santos (2006) apresentam-se os principais problemas que cada uma das componentes básicas consideradas poderiam exibir e as respectivas eventuais causas originadoras. A justificação do conteúdo do Quadro 3 pode ser encontrada naquela referência.

Quadro 3 – Modos de rotura das componentes básicas e suas causas iniciadoras.

ID Comp.	Potenciais modos de rotura (MR)	Eventuais causas iniciadoras
I.1.1	I.1.1.(1) Percolação excessiva a grande distância.	Presença de formações permeáveis, com continuidade
I.1.2	I.1.2.(1) Percolação excessiva	Alterabilidade química do maciço; Presença de formações permeáveis, com continuidade a grande distância; Excessiva permeabilidade dos rejeitados.
I.2	I.2.(1) Arraste de material sólido	Pluviosidade intensa
III.1.1	III.1.1.(1) Erosão	Ondulação sob acção do vento; Alterabilidade química dos materiais; Ciclos de molhagem e secagem ou variações térmicas (fracturação e meteorização).
III.1.2	III.1.2.(1) Desestabilização associada a movimentos de massas de solo	Acção sísmica; Alterabilidade química dos materiais; Insuficiente resistência na interface aterro/geomembrana.
	III.1.2.(2) Deformação excessiva	Alterabilidade química dos materiais; Colapso; Fluência; Deficiente compactação dos aterros.
III.1.3	III.1.3.(1) Desestabilização associada a movimentos de grandes massas de solo	Acção sísmica; Deficiente ligação entre materiais aplicados nas diferentes fases do alteamento.
	III.1.3.(2) Deformação excessiva	Carregamento do 3º alteamento (4ª fase); Fluência; Deficiente compactação do aterro do alteamento.
	III.1.3.(3) Erosão externa	Balanço hidrológico desfavorável – com galgamento.
III.1.4	III.1.4.(1) Percolação excessiva (sem fissuração)	Alterabilidade química dos materiais; Dissolução dos materiais; Elevada carga hidráulica.
	III.1.4.(2) Percolação excessiva (com fissuração)	Fracturação hidráulica.
III.1.5	III.1.5.(1) Danificação da geomembrana	Ataque químico; Deficiente instalação; Deficiente ligação ao núcleo ou aos encontros.
III.1.6	III.1.6.(1) Perda de estabilidade interna ou externa	Inadequação dos materiais ou da sua colocação; Alterabilidade química dos materiais.

Quadro 3 – Modos de rotura das componentes básicas e suas causas iniciadoras. *(Cont.)*

ID Comp.	Potenciais modos de rotura (MR)	Eventuais causas iniciadoras
III.1.6	III.1.6.(2) Insuficiente capacidade drenante	Inadequação da granulometria; Espessura insuficiente (aumento da cota de exploração).
III.1.7	III.1.7.(1) Perda de estabilidade interna ou externa	Inadequação dos materiais ou da sua colocação; Alterabilidade química dos materiais.
	III.1.7.(2) Insuficiente capacidade drenante	Secção insuficiente (aumento da cota de exploração); Inadequação da granulometria.
III.1.8	III.1.8.(1) Perda de estabilidade interna ou externa	Inadequação dos materiais ou da sua colocação; Alterabilidade química dos materiais.
	III.1.8.(2) Insuficiente capacidade drenante	Secção insuficiente (aumento da cota de exploração); Alterabilidade química dos materiais.
III.3.1	III.3.1.(1) Percolação excessiva	Falta de tratamento da fundação; Alterabilidade química da fundação.
	III.3.1.(2) Percolação profunda	Falta de tratamento da fundação.
III.4.1	III.4.1.(1) Percolação excessiva	Deficiente compactação; Falta de tratamento do maciço; Alterabilidade química do maciço; Deficiente saneamento.
III.4.2	III.4.2.(1) Percolação excessiva	Falta de tratamento do maciço; Deficiente saneamento; Deficiente ligação.
VII.1	VII.1.(1) Funcionamento hidráulico sem danos	Balanço hidrológico desfavorável.
	VII.1.(2) Funcionamento hidráulico com danos	Deficiente qualidade do betão.
VIII.1	VIII.1.(1) Sedimentação	Arrastamento de finos.
	VIII.1.(2) Colmatação	Arrastamento de finos.
VIII.2	VIII.2.(1) Avaria mecânica	Falhas mecânicas nas bombas.
	VIII.2.(2) Potência insuficiente	Aumento do caudal percolado ao longo do tempo.
	VIII.2.(3) Falha eléctrica	Falha no fornecimento de energia; Descarga eléctrica (*e.g.*, trovoadas).

5.5 – Sequência de efeitos dos modos potenciais de rotura

Identificadas as eventuais causas iniciadoras dos modos de rotura e admitidas as suas ocorrências, interessa, agora, avaliar a cadeia Modos de rotura/Modos Contribuintes/Efeitos ao longo da hierarquia do sistema anteriormente definido.

Dada a natureza hierárquica do sistema, a análise deverá iniciar-se pelos subsistemas de fron - teira (componentes básicas). Os seus modos de rotura têm neles efeitos imediatos, que, por consequência, são modos de rotura do subsistema de nível de detalhe inferior, e assim sucessivamente, em níveis de detalhe progressivamente inferiores, até se atingirem os sistemas principais e, finalmente, o sistema como um todo.

A cadeia de sucessivos acontecimentos entre subsistemas de diferentes níveis é um assunto complexo e de difícil abordagem. É conveniente que a aplicação do método inclua uma forma de representar a sequência dos efeitos dos vários modos de rotura das componentes básicas nos suces-

sivos subsistemas de nível de detalhe inferior. Como exemplo, na Figura 7 representa-se a cadeia de sucessivos efeitos induzidos pelos dois modos potenciais de rotura da componente básica *III.1.7 – Tapete drenante*.

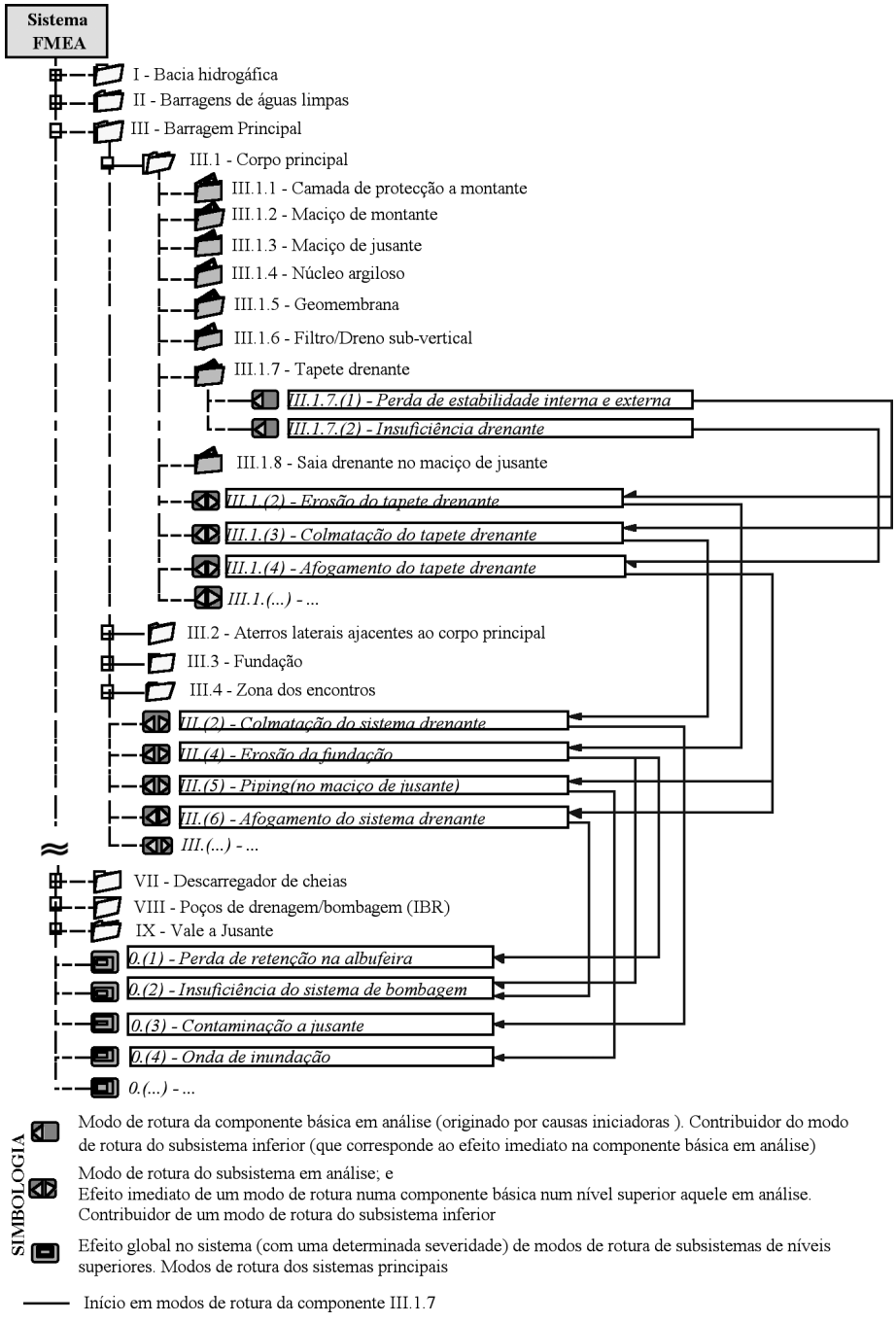

Fig. 7 – Modos de rotura/efeitos em subsistemas de nível sucessivamente superior para a componente III.1.7 – Tapete drenante (Santos *et al*., 2006).

Para o primeiro modo de rotura, *III.1.7.(1) – Perda de estabilidade interna ou externa –* consi - dera-se como possíveis causas iniciadoras a ocorrência conjugada dos seguintes factores: (i) inadequação dos materiais ou da sua colocação, devido à utilização de solos que violam os critérios de filtro (Sherard e Dunnigan, 1989; Sherard *et al.,* 1984) relativamente à fundação, à sua contaminação com os materiais de aterro adjacente ou à segregação dos materiais; (ii) e alterabilidade química dos materiais, face às condições de agressividade prevalecentes no local (ver Quadro 3).

O segundo modo de rotura, *III.1.7.(2) – Insuficiente capacidade drenante,* pode ocorrer devido a uma eventual insuficiência da secção ou de inadequação da granulometria dos materiais. Salienta-se que esta componente será submetida a condições progressivamente mais gravosas devido à subida da cota de exploração e consequente aumento da carga hidráulica e subida da linha de saturação no interior do aterro.

Primeiro modo de rotura do tapete drenante

Sobre a própria componente básica considera-se como possível, devido à *III.1.7.(1) – Perda de estabilidade interna ou externa,* a ocorrência dos seguintes efeitos (imediatos): *III.1.(2) - Erosão do tapete drenante* devido ao arrastamento das suas partículas para o exterior; e *III.1.(3) – Colmatação do tapete drenante* devido ao arrastamento de partículas mais finas da fundação.

Na Figura 7 estes efeitos imediatos correspondem a modos de rotura (designados simplificadamente como MR) do subsistema de nível de detalhe imediatamente inferior (III.1- Corpo principal), ou seja, *III.1.(2)- Erosão do tapete drenante* e *III.1.(3) - Colmatação do tapete drenante*.

Por sua vez, esses *MR* têm como contribuinte directo o primeiro modo de rotura da componente básica em análise *III.1.7.(1)*. Para além deste contribuinte podem existir outros relativos a modos de rotura de outras componentes.

No subsistema de nível imediatamente de detalhe inferior *(III – Barragem principal)* o efeito (próximo) associado à erosão do tapete drenante é a *III.(4) – Erosão da fundação* por perda de material para o interior do tapete drenante. Por sua vez, a colmatação do tapete drenante impede progressivamente o escoamento da água inviabilizando o funcionamento de todo o sistema drenante *(III.(2) – Colmatação do sistema drenante)*.

Para completar a análise da progressão do *MR* da componente básica em análise é necessário identificar os seus efeitos finais. São considerados para o efeito próximo *III.(4) a 0.(1) – Perda de retenção na albufeira* (com consequente exposição aos agentes atmosféricos) devido ao aumento dos caudais percolados pela fundação e à descida do nível de sobrenadante; e a *0.(2)–Insuficiência do sistema de bombagem* (causando uma contaminação local em redor dos poços *IBR*) devido ao caudal captado exceder a capacidade de bombagem, escoando-se parte da água para jusante.

Por outro lado, o efeito próximo *III.(2) – Colmatação do sistema drenante* tem como efeito final a *0.(3) - Contaminação a jusante* induzida pelo escoamento pela fundação e pela saída da água a jusante dos poços de bombagem *IBR*.

Segundo modo de rotura do tapete drenante

O segundo MR da componente em análise, *III.1.7.(2) – Insuficiente capacidade drenante,* tem como único efeito imediato o *III.1.(4)- Afogamento do tapete drenante*. Este pode originar erosão interna do maciço de jusante constituído pelos rejeitados e progredir para *III.(5) – Piping (no maciço de jusante)* ou apenas originar o *III.(6) – Afogamento do sistema drenante,* cujos efeitos finais se traduzem, respectivamente, pela formação de uma brecha e a geração de uma *0.(4)- Onda de inundação* e pela *0.(2) – Insuficiência do sistema de bombagem* pelas razões atrás apontadas.

Para obter resultados consistentes e substanciais com este método é importante manter uma atitude disciplinada no raciocínio *"causa – efeito"*. Caso contrário, a análise pode tornar-se difícil

e descontrolada e gera muita confusão entre o que são modos de rotura, causas ou efeitos, dando azo à ocorrência de situações indesejáveis de ciclos envolvendo esses conceitos em diferentes componentes do sistema.

No Quadro 4 apresenta-se a *sequência de efeitos* de todos os *MR* considerados para o sistema da barragem de Cerro do Lobo.

Quadro 4 – Sequência de efeitos dos modos de rotura indicados no Quadro 3.

ID MR	ID	Efeitos imed.	ID	Efeitos próximos	ID	Efeitos finais
I.1.1.(1)	I.1.(1)	Contaminação do maciço (taludes)	I.(2)	Contaminação do maciço	0.(13)	Contaminação das zonas envolventes
I.1.2.(1)	I.1.(2)	Sem efeito	I.(3)	Sem efeito	0.(13)	Contaminação das zonas envolventes
I.2.(1)	I.(1)	Ravinamento	0.(5)	Diminuição do encaixe da albufeira	0.(5)	Diminuição do encaixe da albufeira
III.1.1.(1)	III.1.(5)	Formação de escarpas e praias	III.(8)	Diminuição do corpo da barragem	0.(5)	Diminuição do encaixe da albufeira
III.1.2.(1)	III.1.(7)	Zona de escorregamento a montante	III.(8)	Diminuição do corpo da barragem	0.(5)	Diminuição do encaixe da albufeira
III.1.2.(2)	III.1.(6)	Assentamento a montante e no coroamento	III.(7)	Perda de folga	0.(6)	Perda de folga
III.1.3.(1)	III.1.(8)	Zona de escorregamento a jusante	III.(9):: III.(12):: III.(10):: III.(11)	Diminuição do corpo da barragem a jusante:: Perda de estanqueidade no aterro (sem afogamento do sistema de drenante) :: Formação de brecha com onda de inundação:: Formação de brecha sem onda de inundação	0.(14):: 0.(11).∴ 0.(2):: 0.(1).∴ 0.(4).∴ 0.(3)	Danificação dos poços IBR:: Destruição do sistema de observação ∴Insuficiência do sistema de bombagem::Perda de retenção na albufeira (exposição aos agentes atmosféricos).∴Onda de inundação.∴ Contaminação a jusante
III.1.3.(2)	III.1.(9)	Assentamento no coroamento e a jusante	III.(12) ::III.(7)	Perda de estanqueidade no aterro (sem afogamento do sistema de drenante):: Perda de folga	0.(2):: 0.(1).∴ 0.(7):: 0.(6)	Insuficiência do sistema de bombagem::Perda de retenção na albufeira (exposição aos agentes atmosféricos) ∴Erosão externa do coroamento – por acção das ondas :: Perda de folga
III.1.3.(3)	III.1.(10)	Arraste rápido e progressivo de material	III.(9):: III.(12):: III.(10)	Diminuição do corpo da barragem a jusante:: Perda de estanqueidade no aterro (sem afogamento do sistema de drenante):: Formação de brecha com onda de inundação	0.(14):: 0.(11).∴ 0.(2):: 0.(1).∴ 0.(4)	Danificação dos poços IBR:: Destruição do sistema de observação.∴ Insuficiência do sistema de bombagem::Perda de retenção na albufeira (exposição aos agentes atmosféricos).∴Onda de

Quadro 4 – Sequência de efeitos dos modos de rotura indicados no Quadro 3. *(Cont.)*

ID MR	ID	Efeitos imed.	ID	Efeitos próximos	ID	Efeitos finais
III.1.4.(1)	III.1.(1)	Erosão interna do núcleo	III.(2):: III.(3):: III.(1)	Colmatação do sistema drenante:: Piping (a montante do sistema drenante):: Perda de estanqueidade no aterro (com afogamento do sistema de drenante)	0.(3).∴ 0.(4).∴ 0.(2)	Contaminação a jusante ∴Onda de inundação ∴Insuficiência do sistema de bombagem
III.1.4.(2)	III.1.(1)	Erosão interna do núcleo	III.(2):: III.(3):: III.(1)	Colmatação do sistema drenante :: *Piping* (a montante do sistema drenante) :: Perda de estanqueidade no aterro (com afogamento do sistema de drenante)	0.(3).∴ 0.(4).∴ 0.(2)	Contaminação a jusante.∴Onda de inundação.∴Insuficiência do sistema de bombagem
III.1.5.(1)	III.1.(11)	Rotura da geomembrana	III.(2):: III.(3):: III.(1)	Colmatação do sistema drenante:: *Piping* (a montante do sistema drenante):: Perda de estanqueidade no aterro (com afogamento do sistema de drenante)	0.(3).∴ 0.(4).∴ 0.(2)	Contaminação a jusante.∴ Onda de inundação.∴ Insuficiência do sistema de bombagem
III.1.6.(1)	III.1.(13)	Erosão do filtro/ /dreno sub-vertical	III.(3)	*Piping* (a montante do sistema drenante)	0.(4)	Onda de inundação
III.1.6.(2)	III.1.(12)	Afogamento do dreno sub-vertical	III.(15):: III.(5)	Afogamento do sistema drenante (Percolação no maciço de jusante):: *Piping* (no mac. de jusante)	0.(3).∴ 0.(4)	Contaminação a jusante.∴Onda de inundação
III.1.7.(1)	III.1.(2):: III.1.(3)	Erosão do tapete drenante:: Colmatação do tapete drenante	III.(4).∴ III.(2)	Erosão da fundação.∴ Colmatação do sistema drenante	0.(2).∴ 0.(3)	Insuficiência do sistema de bombagem ∴ Contaminação a jusante
III.1.7.(2)	III.1.(4)	Afogamento do tapete drenante	III.(5):: III.(6)	*Piping* (no maciço de jusante):: Afogamento do sistema drenante	0.(4).∴ 0.(2)	Onda de inundação ∴ Insuficiência do sistema de bombagem
III.1.8.(1)	III.1.(14)	Erosão da saia	III.(4)	Erosão da fundação	0.(2)	Insuficiência do sistema de bombagem
III.1.8.(2)	III.1.(15)	Afogamento da saia	III.(6)	Afogamento do sistema drenante	0.(2)	Insuficiência do sistema de bombagem
III.3.1.(1)	III.3.(1):: III.3.(2)	Erosão da fund. para o sistema drenante::Erosão do fundação para a zona imed. a jusante	III.(2):: III.(6).∴ III.(13)	Colmatação do sistema drenante:: Afogamento do sistema drenante ∴Deterioração da estanqueidade na fundação	0.(3).∴ 0.(2).∴ 0.(9)	Contaminação a jusante.∴Insuficiência do sistema de bombagem ∴Exsurgências a jusante – contaminação
III.3.1.(2)	III.3.(3)	Contaminação do aquífero	III.(16)	Contaminação do aquífero	0.(8)	Contaminação dos aquíferos subterrâneos a jusante

Quadro 4 – Sequência de efeitos dos modos de rotura indicados no Quadro 3. *(Cont.)*

ID MR	ID	Efeitos imed.	ID	Efeitos próximos	ID	Efeitos finais
III.4.1.(1)	III.4.(1):: III.4.(2)	Erosão para o sistema drenante :: Erosão do maciço para a zona da encosta imed. a jusante	III.(2):: III.(6).∴ III.(14)	Colmatação do sistema drenante:: Afogamento do sistema drenante ∴ Deterioração da estanqueidade na zona dos encontros	0.(3).∴ 0.(2).∴ 0.(9)	Contaminação a jusante.∴Insuficiência do sistema de bombagem ∴Exsurgências a jusante – contaminação
III.4.2.(1)	III.4.(1):: III.4.(2)	Erosão para o sistema drenante :: Erosão do maciço para a zona da encosta imed. a jusante	III.(2):: III.(6).∴ III.(14)	Colmatação do sistema drenante:: Afogamento do sistema drenante.∴Deterioração da estanqueidade na zona dos encontros	0.(3).∴ 0.(2).∴ 0.(9)	Contaminação a jusante.∴Insuficiência do sistema de bombagem ∴ Exsurgências a jusante - contaminação
VII.1.(1)	VII.(2)	Sem efeito	0.(3)	Contaminação a jusante	0.(3)	Contaminação a jusante
VII.1.(2)	VII.(1)	Danificação da soleira			0.(12)	Escoamento descontro-lado (com contaminação generalizada a jusante)
VIII.1.(1)	VIII.(4)	Subida da cota de bombagem			0.(2)	Insuficiência do sistema de bombagem
VIII.1.(2)	VIII.(3)	Inutilização			0.(9)	Exsurgências a jusante – contaminação
VIII.2.(1)	VIII.(2)	Incapacidade pontual de bombear o fluido			0.(10)	Exsurgências pontuais a jusante
VIII.2.(2)	VIII.(2)	Incapacidade pontual de bombear o fluido			0.(10)	Exsurgências pontuais a jusante – contaminação local
VIII.2.(3)	VIII.(1)	Incapacidade de bombear o fluido			0.(9)	Exsurgências a jusante – contaminação

Notação

:: Delimitador principal ou de efeito subsequente do efeito em análise da coluna anterior;
∴ Delimitador secundário (separação causada por mudança de efeito na coluna anterior).

Exemplos:

***ID* efeitos imediatos**	***ID* efeitos próximos**	***ID* efeitos finais**
III.3.(1)::III.3.(2)	III.(2)::III.(6)\III.(13)	0.(3)\0.(2)\0.(9)
III.1.(2)::III.1.(3)	III.(4)\III.(2)	0.(2)::0.(1)\0.(3)

⇔

***ID* efeitos imediatos**	***ID* efeitos próximos**	***ID* efeitos finais**
III.3.(1)	III.(2)	0.(3)
	III.(6)	0.(2)
III.3.(2)	III.(13)	0.(9)
III.1.(2)	III.(4)	0.(2)
		0.(1)
III.1.(3)	III.(2)	0.(3)

Nesta fase da análise para todos os modos de rotura de todas as componentes básicas do sistema estão identificadas e convenientemente associadas as causas iniciadoras com os seus efeitos imediatos, próximos e finais. Adicionalmente, para os subsistemas de nível de detalhe inferior ao das componentes estão igualmente identificados os contribuintes de cada um dos seus modos de rotura.

5.6 – Medidas de detecção e de controlo dos modos potenciais de rotura

As *medidas de detecção* devem conseguir revelar a ocorrência das causas iniciadoras ou os efeitos mais imediatos numa fase inicial de desenvolvimento dos modos de rotura.

Em barragens de aterro a detecção é baseada essencialmente em inspecções visuais de rotina e de especialidade e em campanhas de leitura do sistema de observação. Em geral, as inspecções visuais permitem apenas a identificação de problemas quando estes já se encontram num estado avançado pelo que são complementadas pelos equipamentos de observação instalados que possibilitam, em princípio, diagnosticá-los precocemente.

A comparação dos resultados de observação com as tendências expectáveis de evolução das grandezas medidas permite, de uma forma segura, detectar a ocorrência dos modos de rotura em análise.

Na Figura 8 esquematizam-se os *equipamentos de observação disponíveis,* por exemplo, na zona de influência do tapete drenante, os quais possibilitam a leitura dos níveis piezométricos no maciço de jusante numa cota um pouco superior à do tapete drenante e ao longo da fundação. Complementarmente, procede-se com regularidade ao registo dos caudais bombeados, à medição do nível do sobrenadante e à análise química da água da albufeira e da água recolhida em piezómetros localizados a jusante da barragem.

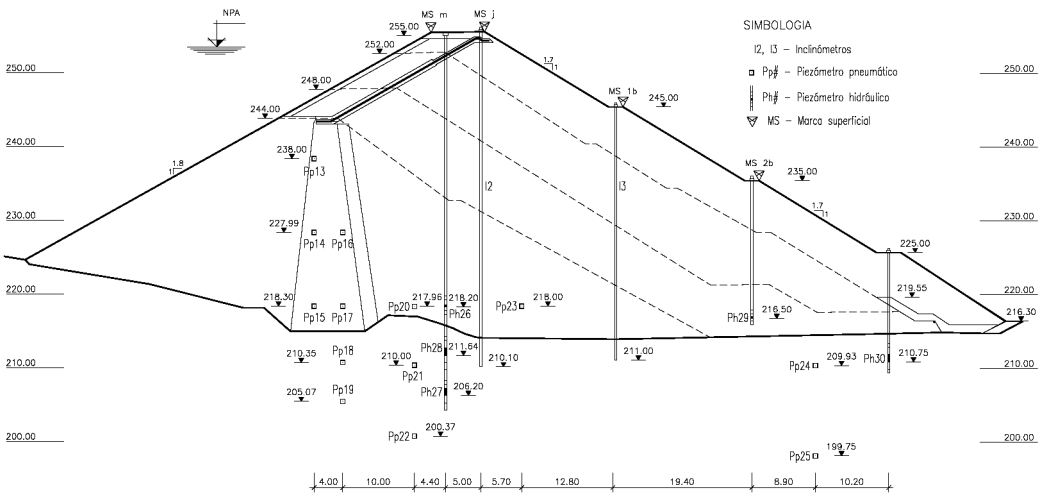

Fig. 8 – Secção de instrumentação de maior altura do corpo principal (*CENORGEO,* 2005).

Por sua vez, com as *medidas de controlo* pretende-se interromper ou, quando tal não seja possível, atenuar a sucessão dos efeitos, em tempo útil, de forma a reduzir a sua gravidade. No caso concreto em análise a medida de controlo disponível para ambos os modos de rotura é o abaixamento (apesar de limitado) do nível de água na albufeira.

No Quadro 5 apresentam-se as *medidas de detecção* e as *medidas de controlo* disponíveis na barragem de Cerro do Lobo. Estas são identificadas para todos os modos de rotura *(MR)* do sistema analisado.

Quadro 5 – Medidas de detecção e de controlo dos modos potenciais de rotura das componentes básicas do sistema associado à barragem de Cerro do Lobo (ver Quadro 3 e Quadro 4).

		Medidas de intervenção disponíveis		
		Detecção		**Controlo ‡**
Descrição da componente básica	**MR**	**Inspecção Visual ***	**Instrumentação †**	
Taludes	I.1.1.(1)	–	*Nas; Nal*	–
Fundo do vale	I.1.2.(1)	*zjp*	*Nas; Nal; Cpf; Cdb*	*RCB*
Encostas	I.2.(1)	*erx*	–	*PLV*
Camada de protecção do maciço montante	III.1.1.(1)	*erx*	–	*CMA*
Maciço de montante	III.1.2.(1)	d*te; fsc*	*Des*	*BEA (a montante)*
	III.1.2.(2)	*fac; iea*	*Des*	*RPG*
Maciço de jusante	III.1.3.(1)	*dte; fsc*	*Dhi; Des; Pmj; Mam*	*BEA (a jusante)*
	III.1.3.(2)	*fsc; ded*	*Dhi; Des; Mam*	*RPG*
	III.1.3.(3)		*Nas; Nal; Vdr; Pee; Cdb*	–
Núcleo argiloso	III.1.4.(1)	*tva; zhj; sub*	*Cpn; Cmj; Cdb; Nal; Mam*	*RCB*
	III.1.4.(2)	–		–
Geomembrana	III.1.5.(1)	*zhj; sub*	*Cmj; Cdb; Nal; Mam*	*ANA; RCB*
Filtro/Dreno sub-vertical	III.1.6.(1)	*sub*	*Cdb; Nal; Cmj*	*ANA*
	III.1.6.(2)	*zhj; sub*	*Cmj; Cdb; Nal*	*ANA*
Tapete drenante	III.1.7.(1)	*tva; sub; res*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*RCB*
	III.1.7.(2)	*zhj*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*ANA; RCB*
Saia drenante no maciço de jusante	III.1.8.(1)	*tva; sub; res*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*RCB*
	III.1.8.(2)	*zhj*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*RCB*
Zona imediatamente sob corpo da barragem	III.3.1.(1)	*tva; res*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*RCB; PAJ*
	III.3.1.(2)	–	*Cpf; Cdb; Mam*	–
Zona de contacto dos encontros com o núcleo argiloso	III.4.1.(1)	*tva; res*	*Cmj; Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*RCB* PAJ
Zona de contacto dos encontros com a geomembrana	III.4.2.(1)			PAJ
Estrutura global do descarregador de cheias	VII.1.(1)	–	*Nal; Nas; Vdr; Pee; Cdb*	–
	VII.1.(2)	*aps*	*Nal; Nas; Vdr; Pee; Cdb*	*ALD; ANA*

Quadro 5 – Medidas de detecção e de controlo dos modos potenciais de rotura das componentes básicas do sistema associado à barragem de Cerro do Lobo (ver Quadro 3 e Quadro 4). *(Cont.)*

		Medidas de intervenção disponíveis		
		Detecção		Controlo ‡
Descrição da componente básica	**MR**	**Inspecção Visual ***	**Instrumentação †**	
Poços	VIII.1.(1)	*dmf*	*Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*LMP*
	VIII.1.(2)	*dmf; res*	*Cpf; Cdb; Nal; Mam*	*PAJ*
Sistema de bombagem	VIII.2.(1)	fmb; res(pontuais)	*Cdb*	*MSB*
	VIII.2.(2)	fmb; res(pontuais)	*Cdb*	*MSB; ANB*
	VIII.2.(3)	*dfe; res*	*Cdb; Nal; Mam*	*REG*

* *zjp* = zonas a jusante dos poços *IBR; erx* = erosão externa; *dte* = detecção de escarpas; *fsc* = fissuração do coroamento; *fac* = fissuração e alinhamento do coroamento; *iea* = intersecção da borda do espelho de água; *ded* = desalinhamentos e desnivelamentos; *tva* = turvação da água; *zhj* = zonas húmidas imediatamente a jusante; *sub* = subsidências; *res* = res - surgências; *aps* = aspecto da soleira; *dmf* = deposição de materiais finos; *fmb* = funcionamento das bombas; *dfe* = detecção de falta de energia.

† *Nas* = nível da albufeira (parte sólida); *Nal* = nível da albufeira (parte líquida); *Cpf* = cotas piezométricas na fundação; *Cdb* = caudais bombeados; *Des* = Deslocamentos superficiais; *Dhi* = deslocamentos horizontais internos; *Pmj* = pressões intersticiais no maciço de jusante; *Mam* = monitorização ambiental; *Vdr* = volume de deposição dos rejeitados; *Pee* = precipitação e evaporação; *Cpn* = cotas piezométricas no núcleo; *Cmj* = cotas piezométricas no maciço de jusante.

‡ *RCB* = reforço da capacidade de bombagem; *PLV* = plantação de vegetação, *CMA* = colocação de material adicional; *BEA* = berma estabilizadora adjacente à zona afectada; *ANA* = abaixamento do nível de água na albufeira; *RPG* = reposição da geometria; *PAJ* = poços IBR adicionais a jusante; *ALD* = alteamento do descarregador; *LMP* = limpeza

6 – ANÁLISE DA CRITICALIDADE DOS MODOS POTENCIAIS DE ROTURA (FMECA)

A extensão do processo da *FMEA* para a *FMECA* obriga à estimação da criticalidade de cada modo de rotura para todas as componentes do sistema. Para os modos de rotura das várias componentes é necessário estimar: i) a verosimilhança da ocorrência dos efeitos finais de cada modo de rotura e ii) a severidade das suas consequências no sistema.

Ao contrário do que acontece noutros sistemas, nas obras geotécnicas, em geral, não existem dados suficientes para proceder a análises puramente probabilísticas. Tal dificuldade pode ser ultrapassada com a utilização de métodos classificativos em que a probabilidade de ocorrência dos eventos e a severidade das suas consequências no sistema são ordenadas em classes, designadas, respectivamente, por classes de verosimilhança e por classes de severidade.

6.1 – Classes de verosimilhança

No Quadro 6 apresenta-se um exemplo de possíveis classes de verosimilhança. Nesse quadro efectua-se uma divisão da probabilidade de ocorrência de um dado evento (ou conjunto de eventos) em cinco intervalos, com classificações entre *A-Improvável* e *E-Frequente,* e associa-se a cada a sua descrição.

Quadro 6 – Classes de verosimilhança (US Department of Defense, 2005).

Classes de verosimilhança	Intervalos de probabilidade	Classificação	Descrição
A	<0.1%	Improvável	Muito baixa probabilidade
B	0.1 – 1%	Remota	Possível mas de baixa probabilidade
C	1 – 10%	Ocasional	Ocorrência ocasional
D	10 – 20%	Provável	Ocorrência de elevada probabilidade
E	>20%	Frequente	Ocorrência regular

Em geral, a informação a que os analistas de risco têm acesso para análise de estruturas geotécnicas não lhes permite utilizar de um modo directo os intervalos de probabilidade, pelo que a atribuição das classes de verosimilhança possui, necessariamente, alguma subjectividade.

6.2 – Classes de severidade

As diversas consequências dos modos de rotura identificados aquando da realização da *FMEA* necessitam de ser avaliadas em termos da sua severidade. Este é um tema de grande dificuldade para os analistas de riscos, uma vez que a sua resolução não é única. Uma forma de minimizar esta indeterminação passa pela atribuição de classes de severidade às consequências associadas aos efeitos finais no sistema derivados da ocorrência dos modos de rotura.

As *classes de severidade* têm de ser capazes de reflectir de modo gradual todo um conjunto de situações, desde a mais catastrófica à menos relevante. A escolha e a descrição das classes de severidade devem ser claras, objectivas e cuidadosas para que a sua atribuição seja a mais directa possível.

As consequências dos modos de rotura podem ser agrupadas em diferentes áreas de interesse, tais como a saúde e a segurança de pessoas, o ambiente, os danos e a censura da opinião pública. Cada área de interesse é definida com base em atributos específicos, tais como fatalidades, perdas económicas, impactes ambientais, consequências políticas, etc. Assim, as classes de severidade podem ser atribuídas separadamente a cada uma das diferentes áreas de interesse.

No Quadro 7 apresentam-se as classes de severidades utilizadas no caso de estudo. Aí apresentam-se seis classes de severidades para quatro áreas de interesse relevantes.

A estimação das classes de severidade para as consequências dos efeitos finais do sistema pode ser efectuada de modo discriminado para as diferentes áreas de interesse da análise. Na análise efectuada a severidade dos efeitos finais dos modos de rotura foi estimada adoptando uma ponderação subjectiva para cada uma das áreas de interesse de modo a ser obtido uma classe de severidade agregada.

6.3 – Estimação do risco de cada modo de rotura (criticalidade)

A *criticalidade* de cada modo de rotura só fica perfeitamente definida quando se relaciona a severidade das consequências com a possibilidade de ocorrência dos eventos que lhe dão origem, obtidos, respectivamente, através das classes de severidade e de verosimilhança.

Para aplicação do método deve ser atribuída uma *classe de verosimilhança* para cada conjunto de efeitos finais originado por um certo modo de rotura numa componente e uma *classe de severidade* associada às consequências daí resultantes. Este processo deve, então, ser repetido para

Quadro 7 – Classes de severidade (adaptado de Hartford e Baecher, 2004; Robertson *et al*., 2003).

Classes de severidade	Áreas de interesse			
	Saúde e segurança de pessoas	**Ambiente**	**Perdas económicas (€)**	**Censura da opinião pública**
I	Negligenciável	Sem impacte mensurável	Impacte baixo (<10 mil)	Nenhuma
II	Pequenos primeiros socorros	Pequenos impactes na zona	Impacte médio (10 mil - 100 mil)	Baixa
III	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Impacte médio-alto (100 mil - 1 milhão)	Média-Baixa
IV	Incapacidade temporária	Prejuízo local	Impacte alto (1 - 10 milhões)	Média
V	Incapacidade permanente/fatalidade	Impacte significativo (grande mas reversível)	Impacte muito alto (10 - 100 milhões)	Média-Alta
VI	Várias fatalidades	Impacte catastrófico (grande e irreversível)	Impacte Massivo (> 100 milhões)	Alta

todos os modos potenciais de rotura. No caso de estudo apresentado essa análise encontra-se simplificada, considerando-se uma única classe de verosimilhança para cada modo de rotura e uma classe de severidade para cada conjunto de efeitos finais de cada modo de rotura.

Foi efectuada uma avaliação subjectiva da criticalidade dos modos de rotura em termos absolutos, mas ponderada em termos relativos. Utilizaram-se julgamentos subjectivos da verosimilhança de ocorrência de eventos e da severidade das suas consequências. As decisões tomadas são baseadas em informações disponíveis sobre o comportamento da obra até esta fase e, quando tal não existe com base no conhecimento de situações comparáveis de outras obras. Em Santos (2006) referem-se os julgamentos subjectivos que conduziram à escolha da classe de verosimilhança e das classes de severidade que foram atribuídas a cada modo de rotura do caso de estudo.

6.4 – Matriz de criticalidade dos modos potenciais de rotura

A avaliação da criticalidade dos modos de rotura foi efectuada através da consideração de uma matriz bidimensional – *matriz de criticalidade* [Cr] = *(veros, sev)*. Nesta matriz de criticalidade as colunas estão associadas às classes de severidade *(sev)* e as linhas às várias classes de verosimilhança *(veros)*.

Em Santos (2006) apresentam-se as classes de verosimilhança e de severidade atribuídas a cada modo de rotura. Na Figura 9 apresenta-se o resumo dos resultados, através de uma representação tabular da criticalidade dos modos de rotura das componentes básicas do sistema correspondente à barragem de Cerro do Lobo na forma de uma *matriz de criticalidade*. Nessa matriz estão indicados todos os pares *(veros, sev)* identificados na análise.

Os modos de rotura mais críticos correspondem àqueles que apresentarem o efeito conjunto mais desfavorável de severidade e de verosimilhança, ou seja, os modos de rotura mais críticos encontram-se na matriz no canto superior direito e os menos relevantes no canto inferior esquerdo.

Para os modos de rotura com vários pares *(veros, sev)* associados a maior criticalidade corresponde àquela com classe de severidade e classe de verosimilhança mais desfavorável (valores representados a negrito na Figura 9).

Classes de verosimilhança							
	E						
	D				III.3.1.(1) III.4.1.(1)	**III.3.1.(1)** **III.4.1.(1)** VII.1.(1)	
	C		VIII.2.(1)	III.1.4.(2) III.1.5.(1) III.4.2.(1)	III.1.7.(2) **III.4.2.(1)**	III.1.4.(2) III.1.5.(1) III.1.6.(2)	**III.1.5.(1)** **III.1.6.(2)** **III.1.7.(2)**
	B	I.2.(1) III.1.1.(1) III.1.3.(3)	VIII.1.(1)	III.1.2.(2) III.1.3.(2) III.1.4.(1) VIII.1.(2) VIII.2.(2) VIII.2.(3)	**I.1.2.(1)** **III.1.3.(2)** III.1.3.(3) III.1.7.(1) III.1.8.(2)	III.1.4.(1) III.1.7.(1) VII.1.(2)	**III.1.3.(3)** **III.1.4.(1)** III.1.6.(1)
	A	III.1.3.(1)	III.1.2.(1)	I.1.1.(1) III.3.1.(2)	III.1.3.(1) III.1.8.(1)	III.1.3.(1)	**III.1.3.(1)**
MR		**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**
		Classes de Severidade					

Fig. 9 – Matriz de criticalidade dos modos potenciais de rotura das componentes básicas do sistema correspondente à barragem de Cerro do Lobo.

6.5 – Resultados mais significativos da *FMEA/FMECA* da barragem de Cerro do Lobo

De seguida apresentam-se os *principais resultados* relativamente aos modos de rotura mais críticos, referindo-se as suas causas iniciadoras, a progressão sequencial de efeitos e as medidas disponíveis para a sua detecção e para o seu controlo.

6.5.1 – Percolação excessiva na zona superficial do maciço natural

A análise permitiu concluir que os principais problemas associados a este sistema estão relacionados com uma eventual percolação excessiva na zona superficial do maciço de fundação e dos encontros da barragem principal – *modos de rotura III.3.1.(1) e III.4.1.(1)*.

A ocorrência desses modos de rotura poderá originar erosão interna do maciço na zona superficial que, por sua vez, pode colmatar ou afogar o sistema drenante do aterro ou conduzir a uma perda de estanqueidade do maciço. Caso o sistema drenante fique colmatado, a água percolada pela zona superficial do maciço não é recolhida nos poços *IBR*, tendo como efeito final uma contami - nação generalizada e descontrolada dos vales a jusante. O afogamento do sistema drenante pode ter como consequência final uma insuficiência do sistema de bombagem e originar uma contaminação localizada na zona dos poços *IBR*. A perda de estanqueidade do maciço associado à erosão leva ao aparecimento de exsurgências a jusante.

Como medidas disponíveis na obra para a detecção destes dois modos de rotura referem-se: i) a inspecção visual, mais concretamente, através da observação da turvação da água e do aparecimento de ressurgências a jusante; e ii) a instrumentação que permite monitorizar cotas piezométricas no maciço de jusante e na fundação, caudais médios mensais bombeados e níveis da albufeira (fase líquida e fase

sólida) e efectuar uma monitorização ambiental (comparação dos parâmetros ambientais entre amostras colhidas na albufeira, nos poços *IBR* e nos piezómetros de tubo aberto existentes a jusante).

Como medida de controlo desses modos de rotura pode referir-se a possibilidade de reforço da capacidade de bombagem nos poços *IBR* existentes. Quando esta medida se revelar ineficaz ou não existirem poços *IBR* na vizinhança da zona afectada a única medida de controlo para captar parte da água percolada pelo maciço e conduzi-la de novo para a albufeira passa por criar poços *IBR* adicionais a jusante.

6.5.2 – Funcionamento hidráulico do descarregador de cheias

Em virtude da ocorrência de um balanço hidrológico desfavorável, outro modo de rotura crítico no sistema está relacionado com a possibilidade do descarregador de cheias funcionar sem danos estruturais significativos – *modo de rotura VII.1.(1)*. A consequência final mais evidente dessa ocorrência traduz-se por uma contaminação significativa na zona a jusante do descarregador.

As *medidas de detecção* desse modo de rotura estão associadas à instrumentação instalada na obra que permite monitorizar regularmente as seguintes grandezas: o nível da albufeira (da fase líquida e da fase sólida), o volume de deposição dos rejeitados, a precipitação, a evaporação e o caudal de água bombeada dos poços *IBR*. Um conhecimento permanentemente actualizado dos valores dessas grandezas pode permitir antever a ocorrência do referido modo de rotura.

Como *medida de controlo* pode indicar-se o alteamento do descarregador. Esta medida apenas pode ser considerada como eficiente durante um período limitado de tempo, dado que pode aumentar a verosimilhança de outros modos de rotura (*e.g.,* erosão externa do maciço de jusante por galgamento). Logo após a implementação desta medida de controlo deve ser efectuada uma reavaliação da situação e prover medidas de mitigação de riscos adequadas. Trata-se, portanto, de uma medida de carácter provisório, com efeitos eficazes apenas a curto prazo.

6.5.3 – Insuficiente capacidade drenante do tapete drenante

A análise permitiu ainda aferir que, face ao aumento da cota de exploração da albufeira e ao facto de a secção do tapete drenante poder ser insuficiente ou existir uma inadequação dos materiais aplicados, este poderá ter insuficiente capacidade drenante – *modo de rotura III.1.7.(2)*. O efeito final mais gravoso é a possibilidade de formação de uma onda de inundação causada pela formação de *piping* no maciço de jusante. Numa situação menos gravosa, pode ainda considerar-se como plausível o efeito final de uma insuficiência do sistema de bombagem.

As medidas de detecção desse modo de rotura são, essencialmente, de dois tipos – as associadas à inspecção visual e à instrumentação disponível em obra. A primeira reporta-se, principalmente, à observação de zonas húmidas a jusante. As segundas estão relacionadas com a leitura frequente das cotas piezométricas no maciço de jusante e no maciço de fundação, dos caudais bombeados nos *IBR* e dos níveis de água na albufeira e com a monitorização ambiental.

As medidas de controlo deste modo de rotura são diferenciadas consoante a sequência de efeitos que se vier a verificar. Para o efeito final associado à onda de inundação a única forma de controlar a sua ocorrência ou minimizar as suas consequências passa por realizar um abaixamento do nível de água na albufeira com recurso ao descarregador em sifão existente na obra. Esta medida não é totalmente eficaz, dado que não existem na obra meios capazes de tratamento de caudais significativos de água contaminada, pelo que esta teria de ser descarregada directamente para o meio receptor. Esta solução pretende controlar a ocorrência de um efeito com consequências ainda mais severas – o colapso da barragem.

Para o efeito final associado à insuficiência do sistema de bombagem, o modo de controlar a consequente contaminação passa por um reforço da capacidade de bombagem.

6.5.4 – Danificação da geomembrana

Por último, indica-se o modo de rotura associado a uma eventual danificação da geomembrana – *modo III.1.5.(1)*. A rotura da geomembrana pode dever-se a ataque químico a longo prazo por parte dos materiais agressivos retidos na albufeira, a uma deficiente instalação neste último alteamento ou a uma deficiente ligação ao núcleo ou ao encontro. A sua efectivação pode originar: i) uma colmatação do sistema drenante com consequente contaminação generalizada a jusante; ii) piping (a montante do sistema drenante) que pode levar a uma onda de inundação; iii) perda de estanqueidade do aterro (com afogamento do sistema drenante) conduzindo a uma insuficiência do sistema de bombagem.

Como *medidas de detecção* referem-se a inspecção visual de zonas húmidas imediatamente a jusante da barragem e de subsidências no corpo da barragem e a monitorização regular das cotas piezométricas no maciço de jusante, dos caudais bombeados nos *IBR* e do nível de água na albufeira e a monitorização ambiental a jusante.

As *medidas de controlo* existentes na obra para evitar a progressão da sequência de efeitos ou atenuar as suas consequências causadas pela eventual danificação da geomembrana coincidem com as referidas para o modo de rotura anterior.

6.6 – Mitigação dos modos de rotura mais críticos

As *medidas de mitigação dos riscos* identificados e analisados devem consistir na aplicação selectiva de técnicas e de princípios de gestão apropriados para reduzir, para os modos de rotura de maior risco, a possibilidade da sua ocorrência, a amplitude das suas consequências adversas ou ambas.

Por exemplo, a mitigação dos riscos associados a dois dos modos de rotura de maior criticalidade – *Percolação excessiva na zona superficial do maciço dos encontros e da fundação* – poderá passar pela impermeabilização deste maciço (*e.g.*, através de injecções). Naturalmente, para a tomada desta decisão seria necessário efectuar *análises de custo-beneficio* e avaliar a viabilidade económica desta medida de mitigação.

Para o modo de rotura relativo ao funcionamento hidráulico do descarregador, a filosofia de projecto de descarga nula constitui um pressuposto extremamente recomendável, se não indispensável, na concepção e na gestão da sua componente hidrológica e ambiental. Não é, no entanto, possível assegurar que não ocorrerão descargas da albufeira para jusante através do descarregador de cheias. A própria existência deste órgão manifesta a convicção por parte do Projectista dessa eventualidade. Em consequência, como medida de mitigação poderiam ser implantadas, na zona a jusante do descarregador de cheias, dispositivos que pudessem minimizar o alcance das descargas não tratadas nos vales de jusante da barragem.

Uma possibilidade seria a construção de uma central de tratamento de águas dimensionada para uma cheia inferior à cheia de projecto decamilenar. Outra opção possível seria a construção de uma barragem interceptando a distância adequada a linha de água potencialmente afectada por descargas de superfície. Estas opções não se excluiriam mutuamente.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Presentemente, a utilização de análises de riscos em Geotecnia encontra-se num estado muito incipiente em Portugal. No entanto, a sua utilização pode ser importante em obras relevantes, cujos modos de rotura possam acarretar riscos elevados.

Existem diversas metodologias de análise de riscos, perfeitamente estabelecidas no meio científico que, com as devidas adaptações, podem ser aplicadas em Geotecnia. Em particular, apresen-

tou-se uma aplicação prática de uma *FMEA/FMECA* a uma barragem de aterro convencional para retenção de rejeitados resultantes das lavarias de minas. A *FMEA* é uma abordagem tipo hierárquica enfatizando o refinamento progressivo de cada componente até se atingir um nível de conhecimento ideal. Adicionalmente, permite uma hierarquização de riscos *(FMECA)*.

A aplicação da *FMEA/FMECA* permitiu, através de um processo metódico e padronizado, identificar e ordenar os principais problemas induzidos por perdas de funcionalidade no sistema composto pela barragem de Cerro do Lobo e pela sua zona de influência após a construção do úl - timo alteamento. Possibilitou a identificação e a análise da maioria das possíveis roturas do referido sistema e, adicionalmente, permitiu ordená-las de acordo com o seu risco efectivo através da avaliação da criticalidade dos modos de rotura das suas componentes básicas. Adicionalmente, permitiu identificar para esses modos de rotura quais as medidas de detecção e de controlo disponíveis na barragem de Cerro do Lobo.

O produto final foi apresentado de forma tabular, facilitando a comunicação entre os técnicos responsáveis pela obra, designadamente acerca dos aspectos relacionados com as medidas de detecção e de controlo. Fornece ainda indicações para a concepção de medidas de minimização de risco. A criticalidade dos modos de rotura foi apresentada na forma de uma matriz de criticalidade.

A utilização de uma *FMEA/FMECA* pode constituir uma mais valia como precursora da apli - cação de outros tipos de metodologias de análises de risco mais completas e com maior grau de complexidade, como por exemplo, através de análises de árvore de eventos *(ETA)* e de árvore de falhas *(FTA)*. O conhecimento adquirido durante a execução da *FMEA/FMECA* é uma valiosa ajuda para a etapa de construção das árvore de eventos, pois a análise sistemática de todos os modos de rotura e dos respectivos efeitos evita que modos de rotura relevantes deixem de ser considerados ou que aqueles sem importância prática sejam modelados.

Quando aplicadas apropriadamente, as análises de riscos podem desempenhar uma função importante na integração de diversas actividades de segurança de obras geotécnicas e, em particular, de barragens de aterro, tais como, a exploração, a manutenção, a observação, a revisão periódica da segurança, a formação e a sensibilização de pessoal de obra e as acções de emergência. Admite-se igualmente que as análises de riscos possam desempenhar uma função nuclear nas actividades desenvolvidas em programas de segurança modernos de estruturas geotécnicas importantes.

8 – AGRADECIMENTOS

Agradece-se à empresa *SOMINCOR* a autorização concedida para utilização e apresentação de informação relativa à barragem de Cerro do Lobo. Agradece-se igualmente ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil *(LNEC)* pelo financiamento atribuído através de uma Bolsa de Iniciação à Investigação Científica e por facultar todos os meios necessários para a realização da dissertação de mestrado referida.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baecher, G.; Christian, J. (2000). *The practice of risk analysis and safety of dams*. University of Maryland.

Caldeira, L. (2003). *Segurança em Geotecnia*. Folhas da disciplina de Segurança em Geotecnia do Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil (ano lectivo 2003/2004), FCT/UNL | IST | LNEC, Lisboa.

Caldeira, L. (2005). *Metodologias de Análise de Risco. Aplicações em Geotecnia*. 2.as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia: Modelação e Segurança em Geotecnia, LNEC, Lisboa, pp. 31-55.

Caldeira, L. (2006). *Análises de risco em Geotecnia. Aplicação a barragens de aterro*. Programa de Investigação e de Pós-Graduação na Área Científica de Mecânica dos Solos, LNEC, Lisboa, pp. 248.

Caldeira, L., Pimenta, L.; Silva Gomes, A. (2005). *Enquadramento das análises de riscos e sua aplicação a barragens de aterro*. Seminário de Barragens Tecnologia, Segurança e Interacção com a Sociedade, LNEC, Lisboa, Vol.T4.C4, pp. 569-685.

CENORGEO (2005). *Barragem de Cerro do Lobo. 4ª Fase de Construção – Alteamento para a cota 255. Peças Desenhadas do Plano de Observação da Barragem*. Fevereiro.

Hartford, D.; Baecher, G. (2004). *Risk and Uncertainty in Dam Safety*. CEA Technologies Dam Safety Interest Group, Thomas Telford Books.

HIDROPROJECTO (2002). *Barragem de Cerro do Lobo. 4ª Fase de Construção – Execução do projecto de alteamento da barragem da cota 252 para a cota 255. Projecto de execução*.

ICOLD (1974). *Lessons from dams incidents. Complete Ed.,* International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.

ICOLD (1995). *Dam failures statistical analysis. Bulletin 99-1995*. International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris.

ICOLD (1998). ICOLD *Guidelines on Risk Assessment for Dams, Attachment by: A. Williams*. Progress Report for New Delhi Meeting, International Committee on Dam Safety, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, pp. 1-28.

ITEM Toolkit Software (2001). *www.itemuk.com*.

Maranha das Neves, E. (2002). *Breves considerações sobre análises de risco de obras geotécnicas em Portugal*. 8º Congresso Nacional de Geotecnia - A Geotecnia Portuguesa e os desafios do futuro, Vol.4, pp. 2313-2317.

Mineiro, A. (1991). *Dimensionamento de barragens de aterro. Novos critérios de segurança (Lição Manuel Rocha)*. Geotecnia, SPG, vol. 62, pp. 1-62.

Pimenta, L., Caldeira, L.; Silva Gomes, A. (2005). *Análise de riscos da ensecadeira de Odelouca. Aplicação de uma metodologia simplificada com base em diagramas LCI*. Seminário de Barragens Tecnologia, Segurança e Interacção com a Sociedade, LNEC, Lisboa, Vol.T4.C7, pp. 609-627.

Robertson, A., Mac, G.; Shaw, S. (2003). *Risk Management for Major Geotechnical Structures on Mines*. Computer Applications in the Mineral Industries, Calgary, Alberta, Canada, 8-10 September.

RSB (2007). *Regulamento de Segurança de Barragens*. Decreto-Lei n.º 344/2007, de 15 de Outubro.

Santos, R. (2006). *Enquadramento das análises de riscos em Geotecnia*. Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT | UNL), Monte da Caparica, pp. 257.

Santos, R., Caldeira, L.; Serra, J.B. (2006). *Análise de riscos pela FMEA. Aplicação ao tapete drenante de uma barragem de aterro*. COBRAMSEG'2006, Curitiba, Brasil.

Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. (1989). *Critical filters for impervious soils*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 115 (7), pp. 927-947.

Sherard, J.L., Dunnigan, L.P.; Talbot, J. (1984). *Filters for silts and clays*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 110 (6), pp. 701-718.

US Department of Defense (2005). *MIL-STD-1629 Revision. Procedures for performing FMECA*. MIL Standards.

Vick, S.G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailing dams*. BiTech Publishers.