

CONTRIBUIÇÕES PARA A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITADOS

CONTRIBUTIONS FOR SAFETY MANAGEMENT OF TAILINGS DAMS

Espósito, Terezinha, *Univesidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Brasil, espósito@etg.ufmg.br*

Caldeira, Laura, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa, Portugal, laurac@lnec.pt*

RESUMO

As barragens para contenção de rejeitados são concebidas para crescerem ao longo da vida útil da mina, sendo a sua construção usualmente simultânea com sua própria exploração. Ressalta-se que, por serem estruturas com características diferenciadas, necessitam de uma gestão de segurança adequada às suas especificidades, de forma a garantir as três premissas básicas - a sua estabilidade, um adequado controlo da percolação e a retenção dos rejeitados. Inserido nesse contexto, esse artigo tem como objectivo apresentar algumas considerações relativas ao projecto, à construção e à exploração das barragens de contenção de rejeitados, sendo também apresentado, no final, um sumário sucinto de condições de aplicação de metodologias de análises de riscos, destacando-se a importância dessas ferramentas no âmbito da gestão da segurança dessas estruturas.

ABSTRACT

Tailings dams are designed to be built over the life of the mine, and the construction is usually simultaneous with the operation. These dams are structures with different characteristics that require a safety management, which must include recommendations appropriate to ensure three basic premises, namely, stability, seepage control and retention of the tailings. In this context, this article aims to present some considerations for the design, construction and operation of tailings dams, and at the end, is presented a brief summary of conditions for the application of risk analysis methodologies, highlighting the importance of these tools in the safety management of such structures.

1. INTRODUÇÃO

Os rejeitados são uma consequência inevitável do processo de tratamento a que são submetidos os minérios para a geração do produto final. Estes resíduos da actividade minerária devem ser depositados, de forma controlada, para evitar problemas ambientais de contaminação ou assoreamentos. A preferência das mineradoras brasileiras tem sido pela deposição dos rejeitados em superfície, através de barragens de contenção de rejeitados, no caso de materiais finos (lamas), ou de pilhas drenadas, no caso de rejeitados granulares (Figura 1). Essas barragens ou pilhas são construídas por fases, com previsão de alteamentos sucessivos e ao longo do tempo, sendo que, em muitos casos, o próprio rejeitado é utilizado como material de construção nestes alteamentos.

Independentemente dos materiais e dos métodos utilizados, no contexto da gestão de segurança de uma barragem de rejeitados três premissas básicas devem ser contempladas: deve ser uma estrutura estável conjuntamente com a sua fundação; tem que permitir o controlo adequado de

toda a água que a atravessa e deve reter praticamente a totalidade dos rejeitados na sua albufeira (Espósito, 2000).



Figura 1 – Barragem de Contenção de Rejeitados e Empilhamento Drenado de Rejeitado Granular

No caso específico dos empilhamentos drenados, diferentemente das barragens para contenção de rejeitados, não se prevê a formação de uma albufeira permanente. Dessa forma, para pilhas de rejeitados poder-se-ia re-escrever a terceira premissa, considerando que essas estruturas devam reter e auto-conter todas as partículas sólidas do rejeitado lançado.

Deve ser ressaltado, no presente contexto, que barragens denominadas convencionais são aquelas destinadas à retenção de água, cuja finalidade é a geração de energia, o abastecimento de água, a regularização de cheias, a rega, o lazer etc. Nestas estruturas, a segurança está directamente relacionada com a estabilidade, que é função das características geotécnicas da fundação e do corpo da barragem, como também das condições locais, tais como topografia, geologia, hidrologia, água subterrânea e superficial, clima, sismicidade, etc.

No caso de barragens/pilhas de contenção de rejeitados todas estas características e condições são também muito importantes. É, portanto, natural, utilizar inicialmente considerações semelhantes às relativas a barragens convencionais. Por exemplo, a investigação do local, tendo em vista sua possível selecção, deve considerar as condições hidrológicas, a dimensão da albufeira, a complexidade hidrogeológica do local, as consequências de uma possível ruptura, assim como os riscos de poluição atmosférica ou na água superficial ou subterrânea. Adicionalmente, as alterações produzidas na exploração da mina nas características e nas propriedades dos rejeitados podem ser factores determinantes na concepção do projecto.

Por outro lado, não se pode omitir que as necessidades de operação destas estruturas são diferentes das barragens convencionais. As barragens/pilhas de contenção de rejeitados são projectadas para serem construídas ao longo da vida útil da mina. Dessa forma, sua construção é usualmente simultânea com sua própria operação.

Destaca-se que a construção por alteamentos sucessivos é atraente e viável, pois, além de diluir os custos envolvidos, dá maior flexibilidade de operação, possibilitando adaptar a construção da barragem/pilha às necessidades de alteração das taxas de produção devido às flutuações do mercado de minérios, o que resulta em maiores ou menores volumes de rejeitados a serem depositados.

Conclui-se que as barragens de contenção de rejeitados, assim como os empilhamentos drenados, por serem estruturas com características diferenciadas, necessitam de uma gestão de segurança, no que se refere ao projecto, à construção e à exploração, que contemple recomendações adequadas às suas especificidades, de forma a garantir a sua segurança estrutural e ambiental (estabilidade e controlo da percolação) e a sua funcionalidade (retenção dos rejeitados) durante a sua vida útil.

Na sequência, no contexto da gestão da segurança, são apresentadas algumas recomendações relativas às diferentes fases (projecto, construção e exploração) das barragens de contenção de rejeitados. Atendendo-se às diferenças entre estes dois tipos de estruturas, as partes relevantes destas recomendações poderão ser estendidas aos empilhamentos drenados. É ainda de referir que, neste tipo de estrutura, dado o seu faseamento construtivo, as diferentes fases estão fortemente interligadas, podendo ocorrer simultaneamente a revisão do projecto com a construção e com a exploração.

Finaliza-se o presente artigo com uma sucinta apresentação de metodologias de análises de riscos, tendo em vista o papel dessas ferramentas no contexto da gestão da segurança das barragens/pilhas de rejeitados.

2. BARRAGENS/PILHAS DE REJEITADOS

2.1. Recomendações sobre o Projecto

No âmbito da gestão de segurança, um projecto adequado deve atender à melhor prática da engenharia, incluindo a realização de, entre outros, estudos hidrológicos, sismológicos, hidrogeológicos e geotécnicos, mediante a execução de sondagens e de ensaios de caracterização física, hidráulica e mecânica da fundação, dos materiais de construção e dos rejeitados, a depositar e a utilizar nos aterros, além de estudos de análise do comportamento global da obra e de optimização da disposição dos materiais disponíveis.

Como factores relevantes que influenciam a concepção do projecto de uma barragem de rejeitados podem ser citados os seguintes: o plano de lavra, a lavra propriamente dita, a vida útil da mina, os processos de tratamento e de concentração, as características (físicas e químicas) do produto e dos rejeitados oriundos do processo, a água do processo, o local barrável, a bacia de retenção, os custos da operação e os equipamentos de terraplenagem disponíveis na mina.

De forma sucinta, o projecto de uma barragem de contenção de rejeitados compreende as seguintes fases:

- Definição do local.
- Avaliação das propriedades e das características geotécnicas da fundação e dos materiais das áreas de empréstimo e das propriedades tecnológicas dos rejeitados.
- Definição do tipo de barragem.
- Selecção do tipo de alteamento (a montante, a jusante ou central).
- Definição do tratamento da fundação.
- Selecção do método de deposição.
- Definição do sistema de transporte da polpa (por gravidade ou por bombeamento).
- Determinação da folga, da dimensão da praia e do sistema de drenagem interna.
- Dimensionamento de filtros e de drenos.
- Elaboração de estudos da fundação e de análises de percolação, tensão-deformação, de estabilidade de taludes em condições estáticas e sísmicas e de contaminação da água e dos solos.
- Análise do potencial de liquefação.
- Elaboração dos Planos de Avaliação da Qualidade da Construção, de Observação e de Manutenção ou Conservação.
- Levantamento de dados e de informações para a elaboração do projecto de selagem e de recuperação ambiental.
- Elaboração de documentação completa, incluindo, por exemplo, memoriais de cálculo, desenhos, relatórios técnicos, boletins de sondagens e especificações de construção.

- Gestão da água e do balanço hídrico.
- Controlo de vazões extremas.
- Recuperação de água para o tratamento.

A investigação do local, tendo em vista sua possível selecção, deve considerar a dimensão da albufeira, a complexidade do local, as consequências de uma possível ruptura, assim como os riscos de poluição atmosférica ou da água. Esta investigação, assim como a prospecção das possíveis manchas de empréstimo, passa pelo reconhecimento do local em termos geotécnicos e hidrogeológicos e inclui a recolha de amostras para realização de ensaios laboratoriais de caracterização física, mecânica e hidráulica e de adensamento.

Após a selecção do local, deve ser definido o tipo de barragem, levando-se em consideração a sua compatibilidade com as características da fundação, a disponibilidade de materiais de construção a serem utilizados, assim como o clima. Uma etapa fundamental é a definição do tratamento a ser conduzido nas fundações, em solo ou em rocha.

Em barragens de contenção de rejeitados, a estabilidade, a permeabilidade e a deformabilidade dependem das características geotécnicas da fundação, da barragem e dos rejeitados, bem como das condições locais (topográficas, hidrogeológicas, hidrológicas, climáticas, sismicidade, etc.). Será, contudo, de ressaltar que, contrariamente a barragens tradicionais, é muito comum a ocorrência de alterações nas características e nas propriedades tecnológicas dos rejeitados, assim como sua evolução, directamente relacionadas com mudanças do plano de lavra, do minério, de processos de tratamento, de condições de mercado, etc., o que pode exigir uma revisão do projecto, dado que constituem factores que influenciam o comportamento global da estrutura.

Apresenta-se, seguidamente, uma síntese de algumas recomendações básicas para a fase de projecto de uma barragem de rejeitados:

- Deve ser projectada tendo em conta as características dos rejeitados e dos outros materiais constituintes para o aterro e factores específicos como a topografia, a geologia, a hidrologia, a sismicidade e o custo.
- Factores geométricos (volume de rejeitados e área requerida para a deposição), financeiros (quantidade e custo dos materiais de preenchimento e métodos de deposição) e ambientais devem ser ponderados ao ser considerada a localização das barragens.
- Vales naturais ou outras topografias em depressão devem ser inicialmente investigados, pois possibilitam a maximização da capacidade de armazenamento com uma menor quantidade de aterro.
- Considera-se fundamental o estudo aprofundado da geologia local, dado o seu impacto no eventual tratamento da fundação, nos caudais percolados e no estudo da viabilidade dos materiais de empréstimo para a construção da barragem.
- As captações de água a montante devem ser preservadas.
- Na fundação devem ser avaliadas a capacidade de suporte, as condições de percolação, a deformabilidade, o tipo de tratamento, tendo em consideração o controlo de possíveis agentes poluidores.
- A superfície freática deve permanecer a cotas reduzidas, dada a sua grande influência na estabilidade da barragem, em condições de carregamento estático ou dinâmico. A sua posição é função das características de deposição dos rejeitados, das condições locais e das condições de funcionamento dos sistemas de drenagem.
- Os sistemas de drenagem interna devem assegurar o controlo da superfície freática, de modo a garantir efectivamente a dissipação da poropressão.
- Dependendo da granulometria e da densidade das partículas do rejeitado, a ciclonagem pode ser utilizada para separar a fracção granular, indicada para o corpo da barragem.

- O conhecimento das condições de colocação dos diferentes materiais é fundamental para a avaliação do comportamento tensão-deformação e da estabilidade da barragem.
- Os materiais a utilizar no corpo da barragem, para além das características de permeabilidade, compressibilidade e resistentes requeridas no projecto, devem ser estáveis quimicamente.
- O uso do rejeitado como material construtivo é um procedimento muito económico, mas tem alguns inconvenientes, como a sua elevada susceptibilidade a fenómenos de erosão interna e externa e de liquefacção, sob carregamentos dinâmicos ou mesmo estáticos. Neste sentido, a utilização da fração granular dos rejeitados é a mais indicada.
- Devem ser realizadas análises de risco na fase de projecto, com vista à selecção das melhores soluções e à elaboração dos Planos de Acções de Contingência e de Emergência.

2.2. Recomendações sobre a Construção

Definidos o local, o tipo de estrutura (barragem ou pilha), o material a ser utilizado na barragem, o tipo de barragem e o método de alteamento e o tratamento da fundação, inicia-se a construção, que deve contar, em todo seu período de vida, com um monitoramento contínuo das acções e das respostas da estrutura, com vista à avaliação das suas condições de estabilidade, de percolação, de deformabilidade e ambientais.

As características geotécnicas dos materiais de construção disponíveis quando compactados e as características logísticas e económicas das áreas de empréstimo (condições de exploração, distância à barragem, etc.) constituem factores determinantes durante a fase de construção da barragem. Para o efeito, realizam-se ensaios de compactação para a avaliação do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo dos solos a colocar e definem-se os intervalos de variação dos parâmetros construtivos de modo a conferir ao aterro as melhores características em termos de resistência, de permeabilidade e de compressibilidade. No decurso da construção devem ser realizados sistematicamente ensaios de controlo da compactação.

Devem ser realizadas inspeções visuais para detecção de comportamentos anómalos, como, por exemplo, a presença de fissuras ou fendas no coroamento ou nos taludes, deslocamentos perceptíveis e ressurgências, bem como dotar a barragem de equipamentos de observação. O controlo da superfície freática constitui um aspecto muito relevante para a segurança deste tipo de barragens, sendo indispensável para este efeito a instalação de piezómetros.

Após a construção, a elaboração do “as built” (como construído), que implica um trabalho contínuo de identificação e de registo de alterações verificadas na obra, é essencial. Dessa forma, dado o carácter faseado deste tipo de barragem, podem ser introduzidas melhorias adicionais na prática do projecto, da construção e da operação, reduzindo os riscos de incidentes no futuro.

Seguidamente, é apresentada uma síntese de algumas recomendações básicas para a fase de construção de uma barragem de rejeitados (DNPM, 2002):

- A construção de qualquer barragem para retenção de rejeitados na forma de polpa (rejeitados finos) ou de depósitos de rejeitados em pilhas drenadas (rejeitados granulares) deve ser precedida de projecto de execução.
- Devem ser adoptadas medidas para evitar o arrastamento dos materiais para rios, lagos ou outros cursos de água.
- Nas áreas de segurança das barragens/pilhas, as edificações devem ser preferencialmente operacionais.
- As construções devem estar dentro dos limites do empreendimento.

- Durante o alteamento e a construção dos sistemas de deposição, deve ser feito o monitoramento das grandezas relevantes para a barragem, assim como dos impactos ao meio ambiente.
- A qualidade dos efluentes deve ser sempre verificada através do monitoramento constante dos sistemas de deposição.
- As análises de riscos realizadas na fase de projecto deverão ser revistas e actualizadas durante a construção.

2.3. Recomendações sobre a Exploração

A exploração de uma barragem de rejeitados, principalmente se construída por alteamento a montante, condiciona a segurança desta estrutura. Os procedimentos para operação dos vários sub-sistemas precisam estar detalhadamente descritos. Aspectos como largura mínima de praia, a folga mínima, detalhes de operação da estrutura extravasora, locais de descarga dos rejeitados, controle da clarificação da água, etc, devem estar devidamente especificados. Complementarmente, deverá ser definida a frequência das inspeções visuais e das campanhas de observação a realizar, dependentes das características da obra e do seu comportamento.

Apresenta-se, na sequência, uma síntese de algumas recomendações básicas para a fase de exploração de uma barragem de rejeitados:

- Devem ser registados os procedimentos operacionais.
- Deve ser mantida uma largura mínima de praia e não ultrapassado o valor mínimo da folga.
- Devem ser permanentemente controlados os caudais percolados.
- A qualidade da água efluente deve ser monitorizada.
- Deve ser cumprido o Plano de Observação.
- Com base nos dados de observação, devem ser periodicamente avaliadas as condições de segurança da obra.
- Deve ser elaborado um relatório periódico de operação.
- Devem ser realizadas auditorias externas independentes.
- Devem ser revistas e actualizadas as análises dos riscos inerentes à operação da barragem de rejeitos, assim como o Plano de Acções de Contingência e o Plano de Emergência.

3. GESTÃO DA SEGURANÇA DAS BARRAGENS/PILHAS DE REJEITADOS

3.1. Avaliação da Segurança

A avaliação da segurança de uma barragem deve ser baseada em informações recolhidas nas inspeções pormenorizadas e na avaliação do seu desempenho, tendo em conta os registos originais de projecto e de construção e a actualização dos modelos de cálculo utilizados na fase de projecto.

As inspeções de rotina fazem parte das actividades de operação e de manutenção. A frequência dessas inspeções pode ser semanal, definida de acordo com o recomendado no item a ser inspecionado ou ser intensificada em função de restrições sazonais. Existem também as inspeções formais, que são aquelas que devem ser executadas por equipas técnicas do proprietário, responsáveis pela gestão segurança da barragem, ou por seus representantes. Exigem o conhecimento do projecto, dos registos existentes e do histórico de intervenções. Os respectivos resultados são relatórios, com as observações de campo, as análises realizadas e as recomendações pertinentes. As inspeções denominadas especiais devem ser executadas por uma

equipa multidisciplinar, envolvendo especialistas (em Hidráulica, Geotecnia, Geologia e outros). Estas inspeções devem gerar relatórios com as informações das áreas inspeccionadas.

Nas inspeções devem ser examinados o coroamento, os taludes da barragem e os encontros quanto a fissuras, abatimentos e desalinhamentos da superfície. Devem ser verificados se os taludes da albufeira são estáveis sob a acção de precipitações pluviométricas severas e de rebaixamento rápido ou sob qualquer outra condição de funcionamento.

Um aspecto importante a ser verificado são as condições de percolação e de controlo do sistema de drenagem. A percolação deve ser monitorizada e verificada quanto à presença de partículas em suspensão. Fissuras podem causar fluxos concentrados que podem conduzir a ruptura da barragem por erosão interna (piping), devendo ser interceptados e controlados por meio de filtros e drenos. Os gradientes hidráulicos na barragem, nas fundações, nos encontros e ao longo de condutas devem ser suficientemente baixos para prevenir os fenómenos de erosão regressiva. Complementarmente, a capacidade de vazão dos filtros e drenos não deve ser excedida. Altas poropressões podem indicar que a drenagem é insuficiente ou a ocorrência de colmatação física, química ou bacteriológica ou de obstrução.

3.2. Acções Resultantes das Inspeções

Os resultados das inspeções devem direccionar os trabalhos de manutenção necessários, podendo ser citados, entre outros, o controlo da percolação e da erosão, a fim de se prevenir a deterioração do corpo da barragem e/ou da fundação, e o desenvolvimento de caminhos preferenciais de percolação, a manutenção regular da instrumentação, do coroamento e do enrocamento de protecção (caso haja); o controlo, no paramento de jusante, desde a vegetação até as tocas de animais, estabilização de taludes, manutenção dos sistemas de drenagem e a remoção de detritos a montante, a fim de garantir-se a segurança da estrutura. Assim, para evitar a sua erosão superficial, os paramentos de montante e de jusante da barragem e seus encontros, devem ser providos de protecção adequada. No paramento de montante deve-se utilizar *rip-rap*, contra erosão provocada pelas ondas, e o paramento de jusante deve ser protegido contra a acção erosiva de escoamentos superficiais, do tráfego, de pessoas e de animais. As estruturas de entrada e de saída de descarregadores e de condutas devem ser adequadamente protegidas contra a erosão.

3.3. Gestão da Segurança

No contexto da Gestão da Segurança são os proprietários e os operadores os responsáveis pela formulação de procedimentos, devidamente enquadrados pelos órgãos reguladores e fiscalizadores, os quais devem constituir e gerir adequadamente uma base de dados sobre a segurança de todas as barragens de contenção de rejeitados. Ressalta-se que as barragens de contenção de rejeitados requerem a elaboração e a divulgação de planos de contingências e de emergência, de modo a possibilitar que as comunidades potencialmente afectadas saibam o que fazer em caso de acidente. Desta forma, a empresa deve estar aberta para fornecer informações à comunidade, e esta deve participar activamente destes planos.

4. METODOLOGIAS DE ANÁLISES DE RISCO NO CONTEXTO DA APLICAÇÃO EM BARRAGENS/PILHAS DE REJEITADOS

O projecto e a construção adequados de uma barragem são de extrema importância, porém não suficientes para a operação segura das mesmas. Nesse sentido, deve ser estabelecido um processo de acompanhamento e de avaliação permanente das estruturas, mediante o recurso de ferramentas, tais como as inspeções visuais e a instrumentação, que têm por função fornecer aos

responsáveis pela auscultação da barragem os parâmetros para comparação com as hipóteses consideradas no projecto.

No entanto o risco está sempre presente, constituindo-se as Análises de Riscos, parte integrante da Gestão de Riscos, como um complemento das abordagens tradicionais de avaliação da segurança das estruturas (Caldeira, 2005).

As metodologias de análises de riscos, no âmbito da aplicação nas barragens/pilhas de rejeitados, permitem uma identificação sistemática dos sub-sistemas dessas estruturas e dos perigos a eles associados, além da identificação dos seus possíveis modos de ruptura e das consequências. Através dessas ferramentas é possível a identificação de medidas alternativas para a redução ou a mitigação dos riscos, assim como a hierarquização da implementação de recomendações de segurança e de trabalhos de reabilitação e o estabelecimento de prioridades de intervenção. No contexto da gestão da segurança de barragens e pilhas de rejeitados, alguns métodos de análises de riscos podem ser evidenciados:

- *Análise por listas de verificações*: apresenta uma abordagem sistemática baseada no conhecimento do histórico da barragem, através da inclusão de tópicos nas listas de verificação. Fundamenta-se em entrevistas, na revisão de documentos e em inspeções de campo (Caldeira, 2005). Essa análise pode ser utilizada para identificar todos os elementos da cadeia de eventos que induzem o risco em barragens/pilhas, sendo indicada sua aplicação nessas estruturas quando não for possível aplicar métodos mais elaborados.

- *Análise preliminar de risco*: trata-se de um método cuja finalidade é identificar riscos, tanto na fase de projecto como em barragens/pilhas já existentes, utilizando para isso listas orientadoras relativas a elementos e a situações potencialmente perigosos. Cada risco identificado é analisado separadamente para descrever as suas possíveis causas, as consequências e a probabilidade de sua ocorrência. Por último, seleccionam-se medidas de protecção para redução dos riscos (Caldeira, 2005). Por ser um estudo de carácter preliminar, não tem como objectivo proceder a análise dos possíveis modos de ruptura, sendo indicado, quando aplicado em barragens/pilhas, acoplar os resultados dessas análises com os relativos a outros métodos.

- *Análise de perigos e operacionalidade*: constitui uma técnica de identificação de perigos que avalia cada parte das barragens/pilhas para verificar como os desvios de determinadas grandezas podem ocorrer e se os mesmos poderiam ocasionar problemas (Caldeira, 2005). São identificados os perigos potenciais e/ou problemas de operacionalidade através de um conjunto de palavras-chave que focalizam os desvios dos parâmetros estabelecidos para as barragens/pilhas em análise. Apresenta similaridade com o Método Observacional, tradicionalmente utilizado em Geotecnia, podendo, dessa forma, ter uma aplicação na Engenharia de Barragens nas fases de construção e de funcionamento dessas estruturas. Pode ser também aplicado na fase de projecto, permitindo actuar na concepção e pormenorização de determinadas componentes da barragem/pilha e na elaboração das respectivas especificações técnicas que servirão de apoio à construção. No final da análise elabora-se um documento com recomendações de medidas de segurança e procedimentos a serem seguidos.

- *Análise por índices de risco*: trata-se de um método para determinação do valor de risco associado a uma determinada obra. Através desse método determina-se um valor numérico denominado *Índice Global de Risco*, utilizando-se descritores, que geralmente são agrupados por classes que considerem condições externas, características da estrutura e consequências potenciais associadas ao risco. É um método de simples aplicação, sendo geralmente adoptado quando se necessita de uma ordenação relativa dos riscos (Caldeira, 2005). No caso das barragens/pilhas é indicado para o estabelecimento de prioridades de inspecção, assim como

para auxiliar na tomada de decisões sobre a hierarquização de providências imediatas para minimização dos riscos.

- *Análise por diagramas de localização, causa e indicadores de falhas*: trata-se de um método especificamente para análises de riscos em barragens. Esse método tem como objectivo prioritário identificar e avaliar as consequências de uma onda de inundação resultante da libertação do volume armazenado na barragem. Os resultados das análises através destes diagramas permitem também identificar os elementos estruturais que mais contribuem para a ruptura total, sendo identificados os modos de ruptura e definidas as intervenções e/ou a implementação de estudos complementares. Pode ser aplicado tanto dentro de um portfólio de barragens, pois indica, dentro de uma escala de valores de risco qual barragem deveria ser priorizada em termos de providências imediatas para minimizar os riscos associados, como a uma única barragem, pois possibilita a ordenação e a hierarquização de procedimentos em prol da sua segurança (Hughes *et al.*, 2000). Devido à concepção do método, entende-se que não deva ser aplicado às pilhas drenadas de rejeitos granulares, necessitando para o efeito de algumas alterações.

- *Análise por árvores de eventos*: esta metodologia baseia-se num esquema lógico, que permite ligar os acontecimentos iniciadores às consequências que podem provocar, calculando as probabilidades associadas. Sua aplicação no âmbito das barragens/pilhas envolve a modelação dessas estruturas como sistemas constituídos por vários subsistemas, com funções individuais bem definidas, que assegurem a sua funcionalidade (Hartford & Baecher, 2004, e Caldeira, 2005). Apresenta-se como uma ferramenta muito eficaz na análise de riscos de barragens/pilhas, pois possibilita um adequado entendimento do comportamento dessas estruturas, proporcionando discernimento qualitativo/quantitativo e indicações sobre o funcionamento da barragem, tendo em vista as incertezas associadas ao seu desempenho.

- *Análise dos modos de ruptura e seus efeitos e análise dos modos de ruptura, seus efeitos e sua criticalidade*: são técnicas indicadas para definir, identificar e analisar potenciais rupturas, a partir de um determinado modo de ruptura, com suas respectivas causas e efeitos, assim como os meios de detecção e prevenção dos modos de ruptura e de mitigação dos seus efeitos. O segundo tipo de análise acrescenta ao primeiro os procedimentos relativos à hierarquização dos modos de ruptura, conforme a influência combinada da respectiva probabilidade de ocorrência e da severidade das suas consequências, denominada por criticalidade (Caldeira, 2005). No caso da sua aplicação específica em barragens/pilhas entende-se que esses métodos possam ser utilizados em diferentes fases da obra e com diferentes objectivos, auxiliando na tomada de decisões relativas ao projecto, funcionando como controlo da execução da obra, actuando como um instrumento de segurança, de funcionalidade e de decisão quanto ao encerramento da barragem/pilha.

- *Análise por árvore de falhas*: trata-se de um método muito útil para apresentar combinações lógicas de estados de um sistema e das possíveis causas que contribuem para um evento específico, chamado de evento de topo, relacionado com a ruptura ou com a perda de funcionalidade do sistema. Pode ser utilizada para avaliar a forma como o não funcionamento eficiente de diversas componentes interagem para provocarem a ruptura global do sistema, apresentando-se na forma de construção gráfica, em que é mostrada essa interação lógica entre os elementos de um sistema, cuja ruptura, individualmente ou em combinação, pode contribuir para a ocorrência de um acontecimento indesejável selecionado (Caldeira, 2005). Para o caso específico das barragens/pilhas podem permitir o estudo das sucessões de eventos que conduziriam à sua ruptura, em detalhes, como também avaliar a importância relativa dos diferentes eventos.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Na gestão do risco para os sistemas de barragens de contenção de rejeitos factores, como o conhecimento das estruturas e dos perigos a elas associados, a realização de inspeções, de monitoração e de manutenção, a preparação de mapas de inundação, a estimativa do tempo de chegada da onda de inundação em diferentes locais e a duração da inundação, a implementação e manutenção de procedimentos e sistemas para aviso e de alerta de emergências, são da maior importância.

Complementarmente, entende-se que os procedimentos a serem adotados num Sistema de Gestão de Segurança de Barragens de Rejeitados devem passar, necessariamente, pela Análise de Riscos, uma etapa muito importante da Gestão do Risco. Salienta-se que qualquer técnica de análise de riscos a ser aplicada a barragens/pilhas de rejeitados deve sempre considerar os principais componentes dessa estrutura, que incluem, por exemplo, aspectos relativos ao corpo barragem e à fundação, ao sistema de gestão da água e aos rejeitados.

Em síntese, pode-se dizer que as análises de riscos que objectivam estimar as probabilidades de eventos de falha da componente ou da barragem/pilha e a magnitude das consequências resultantes, são muito importantes e eficazes na Gestão da Segurança. Ocorre, porém, que sua aplicação em Geotecnia está ainda numa fase incipiente, principalmente no âmbito das barragens/pilhas de rejeitos. No entanto, à utilização desta ferramenta em barragens, de modo geral, está associado um aumento da segurança dessas estruturas, assim como, uma compreensão melhorada do comportamento das mesmas. Apesar da sua aplicação em Geotecnia ainda não ser rotineira, entende-se que seu uso, associado aos métodos tradicionais de gestão de segurança, pode ser extremamente útil em obras cujos eventuais riscos sejam elevados, caso em que se incluem as barragens/pilhas de rejeitados.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG – FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE MINAS GERAIS (BRASIL) pelo apoio para a participação nesse evento.

REFERÊNCIAS

- Caldeira, L. (2005). *Análise de Risco em Geotecnia. Aplicação a Barragens de Aterro*. Programa de Investigação para obtenção de Habilitação para funções de Coordenação Científica. LNEC, Lisboa, 238 p.
- Espósito, T.J. (2000). *Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-004A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 359 p.
- DNPM (2002). *Normas Reguladoras de Mineração – NRM*. Portaria Nº 12, de 22 de janeiro de 2002 publicada no DOU de 29 de janeiro de 2002, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- Hartford, D. N. D. and Baecher G. B. (2004). *Risk and uncertainty in dam safety – CEA Technologies Dam Safety Interest Group*. ISBN 0 7277 3270 6, Londres, Inglaterra: Thomas Telford Publishing, 391 p.
- Hughes, A., Hewlett, H., Samuels, P., Morris, M., Sayers, P., Moffat, I., Harding, A. and Tedd, P. (2000). *Risk Management for UK Reservoirs, Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) C542*, London, UK, 213 p.