

APLICAÇÃO DAS ANÁLISES FMEA/FMECA A UMA PILHA DRENADA DE REJEITADOS DE MINÉRIO DE FERRO

Terezinha Espósito¹ e Laura Caldeira²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia - DETG
Belo Horizonte, Brasil
esposito@etg.ufmg.br

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia
Lisboa, Portugal
laurac@lnec.pt

Resumo

As Análises de Riscos, parte integrante da Gestão de Riscos, consistem na verificação de como diferentes factores podem interagir, os possíveis cenários existentes e os prejuízos que estes cenários podem provocar (Caldeira, 2005). Neste sentido, as Análises dos Modos de Rupturas e seus Efeitos (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA) e as Análises dos Modos de Rupturas, seus Efeitos e sua Criticalidade (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA) são nesta comunicação aplicadas a uma pilha drenada de rejeitados de minério de ferro, para se avaliar os possíveis modos de ruptura desta pilha, assim como estabelecer uma ordenação do respectivo risco decorrente da probabilidade de ocorrência e da severidade. Esta pilha foi projectada para depositar rejeitados granulares de minério de ferro, advindos do processo de concentração para obtenção do produto de interesse (minério de ferro). Os resultados das análises de riscos possibilitaram um melhor entendimento do comportamento dessa pilha em relação à sua segurança e consequências, revelando a pertinência destes métodos na Gestão de Riscos dessas estruturas.

1 Introdução

Nas actividades de mineração, paralelamente à geração do produto de interesse, são gerados os rejeitados. A produção desses rejeitados tem aumentado bastante nos últimos tempos, devido à elevada demanda de minério, à tendência de se trabalhar com lavras com baixos teores, assim como a evolução tecnológica e económica dos processos de separação desses minérios. Tendo em vista a grande quantidade de rejeitados gerada torna-se

imprescindível a utilização de processos sistemáticos de deposição. Dessa forma, as empresas de mineração têm procurado minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de deposição e de contenção desses materiais, sendo verificada uma preferência das mineradoras brasileiras pela deposição desses rejeitados em superfície, através de pilhas drenadas para rejeitados granulares (diâmetro das partículas maiores do que 0,075 mm) ou de barragens de contenção de rejeitados finos.

Inserido neste contexto ressalta-se a importância da aplicação de métodos de análises de riscos como um complemento às abordagens tradicionais de avaliação da segurança de barragens/pilhas. Neste sentido, justifica-se a aplicação de metodologias de análises de riscos especificamente em pilhas drenadas de rejeitados, caso estudo apresentado neste artigo, pois, através dessas análises, pode-se obter um melhor entendimento do comportamento da pilha em relação à sua segurança e às consequências relacionadas com as possíveis rupturas. Embora não haja ainda uma cultura de aplicação destas técnicas às obras geotécnicas, entende-se a relevância destas ferramentas, principalmente na avaliação da segurança destas pilhas de rejeitados, sendo um dos objectivos deste artigo contribuir para a propagação dessa prática no âmbito de aplicação da Engenharia Geotécnica

2 Características da pilha X de rejeitados granulares

As metodologias Análises dos Modos de Rupturas e seus Efeitos (*Failure Modes and Effects Analysis - FMEA*) e Análises dos Modos de Rupturas, seus Efeitos e sua Criticalidade (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis – FMECA*) foram aplicadas a uma pilha drenada de rejeitados granulares de minério de ferro, denominada pilha X, descrita em Espósito (1995) e Espósito (2000). Esta pilha foi utilizada apenas como um exemplo ilustrativo. Os respectivos rejeitados constituem areias médias e finas, com massa volúmica média das partículas de 4020 kg/m^3 e composição química média de 50% de *Fe*, 26% de *SiO₂* e 0,3% de *Al₂O₃*, sendo indicado a sua deposição em pilha drenante.

Para a construção da pilha X, estes rejeitados foram transportados por via hídrica e depositados através da técnica de aterro hidráulico, sendo os sucessivos alteamentos realizados através do método de montante. Foi construída em três subáreas topográficas, utilizando três diques, dotados de banquetas, com 5 m de largura a cada 5 m de altura, e de sistema de drenagem superficial, como canaletas e valetas. A infra-estrutura de partida da pilha foi constituída por um tapete de drenagem sub superficial e um aterro filtrante.

Os aterros de partida são constituídos por materiais granulares, como canga, ou seja, blocos rochosos com alto teor de minério de ferro, transições finas e

grossas. O talude de montante dos aterros de partida foi projectado com inclinação de 1V:1,5H. Foi adoptada uma largura de praia de, aproximadamente, 40 m e um sistema de drenagem interna constando de um tapete drenante no contacto com a fundação, constituído por duas camadas de cascalho e uma camada interna de brita. Quando da finalização do aterro de partida, foi iniciado o lançamento do rejeitado a montante, com uma inclinação de 1V:10H. Foram realizados alteamentos com o próprio rejeitado, de 5 em 5 m, em lances de 2,5 m, com formação de taludes de jusante com inclinação de 1V:3H, resultando um talude final, conjuntamente com as banquetas, de 1V:4,0H. O sistema de deposição concebido, a princípio, contemplava o armazenamento dos rejeitados com a formação de uma pilha com 75 m de altura máxima e uma capacidade total da ordem de $6,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, correspondendo a uma vida útil de 22 anos. Porém, a produção anual de rejeitados foi grandemente aumentada em relação ao originalmente previsto, ficando sua vida útil limitada a 9 anos. A funcionalidade da pilha X está directamente associada à drenagem do rejeitado e à manutenção da superfície freática a cotas o mais baixo possível. Um outro aspecto a considerar é relativo à formação da pilha, ou seja, os pontos de lançamento dos rejeitados não devem ser muito avançados para montante na praia, para não ocasionarem acumulação de água entre o coroamento e o ponto de lançamento (“*back ponding*”). Deve ser ressaltado, também, que o teor da concentração de sólidos da polpa do rejeitado é essencial para a formação de uma praia suficientemente resistente, sendo sugerido que o seu valor esteja compreendido entre 40 e 60%. Na pilha X, o rejeitado bombeado e conduzido por rejeitodutos, na forma de polpa, e lançado por vários *spigotings*, possuía polpa com 35 a 40 % de sólidos.

3 FMEA/FMECA aplicada à pilha X

A metodologia FMEA consiste na identificação dos modos de falhas (rupturas) e dos seus efeitos. A aplicação da metodologia FMECA produz a ordenação dos modos de falhas (rupturas) de acordo com a combinação da probabilidade de ocorrência dos modos de ruptura e da sua severidade. Estas metodologias foram aplicadas à pilha X. São apresentados, nas tabelas 1 e 2, respectivamente, o sistema analisado e as funções de todas as componentes básicas consideradas para o sistema. Uma vista geral da pilha é mostrada na figura 1. A figura 2 apresenta um desenho esquemático de secção da pilha com seus componentes.

Tabela 1 - Sistema da pilha X de rejeitados

Sistema: Pilha de rejeitados de minério de ferro
I::Pilha drenada de rejeitados granulares de minério de ferro
I.1::Aterro de partida constituído por materiais granulares (blocos e materiais de transição)
I.2::Restante do corpo da pilha
I.2.1::Praia de rejeitados, com inclinação de 1V:10H
I.2.2::Taludes (camada exterior do maciço), dotados de banquetas com 5 m de largura a cada 5 m de altura, com uma inclinação com 1V:4H
I.2.3::Revestimento vegetal do talude
I.2.4::Sistema de drenagem superficial
I.3::Sistema de drenagem interna
I.3.1::Tapete drenante
I.4::Fundação
I.4.1::Zona de fundação em solo residual
I.4.2::Camada de argila mole
II::Sistema de bombagem da polpa
II.1::Bombas
II.2::Conduitas dos rejeitados
II.3::Spigottings
III::Instalações de beneficiamento da mina



Figura 1 – Vista da pilha X

Tabela 2 – Funcionalidade das componentes básicas do sistema – Pilha X

ITEM	COMPONENTE	FUNÇÃO
I.	PILHA DRENADA DE REJEITADOS GRANULARES DE MINÉRIO DE FERRO	<ul style="list-style-type: none"> - Deposição de rejeitados granulares de exploração minéria de ferro através da técnica de aterro hidráulico, sendo os sucessivos alteamentos realizados pelo método de montante - Drenagem do rejeitado - Superfície freática o mais baixo possível
I.1	ATERRO DE PARTIDA	<ul style="list-style-type: none"> - Atuar como estrutura de contenção para a deposição inicial dos rejeitados - Assegurar a drenagem do fluxo de água percolado do maciço - Suportar o maciço de montante constituído pelos rejeitados
I.2	RESTANTE DO CORPO DA PILHA	<ul style="list-style-type: none"> - Deposição de rejeitados granulares de exploração minéria de ferro através da técnica de aterro hidráulico, sendo os sucessivos alteamentos realizados pelo método de montante - Drenagem do rejeitado - Superfície freática o mais baixa possível
I.2.1	PRAIA DE REJEITADOS	<ul style="list-style-type: none"> - Garantir a deposição dos rejeitados - Garantir a drenagem e a estabilidade dos rejeitados
I.2.2	TALUDES	<ul style="list-style-type: none"> - Conferir confinamento dos rejeitados - Conferir drenagem aos rejeitados e a a estabilidade do maciço
I.2.3	REVESTIMENTO VEGETAL DO TALUDE	<ul style="list-style-type: none"> - Proteger o maciço relativamente à erosão interna produzida pela águas das chuvas e pelo vento
I.2.4	SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> - Captar as águas superficiais que se escoam através dos taludes - Escoar as águas superficiais para o exterior da pilha - Escoar as águas provenientes da drenagem das praias de rejeitados
I.3	SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA	<ul style="list-style-type: none"> - Drenar e filtrar os caudais de água provenientes de toda a pilha. do maciço natural e da fundação

Tabela 2 – Funcionalidade das componentes básicas do sistema – Pilha X -

Continuação

ITEM	COMPONENTE	FUNÇÃO
I.3.1	TAPETE DRENANTE	- Filtrar e drenar os caudais provenientes da pilha de rejeitados, do maciço natural e da fundação
I.4	FUNDAÇÃO	- Suportar em condições adequadas a pilha de rejeitados
I.4.1	ZONA DE FUNDAÇÃO EM SOLO RESIDUAL	- Conferir suporte adequado à pilha - Possuir rigidez suficiente - Não gerar subpressões elevadas - Assegurar a estabilidade global à pilha
I.4.2	CAMADA DE ARGILA MOLE	- Conferir suporte adequado à pilha - Possuir rigidez suficiente - Não gerar subpressões elevadas - Assegurar a estabilidade global à pilha
II.	SISTEMA DE BOMBAGEM DA POLPA	- escoar os rejeitados para o exterior das instalações de beneficiamento - Garantir a adequada deposição dos rejeitados na pilha
II.1	BOMBAS	- Bombear sem interrupção a polpa para a formação das praias de rejeitados
II.2	CONDUTAS DOS REJEITADOS	- Conduzir a polpa para o ponto de lançamento
II.3	SPIGOTTINGS	- Garantir a deposição dos rejeitados de jusante para montante de forma a não se acumular água nas proximidades do talude - Garantir o lançamento da polpa de modo a que esta não crie zonas de deposição com altura superior a 1 m
III	INSTALAÇÕES DE BENEFICIAMENTO DA MINA	- Garantir a geração de polpa adequada em termos de vazão e concentração, para formação das praias de rejeitados com ocorrência de segregação hidráulica, drenabilidade e estabilidade

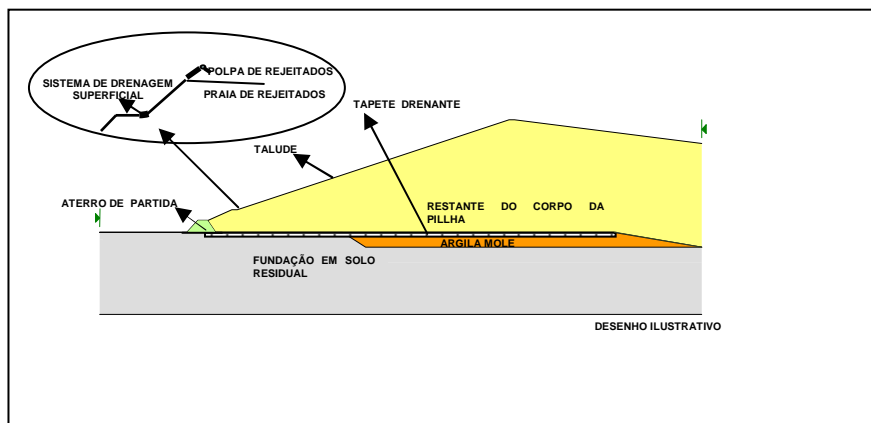


Figura 2 - Desenho esquemático de secção da pilha X com seus componentes

3.1 *Resultados da FMEA/FMECA aplicados à pilha X: classes de probabilidades e de severidades*

Os modos de ruptura da FMEA/FMECA aplicados à pilha X são mostrados na tabela 3. São apresentados na tabela 4 os efeitos finais considerados na análise.

O método prevê uma análise em que se considera, além da matriz de criticalidade, a sequência dos modos de ruptura, com suas causas iniciadoras, assim como efeitos imediatos, próximos e finais.

Apenas como exemplo ilustrativo cita-se essa sequência para o Modo de Ruptura “I.2.1 - Insuficiente capacidade drenante da praia”, ou seja, causas iniciadoras “polpa de rejeitados com granulometria abaixo do especificado”, apresentando os efeitos imediatos “Geração de poropressão”; como próximos “Instabilizações locais” e como finais “0. (1) Interrupção temporária do funcionamento das instalações de beneficiamento da mina; 0. (2) Diminuição no volume de acumulação de rejeitados e 0. (3) Instabilização global”.

Um outro aspecto também previsto nesse método é a apresentação de medidas de detecção e controlo. Apenas como exemplo, também para o modo de ruptura I.2.1, poderiam ser citadas como medidas de detecção “Inspeção Visual e Instrumentação” e de controlo “Lançamento de rejeitados com as características drenantes especificadas em projecto”.

Tabela 3 - Modos de ruptura da FMEA/FMECA – Pilha X

I::Pilha drenada de rejeitados granulares de minério de ferro
I.1::Aterro de partida constituído por materiais granulares (blocos e materiais de transição)
I.1.(1)::Deformação excessiva
I.1.(2)::Insuficiente capacidade drenante
I.2::Restante do corpo da pilha
I.2.1::Praia de rejeitados, com inclinação de 1V:10H
I.2.1.(1)::Insuficiente capacidade drenante da praia
I.2.1.(2)::Abatimentos da praia
I.2.1.(3)::Desestabilização da praia
I.2.1.(4)::Liquefação da praia
I.2.2::Taludes (camada exterior do maciço), dotados de banquetas com 5 m de largura a cada 5 m de altura, com uma inclinação com 1V:4H
I.2.2.(1)::Desestabilização dos taludes
I.2.2.(2)::Perda de capacidade drenante dos taludes
I.2.3::Revestimento vegetal do talude
I.2.3.(1)::Ravinamento
I.2.4::Sistema de drenagem superficial
I.2.4.(1)::Insuficiente capacidade de escoamento
I.2.4.(2)::Obstrução
I.2.4.(3)::Rotura estrutural das caleiras
I.2.(1)::Insuficiente capacidade drenante da pilha
I.2.(2)::Abatimentos da pilha
I.2.(3)::Desestabilização da pilha
I.2.(4)::Liquefação da pilha
I.3::Sistema de drenagem interna
I.3.1::Tapete drenante
I.3.1.(1)::Insuficiente capacidade drenante
I.3.1.(2)::Colmatação
I.3.1.(3)::Erosão interna
I.3.(1)::Colmatação
I.3.(2)::Obstrução
I.3.(3)::Erosão interna
I.4::Fundação
I.4.1::Zona de fundação em solo residual
I.4.1.(1)::Insuficiente capacidade resistente
I.4.1.(2)::Deslizamento
I.4.1.(3)::Desestabilização
I.4.1.(4)::Deformação excessiva
I.4.1.(5)::Erosão interna

Tabela 3 - Modos de ruptura da FMEA/FMECA – Pilha X - Continuação

I.4.(1)::Insuficiente capacidade resistente
I.4.(2)::Deslizamento
I.4.(3)::Desestabilização
I.4.(4)::Deformação excessiva
I.4.(5)::Erosão interna
I.4.2::Camada de argila mole
I.4.2.(1)::Insuficiente capacidade resistente
I.4.2.(2)::Deslizamento
I.4.2.(3)::Deformação excessiva
I.4.2.(4)::Erosão interna
I.4.2.(5)::Desestabilização
I.(1)::Funcionamento inadequado do aterro de partida
I.(2)::Funcionamento inadequado do corpo da pilha
I.(3)::Funcionamento inadequado da fundação
II::Sistema de bombagem da polpa
II.1::Bombas
II.1.(1)::Avaria mecânica
II.1.(2)::Potência insuficiente
II.1.(3)::Falha elétrica
II.2::Condutas dos rejeitados
II.2.(1)::Entupimento dos rejeitodutos
II.2.(2)::Desgaste dos rejeitodutos
II.3::Spigottings
II.3.(1)::Formação de "back pounding"
II.3.(2)::Inadequação da altura de lançamento da polpa
II.(1)::Funcionamento inadequado das bombas
II.(2)::Funcionamento inadequado das condutas dos rejeitados
II.(3)::Funcionamento inadequado dos spigottings
III::Instalações de beneficiamento da mina
III.(1)::Polpa com características físicas em relação à vazão e concentração de forma a impossibilitar a formação de uma praia adequada em termos de resistência e percolação

Tabela 4 –Efeitos finais no sistema associados à pilha X e aos modos de ruptura

ID	Descrição do efeito final
0.(1)	Interrupção temporária do funcionamento das instalações de beneficiamento da mina
0.(2)	Diminuição no volume de acumulação de rejeitados
0.(3)	Instabilização global
0.(4)	Afectação sob o ponto de vista ambiental de todo o vale numa zona próxima da pilha
0.(5)	Escoamento da polpa fora dos limites da pilha

Os modos de ruptura, com as classes de severidade e os índices ponderativos da severidade s , utilizados para determinação dos índices de criticalidade, I_{cr} , atribuídos a cada efeito final, em conjunto com as probabilidades, permitiram a elaboração da matriz de criticalidade. A associação das classes de severidade e do índice s aos modos de ruptura foi baseada na tabela 5, sendo a consideração dos valores atribuídos decorrentes de experiência e de conhecimento. A probabilidade de ocorrência dos efeitos finais de cada modo de ruptura e a severidade das suas consequências no sistema foi estimada. A tabela 6 apresenta possíveis classes de probabilidade e os índices ponderativos das classes de probabilidade.

Tabela 5 - Classes de severidade – Pilha X (Fonte: adaptado de Hartford & Baecher, 2004; Robertson *et al.*, 2003 *apud* Santos, 2006)

Classes de severidade/ Índices de severidade s	Áreas de interesse			
	Saúde e segurança de pessoas	Ambiente	Econômicos (€)	Censura da opinião pública
I / 1	Negligenciável	Sem impacto mensurável	Impacto baixo (<10 mil)	Nenhuma
II / 2	Pequenos primeiros socorros	Pequenos impactos na zona	Impacto médio (10 mil - 100 mil)	Baixa
III / 4	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Impacto médio-alto (100 mil - 1 milhão)	Média-Baixa
IV / 6	Incapacidade temporária	Prejuízo local	Impacto alto (1 - 10 milhões)	Média
V / 9	Incapacidade permanente/fatalidade	Impacto significativo (grande mas reversível)	Impacto muito alto (10 - 100 milhões)	Média-Alta
VI / 10	Várias fatalidades	Impacto catastrófico (grande e irreversível)	Impacto Massivo (> 100 milhões)	Alta

Tabela 6 – Classes de probabilidade (Fonte: US Department of Defense, 2005 *apud* Santos, 2006).

Classes de Probabilidade	Intervalos de probabilidade	Classificação	Descrição	Índices de probabilidade ν
A	<0,1%	Improvável	Muito baixa probabilidade	1
B	0,1 – 1%	Remota	Possível mas de baixa probabilidade	2
C	1 – 10%	Ocasional	Ocorrência ocasional	4
D	10 – 20%	Provável	Ocorrência de elevada probabilidade	7
E	>20%	Frequente	Ocorrência regular	10

3.2 *Resultados da FMEA/FMECA aplicados à pilha X: índices de criticidade I_{cr}*

Após a análise de todos os modos de ruptura, em termos da severidade das consequências associadas aos seus efeitos no sistema e das suas probabilidades, foi feita uma ordenação relativa dos riscos, sendo avaliadas, para isso, as suas criticidades. Para aplicação do método foi atribuída uma classe de probabilidade para cada conjunto de efeitos finais originado por um certo modo de ruptura numa componente e uma classe de severidade associada às consequências daí resultantes. Este processo foi, então, repetido para todos os modos potenciais de ruptura (tabela 7).

A criticidade do par (Probabilidade e Severidade) foi calculada pelo índice de criticidade I_{cr} , produto do índice atribuído à possibilidade de ocorrência de um dado modo de ruptura (ν) pelo índice atribuído à severidade das consequências dos seus efeitos finais (s).

Ressalta-se que os julgamentos que conduziram à escolha das classes de probabilidade e das classes de severidade que foram atribuídas a cada modo de ruptura da pilha X foram subjetivos, baseados na experiência e no conhecimento. Após essa análise foi construída uma matriz de criticidade dos modos potenciais de ruptura. Nesta matriz as colunas estão associadas às classes de severidade e as linhas às várias classes de probabilidade (tabela 8).

Tabela 7 – I_{cr} para os modos de ruptura – Pilha X

MR - Modos de ruptura	Classe de prob. /Índ.v	Classes de severidade /Índices s					
		I 1	II 2	III 4	IV 6	V 9	VI 10
I.1 (1) Deformação excessiva	B/2		4				
I.1 (2) Insuficiente capacidade drenante	B/2		4				
I.2.1 (1) Insuficiente capacidade drenante da praia	B/2				12		
I.2.1 (2) Abatimentos na praia	C/4			16			
I.2.1 (3) Instabilização da praia	B/2				12		
I.2.1 (4) Liquefação da praia	C/4				24	45	
I.2.2 (1) Desestabilização dos taludes	C/4			16	24		
I.2.2 (2) Perda de capacidade drenante dos taludes	C/4			16	24		
I.2.3 (1) Ravinamento	C/4			16			
I.2.4 (1) Insuficiente capacidade de escoamento	B/2		4				
I.2.4 (2) Obstrução	B/2		4				
I.2.4 (3) Rotura estrutural das calceiras	B/2		4				
I.2 (1) Insuficiente capacidade drenante da pilha	C/4		8		24		
I.2 (2) Abatimentos da pilha	B/2		4		12		
I.2 (3) Instabilização da pilha	B/2		4		12		
I.2 (4) Liquefação da pilha	C/4		8		24	36	
I.3.1 (1) Insuficiente capacidade drenante	B/2		4				
I.3.1 (2) Colmatação	B/2		4				
I.3.1 (3) Erosão interna	B/2			8			
I.3 (1) Colmatação do sistema drenante	B/2			8			
I.3 (2) Obstrução	B/2			8			
I.3 (3) Erosão interna	B/2			8			
I.4.1 (1) Insuficiente capacidade resistente	B/2			8			
I.4.1 (2) Deslizamento	B/2			8			
I.4.1 (3) Desestabilização	B/2			8			
I.4.1 (4) Deformação excessiva	B/2			8			
I.4.1 (5) Erosão interna	B/2			8			

Tabela 7 – I_{cr} para os modos de ruptura – Pilha X - Continuação

MR - Modos de ruptura	Classe de prob. /Índ.v	Classes de severidade / Índices s					
		I 1	II 2	III 4	IV 6	V 9	VI 10
I.4.2 (1) Insuficiente capacidade resistente	B/2			8			
I.4.2 (2) Deslizamento	B/2			8			
I.3.1 (3) Erosão interna	B/2			8			
I.3 (1) Colmatação do sistema drenante	B/2			8			
I.4.2 (3) Deformação excessiva	B/2			8			
I.4.2 (4) Erosão interna	B/2			8			
I.4.2 (5) Desestabilização	B/2			8			
I.4 (1) Insuficiente capacidade resistente	B/2			8			
I.4 (2) Deslizamento	B/2			8	12		
I.4 (3) Desestabilização	B/2			8		18	
I.4 (4) Deformação excessiva	B/2			8	12		
I.4 (5) Erosão interna	B/2		4		12		
I (1) Funcionamento inadequado do dique de partida	B/2		4		12		
I (2) Funcionamento inadequado do corpo da pilha	B/2		4	8	12	18	
I (3) Funcionamento inadequado da fundação	B/2			8	12		
II.1 (1) Avaria mecânica	B/2		4				
II.1 (2) Potência insuficiente	B/2		4				
II.1 (3) Falha elétrica	B/2		4				
II.2 (1) Entupimento da tubulação	B/2			8			
II.2 (2) Desgaste da tubulação	B/2		4				
II.3.(1) Formação de "back pounding"	C/4			16	24		
II.3.(2) Inadequação da altura de lançamento da polpa	C/4			16			
II. (1) Funcionamento inadequado das bombas	B/2			8			
II. (2) Funcionamento inadequado dos rejeitodutos	B/2				12		
II. (3) Funcionamento inadequado dos spigottings	B/2				12		
III.1 Polpa com características físicas em relação à vazão e concentração de forma a impossibilitar a formação de uma praia adequada em termos de resistência e percolação	D/7				42		

Tabela 8 - Matriz de criticalidade dos modos potenciais de ruptura das componentes básicas do sistema correspondente à Pilha X

CLASSES DE PROBABILIDADE	E						
	D					III. (1)	
	C			I.2.1 (1) I.2.3 (1) II.3 (2)	I.2.2 (1) I.2.2 (2) I.2 (1) II.3 (1)	I.2.1 (4) I.2 (4)	
	B		I.1 (1) I.1 (2) I.2.4 (1) I.2.4 (2) I.2.4 (3) I.3.1 (1) I.3.1 (2) I.3.1 (3) II.1 (1) II.1 (2) II.1 (3) II.2 (2)	I.3 (1) I.3 (2) I.3 (3) I.4.1 (1) I.4.1 (2) I.4.1 (3) I.4.1 (4) I.4.1 (5) I.4.2 (1) I.4.2 (2) I.4.2 (3) I.4.2 (4) I.4.2 (5) I.4 (1) II.2 (1) II.(1)	I.2.1 (2) I.2.1 (3) I.2 (2) I.2 (3) I.4 (2) I.4 (4) I.4 (5) I.(1) I.(3) II. (2) II. (3)	I. (2)	
	A						
MR		I	II	III	IV	V	VI
		CLASSES DE SEVERIDADE					

4 Comentários finais

Os modos de ruptura (MR) mais críticos correspondem àqueles que apresentaram o efeito conjunto mais desfavorável de severidade e de

probabilidade, ou seja, os modos de ruptura mais críticos encontram-se na matriz no canto superior direito e os menos relevantes no canto inferior esquerdo. Para os modos de ruptura com vários pares associados a maior criticalidade corresponde àquela com classe de severidade e classe de probabilidade mais desfavorável. No caso da Pilha X os itens:

- III.1 Polpa com características físicas em relação à vazão e concentração de forma a impossibilitar a formação de uma praia adequada em termos de resistência e percolação
- I.2.1 (4) Liquefação da praia
- I.2 (4) Liquefação do corpo da pilha
- I (2) Funcionamento inadequado do corpo da pilha

se apresentaram como os modos de ruptura mais críticos, em termos de severidade. Entretanto, vale destacar que as probabilidades de ocorrência para cada item foram distintas, ou seja, III.(1) Provável; I.2.1 (4) Ocasional, I.2 (4) Ocasional e I (2) Remota.

A partir desses resultados pode-se concluir que as análises realizadas confirmam os modos de ruptura mais preocupantes nessas estruturas, demonstrando, assim, a eficácia do método aplicado.

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. (1995), “Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito - Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação”. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 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.

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), Lisboa, Portugal, 257 p.