

FELIPE THADEU BONUCCI

GERENCIAMENTO DE RISCOS EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO:

APLICAÇÃO DO MÉTODO BOWTIE

São Paulo

2016

FELIPE THADEU BONUCCI

**GERENCIAMENTO DE RISCOS EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO:
APLICAÇÃO DO MÉTODO BOWTIE**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Médici de Éston

São Paulo

2016

TF-2016

B644g

Sysw

2798777

H2016g

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010022

Catálogo-na-publicação

Bonucci, Felipe Thadeu

Gerenciamento de Riscos em Barragens de Mineração: Aplicação do
Método Bowtie / F. T. Bonucci -- São Paulo, 2016.
34 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Barragens de Rejeitos 2.Acidentes em Mineração 3.Prevenção de
Acidentes 4.Risco Ambiental I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Dedico este trabalho à minha querida avó Maria Cândida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a meus pais, pelo amor incondicional, pela paciência inesgotável e pela batalha incomensurável que travaram todos os dias para me trazer até aqui. A toda minha família direta e indireta, pelos momentos de lazer e de aprendizado.

À Gabriela e a todos meus amigos por tornarem meus dias mais alegres e por me darem forças para prosseguir.

Ao corpo docente e discente do Colégio São Judas Tadeu e Colégio Guimarães Rosa pela minha formação pessoal e intelectual.

À Escola Politécnica pelo amadurecimento, ao seu corpo docente pelas lições, e ao seu corpo discente pelo companheirismo na adversidade. E particularmente aos meus colegas Flávia de Lima Fernandes e Daniel Ueno, que me ajudaram a manter a sanidade nas tribulações do biênio.

A todos meus colegas do LACASEMIN pelo desenvolvimento profissional, pelo sucesso nas atividades que realizamos juntos e comprometimento de toda a equipe.

A meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston, pela inspiração.

E ao Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi, Prof. Dr. Eduardo Cesar Sansone, Prof. Dr. Luis Enrique Sanchez, Profa. Alessandra Isabella Sampaio Martins, Profa. Dra. Maria Eugênia Gimenez Boscov, Prof. Dr. Waldemar Coelho Hachich, Me. Gláucia Cuchierato e, especialmente, à Profa. Dra. Maria Renata Machado Stellin, pelo auxílio na realização deste trabalho.

RESUMO

Riscos são inerentes a todas as atividades humanas, estando associados a consequências, que podem ser desde imperceptíveis a catastróficas. Em atividades de engenharia, é de sua responsabilidade realizar o gerenciamento destes riscos e prevenir incidentes. No setor mineral, umas das principais condições perigosas é a barragem de rejeitos, cujo rompimento é um risco intolerável, dadas as calamitosas consequências que podem ocorrer. Devido aos grandes acidentes com barragens, como Mt. Polley no Canadá, Hpakant em Myanmar, Dahegou na China e Mariana no Brasil, a mineração tem passado por intensas críticas da sociedade e da mídia, que são extremamente justificáveis, uma vez que a tecnologia atual permite a prevenção deste rompimento. O setor deve se esforçar para melhorar suas técnicas de controle e atuar fortemente na segurança de barragens. Neste intuito, o objetivo deste trabalho é a realização de uma análise de riscos de uma hipotética barragem de rejeitos de mineração utilizando a metodologia *BowTie Analysis* ou Análise da Gravata Borboleta, focando no evento topo, a ruptura da barragem. Para isso, é feita uma breve descrição sobre barragens de contenção de rejeitos de mineração e sobre as diversas técnicas de análise de risco, a identificação das principais ameaças que podem causar um acidente, de controles que possam prevenir que estas ameaças desencadeiem este acidente, das consequências que ele poderia ter e de controles que possam mitigar, reduzir ou eliminar estas consequências.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos; Segurança de barragens; Ruptura de barragens; Análise de risco; Engenharia de minas.

ABSTRACT

Risks are inherent to all human activities, being associated to consequences, that may be from imperceptible to catastrophic. In engineering activities, it is its responsibility to perform the management of such risks and to prevent incidents. In the mining sector, one of the main hazards is the tailings dam, the failure of which is an intolerable risk, given the disastrous consequences that may occur. Due to significant accidents with tailings dams, like Mt. Polley in Canada, Hpakant in Myanmar, Dahegou in China and Mariana in Brazil, mining has been through intense criticism from society and the media, which is extremely justifiable, since current technology allows the prevention of such failure. The mining sector must make an effort to improve its control techniques and act strongly on dam safety. Therefore, the objective of this paper is to perform a risk analysis of a hypothetical tailings dam, using the Bow Tie Analysis Methodology, focusing on the top event, the dam failure. To that end, it makes a brief description about tailings dams used in mines and about several methods of risk analysis, the identification of the main threats that can cause an accident, of controls that can prevent these threats from triggering this accident, of the consequences it could have and of controls that can mitigate, reduce or eliminate these consequences.

Key-words: Tailings dams; Dam safety; Dam failure; Risk analysis; Mining engineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Barragem do Fundão em Mariana (MG) após o acidente.	11
Figura 2 - Esquema de uma Barragem Convencional.....	13
Figura 3 - Esquema de uma Barragem de Rejeito.....	13
Figura 4- Esquema dos Métodos Construtivos Mais Comuns de Barragens de Rejeito.	14
Figura 5 - Exemplo de Árvore de Falhas.....	19
Figura 6- Diagrama BowTie Genérico Produzido pelo Software BowTieXP.....	23
Figura 7 - BowTie Completo da Ruptura de uma Barragem	28
Figura 8 - Detalhe do BowTie (Lado Esquerdo) - Ameaças e Controles de Prevenção	29
Figura 9- Detalhe do BowTie (Lado Direito) - Consequências e Controles de Recuperação ..	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de Risco pelo Método Qualitativo.....	20
Quadro 2 - Matriz de Classificação de Risco pelo Método Semiquantitativo.....	20
Quadro 3 - Associação entre Ferramentas de Análise de Riscos e Métodos de Valoração.	21

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 OBJETIVO GERAL.....	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO.....	11
3.1.1 Definições Legais.....	12
3.1.2 Comparação com Barragens Convencionais.....	12
3.1.3 Métodos Construtivos	14
3.1.4 Modos de Falha	15
3.1.5 Acidentes no Brasil.....	16
3.2 ANÁLISE DE RISCOS.....	17
3.2.1 Terminologia	17
3.2.2 As Técnicas de Análise de Risco	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 AMEAÇAS E CONTROLES DE PREVENÇÃO.....	24
5.2 CONSEQUÊNCIAS E CONTROLES DE RECUPERAÇÃO	26
5.3 DIAGRAMA BOWTIE.....	27
6. CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A mineração é um setor fundamental para o funcionamento da economia. A produção mineral brasileira em 2014 foi equivalente a US\$ 40 bilhões, representando 5% do PIB industrial do país, e o setor extrativo mineral em julho de 2015 possuía mais de 214 mil empregos diretos e mais de 770 mil empregos indiretos (IBRAM, 2015). Ela produz desenvolvimento em todas as regiões do país, com minas de metais preciosos e de minérios com maior valor agregado em funcionamento nos locais mais remotos, pedreiras e portos de areia nos locais mais próximos dos grandes centros.

O Brasil, devido à sua grande área e diversidade geológica, produz 72 diferentes substâncias minerais, desde o minério de ferro e seus concentrados, cuja produção anual tem o maior valor financeiro dentre os bens minerais e é a principal *commodity* exportada pelo país; passando pelos diversos bens minerais metálicos como ouro, cobre, níquel, zinco, alumínio (bauxita), chegando aos não-metálicos como agregados para a construção civil (com maior produção anual em toneladas) e minérios de potássio e fosfato para a produção de fertilizantes, essenciais para a agricultura brasileira (IBRAM, 2015).

A essencialidade da mineração para a sociedade, porém, vai além de seu valor econômico, da sua geração de empregos e da diversidade de sua produção. Os bens minerais são as matérias primas da indústria e fazem parte de todos os aspectos da vida moderna. A mineração não produz somente ouro e pedras preciosas para joias, ela é a base sobre a qual se desenvolve a construção civil, os bens de consumo, o setor alimentício, a indústria química, e muitos outros. Praticamente inexistem produtos que, em seu processo de fabricação, não foram utilizados insumos produzidos pela mineração.

Devido à falta de compreensão e até mesmo má comunicação, a mineração pode ser vista com preconceito e associada com degradação ambiental, más condições de trabalho e baixo desenvolvimento. O setor mineral deve enfrentar esta desconfiança, mostrar à sociedade todos os benefícios que traz para esta, e que a mineração moderna consegue trabalhar com segurança, minimizando seu impacto ambiental e gerando desenvolvimento social e econômico.

Riscos, definidos como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento indesejado e a magnitude de suas consequências (MARTINS, 2016b), são inerentes a todas as atividades humanas. O dever da engenharia é efetuar o gerenciamento destes riscos, atuando de forma preventiva, com controles e barreiras que impeçam que a ocorrência destes eventos indesejados.

Frente a este desafio, acidentes como o ocorrido em 2015 na barragem de rejeitos do Fundão em Mariana (MG) não são aceitáveis. As barragens de mineração são uma das maiores estruturas construídas pela engenharia e a tecnologia contemporânea é capaz de auxiliar na prevenção deste tipo de acidente e na mitigação de suas consequências.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Fazer uma análise de riscos em uma barragem de rejeitos de mineração hipotética através do método de análise *BowTie*, que permite uma melhor visualização do sistema como um todo, e assim, facilita o gerenciamento do risco em barragens de mineração.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Identificar as principais ameaças que poderiam causar falha (ruptura) em uma barragem de contenção de rejeitos de mineração;
- Identificar os principais métodos de controle de prevenção (que previnem a ocorrência de uma falha ou acidente);
- Identificar as principais consequências de uma possível ruptura;
- Identificar os principais métodos de controle de recuperação (que previnem ou minimizam as consequências de um acidente);
- Elaborar, com o uso de *software*, um diagrama de gravata borboleta (*bowtie*) que relaciona estas ameaças e consequências, adicionando entre eles e o evento topo (a ruptura) os controles de prevenção e de recuperação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Na mineração, de forma geral, o material que é retirado da cava durante a lavra (*run-of-mine*) é composto não somente do mineral de interesse, mas também de diversos outros minerais que não são de interesse econômico ou não são aproveitáveis economicamente. Então, eles devem ser separados através de processos físicos e/ou químicos, normalmente em uma usina de tratamento próxima à cava, para a obtenção de um minério de alto teor do mineral de interesse, e um rejeito.

Durante o beneficiamento, adiciona-se água ao material sólido, formando uma polpa, para melhorar a eficiência de processos como peneiramento e moagem, permitir bombeamento, reduzir a formação de poeira, e principalmente por certos processos serem inerentemente realizados em meio aquoso, como a flotação. Com isto, o rejeito da usina usualmente possui um percentual de sólidos baixo, chegando a menos de 30% dependendo do processo (LOZANO, 2006).

Para a disposição destes rejeitos, é realizada a construção de uma barragem de rejeitos, onde tal polpa é depositada para que o material sólido decante. Esta decantação é um processo lento, podendo levar anos (LOZANO, 2006), já que estas partículas possuem uma granulometria reduzida devido à sua passagem por ciclos de britagem e moagem, o que é necessário para atingir-se a liberação do mineral útil.

Barragens de contenção de rejeito são estruturas que podem chegar a ter dezenas de metros de altura e um volume de reservatório de dezenas de milhões de metros cúbicos (ARCOVERDE, 2016). E por isso, o gerenciamento de seus riscos deve permear as etapas de estudos, projeto, construção, operação e desativação, de maneira a prevenir que aconteçam acidentes como o de Mariana (Figura 1).

Figura 1- Barragem do Fundão em Mariana (MG) após o acidente.



Fonte: WALL STREET JOURNAL, 2016.

3.1.1 Definições Legais

A Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB) define barragem como:

“Qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguinte características:

I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.”

A Portaria nº 416 do DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) define barragens de mineração como: “barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas localizados no interior da área concedida ou área de servidão, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração, descarga de sedimentos provenientes de atividades de mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.”

A definição da Política Nacional de Segurança de Barragens (PSNB), portanto, se restringe a barragens de grande porte, ou que possuam maior risco, e não diferencia barragens convencionais de barragens de contenção de rejeitos de mineração. Enquanto que a definição do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), apesar de se restringir a barragens de mineração, é mais abrangente, pois não delimita seu porte.

3.1.2 Comparação com Barragens Convencionais

De acordo com RICO (2007), várias características fazem com que barragens de mineração sejam mais vulneráveis a falhas do que as barragens comuns (de retenção de água para fornecimento ou para geração de energia elétrica). O talude de retenção normalmente é construído com material local (solo ou rejeito), a barragem é continuamente aumentada durante a vida útil da mina, há falta de especificidade nas regulações para o projeto, além de comumente as mineradoras não fazerem a manutenção e/ou o monitoramento adequado.

MAFRA (2016) também considera que as barragens de rejeitos de mineração são mais propensas a acidentes, devido a três fatores fundamentais:

1) Nas barragens convencionais, pode-se realizar um controle amplo do material de construção, pois este material é usualmente solo proveniente de empréstimos, e são realizados ensaios que permitem a obtenção de sua curva granulométrica, resistência, permeabilidade e outras características que possam assegurar sua utilização na construção da barragem. Já em barragens de rejeitos, o controle do material de construção é baixo, pois ela é normalmente

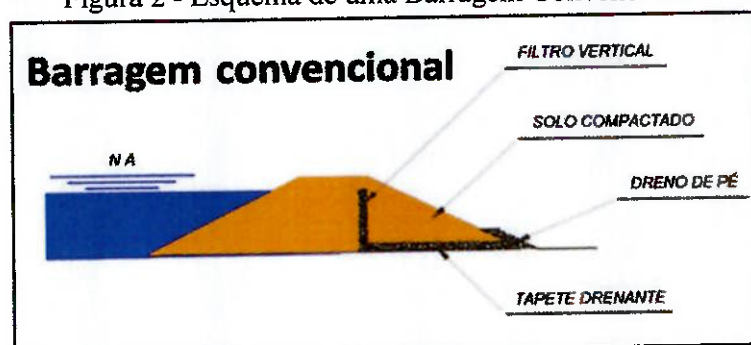
construída com o próprio rejeito, que pode sofrer grandes variações dependendo da frente de lavra de que ele for proveniente ou de flutuações usuais no processo de tratamento da usina.

2) Enquanto a construção de barragens convencionais é realizada anteriormente ao início de sua operação, sendo realizadas compactações do solo a cada nova camada de cerca de vinte centímetros, as barragens de rejeito são construídas continuamente ao longo de toda a vida da mina. Se a vida útil de uma mina for de vinte anos, e a barragem tiver sido projetada para dispor dos rejeitos durante toda a operação da mina, a sua construção se seguirá ao longo destes vinte anos.

3) É possível o tratamento da fundação de barragens convencionais, onde comumente é instalado um sistema de drenagem interna, com filtro vertical e tapete de drenagem. A fundação de barragens de rejeitos, porém, é a própria praia de rejeito, que é constituída do próprio rejeito, não consolidado e parcialmente saturada. O que faz com que a praia de rejeito seja suscetível de deformações, podendo chegar até a sofrer liquefação.

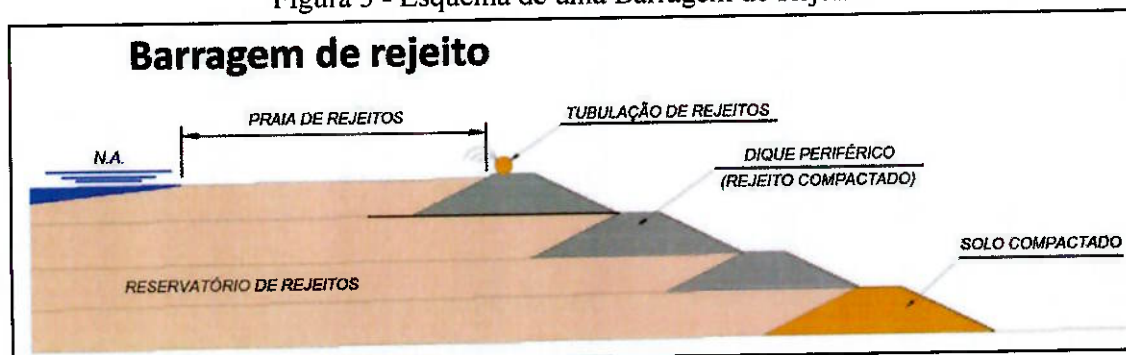
A Erro! Fonte de referência não encontrada. mostra uma representação esquemática de uma barragem convencional e de uma barragem de contenção de rejeitos de mineração, construída pelo método mais comum, o de alteamento a montante.

Figura 2 - Esquema de uma Barragem Convencional.



Fonte: MAFRA, 2016 (Adaptado).

Figura 3 - Esquema de uma Barragem de Rejeito.

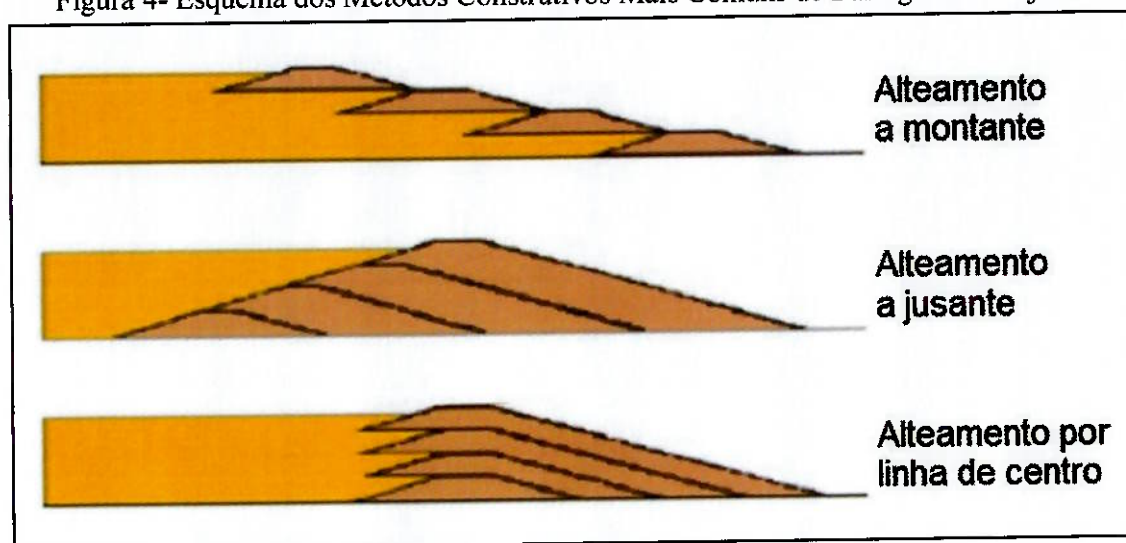


Fonte: MAFRA, 2016 (Adaptado).

3.1.3 Métodos Construtivos

Existem três métodos básicos de construção de barragens de rejeito: alteamento a montante, por linha de centro e a jusante (MAFRA, 2016). Conforme a Figura 4, o alteamento a montante implica numa menor movimentação de terra, o alteamento por linha de centro numa movimentação intermediária e o alteamento a jusante numa maior movimentação. Consequentemente, o custo da construção cresce conforme a volume de terra a ser movimentado, por outro lado, a segurança e o número de acidentes associados com cada um dos métodos de construção são inversamente proporcionais ao seu custo.

Figura 4- Esquema dos Métodos Construtivos Mais Comuns de Barragens de Rejeito.



Fonte: HADZI-NIKOLOVA, 2011, apud VICK, 1983 (Adaptado).

3.1.3.1 Alteamento a montante

Este é o tipo mais antigo e mais comum de construção de barragens de rejeitos. Existem registros da construção de barragens de rejeitos utilizando este método na África do Sul no início dos anos 1900 (ICOLD, 2001).

Segundo MAFRA (2016), a construção do dique inicial e dos diques de alteamento pode ser realizada com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com *underflow* da ciclonagem. Suas vantagens principais são o menor custo, maior velocidade de alteamento, e pode ser utilizado em locais onde não é possível aumentar a área ocupada pela barragem. Suas desvantagens principais são maior dificuldade de controle do nível freático e de construção de um bom sistema de drenagem, a superfície de ruptura passa pelo material de mais baixa resistência e é mais suscetível a problemas como liquefação e *piping*.

3.1.3.2 Alteamento a jusante

Devido ao alto risco de falha de barragens construídas com alteamento a montante, o alteamento a jusante foi desenvolvido, e é considerado atualmente o método mais seguro de

construção de barragens, especialmente quando sujeitas a sismicidade (ICOLD, 2001). Por este motivo, este é o método construtivo mais comum em minas chilenas (MAFRA, 2016).

Neste método, é construído um dique inicial impermeável e na crista se utiliza o *underflow* da ciclonagem, e ainda é instalado um dreno interno e feita a impermeabilização a montante. Suas principais vantagens são maior segurança, menor probabilidade de ruptura, maior controle do nível freático, a compactação de todo o corpo da barragem e a superfície de ruptura passa por uma zona resistente e compactada.

3.1.3.3 Alteamento por linha de centro:

Este método é uma variação do alteamento a jusante, apresentando técnicas construtivas semelhantes, porém requerendo aproximadamente a metade do volume a ser movimentado e compactado. Ele necessita de sistemas eficientes de drenagem e de contenção a jusante (MAFRA, 2016).

Devido a este método ser uma combinação entre o alteamento a montante e o alteamento a jusante, possui características intermediárias, sendo mais caro do que o alteamento a montante e mais barato do que o alteamento a jusante, porém mais seguro do que o primeiro e menos seguro do que o segundo (MAFRA, 2016).

3.1.4 Modos de Falha

Por ser um sistema complexo, cada barragem tem suas próprias características e quando ocorre uma ruptura ela frequentemente está associada a diversos fatores. Pode-se, no entanto, generalizá-los em grupos similares para facilitar a sua compreensão. Também é comum que eventos indesejados estejam associados a causas naturais como chuva excessiva, tornados, furacões, terremotos, degelos muito rápidos, ou acumulação de gelo na barragem com grandes acidentes (RICO et al., 2007). Porém, as barragens devem ser projetadas, mantidas e monitoradas de forma a impedir que essas situações causem uma falha.

Os principais modos de falhas em barragens e suas descrições são (SZNELWAR, 2016):

- Problemas estruturais: erros de projeto, escolha ruim do local, falhas na construção.
- Erros de operação: má manutenção do talude, má gestão da praia, crescimento muito rápido da barragem, presença de equipamentos pesados em barragens instáveis.
- *Piping*: fluxo crescente de água na parte inferior do talude, causando a erosão deste.
- Liquefação: perda da resistência ao cisalhamento do material do talude.
- Problemas no talude: ângulo muito íngreme, má manutenção, formação de trincas ou direções mais frágeis que possam causar uma ruptura.

- Subsistência do solo: ocorrem quando o solo ou a rocha imediatamente abaixo da barragem não conseguem suportar o peso da barragem.
- Transbordamento ou galgamento (*overtopping*): excesso de água na barragem, de forma que ela ultrapassa a cota máxima e transborda (JÓNATAS, 2013).

3.1.5 Acidentes no Brasil

O rompimento da barragem do Fundão da mineradora Samarco em Bento Rodrigues, distrito de Mariana (MG) no dia 05 de novembro de 2015 foi evento trágico, que causou enorme impacto ambiental, social e econômico, e pior que isto, cerca de 20 mortes. A magnitude deste acidente, e a grande atenção por ele gerada, fez com que as empresas e autoridades de mineração repensassem a atual situação de segurança das barragens brasileiras.

Este, porém, não é o primeiro acidente de ruptura de barragens a ocorrer no país. Somente nos últimos trinta anos, houveram seis grandes acidentes de rompimento de barragens no Brasil (DE ÁVILA, 2016):

- Em 1986, na mina de Fernandinho do grupo Itaminas, em Itabirito (MG), o rompimento da barragem causou sete mortes e a liberação de mais de cem mil toneladas de rejeito, que prosseguiram por mais de 12 km a jusante.
- O acidente em 2001 na mineração Rio Verde, de minério de ferro, em Sebastião das Águas Claras, distrito de Nova Lima (MG) matou cinco trabalhadores da mina. Apesar de as causas da ruptura não terem sido identificadas definitivamente, havia sido realizada uma inspeção prévia ao acidente, em maio de 2001, onde foi notada a falta de piezômetros para o monitoramento do nível e da pressão de água na barragem (WISE, 2016).
- A barragem de rejeitos de uma indústria de papel em Cataguases (MG) rompeu em 2003, causando a liberação de lixívia negra e contaminando o sistema de fornecimento de água, causando sua interrupção.
- Em 2006, a barragem de rejeitos de bauxita da mineração Rio Pomba em Miraf (MG) rompeu, causando interrupção do fornecimento de água aos moradores das cidades a jusante.
- E em 2007, novamente na mineração Rio Pomba em Miraf, após fortes chuvas, ocorreu outro rompimento da barragem, desabrigando mais de quatro mil residentes das cidades de Miraf e de Muriaé na Zona da Mata.
- O acidente mais recente no Brasil, antes de Mariana, foi em 2014 na Mineradora Herculano situada em Itabirito (MG). O rompimento da barragem ocorreu durante sua manutenção causou a morte de três trabalhadores.

3.2 ANÁLISE DE RISCOS

O Gerenciamento de Riscos (*Risk Management*) é o processo completo que engloba a Avaliação de Riscos (*Risk Assessment*), seu controle, redução ou mitigação. A Avaliação do Riscos, por sua vez é composta da Análise de Riscos (*Risk Analysis*) e sua Valoração (*Risk Evaluation*) ou Estimativa (*Risk Estimation*). A Análise de Riscos busca identificar e compreender as causas e consequências dos riscos. (COLLE, 2008).

3.2.1 Terminologia

Devido à falta de uniformidade no uso de certos termos frequentes na área de análise de riscos e segurança como “perigo”, “risco” e “acidente”, serão utilizadas as definições adaptadas de Lapa (2011):

- Condição perigosa: fonte, situação ou ato com potencial para causar uma lesão ou doença ou uma combinação de ambos.
- Perigo: é a efetiva exposição à condição perigosa, desta forma, podendo causar dano ou lesão.
- Risco: associação entre a probabilidade de ocorrência de um evento e a gravidade de sua consequência.
- Evento indesejável: evento resultante, real ou potencial, da exposição à condição perigosa.
- Ameaças: fatores que podem vir a contribuir para a ocorrência do evento indesejável.
- Incidente: toda e qualquer ocorrência ou evento indesejável independente da sua consequência real.
- Acidente: evento indesejável, a partir do qual, possa se ter como resultado uma lesão qualquer.
- Controle: medida capaz de prevenir a ocorrência do evento indesejável.
- Barreira: meio capaz de prevenir a ocorrência do evento indesejável.
- Defesas: medida capaz de atenuar a consequência do evento indesejável.

3.2.2 As Técnicas de Análise de Risco

Existe um grande número de ferramentas de análise de risco, com focos, métodos e objetivos diferentes. Nesta seção, faz-se uma breve descrição das principais delas, conforme Martins (2016b) e ao final, faz-se uma comparação entre elas.

3.2.2.1 WRAC

A WRAC (*Workplace Risk Assessment and Control* ou Análise e Controle de Riscos no Local de Trabalho) possui diversas variações e as mais populares no Brasil são a APR (Análise Preliminar de Riscos) ou APP (Análise Preliminar de Perigos). A característica principal deste tipo de técnica é o desmembramento de tarefas em etapas ou passos. Então cada passo é submetido a uma avaliação para a identificação das condições perigosas e possíveis erros que podem ocorrer durante ele através da pergunta “o que pode dar errado?” (MARTINS, 2016a).

3.2.2.2 FMECA

A FMECA (*Failure Modes, Effect and Criticality Analysis* ou Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidades) é uma ferramenta de análise de riscos desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (PEREIRA, 2009). Resumidamente, ela é feita através do desmembramento de sistemas em itens, componentes ou equipamentos e analisa cada um destes, buscando problemas que possam surgir através da pergunta “como esse item pode falhar?”. Objetiva identificar a confiabilidade de cada um dos itens e aumentar o foco no controle dos itens mais críticos.

3.2.2.3 HAZOP

A HAZOP (*Hazard and Operability Studies* ou Estudos de Condições Perigosas e Operabilidade) foi desenvolvida e ainda é muito utilizada pela indústria química (MARTINS, 2016a). Ela é aplicada desmembrando-se processos em nós, que são pontos críticos dentro de um fluxograma de processo. E para cada nó, as variáveis de processo são analisadas com o auxílio de duas palavras-guia: normalmente uma adverbial ou adjetiva (mais, máxima, menos, mínima, nenhuma, etc.) e outra substantiva (velocidade, vazão, temperatura, etc.). Por exemplo, uma combinação poderia ser “mais velocidade” ou “máxima velocidade”, e devem-se identificar quais desvios poderiam ocorrer naquele nó se ele trabalhasse com “mais velocidade” ou “máxima velocidade”.

3.2.2.4 SLAM

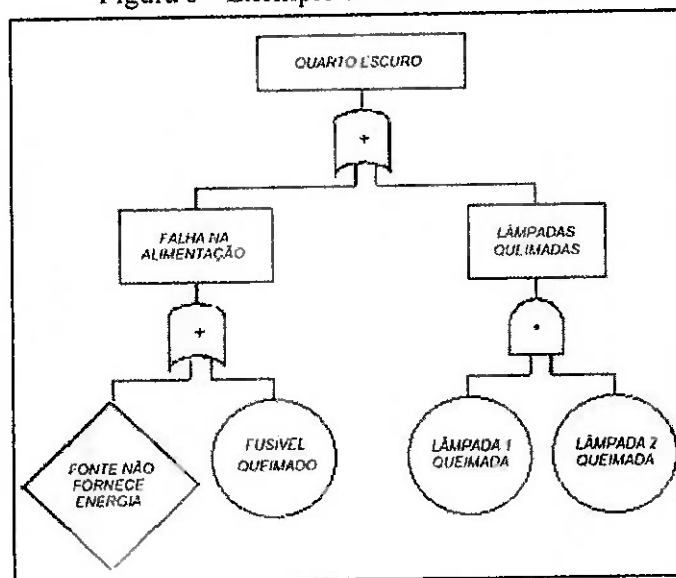
A SLAM (*Stop, Look, Assess And Manage* ou Pare, Olhe, Avalie e Gerencie) é uma técnica de análise de risco indicada para o uso pelo próprio trabalhador. Antes da realização de uma tarefa ou atividade, o trabalhador deve “parar”, “olhar”, “avaliar” os possíveis riscos envolvidos naquela tarefa e “gerenciar” estes riscos, eliminando-os, reduzindo-os ou no mínimo, trabalhando com consciência da possibilidade da ocorrência daquele problema e tentando evitá-lo. Seu foco é verificar se é seguro prosseguir com a realização da tarefa (MARTINS, 2016a).

3.2.2.5 FTA

A FTA (*Fault Tree Analysis* ou Análise de Árvore de Falhas) busca mapear todos os fatores que contribuem para a ocorrência de um evento indesejado que se esteja estudando, que é denominado de evento topo. Este evento topo pode ser um evento global, como a falha total do sistema ou um evento específico, como o mal funcionamento de um componente.

A Árvore de Falhas é construída por fatores contribuidores com eventos que estes podem desencadear, como um fluxograma, até que o desencadeamento cause o evento topo. Os fatores contribuidores também podem se conectar entre si, utilizando operadores booleanos como “e”, “ou” ou “não”, para que esta combinação cause o próximo evento na árvore (MARTINS, 2016a). Um exemplo de Árvore de Falha é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Exemplo de Árvore de Falhas.



Fonte: MARTINS, 2016b.

3.2.2.6 ETA

A ETA (*Event Tree Analysis* ou Análise de Árvore de Eventos) inicia-se com um evento indesejado, denominado de evento iniciador, e busca mapear todas as possíveis consequências decorrentes da perda de controle do evento iniciador. Ela é semelhante à FTA, porém de forma inversa. Supondo-se que o evento iniciador já tenha sido desencadeado, as linhas são traçadas em direção às consequências, analisando a sequência de fatores, eventos e suas possíveis combinações (também com operadores booleanos) que podem levar a consequências maiores.

3.2.2.7 BTA

A BTA (*BowTie Analysis* ou Análise da Gravata Borboleta) combina a Análise de Árvore de Falhas e a Análise de Árvore de Eventos em um só diagrama, que se assemelha a uma gravata borboleta, e por isso, seu nome. Ela também foca em um evento topo, e levanta as ameaças que podem vir a causá-lo como a FTA e as consequências que podem ser desencadeadas como a ETA.

Seu foco, porém, é em controle ou barreiras que possam prevenir a ocorrência do evento topo ou suas consequências. Nas linhas que conectam as ameaças ao evento topo, controles de prevenção podem ser interpostos. E nas linhas que conectam o evento topo às consequências, controles de recuperação podem ser interpostos. E a construção do diagrama *bowtie* visa verificar a efetividade destes controles.

3.2.2.7 Comparação entre as Técnicas de Análise de Risco

Diante da variedade de técnicas de Análise de Risco, a seleção de qual ferramenta utilizar para uma análise é essencial. Para este fim, pode-se categorizar as ferramentas em grupos de forma a facilitar a compreensão de quando cada uma delas é melhor aplicada e auxiliar na escolha do método.

Conforme as definições utilizadas, para a Avaliação do Risco é necessário a sua Análise e sua Valoração. Existem três tipos básicos de Valoração, e cada ferramenta de Análise trabalha melhor com alguns deles. A Valoração do Risco pode ser feita através do Método Qualitativo, do Método Semiquantitativo e do Método Quantitativo.

O Método Qualitativo atribui aos riscos categorias ou classificações como “alto”, “médio” e “baixo”, sem a associação de números, como o esquema apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de Risco pelo Método Qualitativo.

Probabilidade	Consequência		
	Alta	Média	Baixa
Alta	Alto	Médio	Baixo
Média	Médio	Médio	Baixo
Baixa	Baixo	Baixo	Baixo

Fonte: MARTINS, 2016a (Adaptado).

O Método Semiquantitativo utiliza uma matriz de risco, como a apresentada na Quadro 2, para associar não somente uma categoria, mas também um valor numérico ao risco. Usualmente, as categorias de probabilidade e severidade possuem definições para a sua classificação. Por exemplo, uma probabilidade alta é um evento que ocorre uma vez por ano, uma probabilidade média a cada dez anos, e uma probabilidade baixa a cada cem anos. Um exemplo de classificação de severidade pode ser: uma severidade alta é um evento que pode causar uma fatalidade, uma severidade média é um evento que pode causar parada na produção e uma severidade baixa é um evento que não causaria consequências relevantes.

Quadro 2 - Matriz de Classificação de Risco pelo Método Semiquantitativo.

Probabilidade	Severidade			
	Desprezível (1)	Marginal (2)	Crítica (3)	Catastrófica (4)
Improvável (1)	Risco Trivial (1)	Risco Trivial (2)	Risco Tolerável (3)	Risco Tolerável (4)
Remota (2)	Risco Trivial (2)	Risco Tolerável (4)	Risco Moderado (6)	Risco Moderado (8)
Ocasional (3)	Risco Tolerável (3)	Risco Moderado (6)	Risco Substancial (9)	Risco Substancial (12)
Provável (4)	Risco Tolerável (4)	Risco Moderado (8)	Risco Substancial (12)	Risco Intolerável (16)
Frequente (5)	Risco Moderado (5)	Risco Substancial (10)	Risco Intolerável (15)	Risco Intolerável (20)

Fonte: MARTINS, 2016a (Adaptado).

Já o Método Quantitativo utiliza modelos matemáticos ou computacionais para realizar um cálculo efetivo, atribuindo valores contínuos (aos invés de discretos como no Método Semiquantitativo) às probabilidades e consequências. E utiliza uma fórmula, por exemplo determinando que risco seja igual ao produto da probabilidade pela consequência, para fazer a Valoração dos Riscos.

Cada uma das principais técnicas de Análise de Riscos foi originalmente projetada para trabalhar melhor com um dos métodos de valoração e a Quadro 3 sintetiza essa relação.

Quadro 3 - Associação entre Ferramentas de Análise de Riscos e Métodos de Valoração.

Ferramenta	Método de Valoração		
	Qualitativo	Semiquantitativo	Quantitativo
WRAC		X	
FMECA		X	
HAZOP	X		
FTA	X		X
ETA	X		X
BTA	X		

Fonte: MARTINS, 2016a (Adaptado).

As diferentes ferramentas também possuem abrangências diferentes. Quando se trabalha com múltiplos eventos, as ferramentas WRAC, FMECA, HAZOP e SLAM são as mais adequadas, pois possuem uma visão “macro” do sistema, e buscar dividi-lo em partes para analisá-lo. Já quando o foco é em apenas um evento, a FTA, ETA e BTA são mais adequadas, pois possuem uma visão “micro” do sistema, direcionada a um único evento topo ou iniciador.

Martins (2016b) recomenda que, depois da determinação do escopo da análise em múltiplos eventos ou um único evento, a seleção da ferramenta a ser utilizada seja feita com base em algumas palavras-chave, que mostram foco de cada uma delas. Para as ferramentas de múltiplos eventos, as palavras-chave são “tarefas” para a WRAC, “confiabilidade” para a FMECA e “variáveis de processo” para a HAZOP. E para as técnicas em um único evento, as palavras-chave são “contribuidores” para a FTA, “consequências” para a ETA e “controles” para a BTA.

Seguindo estas recomendações, este trabalho, cuja análise é um evento único, o rompimento de uma barragem de rejeitos, e busca controles para prevenção da ocorrência e mitigação das consequências deste tipo de acidente, utiliza a ferramenta BTA.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho é de uma pesquisa descritiva, de fontes secundárias, pela realização de um levantamento bibliográfico na literatura sobre o assunto, em busca de seus primeiros objetivos específicos: a identificação das principais ameaças que poderiam causar uma ruptura de barragens, das consequências que este acidente pode causar, e de controles de prevenção, que impeçam ou reduzam a probabilidade de ocorrência do evento, e de controles de recuperação, que previnam ou minimizem as suas consequências.

Estas são as etapas iniciais para uma Análise de Riscos, onde deve-se identificar e compreender as causas e consequências dos riscos associados a um evento, sistema, incidente ou processo. Após uma breve comparação das principais técnicas de Análise de Riscos e métodos de seleção, este trabalho parte para seu objetivo geral, escolhendo a técnica BTA (BowTie Analysis) ou análise da gravata borboleta.

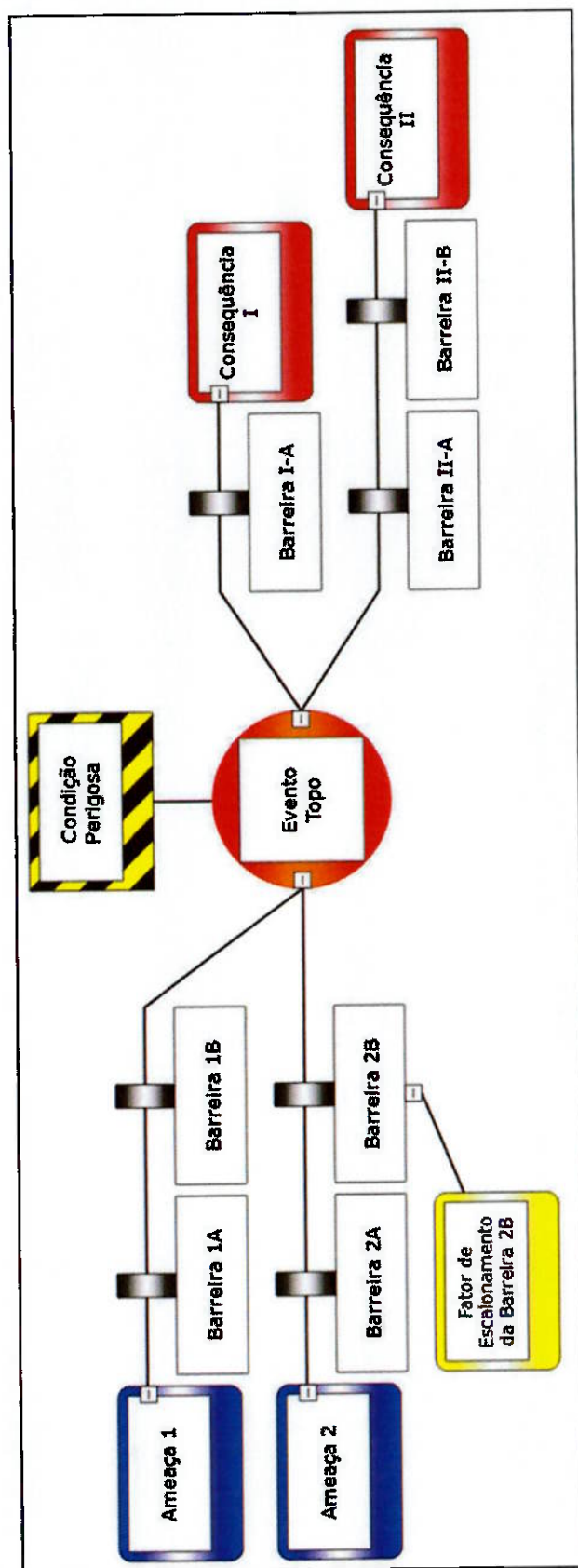
Com este método de Análise de Risco, obtém-se um diagrama *bowtie* que permite a visualização das causas de um evento topo e suas possíveis consequências. O diagrama coloca o evento em seu centro. Enquanto linhas o conectam às causas a sua esquerda e às consequências a sua direita, ficando no formato de uma gravata borboleta e por isso seu nome.

A criação do diagrama *bowtie* foi realizado com o auxílio do *software BowTieXP*, criado pela *CGE Risk Management Solutions*. Este *software* permite a construção, o ajuste e a reorganização da representação gráfica das ameaças, consequências e controles, além de fatores de escalonamento, que são condições que podem levar a um aumento de risco ao eliminar ou reduzir a eficácia de uma das barreiras ou controles. Na Figura 6, vê-se o esquema básico de um diagrama *bowtie* produzido pelo *software*.

Durante sua construção, colocam-se os dois tipos de barreiras: as que impedem que uma determinada causa possa vir à fruição e gerar o incidente, denominadas de controles de prevenção, são postas nas linhas entre a causa e o perigo; e as que impedem que o perigo possa causar uma determinada consequência, denominadas de controles de prevenção, são postas nas linhas entre a consequência e o perigo.

Dessa forma, é possível ter uma visão geral de quais são as causas que estão menos controladas, e que possuem maior probabilidade de vir a causar o perigo, além de avaliar as barreiras que estão postas para impedir que a ocorrência venha a causar consequências mais graves. E com esta visão do cenário, pode-se trabalhar para melhorá-lo, focando em seus pontos mais fracos e reforçando seus pontos mais fortes.

Figura 6 - Diagrama BowTie Genérico Produzido pelo Software BowTieXP



Fonte: Elaboração Própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão relacionadas as ameaças, controles de prevenção, consequências e controles de recuperação identificados através do levantamento bibliográfico. Conforme as definições propostas no item 3.2.1, a condição perigosa (*hazard*) é a própria barragem de rejeitos. E o evento topo a ser analisado é a ruptura da barragem.

5.1 AMEAÇAS E CONTROLES DE PREVENÇÃO

- Falha no Projeto ou Construção

Muito embora grande parte dos acidentes estejam associados a algum fenômeno natural, o projeto adequado da barragem deve antecipar estas condições através de extensivos estudos das condições geológicas, geográficas, hidrológicas e climáticas do local onde a barragem irá ser construída. Segundo Franco (2016), o projeto deve incluir a concepção do sistema de disposição de rejeitos, investigações de campo e de laboratório, estudos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos.

Os estudos geotécnicos adequados são a primeira e mais importante medida de controle desta falha, uma vez que todo o projeto será baseado nos conhecimentos adquiridos nestes estudos. Eles devem avaliar como deve ser realizado o controle de fluxo através do corpo da barragem, das fundações e das interfaces; a estabilidade dos taludes a montante e a jusante; a compatibilidade das deformações; e a proteção contra a erosão superficial dos taludes (SOUZA, 2013).

A escolha de profissionais competentes e responsáveis para a realização do projeto e eventuais treinamentos e certificações a serem oferecidos a esta equipe também é uma medida de controle, para garantir que ele seja planejado e executado devidamente. E ainda, o projeto deve seguir as normas e regulamentações previstas na legislação, e as recomendações de projeto e construção de barragens emitidas por instituições especializadas, como o ICOLD (*International Commission on Large Dams*).

Uma outra medida de prevenção que pode ser tomada é a contratação de auditorias externas que verifique, se possível, em todas as fases de projeto, de construção, de desenvolvimento e de operação, a adequação do projetos e das obras executadas.

- Falhas na Operação, Manutenção ou Alçamento

A operação deve seguir atentamente às normas e condições de projeto e performance do sistema, e para isto os procedimentos necessários para diversas situações de operação, incluindo, parada, emergência e manutenção, devem estar escritos de forma clara, objetiva e amigável. A emissão e o registro de relatórios das condições de operação podem ser extremamente úteis para eventuais intervenções corretivas de segurança.

Os operadores devem receber treinamentos que lhes forneçam as competências necessárias para operar o sistema de maneira segura e eficiente, tomar as decisões adequadas à

situação e poder reportar as condições atuais e possíveis problemas enfrentados a seus supervisores e aos operadores do próximo turno.

A ABMS (2016), Associação Brasileira de Mecânicas dos Solos e Engenharia Geotécnica, recomenda como medida de prevenção que o responsável pela segurança das barragens de disposição de rejeitos reporte diretamente à alta direção executiva da empresa, já que muitas vezes estes profissionais ficam sob a gerência da produção, e neste caso, poderiam ser pressionados a permitir a continuidade da operação mesmo se houverem sinais de problemas, para não prejudicar a produtividade.

- Falhas Estruturais

Falhas estruturais podem ser dos diversos modos de falha como *piping*, liquefação, transbordamento, subsidência da fundação e instabilidade dos taludes, e foram agrupados nesta categoria por possuírem controles semelhantes. Além das considerações de projeto e construção feitas anteriormente, a inspeção frequente, fiscalização, monitoramento, presença de instrumentação e manutenção adequada representam os principais controles para a prevenção desse tipo de ocorrência (COSTA, 2012).

O projeto deve ter considerado a máxima pluviosidade decamilenar e possíveis eventualidades na operação que possam causar um aumento expressivo na vazão de rejeitos da usina. E o controle do nível, vazão e pressão na barragem deve, se possível, ser feito continuamente através de instrumentação apropriada.

Silveira (2006) recomenda que o monitoramento, utilizando instrumentação geotécnica, deve ser planejado paralelamente ao projeto e a construção da barragem, para a definição do tipo de piezômetro a se utilizar, como será realizado o monitoramento topográfico, entre outros. Além da calibração periódica dos instrumentos e da análise frequente dos dados obtidos para agilizar a decisão pela implementação de medidas corretivas, se necessária.

Um excelente controle de prevenção que permite reduzir esta ameaça é a implantação de medidas que possam reduzir a quantidade de rejeito gerado pela usina, como espessamento, filtragem e aumentar a recuperação. Aliadas a estas, é possível realizar também a secagem de parte do rejeito, para que este possa ser estocado em pilhas, utilizado como *backfill* ou até mesmo ser aproveitado ou vendido como material de construção, quando suas características mineralógicas permitirem (PEIXOTO, 2012).

- Solicitações Imprevisíveis ou Incertezas Geológicas

Devido à impossibilidade de se conhecer perfeitamente todos os detalhes da geologia da local, engenharia geotécnica trabalha com modelos para a formulação de suas conclusões sobre as camadas, estruturas geológicas e possíveis falhas do local (HACHICH, 2004). Como essas incertezas não podem ser eliminados, deve-se investir em estudos geotécnicos mais aprofundados durante a avaliação preliminar, e no desenvolvimento e no uso de modelos matemáticos e computacionais mais avançados.

5.2 CONSEQUÊNCIAS E CONTROLES DE RECUPERAÇÃO

Mesmo após a ocorrência da ruptura, ainda existem medidas que podem ser tomadas para a redução dos danos causados. As principais consequências e medidas de controle de recuperação são:

- Impacto Ambiental

Grandes danos ambientais podem ser causados pela ruptura de uma barragem, mesmo quando a barragem não contém substâncias tóxicas, a passagem da lama devasta o ecossistema a jusante, danificando as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, reduzindo a qualidade dos recursos ambientais e prejudicando a biota, podendo causar até a extinção de espécies da fauna e flora local.

A principal forma de controle deste dano é a construção de uma barragem de contenção, que possa suportar ou reduzir o volume de lama que será despejado rio abaixo. Também podem ser aplicadas medidas de recuperação ambiental após o acidente, em busca de recuperação da área degradada.

- Perda de Vidas

Existem *softwares* que fazem a modelagem e simulação da ruptura da barragem, utilizando dados geológicos e hidrológicos da região, permitindo a determinação de um mapa de inundação. Havendo a existência de vilas ou cidades a jusante da barragem, é possível que um acidente possa vir a causar perda de vidas. A implantação de um Plano de Ação Emergencial, a implementação de um sistema que avise estes residentes com antecedência de uma possível ruptura, e se possível, exercício de abandono são as principais barreiras para reduzir ou evitar esta consequência.

- Impacto Social

Após a ocorrência de uma ruptura, se o derramamento de lama não puder ser contido, pode ocorrer perda de infraestrutura viária, perda de terras produtivas, alteração na oferta de emprego, entre outros (PEREIRA, 2009). Um bom Plano de Ação Emergencial, boa comunicação com os residentes a jusante da barragem, e ações sociais da mineradora na comunidade são formas de reduzir este impacto.

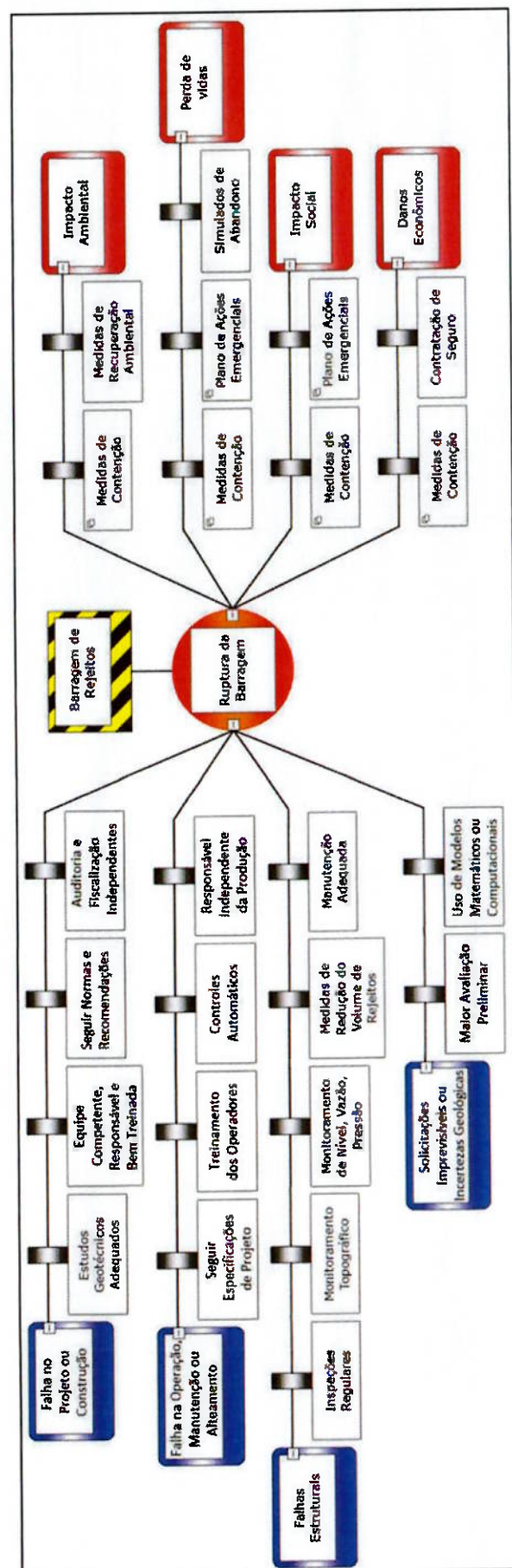
- Danos Econômicos

Uma vez ocorrido o acidente, perdas econômicas com certeza incorrerão devido a parada na mina, perda de produção, danos materiais na mina, na usina ou até nas estradas próximas, além de possíveis multas por dano ambiental, social ou patrimonial causado. Além da existência de um sistema de contenção que possa reduzir as proporções do dano causado, a contratação de um seguro é uma possível medida de redução de perdas econômicas.

5.3 DIAGRAMA *BOWTIE*

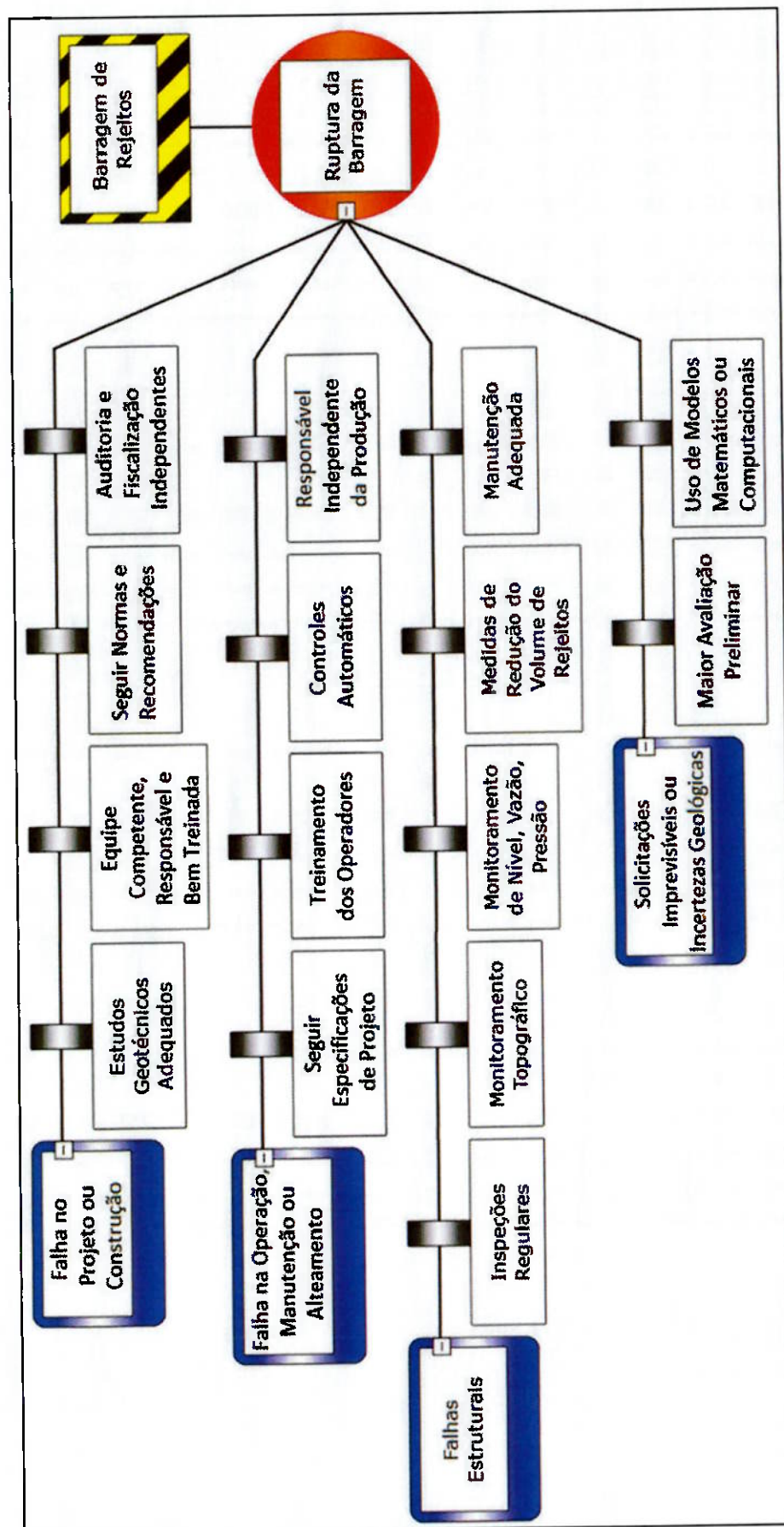
Sumarizando as ameaças, consequências e controles identificados, e com bases nas relações estabelecidas em análises similares como Davies et al. (2002), McLeod (2016), Mills (2016), Satarla (2016) e WISE (2016), foi construído, com o auxílio do software *BowTieXP*, o diagrama *BowTie*, que é apresentado por completo na Figura 7, e para possibilitar uma melhor visualização, é apresentado em detalhe na Figura 8, que mostra seu o lado esquerdo, com as ameaças e os controles de prevenção; e na Figura 9, que mostra o seu lado direito, com suas consequências e controles de recuperação.

Figura 7 - BowTie Completo da Ruptura de uma Barragem



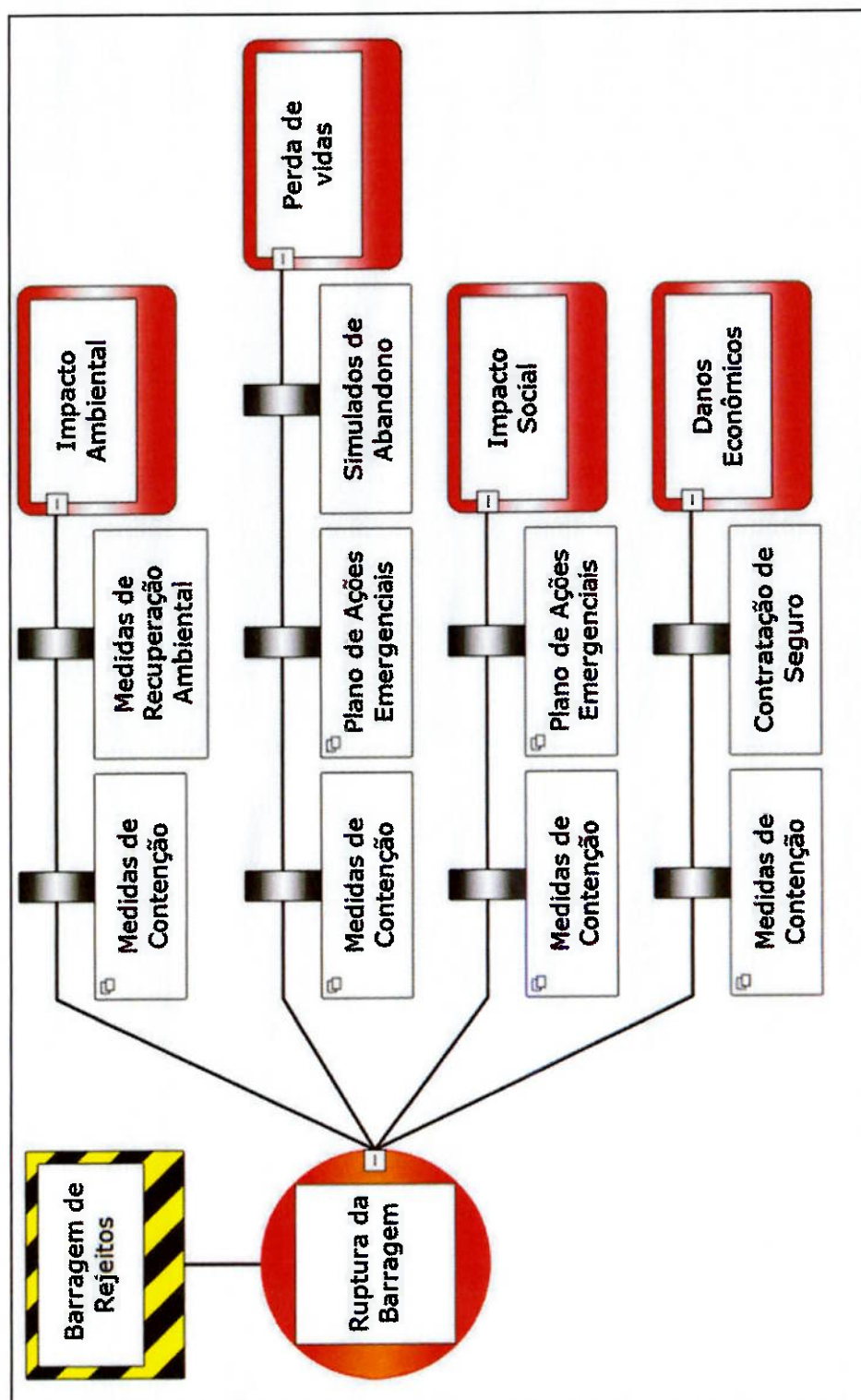
Fonte: Elaboração Própria

Figura 8 - Detalhe do BowTie (Lado Esquerdo) - Ameaças e Controles de Prevenção



Fonte: Elaboração Própria

Figura 9- Detalhe do BowTie (Lado Direito) - Consequências e Controles de Recuperação



Fonte: Elaboração Própria

6. CONCLUSÕES

A barragem de rejeitos é um equipamento necessário na maior parte dos empreendimentos de mineração, principalmente nos de maior porte, já que a secagem total do grande volume de rejeitos gerado no processo de beneficiamento teria um custo proibitivo, impedindo a viabilidade econômica do projeto. Assim, como a eliminação da condição perigosa, que é a barragem, é inviável. O gerenciamento dos riscos por ela gerados é necessário.

Com a identificação das principais ameaças, controles de prevenção, consequências e controles de recuperação realizadas neste trabalho, e com o diagrama obtido pelo método *bowtie*, pode-se verificar que existem diversos controles que podem ser utilizados para a redução dos riscos de uma ruptura, e que quando aliadas, podem representar um eficaz sistema de gerenciamento de riscos e de prevenção de um acidente.

Contudo, apesar da existência de tecnologias de instrumentação que permitem o monitoramento contínuo das condições de operação de barragens, desde medidores de pressão, de nível e vazões até sistemas de monitoramento topográfico, a maior parte das minerações ainda não os utiliza, dificultando o trabalho de prevenção de incidentes. Muitas delas não realizaram estudos adequados, ou foram projetadas sem levar em consideração condições críticas, desde problemas na operação até eventos da natureza, como sismicidades ou alta pluviosidade. Algumas são construídas com materiais de má qualidade, sem a devida compactação, ou sem a implantação dos diversos sistemas de drenagem disponíveis. Durante a operação, em muitos casos, não são realizadas inspeções frequentemente, ou se realizam de forma superficial, para “preencher relatórios”, o que impede que a devida manutenção seja realizada.

O motivo mais comumente citado para estas más práticas é a falta de recursos ou a meta de lucros. A engenharia de minas e a engenharia de segurança devem se aliar na busca de mudança de cultura e conscientização do setor de que este tipo de atitude não é econômica. Os possíveis prejuízos que as consequências de um acidente vão além da perda de produção, parada da operação, fechamento da mina, perda de todo o valor nela investido, ou de eventuais multas que possam vir a ser pagas, pois podem custar vidas.

Antes da ocorrência de novos grandes acidentes como Mt. Polley no Canadá, Hpakant em Myanmar, Dahegou na China e Mariana no Brasil, a mineração e todos nela envolvidos devem se voltar à busca de melhores soluções, melhores controles, redução do volume rejeito produzido. Barragens de contenção de rejeitos de mineração são condições perigosas, todavia, não é por isso que elas devem deixar de existir. Existem diversas técnicas que permitem a redução do risco de uma ruptura, se estas técnicas forem implementadas e acompanhadas, aliadas de um gerenciamento de riscos de maneira apropriada e cuidadosa, a prevenção de acidentes é possível.

REFERÊNCIAS

- ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica). **Carta Aberta da ABMS sobre Barragens de Disposição de Rejeitos**. 2016. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/links/Carta%20Aberta%20201610%20-%20Mineracao.pdf>> Acesso em: 12 nov. 2016.
- ARCOVERDE, W. L. (DNPM). **Situação Atual do Controle de Barragens de Mineração no Brasil**. Seminário Técnico - Barragens de Mineração (SEM-SP). Anais. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2016. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/885.pdf>> Acesso em: 16 set. 2016.
- BRASIL. **Lei n.º 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União. Brasília, DF, n. 181, Seção 1, p. 1 - 3, 21 set. 2010.
- BRASIL. **Portaria n.º 416**, de 03 de setembro de 2012, do Departamento Nacional de Produção Mineral. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União. Brasília, DF, n. 173, Seção 1, p. 77 - 80, 5 set. 2012.
- COLLE, Giselle de A. **Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens Segundo a Segurança**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba (PR), 2008.
- COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.
- DAVIES, Michael P.; LIGHTHALL, Steve R.; MARTIN, Todd E. **Design of Tailing Dams and Impoundments**. SME, AGM. Phoenix, AZ, EUA, 2002. Disponível em: <<http://www.infomine.com/library/publications/docs/Davies2002b.pdf>> Acesso em: 07 jun. 2016.
- DE ÁVILA, Joaquim P. (Pimenta De Avila Consultoria Ltda). **Acidentes em Barragens de Rejeitos no Brasil**. Seminário Técnico - Barragens de Mineração (SEM-SP). Anais. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2016. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/871.pdf>> Acesso em: 16 set. 2016.
- FRANCO, Dinésio. **Riscos em Barragens de Rejeitos de Mineração**. III Congresso de Desenvolvimento e Riscos no Contexto Latino Americano. Sociedade de Análise de Risco Latino Americana SRA-LA. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://abge.org.br/uploads/arquivos/apresentacaodinesio2016053115330438983.pdf>> Acesso em: 16 set. 2016.

HACHICH, Waldemar Coelho. Et al. **Análise tridimensional das tensões em uma barragem e suas fundações: implicações para a avaliação da segurança da obra.** Congresso Nacional de Geotecnia. Actas: Conferências: passado, presente e futuro da geotecnia. Aveiro, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2004. v.4, p.111-132.

HADZI-NIKOLOVA, M.; MIRAKOVSKI, D.; STEFANOVA, V. **Risk Assessment of Tailings Facility Dam Failure.** 3rd International workshop on the project: Antropogenic effects on the human environment in the Neogene basins in the SE Europe. 2011.

IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração). **Informações sobre a Economia Mineral Brasileira** 2015. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>> Acesso em: 17 set. 2016.

ICOLD (International Commission on Large Dams). **Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences.** Bulletin 121. Paris (França), 2001.

JÓNATAS, Ricardo J. L. **Rotura de Barragens de Aterro por Galgamento: Ensaios Experimentais com Aterros Homogêneos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Universidade de Lisboa. Lisboa, 2013.

KOCHEN, Roberto. **Construção de Barragens: Controle de Riscos.** Revista Fundações & Obras Geotécnicas, São Paulo, v. 1, n. 10, p.28-31, 2011.

LAPA, Reginaldo P.; GOES, Maria Luiza S. **Investigação e Análise de Incidentes.** 1 ed. São Paulo: Edicon, 2011.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo (SP), 2006.

MAFRA, J. M. Q. (VOGBR). **Construção de Barragens de Rejeitos de Mineração.** Seminário Técnico - Barragens de Mineração (SEM-SP). Anais. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração, 2016. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/872.pdf>> Acesso em: 16 set. 2016.

MARTINS, Alessandra. I. S. **Gerência de Riscos.** Notas de Aula do Curso de Pós-Graduação de Engenharia de Segurança do Trabalho do Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2016a. (não publicado).

MARTINS, Alessandra. I. S.; LAPA, Reginaldo P. **Gerência de Riscos.** Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho do Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016b.

McLEOD, Ronald W. **Designing for Human Reliability: Human Factors Engineering in the Oil, Gas, and Process Industries.** Oxford: Gulf Professional Publishing, 2015.

MILLS, Russel (GHD). **Black Swans, Bowties and Critical Controls.** International Mine Management Conference 2016. Brisbane (Austrália), 2016. Disponível em:

<http://www.immconference.ausimm.com.au/Media/IMM2016/presentations/1600_Russel_Mills.pdf> Acesso em: 17 set. 2016.

PEREIRA, F. M. da S. **Gestão de Riscos e Plano de Ações Emergenciais Aplicado à Barragem de Contenção de Rejeitos Casa da Pedra/CSN**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto (MG), 2009.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de Nova Metodologia de Desaguamento de Rejeitos em Polpa**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto (MG), 2012.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; Et al. **Reported Tailings Dam Failures: A review of the European Incidents in the Worldwide Context**. Journal of Hazardous Materials, Elsevier, 2007.

SATARLA. **Risk bowtie – Tailings Dam Failure Example**. Disponível em: <<http://www.satarla.com/risk-bowtie---tailings-dam-failure-example.html>> Acesso em: 17 set. 2016

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. Oficina de Textos. 2006. 416 p.

SOUZA, M. M. **Estudo para o Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC**. Projeto de Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (RJ), 2013.

SZNELWAR, José Jaime (Org.). **Barragens de Mineração no Estado de São Paulo: Diagnósticos e Recomendações**. Relatório do Grupo de Trabalho Segurança de Barragens. São Paulo: Secretaria de Energia e Mineração do Governo do Estado de São Paulo, 2016.

VICK, Steven G. **Planning, Design, and Analysis of Tailing Dams**. John Wiley & Sons. Nova Iorque (EUA), 1983. 396 p.

WALL STREET JOURNAL. **Vale Looks to Sell Core Assets to Reduce Debt**. Disponível em: <<http://www.wsj.com/articles/vale-looks-to-sell-core-assets-to-reduce-debt-1456422292>> Acesso em: 17 set. 2016.

WISE Uranium Project. **Tailings Dam Safety**. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/indexm.html>> Acesso em: 17 set. 2016.