



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
DEPARTAMENTO DE MINAS CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

ESTUDO E ANÁLISE DE METODOLOGIAS PREVENTIVA PARA SEGURANÇA
DE BARRAGENS

ISABELLA FERNANDES VALERIO

ORIENTADOR

Dr. FELIPE DE MORAES RUSSO

ARAXÁ
2016

ISABELLA FERNANDES VALERIO

ESTUDO E ANÁLISE DE METODOLOGIAS PREVENTIVA PARA SEGURANÇA
DE BARRAGENS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de
Educação tecnológica de Minas Gerais, Unidade Araxá, como
requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de
Minas.

Data de aprovação: 17 / 08 / 2016

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Felipe Moraes Russo – CEFET/ARAXÁ
Presidente da Banca Examinadora - Orientador



Prof. MSc. Silvania Alves Braga – CEFET/ARAXÁ



Prof. Dr. Mauricio Antônio Carneiro – CEFET/ARAXÁ

Aos meus queridos pais e irmãos (Raísa e Caíque)
vocês são o que tenho de mais valioso na vida. A
todos vocês devo uma gratidão eterna e todo o
carinho do mundo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu amado Pai e ao meu querido Padrinho, pois sem eles eu não chegaria até aonde cheguei. Vocês são um exemplo de vida, admiro a coragem e a força de vocês.

Agradeço aos meus familiares que me deram força e suporte para continuar na batalha em me tornar engenheira. Mãe obrigada pelos ótimos conselhos, seu carinho e admiração pelos meus estudos foram imprescindíveis para eu alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador pela paciência e dedicação, na qual me proporcionou um enorme conhecimento e inspiração, que me permitiu concluir este estudo de forma gratificante. Você com certeza foi uma peça fundamental para conclusão e dedicação do meu curso.

A um querido professor, Dr. Mauricio deixo um agradecimento pelo carinho e por não medir esforços ao compartilhar todo seu conhecimento para a elaboração deste trabalho.

Meus colegas e amigos, deixo um muito obrigado por estarem comigo sempre que precisei. Sentirei a falta de vocês no dia a dia.

Por fim, agradeço a todos que fizeram com que hoje possa estar concluindo esta jornada, e que chegasse ao seu fim de forma tão satisfatória.

Muito obrigado a todos.

"Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho." Dalai Lama

RESUMO

Dado o elevado risco e a severidade de uma eventual ruptura de uma barragem de rejeitos, fez-se necessário uma legislação específica para regulamentar a sua existência. Em consequência, as empresas mineradoras foram obrigadas a cumprir uma nova demanda legal, gerando uma rotina de segurança e gerenciamento operacional das barragens garantindo, desta forma, o atendimento à nova lei. A exigência de confiabilidade e estabilidade em uma operação demanda um gerenciamento de riscos bem elaborado. Desta forma, este estudo será desenvolvido através da apresentação de análises preventivas utilizando duas metodologias distintas. O Sistema Integrado de Gestão de Barragens (SIGBAR) e a Análise de Causa e Efeito do tipo FMEA são ferramentas que permitem oferecer uma melhor segurança e estabilidade apresentando os principais pontos críticos na segurança de barragens e trabalhando em conjunto com a nova demanda legal conseguem estabelecer os critérios de segurança necessários para uma barragem de rejeito.

Palavras Chaves: Prevenção; Segurança; Barragem de Rejeito, SIGBAR, FMEA.

ABSTRACT

Given the high risk and severity of a possible rupture of a tailing dam, it was necessary a specific legislation to regulate their existence. As result, mining companies were required to fulfill a new legal demand, creating a safety routine and operational management of dams, ensuring, the compliance of the new law. The requirement of reliability and stability in an operation requires a well-designed risk management. Thus, this study will be developed by presenting preventive analysis using two different methodologies: The Integrated Management Dams Sistema Integrado de Gestão de Barragens (SIGBAR) and the Cause and Effect Analysis FMEA type. Those are tools that allow us to offer better security and stability presenting main critical points in dam safety and working together with the new legal demand, that can establish the necessary security criteria for a tailing dam.

Key Words: Prevention; Safety; Dam reject, SIGBAR, FMEA.

ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 2.1- Método construtivo a montante (Albuquerque-Filho 2004) | 18 |
| Figura 2.2 Método construtivo a jusante (Albuquerque-Filho 2004) | 19 |
| Figura 2.3 Método construtivo de linhas de centro (Albuquerque-Filho 2004) | 20 |
| Figura 2.4 Cadastramento de Barragens no DNPM. (Cruz & Neves 2012) | 28 |
| Figura 2.5 Potencial de risco associados às barragens de mineração. (Cruz & Neves 2012) | 28 |
| Figura 2.6 Potencial de danos associados as barragens. (Cruz & Neves 2012)..... | 29 |
| Figura 2.7 Módulos competentes ao sistema SIGBAR. | 34 |
| Figura 2.8 Exemplo ilustrativo de aplicação do método FMEA. (Modificada CNGB 2005). | 35 |
| Figura 3.1 Exemplo de como deve ser um organograma de responsáveis e responsabilidades. (Modificada Geoconsultoria)..... | 40 |
| Figura 3.2 - Exemplo de dados de uma barragem de rejeitos (Geoconsultoria). | 41 |
| Figura 3.3 Exemplo de uma planta cadastral. (Geoconsultoria)..... | 41 |
| Figura 3.4 Exemplo de estaqueamento de estruturas lineares (Geoconsultoria). | 42 |
| Figura 3.5 Numeração das estacas (Geoconsultoria). | 43 |
| Figura 3.6 Modelo de ficha de inspeção. (Geoconsultoria). | 46 |
| Figura 3.7 Critérios de avaliação da inspeção de campo (Geoconsultoria). | 46 |
| Figura 3.8 Descrição dos critérios de avaliação da inspeção de campo. (Geoconsultoria)..... | 47 |
| Figura 3.9 Apresentação acessível de dados em painéis. (Geoconsultoria)..... | 48 |
| Figura 3.10 Localização da barragem E da Vale Fertilizantes em Araxá (Google Earth). | 50 |
| Figura 3.11 Vista ampliada da Barragem E da vale Fertilizantes em Araxá..... | 50 |
| Figura 3.12 Vista frontal da barragem | 51 |

TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 Alguns dos mecanismos de falha em barragens de rejeitos, suas causas e ações que podem ser tomadas (Valerius 2014) | 22 |
| Tabela 2.2 Estatísticas recentes (Ávila 2009) | 26 |
| Tabela 3.1 Matriz de classificação de barragens | 51 |
| Tabela 3.2 Matriz de risco- Inquietação Pública e Imagem..... | 53 |
| Tabela 3.3 Agência Reguladora | 54 |
| Tabela 3.4 FMEA Barragem E | 56 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 | <i>Apresentação</i> | <i>11</i> |
| 1.1 | <i>Justificativa</i> | <i>11</i> |
| 1.3. | <i>Objetivos</i> | <i>12</i> |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – O CENÁRIO DAS BARRAGENS DE REJEITO | 14 |
| 2.1 | <i>As barragens de rejeito</i> | <i>14</i> |
| 2.2. | <i>Disposições de rejeitos e a segurança operacional</i> | <i>16</i> |
| 2.2.1 | <i>Método a Montante</i> | <i>18</i> |
| 2.2.2 | <i>Método a Jusante</i> | <i>19</i> |
| 2.2.3 | <i>Método de Linha de Centro</i> | <i>20</i> |
| 2.3. | <i>Tipos de rupturas em barragens de rejeito</i> | <i>21</i> |
| 2.3.1 | <i>Erosão Interna (Piping)</i> | <i>21</i> |
| 2.3.2 | <i>Galgamento.....</i> | <i>23</i> |
| 2.3.3 | <i>Ruptura por Fundação</i> | <i>24</i> |
| 2.4. | <i>Barragens – segurança e a Lei 12.334.....</i> | <i>25</i> |
| 2.5. | <i>Manual de segurança e plano de ação emergencial.....</i> | <i>31</i> |
| 2.6. | <i>Metodologias de análises preventivas</i> | <i>33</i> |
| 2.6.1. | <i>Análise tipo SIGBAR</i> | <i>33</i> |
| 2.6.2. | <i>Análise tipo FMEA</i> | <i>34</i> |
| 3. | METODOLOGIAS DE ANÁLISES PREVENTIVAS..... | 38 |
| 3.1 | <i>Sistema integrado de gestão de segurança de barragens</i> | <i>38</i> |
| i. | <i>Módulo Prelim</i> | <i>39</i> |
| ii. | <i>Módulo Documenta</i> | <i>44</i> |
| iii. | <i>Módulo Monitora.....</i> | <i>44</i> |
| iv. | <i>Módulo Avalia</i> | <i>46</i> |
| v. | <i>Módulo Gvista</i> | <i>47</i> |
| vi. | <i>Módulo Treinar</i> | <i>48</i> |
| 3.2. | <i>Análise do tipo e efeito de falha.....</i> | <i>49</i> |
| 4. | DISCUSSÕES E ANÁLISES DAS METODOLOGIAS APRESENTADAS | 2 |
| 5. | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS COMPLEMENTARES..... | 4 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 6 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

De acordo com (Abraão & Oliveira 1998) a mineração pode ser entendida por um conjunto de atividades necessárias para a extração com fins econômicos de minerais da crosta terrestre. A geração de resíduos é uma das características inevitáveis da produção mineral, onde os estéreis e os rejeitos são os mais comuns em quase todos os tipos de minerações.

Os rejeitos são materiais sem valor econômico no mercado e que não são aproveitados no processo de beneficiamento. Geralmente são encaminhados para uma barragem, que pode ser associada à captação de água.

As barragens são estruturas capazes de conter os rejeitos. Suas características estruturais vão depender de diversos fatores, desde suas dimensões, o composto do solo e principalmente do tipo de material que será reservado no local. Desta forma, uma série de análises devem ser realizadas de maneira a garantir o adequado funcionamento da estrutura, de forma que esta seja capaz de sustentar as operações da usina.

1.1 Justificativa

A mineração é uma importante atividade na economia brasileira, essencial para o desenvolvimento do país. Porém, os riscos envolvidos em suas operações são elevados. O cuidado e a segurança operacional passam a se tornar fundamentais para o progresso e desenvolvimento operações de barragens.

Em vista do aumento contínuo do consumo mineral, é necessária a elaboração e implantação de projetos cada vez maiores para atender às demandas da unidade mineradora. Muitas vezes tornam-se imprescindível que as estruturas das barragens tomem grandes dimensões. As superestruturas

potencializam os riscos envolvidos o que por sua vez exige uma melhor gestão segurança operacional das barragens.

Dado os acidentes já observados e ao elevado risco e a severidade de uma eventual ruptura dessas estruturas, fez-se necessário uma legislação específica, como a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, para regulamentar a sua existência (Brasil 2010). Em consequência, as empresas mineradoras foram obrigadas a cumprir essa nova demanda legal. O novo código de barragens passa a exigir uma rotina de segurança operacional mais detalhada, garantindo, desta forma, a estabilidade e a confiabilidade do maciço atendendo à nova lei.

1.3. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é o estudo dos principais pontos críticos na segurança de barragens, e sua avaliação será feita a partir de algumas metodologias já consagradas como a análise do tipo FMEA (*Failure Mode and Effect analysis*) e o SIGBAR (Sistema de Gestão Integrada de Barragens).

Diante disso, temos que as metodologias citadas se auto complementam e juntas são uma forte ferramenta para garantir o atendimento às demandas necessárias para o cumprimento da lei 12.334. Com o foco regulamentador passam a assegurar a operacionalidade e a gestão de segurança das barragens do país.

Por fim, este trabalho tem o objetivo específico discutir métodos para a melhoria na gestão de segurança de barragens de rejeito. Será abordada ao longo do texto uma análise sobre a estabilidade dos maciços, expondo os riscos que estas estruturas representam durante as operações minerárias na contenção dos rejeitos.

Desta forma, este trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

Resumo/ Abstract: Descreve uma síntese do tema proposto, expondo de forma rápida as principais ideias e metodologias a serem abordadas.

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta a justificativa que levou a real motivação do trabalho. Retrata a visão geral que será apresentada e desenvolvida no decorrer da pesquisa, apresentando os objetivos e ressaltando a importância do assunto no contexto atual da mineração.

Capítulo 2 – Revisões Bibliográficas: Tem sua motivação para o melhor conhecimento e contextualização do tema proposto, destacando alguns pontos principais para a adequação e compreensão efetiva do assunto. Contém uma base para entendimento da metodologia, abordando argumentos encontrados na literatura.

Capítulo 3 – Metodologias de Trabalho: Será realizada uma proposta de problemas que podem ocorrer durante uma operação de barragens. Assim, será simulada a implementação e desenvolvimento das metodologias SIBGAR e FMEA, mostrando a efetividade dos critérios a serem abordados.

Capítulo 4 - Discussões e análises das metodologias: Serão feitas considerações sobre os modelos e análises apresentados, relatando as observações encontradas, além de apresentação de comentários sobre os dados apresentados, mostrando a visão geral dos resultados.

Capítulo 5 - Conclusões e sugestões para futuras pesquisas: Refere-se às considerações finais, retomando os principais problemas discutidos e as conclusões possíveis alcançadas. Serão tratadas as falhas presentes no estudo dos princípios das metodologias apresentadas sendo capaz de provar a eficiência das análises. Ao final do trabalho, é apresentada uma ideia para futuras pesquisas e trabalhos a serem desenvolvidos.

Capítulo 6 - Referências Bibliográficas: Remete a fonte das informações que foram utilizadas no decorrer do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – O CENÁRIO DAS BARRAGENS DE REJEITO

Neste capítulo ficará exposto à revisão bibliográfica encontrada na literatura para um maior auxílio e compreensão do assunto a ser abordado, dentro do contexto de mineração. Um melhor domínio a respeito dos temas que serão tratados traz uma análise minuciosa do cenário em que se encontram as barragens de rejeito, trazendo um levantamento bibliográfico sobre a gestão de segurança de barragens.

2.1 As barragens de rejeito

As barragens de rejeitos são estruturas com o propósito de se tornarem o depósito dos resíduos provenientes do tratamento de minério. Além deste fim, as mesmas podem ser associadas com a captação de água, o que pode aumentar significativamente seu volume e por consequências os riscos e impactos de uma eventual ruptura.

A exigência de uma boa gestão de riscos e segurança passa a ser indispensável para um bom desempenho e funcionalidade das barragens de rejeito. Desta forma, estudos cuidadosos devem ser feitos de forma detalhada de modo a garantir segurança e estabilidade, e ao mesmo tempo atender as especificações necessárias à demanda mineral de disposição dos rejeitos gerados e da qualidade da água para recirculação.

Grandes volumes de rejeitos envolvidos nos processos minerais geram alguns problemas operacionais e estruturais nas barragens. As grandes dimensões ocasionam um elevado risco na estabilidade, aumentando o grau de periculosidade da operação e conseqüentemente se vê em risco uma eventual ruptura do maciço. Por isto, é necessário que durante a fase de implementação das barragens não se deve medir gastos, uma boa fundação garante uma estrutura adequada aos padrões de segurança.

De acordo com (Duarte 2008), algumas falhas ocorridas em barragens de contenção de rejeitos custaram vidas e causaram danos ambientais

consideráveis. Acidentes graves resultaram em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. Têm-se também os reservatórios de rejeitos cada vez maiores, envolvendo muitas vezes efluentes tóxicos e outros materiais potencialmente perigosos.

Tendo em vista o potencial dano ambiental causado por uma eventual ruptura, os problemas econômicos e sociais que serão enfrentados é de fundamental importância o monitoramento periódico do maciço. Os projetos de barragens necessitam de uma boa engenharia para garantir o seu perfeito funcionamento

Cada estrutura se comporta de uma forma e cada novo projeto exige um tratamento individual, garantindo a estabilidade e a segurança operacional. Um projeto bem planejado, executado e operado de forma de maneira correta garante segurança ao longo de sua vida útil e evita gastos futuros com as recuperações de estruturas.

De acordo com (Souza 2008), as barragens de rejeitos são estruturas que seu planejamento se inicia com a procura do local para implantação. Etapa na qual se deve vincular a todo tipo de variável direta e indiretamente que influenciem a obra:

- ✓ Características geológicas;
- ✓ Hidrológicas;
- ✓ Topográficas;
- ✓ Geotécnicas;
- ✓ Aspectos ambientais e sociais;
- ✓ Avaliações de riscos.

Temos também que os volumes de água e as características físico-químicas dos rejeitos vão definir as proporções das barragens, e suas dimensões vão definir a suas características. Têm-se alguns pontos fundamentais e fases de estudos que se tornam indispensáveis para uma boa funcionalidade e operação:

- ✓ **Locação da barragem.** Um estudo locacional é fundamental para o planejamento estratégico. O bombeamento de rejeitos eleva os custos operacionais, quanto mais longe a barragem for da operação maiores os gastos e menos seguro estará.
- ✓ **Investigação geológica e geotécnica de campo.** Atividade a ser realizada com extremo rigor, possui uma delicada análise e investigação do solo, dispõe coletas de amostras sendo necessários ensaios de campo e laboratório, definindo bem a geologia do local.
- ✓ **Estudo hidrológico.** Define os volumes que as barragens receberão em casos de cheias, dimensionando bacias de amortecimento e vertedouros. Estruturas mal dimensionadas causam transbordo, aumentando as chances de ruptura do maciço.
- ✓ **As Bult – Como Construído.** Livro único sobre tudo que ocorre na barragem. Desenhos topográficos, relocação de estrutura, mudança de material, e tudo que for alterado durante o projeto devem estar devidamente documentados e arquivados neste livro.

Com isto, é perceptível a importância de um bom estudo e análise das barragens. São estruturas que são potencialmente perigosas, e podem trazer enormes riscos caso haja uma ruptura, uma boa elaboração de projeto é fundamental para garantir a segurança e estabilidade.

2.2. Disposições de rejeitos e a segurança operacional

De maneira geral os rejeitos podem ser depositados através de instalações subterrâneas, em ambientes subaquáticos, ou o mais comum, sobre a superfície dos terrenos.

Segundo (Santos 2010), a disposição de forma subterrânea envolve o preenchimento de galerias onde o minério já foi extraído e caso sejam seguidos os procedimentos de segurança e ambientais necessários, este método pode-

se mostrar bastante econômico e com menos impacto ambiental. Já a disposição subaquática não é muito utilizada devido ao seu elevado potencial poluidor. Em compensação, a disposição em superfície é a mais aplicada, podendo o material ser disposto em barragens ou diques, em pilhas de rejeito se o material estiver na forma sólida ou na própria mina, em áreas já lavradas ou minas abandonadas.

Porém, a forma de disposição mais habitual, sobre a superfície, consiste em lançar direto nas barragens contidas por diques, os rejeitos. Considerando o uso do próprio rejeito como material de construção para a contenção do material através da técnica de aterro hidráulico ressaltam-se três métodos mais importantes:

- ✓ Método a Montante
- ✓ Método a Jusante
- ✓ Método de linha de centro

Segundo (Lozano 2006), os alteamentos podem assumir diferentes configurações, cada uma com sua característica, especificações, vantagens e desvantagens. Os nomes referem-se à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique inicial.

Para os três casos, inicialmente é feito um dique de partida com o próprio material de rejeito e ao longo do tempo são construídos os alteamentos. Conforme (Santos 2010), os rejeitos são lançados ao longo da crista do dique por ciclones ou por séries de pequenas tubulações, para que haja uma formação uniforme da praia. A sedimentação das partículas dá-se em função do seu tamanho e densidade, isto é, as partículas mais finas e leves ficam em suspensão e transportam-se para o centro da barragem, e as partículas mais grossas e pesadas sedimentam-se rapidamente mais próximo do dique. A diferença entre estes métodos está na direção do alteamento em relação ao dique inicial.

2.2.1 Método a Montante

De acordo com (Russo 2007), o método de montante é considerado a forma mais econômica e de maior facilidade executiva. O seu processo construtivo consiste basicamente na execução de um dique de partida, construído de forma clássica. A partir deste dique, o rejeito é lançado a partir da crista de montante do barramento. Desta forma, surgirá uma praia de deposição que posteriormente servirá de base para o próximo dique periférico e poderá, inclusive, fornecer material para construção do próximo dique. Este processo se repete sucessivamente até que a barragem atinja a sua cota máxima.

O rejeito é lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique (Figura 2.1), formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida.

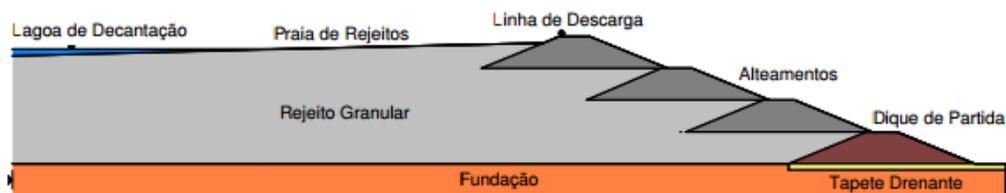


Figura 2.1- Método construtivo a montante (Albuquerque-Filho 2004)

Conforme (Araujo 2006) embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras o método de montante apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactidade fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar

baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos.

De acordo com (Souza *et al.* 2010), as barragens construídas pelo método de Montante, usando principalmente o rejeito como material de construção, possuem algumas desvantagens, tais como dificuldade de controle da superfície freática, redução na capacidade de armazenamento do reservatório, susceptibilidade ao *piping*, superfícies erodíveis e probabilidade de liquefação, no caso de rejeitos granulares, fofos e saturados.

O método a montante é considerado o modelo menos estável de construção de barragens, é um sistema de alteamento que tende ao desuso. É uma técnica de menor custo financeiro de implementação, porém de maior risco de rompimento e instabilidade. A metodologia de lançamento de rejeitos a montante pode ser substituída, de forma a garantir a segurança, para jusante.

2.2.2 Método a Jusante

Segundo (Araújo 2006), neste método, a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, normalmente de solo ou enroscamento compactado. Depois de realizada esta etapa, os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique de partida. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida.

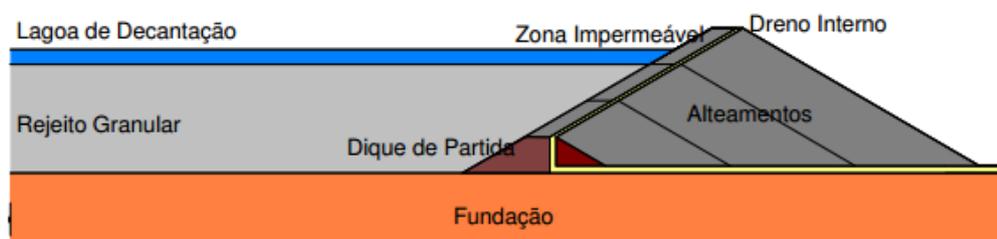


Figura 2.2 Método construtivo a jusante (Albuquerque-Filho 2004)

Segundo (Albuquerque-Filho 2004), a construção de barragens de rejeito pelo método de jusante tem sua origem relacionada com a necessidade

de que os alteamentos sucessíveis não fossem executados sobre o rejeito previamente depositado e pouco consolidado.

Conforme (Souza *et al.* 2010), as principais vantagens desse método são:

- ✓ Resistência a efeitos dinâmicos;
- ✓ Escalonamento da construção sem interferência na segurança;
- ✓ Não interferência na operação dos rejeitos;
- ✓ Facilidade na execução da drenagem interna;
- ✓ Aproveitamento integral das técnicas de barragens convencionais;
- ✓ Possibilidade de comprimento integral das hipóteses de projeto.

Com isso, este método se torna mais consagrado e garante melhor estabilidade e segurança do maciço.

2.2.3 Método de Linha de Centro

Conforme (Araújo 2006), as barragens alteadas pelo método de linha de centro apresentam uma solução intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, apresentando vantagens dos dois métodos anteriores, tentando minimizar suas desvantagens.

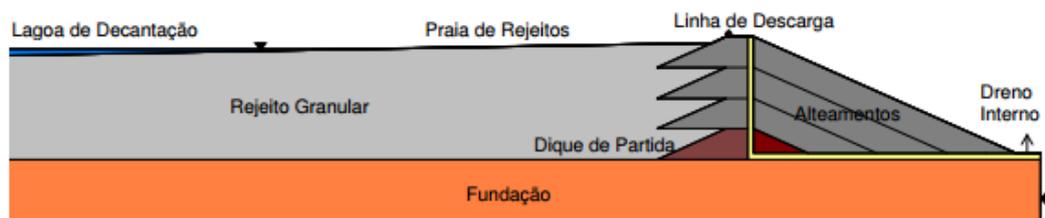


Figura 2.3 Método construtivo de linhas de centro (Albuquerque-Filho 2004)

Russo (2007) afirma que os alteamentos são realizados de forma que a crista de montante não se mova horizontalmente no sentido de montante, mas

sim, verticalmente. Desta forma, torna-se possível, a construção de um sistema de drenagem interno que permite o controle da linha freática dentro do maciço.

Este método é visto como uma solução intermediária entre montante e jusante, é uma técnica que apresenta facilidade construtiva e baixo custo, contudo ainda é apresenta pontos críticos na questão de segurança.

2.3. Tipos de rupturas em barragens de rejeito

Considerando a necessidade de condições normais e seguras das instalações e estabilidade de uma barragem faz-se necessário entender os principais mecanismos de ruptura. A seguir têm-se os principais fatores que podem influenciar na estabilidade do maciço bem como medidas preventivas para o controle de cada situação.

Segundo (Valerius 2014), a partir de análise de casos históricos, constata-se que a maioria dos acidentes com barragens ocorram devido à galgamentos, instabilidade de taludes, erosões internas (*Piping*) e ações externas, todos sob a influência da falta de um monitoramento e controle adequado dos níveis dos reservatórios e da superfície freática dentro dos depósitos. Alguns mecanismos de falha, suas causas e potenciais medidas de estabilização e de restrição à ruptura foram reunidas e são apresentados na Tabela 2.1.

As principais situações de risco envolvendo a ruptura do maciço são: galgamento, *piping* e ruptura pela fundação.

2.3.1 Erosão Interna (*Piping*)

Um motivo recorrente nas rupturas de barragens é a infiltração causada pelos líquidos dentro do maciço, de maneira descontrolada pode acarretar em uma eventual ruptura.

O *piping* é a passagem de água com partículas por dentro da estrutura de terra, originando assim a formação de canais dentro do maciço, trazendo uma instabilidade. Segundo (Francisco-Neto 2010),

“Piping” é a outra forma de ruptura hidráulica, que ocorre nos casos onde se registra erosão, através de carregamento dos grãos do solo pelas forças de percolação, que, embora aconteça internamente, seu mecanismo é semelhante à erosão superficial provocada pela chuva. Seu início se dá num ponto de surgência d’água, progredindo para trás em torno de um filete d’água que arrasta os grãos, cujo resultado é a formação de um tubo, o que leva a ser conhecida também como retroerosão tubular.

Tabela 2.1 Alguns dos mecanismos de falha em barragens de rejeitos, suas causas e ações que podem ser tomadas (Valerius 2014)

| Mecanismo de falha | Causa | Ações que podem ser tomadas |
|---------------------------------|--|---|
| Instabilidade de Taludes | <ul style="list-style-type: none"> Sobrecarga da fundação e/ou do depósito de rejeitos; Controle inadequado de poropressões. | <ul style="list-style-type: none"> Medidas de reforço do solo; Instalação de trincheira drenante no pé do talude de jusante e/ou execução de drenos horizontais a fim de suavização dos taludes |
| Erosão Interna (Piping) | <ul style="list-style-type: none"> Controle inadequado da superfície freática e da percolação; Projeto de drenagem ineficiente e/ou filtro de má qualidade; Projeto ou controle construtivo mal feito, resultando no aparecimento de rachaduras e vazamentos. | <ul style="list-style-type: none"> Realizar um alteamento para a jusante e implantar um tapete drenante; Executar sondagens horizontais para aliviar a pressão; Instalação de trincheiras drenantes |
| Galgamento | <ul style="list-style-type: none"> Projeto hidrológico ou hidráulico inadequado; Nível de água do reservatório muito próximo da crista da barragem. | <ul style="list-style-type: none"> Construção de vertedouros de emergência; Abrir decantadores |
| Erosão Externa | <ul style="list-style-type: none"> Inclinação do talude e pé da barragem inadequados. | <ul style="list-style-type: none"> Plantar vegetação no talude de jusante; Depositar uma camada de estéril na face do talude de jusante; Construção de bermas no talude de jusante; |

Este tipo de ruptura é reparável, ocorre geralmente de forma lenta e gradativa. Monitoramentos constantes e inspeções visuais são capazes de captar a existência do problema no maciço, para controlar os riscos de liquefação ou *piping*, tecnicamente é possível detectar tal fenômeno precocemente, se a barragem possuir INAS (Indicadores de Nível de Água) e PZ's (Piezômetros).

Uma vez detectado o problema, é necessário fazer um filtro evitando o aumento do escoamento de água e partículas, tem-se que permitir a saída de água sem que ocorra o carregamento das partículas. Outra medida a ser tomada é o rebaixamento do reservatório quando for possível.

2.3.2 Galgamento

A ruptura por galgamento se dá por mal dimensionamento hidráulico ou por erro operacional, quando se ocupa a bacia de amortecimento de forma indevida, sendo assim um bom estudo hidrológico é fundamental. Estudos inadequados geram análises erradas, que por sua vez podem gerar volumes não previstos e por consequência promovera ruptura do maciço por galgamento.

O galgamento geralmente é um grave problema sem solução emergencial, pois não existe um controle do nível de água por comportas. Isso implica que um vertedouro é dimensionado para trabalhar livre em todo o tempo de operação. Um mal dimensionamento, não permite que exista uma alternativa para aumentar a vazão de escoamento.

Risco deste tipo de ruptura é elevado e normalmente é a principal causa da ruptura de um maciço. Para evitar este tipo de acidente é fundamental que o reservatório esteja sempre em condições de amortecimento e que sejam bem dimensionados.

2.3.3 Ruptura por Fundação

Conforme (Machado 2007), as barragens de rejeito estão constantemente sujeitas a deslocamento e deformações, em virtude da sua própria natureza e dimensões, além da ação de agentes externos e internos. Desta forma, entende-se por ruptura por fundação a situação em que se registra perda de resistência e estabilidade do maciço, levando à danificação de sua estrutura ou da fundação.

Temos desta forma que a ruptura se dá a partir da deformação do maciço através da perda de resistência ou mudanças no estado de tensão, erosão interna ou até mesmo degradação da fundação. A falta da capacidade de resistência dos materiais ou até mesmo erros de projeto e construção podem também levar a uma possível ruptura de uma barragem de rejeito.

Ainda de acordo com (Machado 2007), as deformações das barragens constituem-se o principal problema que pode surgir durante a vida de um empreendimento. Ele decorre das deformações do maciço, que ocorrem de forma diferencial, podendo causar fissurações, vários fatores influenciam nas deformações:

- ✓ Formato, dimensões e propriedades mecânicas da material matriz;
- ✓ Baixa resistência ao cisalhamento dos materiais da barragem;
- ✓ Espessura da camada compacta;
- ✓ Método de lançamento, direção do movimento de espalhamento e grau de compactação do rejeito;
- ✓ Altos valores de poropressão;
- ✓ Natureza da fundação devendo possuir permeabilidade compatível com o objetivo de minimizar a percolação;
- ✓ Variação do nível d'água do reservatório e
- ✓ Atividade sísmica da região ou efeitos de detonação da mineradora;

Também temos como um tipo de ruptura a liquefação. A liquefação acontece quando um sedimento sólido passa a se comportar como se fosse um líquido devido a um aumento de pressão sofrido pelo excesso de carga acima dele, causando deslizamentos de terra, prejudicando a estrutura da barragem. O risco deste tipo de ruptura se dá devido à liquefação das massas de rejeitos por efeito de sismos naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos.

Diante disto, se vê necessário que todo o projeto de disposição de rejeitos deve possuir a implementação de programas de observação e monitoramento constantes a fim de se evitar quaisquer tipos de ruptura, evitando desta forma, danos associados ao rompimento de uma barragem de rejeitos.

2.4. Barragens – segurança e a Lei 12.334

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (Ávila 2009), em todo o mundo ocorrem em média dois acidentes anuais envolvendo barragens de rejeitos. Como mostra a tabela 2.2 nos últimos 15 anos é perceptível a eventualidade destes acontecimentos, com isso tem-se uma hesitação quando o assunto é segurança.

Mais recentemente em novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos da empresa Samarco. Tal fatalidade destruiu o distrito de Bento Rodrigues em Mariana - MG, e hoje é considerado um dos maiores desastres da história nos últimos 100 anos, levando em consideração o volume de material despejado. O acidente deixou 19 mortos e a devastação em 27 municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Conforme com (Mineração & Sustentabilidade 2016) em acordo que envolveu a Samarco (Vale e BHP por extensão), União e os governos de Minas Gerais e Espírito Santo, ficou definida a destinação de R\$ 5 Bilhões para iniciar a execução dos programas de recuperação. O valor vai ser

repassado até 2018 para atender 40 programas de compensação e mitigação dos danos socioambientais e socioeconômicos provocados pelo colapso do barramento. Uma fundação vai ser criada com o propósito de administrar os recursos direcionados a um fundo, em 15 anos a previsão é de que R\$ 20 bilhões sejam aplicados. Desta forma, se torna evidente a extrema importância de implementação de leis mais rigorosas e efetivas em nosso país.

Tabela 2.2 Estatísticas recentes (Ávila 2009)

| LOCAL | TIPO DE INCIDENTE | IMPACTO |
|---|--|--|
| Shanxi Province, China (2008) | Colapso de barragem de rejeitos durante chuvas | Morte de 254 pessoas 35 feridas |
| Nchanga, Chingola, Zambia (2006) | Ruptura de uma tubulação de rejeitos de cobre | Vazamento de rejeitos ácidos para o rio Kafue.- Cobre, anganês, cobalto. |
| Shaanxi Province China (2006) | Ruptura de barragem de rejeitos de ouro durante o sexto alçamento | Inundação de casas. 130 residentes desabrigados. Vazamento de cianeto para o rio. Contaminação de 5,0 km para Jusante. |
| Bangs Lake Jackson County, Mississippi, USA (2005) | Ruptura de pilha de gesso, por enchimento rápido do Reserv. E ocorrência de chuva intensa. | Vazamento de 17 milhões de m ³ de líquido ácido |
| Pinchi Lake, British Columbia, Canada (2004) | Ruptura de Barragem de rejeitos com mercúrio | Rejeitos fluíram para o Pinchi Lake |
| Partizansk, Primorski Krai, Russia (2004) | Ruptura de um dique de contenção de cinza volante com 1,0 km ² de área, com 20 milhões de m ³ de cinza | A polpa de cinza fluiu por um canal de drenagem para um afluente do rio Partizanskaya |
| Riverview, Florida, USA (2004) | Um dique rompeu no topo de uma pilha de esbo | 60 milhões de galões de líquido ácido, fluíram para o riacho Archie e baía de Hillsboroughliq |
| Malvési, Aude, France (2004) | Ruptura do dique após chuvas intensas. | 30 000 m ³ de líquido vazaram com elevada conc. de nitrato |
| Cerro Negro, Petorca prov. Quinta region, Chile (2003) | Ruptura de barragem de rejeitos de cobre | 50.000 ton. de rejeitos fluíram por 20km do rio Ligua |
| San Marcelino, Zambales, Philippines (2002) | Galgamento e ruptura do vertedouro de duas barragens abandonadas após chuvas intensas | Rejeitos fluíram para o lago Mapanuepe. Inundação de vila com 250 famílias |

Os riscos envolvidos em uma eventual ruptura no maciço acarretam em grandes prejuízos, tanto ambientais como sociais, além do quesito econômico. Com isso, se viu necessário a tomada de medidas preventivas garantindo uma funcionalidade mais adequada das barragens de rejeito. Os dados apresentados na tabela 2.2 mostram a importância de uma lei que vigore sobre a segurança de barragens e a exigência de sua regulamentação.

Com isso a legislação federal brasileira viu necessário à implementação de uma nova lei. Em setembro de 2010, o governo estabeleceu através da lei 12.334 (Brasil 2010) a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) para um controle mais adequado e uma maior segurança operacional e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

Com base em (Nunes 2012), com a nova legislatura passa a existir órgãos fiscalizadores de segurança de barragens, entre os quais quatro são de âmbito federal:

- ✓ ANA – Agencia Nacional de águas;
- ✓ ANEEL- Agencia Nacional de Energia Elétrica;
- ✓ IBAMA- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente;
- ✓ DNPM _ Departamento Nacional de Produção Mineral;

Além de mais 27 órgãos gestores estaduais e 16 órgãos ambientais estaduais. Em um total de 47 instituições, a responsabilidade pela avaliação e acompanhamento das barragens passa a possuir critérios mais rigorosos de estabilidade, garantindo com que os padrões de segurança sejam seguidos.

A lei define que para qualquer tipo de barragem, seja ela destinada a captação de água, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, passam a ser fiscalizadas pelo PNSB. Desta forma, passam a serem alvos de inspeções e monitoramento constantes. Sendo

assim, se vê necessário que as barragens passam a ser cadastradas e classificadas de acordo com o seu grau de periculosidade, e riscos envolvidos nos projetos. As figuras 2.4, 2.5 e 2.6 representam dados das barragens de rejeitos, mostrando a situação atual dos maciços no país.

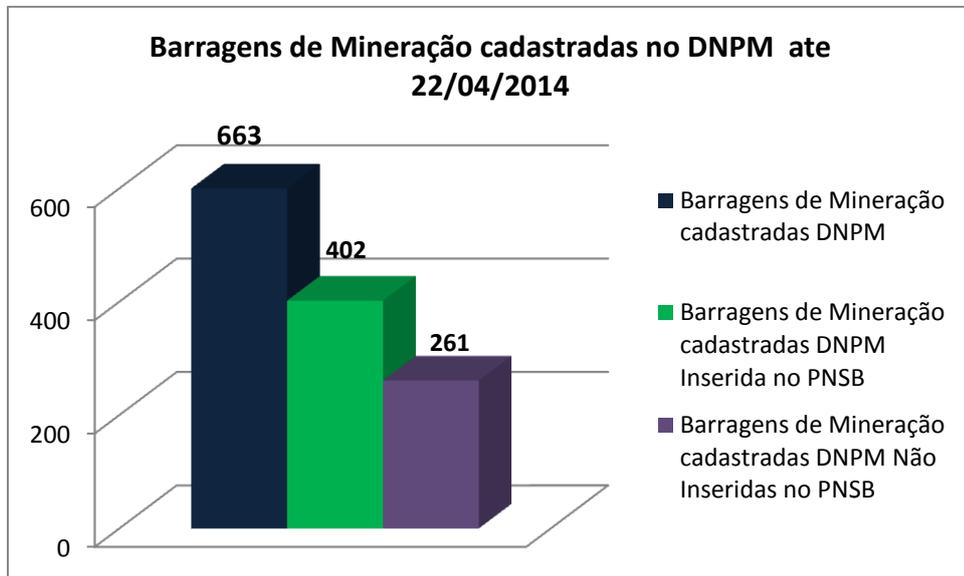


Figura 2.4 Cadastramento de Barragens no DNPM. (Cruz & Neves 2012)

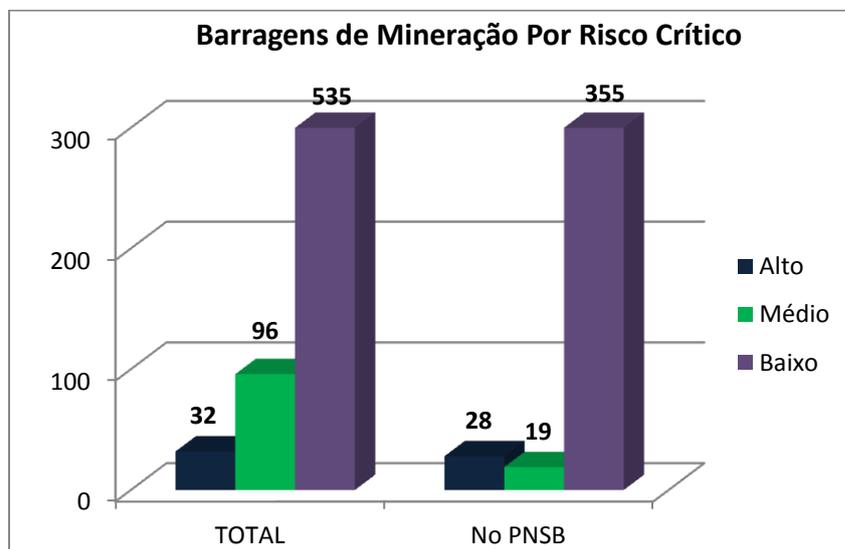


Figura 2.5 Potencial de risco associados às barragens de mineração. (Cruz & Neves 2012)

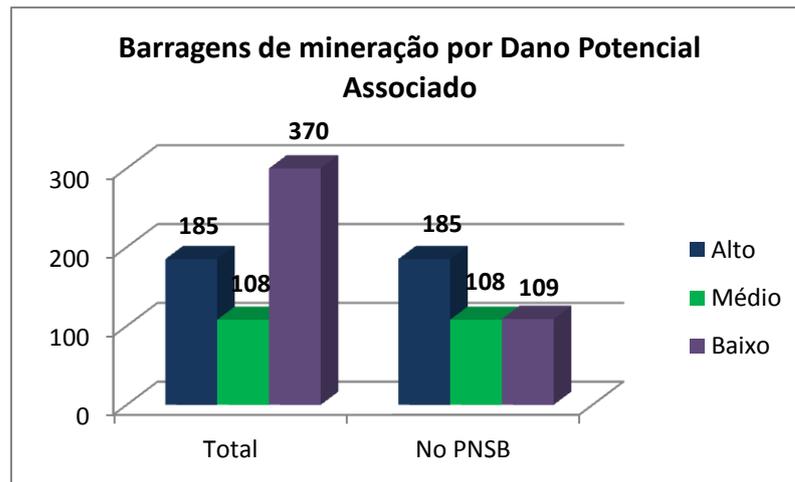


Figura 2.6 Potencial de danos associados as barragens. (Cruz & Neves 2012).

Segundo (ANA 2012), temos diferenças entre os riscos e os danos associados. A Categoria de Risco de uma barragem diz respeito aos aspectos da própria barragem que possam influenciar na probabilidade de um acidente envolvendo aspectos de projeto, integridade da estrutura, estado de conservação, operação e manutenção, atendimento ao Plano de Segurança, entre outros aspectos. Já o Dano Potencial Associado é o que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Os dados acima apresentados mostram que ainda se têm um número significativo de barragens não cadastradas no plano nacional de segurança de barragens (PNSB). Além disto, muitas possuem elevado grau de periculosidade e de potencial dano associado a uma eventual ruptura. Tais referências trazem a situação ainda alarmante em que o Brasil se enquadra quando o quesito é segurança.

De acordo com o artigo 3º (Brasil 2010), os principais objetivos de implementação da lei 12.334 são:

- ✓ Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
- ✓ Regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;
- ✓ Promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
- ✓ Criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- ✓ Coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;
- ✓ Estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;
- ✓ Fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Uma fiscalização mais eficiente ainda é necessária para que todos os maciços se encontrem devidamente regularizados. Porém, com a nova regulamentação é possível criar as mínimas condições para garantir os padrões de segurança e a estabilidade das barragens, reduzindo assim, a possibilidade de eventuais acidentes e rupturas.

A lei exige toda uma documentação das barragens, além de relatórios de segurança periodicamente. As barragens passam a ser classificadas de acordo com o seu potencial de risco e danos e com a quantidade de volume contido pela estrutura, com base nos critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

Esta classificação é importante devido ao enorme grau de periculosidade que algumas barragens demonstram. As que apresentam uma classe maior na escala de categoria de risco e dano potencial associado, devem elaborar um plano mais abrangente, bem como realizar a revisão periódica de segurança com maior frequência.

Uma nova gestão de risco está prevista e passa a ser obrigatório um plano de segurança e um plano de ação emergencial, mantendo assim, uma melhor eficiência em casos de ruptura. Saber o porquê e como proceder em casos de acidente se torna fundamental para a tomada de decisões.

2.5. Manual de segurança e plano de ação emergencial

As operações envolvendo as barragens de rejeitos acarretam em riscos potencialmente perigosos. A segurança e estabilidade do maciço passam a ser um aspecto fundamental para a continuidade e execução das atividades envolvendo as barragens de rejeito. As consequências catastróficas de um eventual acidente podem trazer diversos contratempos, envolvendo o meio ambiente, a sociedade e a economia, todos estes setores passam a ser afetados de forma catastrófica.

Para assegurar o funcionamento adequado das barragens, as condições necessárias de segurança operacional se tornam primordiais. Um monitoramento constante garante a estabilidade ao longo da sua vida útil das barragens.

Saber as causas dos problemas e entender como proceder é fundamental para garantir a segurança das barragens, este entendimento pode salvar inúmeras vidas. As barragens são estruturas complexas e extremamente sensíveis a ações incorretas. A tomada de decisões erradas pode agravar os problemas, por isto como saber como remediar ou agir pode salvar o maciço e evitar eventuais acidentes.

A partir dos riscos envolvidos se viu necessário à criação de documentos que passam a ser indispensáveis para uma boa gestão de riscos tem o Manual de Segurança Operacional e o Plano de Ação Emergencial.

O Manual de segurança operacional é um documento que apresenta os detalhes e os procedimentos efetuados para a conservação das barragens, as vistorias que foram efetuadas, além das rotinas de inspeções. De acordo com (Barbosa 2002), o objetivo principal deste Manual de Segurança de Barragens é estabelecer parâmetros e um roteiro básico para orientar os procedimentos de segurança a serem adotados em novas barragens, e manter as já construídas em um estado de segurança compatível com seu interesse social e de desenvolvimento.

Conforme (Brasil 2010), o Plano de Ação Emergencial (PAE) é um documento formal, a ser elaborado pelo empreendedor. Deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas pelo mesmo em caso de situação de emergência, bem como identificados os agentes a serem notificados dessa ocorrência.

De acordo com (Oliveira *et al* 2015), o Plano de ação emergencial (PAE) é um documento que deve ser adaptado à fase de vida da obra, às circunstâncias de operação e às suas condições de segurança. É, por isso, um documento datado que deve ser periodicamente revisado, nomeadamente sempre que haja lugar a alterações dos dados dos intervenientes e, ainda, na sequência da realização de exercícios de teste ou da ocorrência de situações de emergência, que justifiquem alterações ao plano.

Estes documentos devem conter os estudos e análises de simulações de ruptura. Devem apresentar os procedimentos de emergência a serem seguidos, objetivando a preservação da vida das pessoas e do meio ambiente, em caso de acidente.

O Plano de Ação Emergencial e o Manual Operacional são imprescindíveis em caso de ruptura do maciço. São documentos que contém

as informações necessárias de como proceder a um possível acidente. Além dos documentos, treinamento de pessoal é fundamental. A necessidade de agilidade nas respostas frente ao acidente pode salvar vidas ou até mesmo evitar a ruptura.

2.6. Metodologias de análises preventivas

Mediante o cenário atual apresentado das barragens de rejeito e a vigência da nova lei 12.334 têm-se metodologias que auxiliam na segurança do maciço e que buscam viabilizar e assegurar a sua implantação e continuidade operacional.

Os princípios das metodologias a serem tratadas visam eliminar as causas ou reduzir bruscamente o índice de acidentes ou riscos minimizando as consequências de uma ruptura.

As análises do tipo FMEA e SIGBAR serão tratadas mais significativamente no decorrer do trabalho de modo a apresentar seus critérios e metodologias que serão de efetiva significância para o trabalho.

2.6.1. Análise tipo SIGBAR

É definido como Sistema Integrado de Gestão de Barragens, concebido e estruturado pela empresa de consultoria Geoconsultoria. O Sistema é separado em 10 módulos, na qual serão tratados seis módulos como principais, que possuem funções distintas, sendo capaz de incluir o monitoramento das barragens, sua interpretação, avaliação da segurança, documentação, treinamento.

Seu principal objetivo é verificar e garantir a segurança operacional das barragens de rejeito, se tornando um excelente sistema capaz de atender a demanda da nova lei de barragens. Suas principais aplicações e usos do se devem pelas seguintes razões:

- ✓ Eleger a segurança das barragens como matéria de extrema importância na sua política operacional;

- ✓ Atende o objetivo de gestão das barragens. Por ver a conveniência de uniformização de práticas em todas as suas unidades;
- ✓ Dispõe de um sistema que lhe permita acompanhar continuamente a segurança das barragens;

O sistema se apresenta em 10 módulos, dos quais são representados na figura 2.7 , em que cada item será explicado e ilustrado detalhadamente no decorrer da metodologia do trabalho.

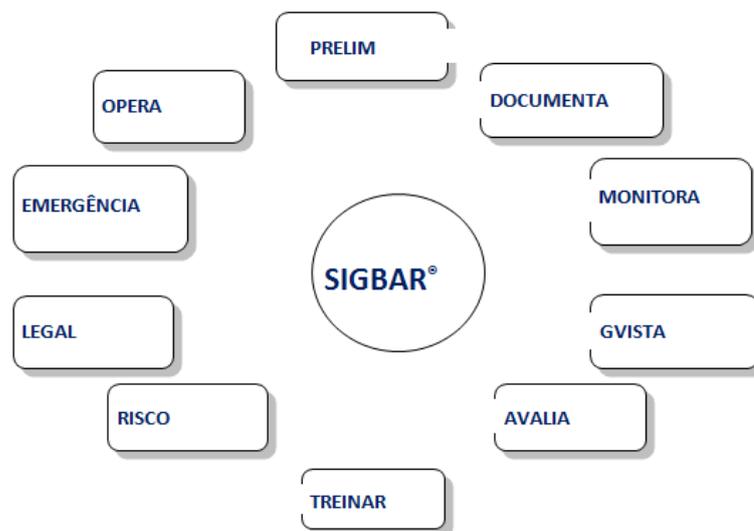


Figura 2.7 Módulos competentes ao sistema SIGBAR.

2.6.2. Análise tipo FMEA

De acordo com (Toledo & Amaral 2006), a metodologia de Análise do Tipo e Efeito de Falha, conhecida como FMEA (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis*), é uma ferramenta que busca, em princípio, evitar, por meio da análise das falhas potenciais e propostas de ações de melhoria, que ocorram falhas no projeto do produto ou do processo.

A utilização deste tipo de procedimento é capaz de diminuir as chances de o produto final falhar durante a operação de um projeto, ou seja, busca aumentar a confiabilidade e sua segurança operacional. Desta forma, diminui-

se a probabilidade de falhas potenciais, minimizam-se os riscos de erros e aumentando a qualidade nos procedimentos operacionais administrativos.

Segundo (Toledo & Amaral 2006), as etapas e a maneira de realização da análise são as mesmas, se diferenciando somente quanto ao objetivo. Assim as análises FMEA's são classificadas em dois tipos:

- ✓ FMEA de produto: na qual são consideradas as falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto. O objetivo desta análise é evitar falhas no produto ou no processo decorrente do projeto. É comumente denominada também de FMEA de projeto.
- ✓ FMEA de processo: são consideradas as falhas no planejamento e execução do processo, ou seja, o objetivo desta análise é evitar falhas do processo, tendo como base as não conformidades do produto com as especificações do projeto. Há ainda um terceiro tipo, menos comum, que é o FMEA.

Segundo (CNPGB 2005), a análise do tipo FMEA trata-se de um método particularmente adaptado ao estudo das falhas e respectivas consequências, passível de ser aplicado a materiais, a equipamentos ou a sistemas mais complexos. Na engenharia de barragens pode ter uma aplicação transversal a todas as fases de projeto, conforme apresentado na figura 2.8

| Exemplo Explicativo de aplicação do método FMEA | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|---|--|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--|
| Codigo de Identificação | Designação | Funcionamento | Modo de Falha | Causas | Efeito da Falha | | | Meios | | | Meios Adicionais |
| 3 1 1 | Galeria de desvio provisorio | Desvio do rio durante a fase de construção. Operação em cheia | Excedida a capacidade e de escoamento da galeria em superfície livre | Cheia superior a cheia de projeto | Local: Escoamento em pressão no interior da galeria | Noutros Sub-sistemas: Subida do nível da água na albulreira acima dos valores previstos | Terminais : Perda de folga; Galgamento; onda de cheias no vale a jusante | De detecção do modo de falha | De prevenção do modo de falha | De mitigação dos efeitos | Considerar a possibilidade de executar um descarregador de emergência. |

Figura 2.8 Exemplo ilustrativo de aplicação do método FMEA. (Modificada CNGB 2005).

Conforme (Melo & Fusano 2015), com relação à implementação do FMEA em um sistema, não existe uma padronização na subdivisão dos

sistemas, nem mesmo na formatação das tabelas de análise. No mínimo, deverão ser detalhados os seguintes itens:

- ✓ Identificação do sistema e subsistemas; Identificação dos componentes (ou elementos) e suas funções;
- ✓ Identificação dos modos de falha e causas associadas;
- ✓ Efeitos e medidas de controle.

Ainda segundo (CNPGB 2005), é possível afirmar que os procedimentos de aplicação deste método de falha e efeito devem prosseguir da seguinte maneira:

- ✓ Seleção do sistema a analisar;
- ✓ Caracterização do seu funcionamento e seleção de um estado de funcionamento;
- ✓ Identificação de um modo de rupturas a serem analisadas;
- ✓ Identificação da respectiva causa;
- ✓ Identificação dos efeitos da ruptura (efeitos locais, no sistema em análise, efeitos em outros sistemas e efeitos terminais);
- ✓ Identificação dos meios de detecção e de prevenção do modo de rotura e dos meios de mitigação dos seus efeitos;
- ✓ Proposta de meios adicionais;
- ✓ Repetição da análise (passos 3 a 7) para o leque de modos de rupturas plausíveis;
- ✓ Identificação de um outro estado de funcionamento e repetição da análise para o respectivo conjunto de modos de rotura.

Uma eficaz análise preventiva envolta por meio de uma metodologia, objetiva estimar as probabilidades de falha e erros apresentados nas barragens de rejeito. A avaliação da segurança operacional transfere uma melhor compreensão do comportamento das estruturas e desta forma prioriza as ações necessárias e imediatas para alcançar os resultados esperados sem que ocorra nenhum incidente.

Desta forma a análise FMEA será tratada de maneira a ressaltar os modos de falhas potenciais em uma barragem de rejeitos. Dispondo-os em uma planilha, cada modo será analisado sob a perspectiva de suas consequências.

Sendo assim, é feito uma abordagem qualitativa de uma barragem de rejeitos. Apresentando de forma descritiva como as duas ferramentas utilizadas para atender às normas de segurança exigidas pela lei. Vale ressaltar que se trata de uma modelagem descritiva vista a impossibilidade de aplicação dos modelos em um caso real.

3. METODOLOGIAS DE ANÁLISES PREVENTIVAS

3.1 Sistema integrado de gestão de segurança de barragens

Como visto anteriormente o SIGBAR é um sistema composto de 10 módulos que garantem a qualificação e segurança de barragens de rejeito. Para a segurança efetiva do maciço, pode-se destacar dentre estes módulos 6 principais que se sobressaem em relação à segurança efetiva enquanto o restante é visto como sistemas opcionais de operação.

Os seis módulos principais e que serão trabalhados com mais ênfase são: Prelim, Documenta, Monitora, Gvista, Avalia e Treinar. Os demais módulos (Risco, Legal, Opera e Emergência), não menos importantes que os demais deverão ser utilizados apenas de acordo com a demanda e a necessidade da empresa.

O Módulo Risco é voltado para o um plano de ação emergencial de barragens, capaz de alegar os riscos envolvidos em uma ruptura. O sistema de risco engloba a análise do objeto de estudo, através da identificação e conceituação dos danos e riscos em que se encontram a barragem de rejeitos. Este módulo pode ser trabalhado junto com a análise tipo FMEA (Análise de falha e efeito) através de uma planilha de dados. Desta maneira, após a colheita dos dados e análises dos riscos é necessário e fundamental o uso de medidas mitigadoras, na qual, sejam capazes de prevenir os impactos negativos ou utilizar de meios a reduzir a magnitude do problema.

O Módulo Legal, trata do controle da demanda de licenciamentos e de devidas atualizações de licenças existentes, o sistema é capaz de mostrar o que têm que fazer e quando se têm que fazer. Este módulo tem interface direta com o módulo opera. Este, por sua vez, trata da operação e ocupação da barragem, gerando o tempo de entrada de novas estruturas e por consequência de novos licenciamentos.

Módulo emergência trabalha em conjunto com o modulo risco, e consiste na efetiva descrição da situação da barragem. É capaz de identificar

os responsáveis de cada setor e dos encarregados na coordenação, para conseguir respostas rápidas e efetivas para uma situação de emergência. É fundamental um mapa de inundações e a avaliação das áreas que serão afetadas e os efeitos que serão causados por uma eventual ruptura.

A seguir, serão tratados os principais módulos do SIGBAR, de maneira mais aprofundada, demonstrando de forma detalhada cada sistema e como ele é operado.

i. Módulo Prelim

Este módulo apresenta uma análise preliminar das atividades da barragem, indispensável para o bom entendimento e compreensão dos possíveis problemas que podem surgir no decorrer das operações. Na qual são necessárias algumas informações detalhadas sobre o projeto, a fim de se ter as informações necessárias para o bom funcionamento de uma barragem de rejeito:

- ✓ Organograma de responsáveis e de responsabilidades: consiste em uma divisão de tarefas e ocupações entre os responsáveis pela barragem de rejeito, denominando os encarregados que representam cada setor. Trata da nomeação dos responsáveis pelas atividades rotineiras, apresentando suas funções e responsabilidades. É indispensável se ter o contato para acionamento rápido dos responsáveis, caso for preciso, para tomada de decisões de forma rápida e precisa.

A figura 3.1 demonstra um exemplo de como deve ser feito um organograma de responsáveis e responsabilidades

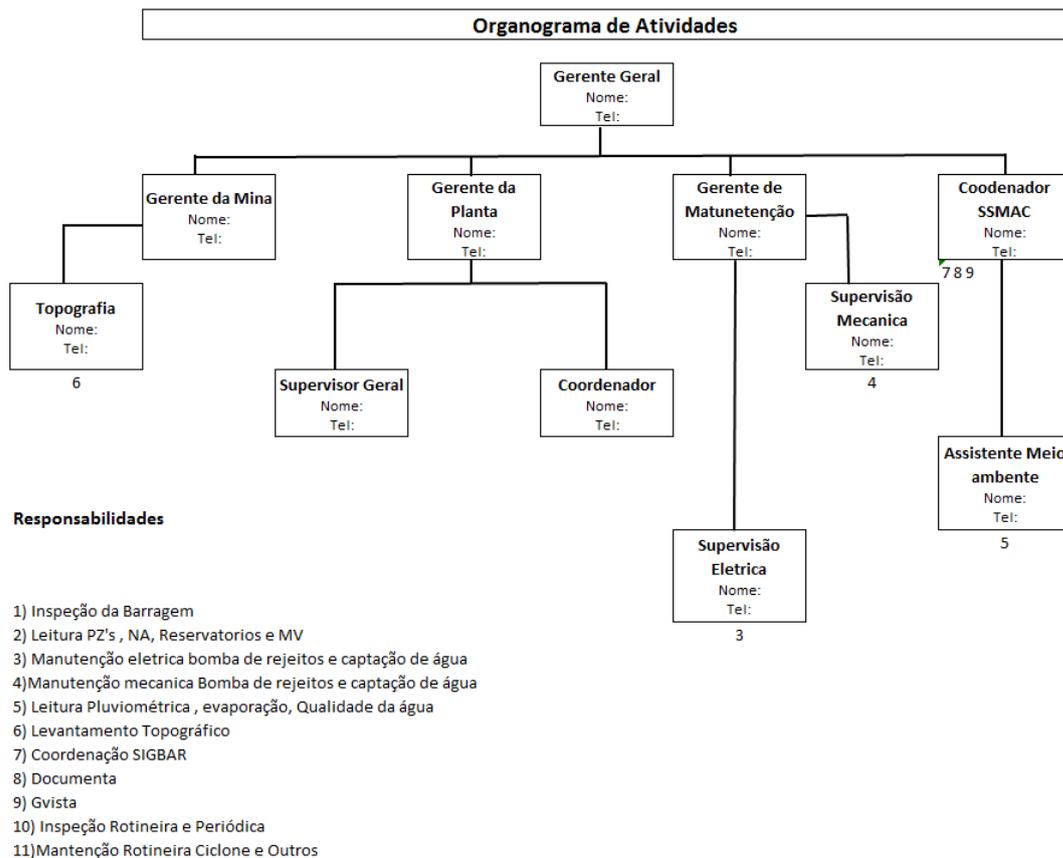


Figura 3.1 Exemplo de como deve ser um organograma de responsáveis e responsabilidades. (Modificada Geoconsultoria).

- ✓ Ficha técnica da barragem: apresenta as predefinições das barragens, de forma a englobar as informações e os dados necessários que caracterizam o projeto. Deve conter o projeto da planta da barragem, como está construído o maciço, fotografia da barragem, mapa locacional, além da indicação das principais características do maciço.

Têm-se que partir do pressuposto que ninguém tem o conhecimento das condições que se encontram a barragem e nem onde ela está localizada e a partir deste documento um leigo se torna capaz de conseguir se orientar e informar dentro da unidade.

A figura 3.2 demonstra como devem ser encontradas e dispostas as especificações exigidas a este módulo.

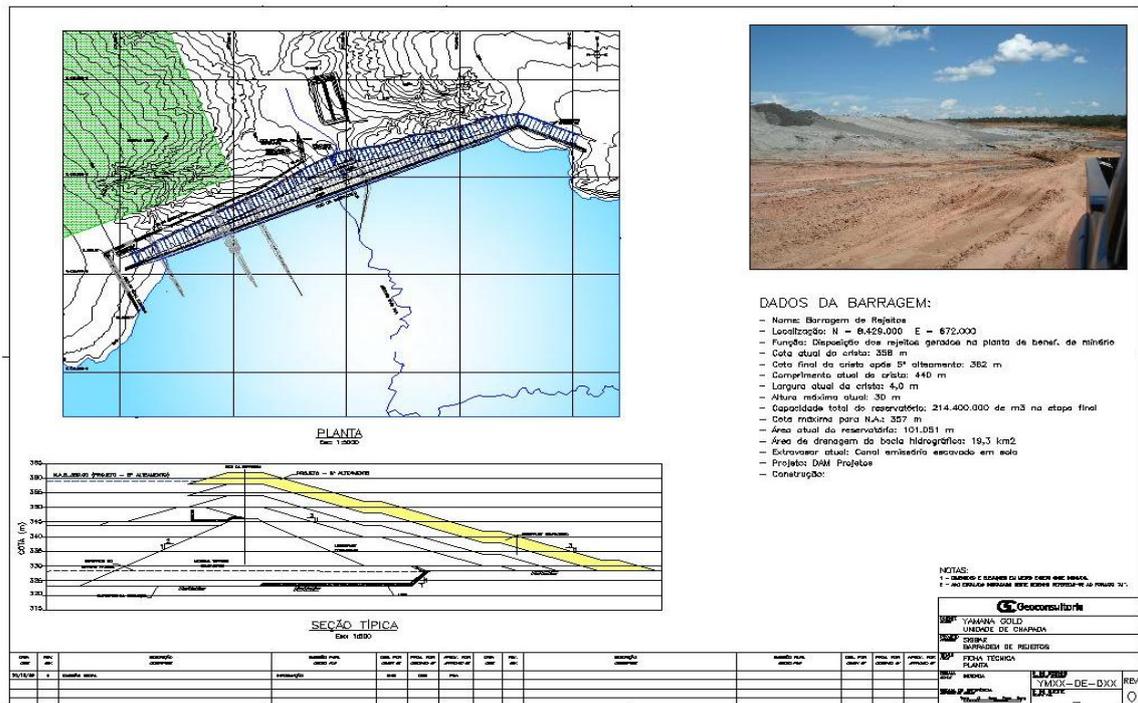


Figura 3.2 - Exemplo de dados de uma barragem de rejeitos (Geoconsultoria).

- ✓ Planta Cadastral da Unidade: consiste em um desenho representativo da barragem de rejeitos da unidade, a fim de proporcionar a exata localização do maciço na unidade com seu respectivo acesso. A figura 3.3 nos mostra um exemplo de como deve estar estruturado a planta cadastral de uma unidade.

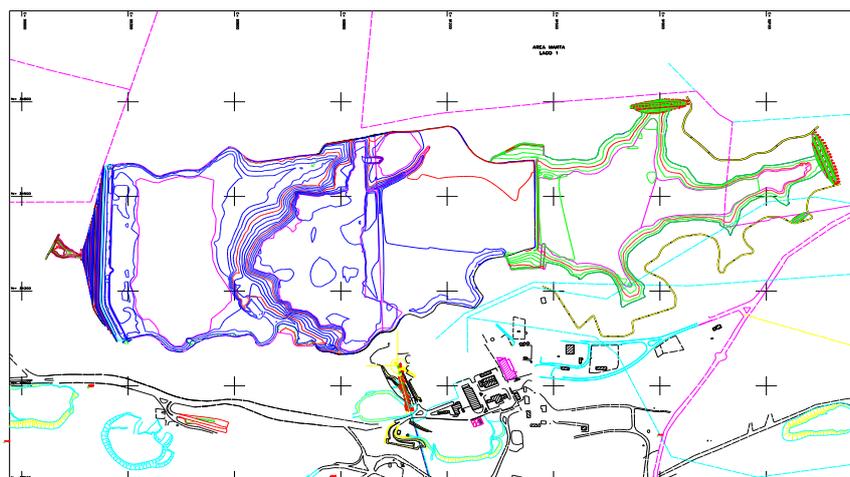


Figura 3.3 Exemplo de uma planta cadastral. (Geoconsultoria).

✓ Estaqueamento de Estruturas Lineares: representa a materialização de pontos ao longo de um alinhamento linear, levando em consideração a distância entre os pontos uma constante. É fundamental para que se tenha a referência de onde se está na barragem. Cada estaca possui uma numeração pré-definida para facilitar a localização, de forma a indicar onde acredita-se que está acontecendo ou começando algum tipo problema que prejudique a estabilidade e funcionalidade do maciço.

As figuras 3.4 e 3.5 demonstram como estes estaqueamentos devem estar dispostos no decorrer da barragem e como devem estar devidamente identificados.



Figura 3.4 Exemplo de estaqueamento de estruturas lineares (Geoconsultoria).



Figura 3.5 Numeração das estacas (Geoconsultoria).

- ✓ Placas de sinalização: são necessárias devido à sua extrema importância, com ela tem-se um conjunto de estímulos visuais que servem para informar e orientar os indivíduos em uma determinada localidade. É um elemento de identificação interna, fundamental para saber onde se está na barragem, além de ser uma referência necessária para um leigo poder se localizar e desta forma, poder ajudar em uma situação de emergência.

- ✓ Cercas de proteção: têm a serventia de delimitar limites e dividindo regiões quando preciso, além de servir como contenção de pessoas e animais não permitindo a passagem indevida de indivíduos não autorizados nos limites da barragem.

Desta forma, este módulo tem a finalidade de orientar pessoal, sendo ele capacitado de obter as informações que são necessárias para as fases preliminares de estudo em uma barragem de rejeito. Este módulo concentra todas as informações e documenta preliminarmente tudo que é necessário para a continuidade das atividades e desta maneira, dar continuidade para os próximos módulos.

ii. Módulo Documenta

Este módulo visa à recuperação e organização de todos os documentos relacionados à barragem de rejeitos em todas as suas fases de implementação. Estes devem ser arquivados e catalogados de maneira que quando requisitados ou for necessário devem ser localizados de forma rápida e direta. Estes documentos devem se encontrar de modo acessível para sua utilização caso devido.

É primordial, os documentos estarem muito bem estruturados para o atendimento de auditorias, de forma 100% organizados e arquivados, permitindo a praticidade em identifica-los. É também muito importante dividi-los em diversos livros e em meio digital garantindo assim a sua durabilidade. O módulo possui duas tarefas básicas, uma delas é fazer o levantamento de todos os documentos que a barragem já tem e outra função é identificar qual, ou quais documentos estão em falta, para providenciá-los de forma a se ter tudo o que é preciso para garantir a segurança e estabilidade do maciço.

O acesso aos documentos da barragem tem de ser de forma rápida para que as tomadas de decisões necessárias junto com as respostas aos problemas sejam efetivas. Muitas vezes eleva-se o risco de uma eventual ruptura dependendo das soluções adotadas e do tempo demandado para coloca-las em pratica.

iii. Módulo Monitora

Este módulo define a metodologia do monitoramento e a inspeção de segurança garantindo a estabilidade do maciço.

O sistema deve possuir uma rede de monitoramento na qual consiste em inspeções de campo, leituras e medições dos instrumentos de monitoramento de maneira periódica, conforme a exigência ou necessidade da barragem. Este tipo de acompanhamento da barragem pode ser subdividido em dois aspectos, o primeiro seria entre da equipe local e outro de uma equipe global (consultoria).

A etapa local permite a inspeção visual no campo verificando a presença de água, surgência de alguma trinca, verificação se a vegetação esta baixa, a leitura e medição de equipamentos, ou seja, confirmando a real situação em que se encontra a barragem.

Posteriormente, devem ser enviados os dados recolhidos em campo para inspeção e avaliação dos dados por profissional qualificado, capaz de emitir um laudo técnico sobre a situação em que se encontra o do maciço. Uma empresa de consultoria é capaz de fazer a avaliação do monitoramento e confirmar se a barragem está de acordo ou não com o que está previsto.

Existem alguns requisitos que devem ser seguidos para melhor eficiência dos dados recolhidos, dentre eles destacam-se:

- ✓ Planta com locação dos instrumentos;
- ✓ Seções de monitoramento;
- ✓ Vegetação na barragem aparada;
- ✓ Instrumentos identificados;
- ✓ Estruturas lineares estaqueadas;
- ✓ Acessos em condições adequadas;
- ✓ Equipamentos de medição aferidos.

As Inspeções de campo têm alguns pressupostos. Devem ser rotineiras (frequência semanal ou quinzenal) e periódicas (frequência mensal) além, de inspeções formais devem constar uma Folha de Registro de Inspeção de Campo.

Já a leituras dos instrumentos devem ocorrer com frequência variando de diária a trimestral. O tempo irá depender da situação em que se encontra a barragem. É necessária sempre a confecção de uma Planilha Monitora, para que seja feito um laudo sem que ocorram manipulações nos resultados.

A figura 3.6 exemplifica como seria uma planilha de inspeção necessária para ser encaminhada a empresa de consultoria para análise de resultados.

| Aspecto observado | Ocorrência | | Providência | | Visto da Gerência |
|---|--------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| | Sim | Não | Corrigir | Avisar a gerência | |
| Maciço e praia | | | | | |
| Trincas na crista ou nos taludes | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Surgência d' água nos taludes/ombreiras | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Erosão no talude | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| N.A. do reservatório acima do previsto | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Largura pequena de praia (*) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Erosão na praia (*) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Alteração da cor da água do dreno | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Redução ou aumento signif. vazão do dreno | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Oper. inadequada dos ciclones/espigotes (*) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Extravasor | | | | | |
| Obstrução da tomada d' água | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Trincas | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Erosão | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Instrumentação | | | | | |
| Instrumento danificado | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |

Figura 3.6 Modelo de ficha de inspeção. (Geoconsultoria).

iv. Módulo Avalia

Este módulo é capaz de fornecer uma avaliação da estabilidade da barragem de rejeitos. É apto para comparar os dados medidos com os limites de projeto, avaliando as tendências das medições e ainda analisar as observações registradas nas inspeções.

A partir destas análises é possível enquadrar a barragem em classificação de riscos e periculosidade, além de conseguir fornecer um parecer sobre sua estabilidade e segurança. Assim, o sistema é capaz de fornecer um diagnóstico preciso da situação da barragem.

Conforme demonstrado na figura 3.7, temos cinco tipos de classes para um maciço (satisfatória, satisfatória com ressalva, indeterminada, indeterminada com agravante e insatisfatória), desta maneira, é possível classificar a estrutura da barragem e garantir ou não a sua estabilidade.

| ICS | Descrição |
|-----------|-----------------------------|
| A | Satisfatória |
| | ↑ Desejável ↑ |
| B | Satisfatória com ressalva |
| | ↓ Inaceitável ↓ |
| C1 | Indeterminada |
| C2 | Indeterminada com agravante |
| C3 | Insatisfatória |

Figura 3.7 Critérios de avaliação da inspeção de campo (Geoconsultoria).

Já na figura 3.8, temos a descrição do que se enquadra dentro de cada classificação de segurança. É sempre necessário tomar medidas que sanem algum tipo de adversidade encontrado no maciço e que o descrevem dentro das classes.

| ICS | Descrição |
|---|---|
| A Satisfatoria | A barragem foi projetada de acordo com os padroes adequados de engenharia E A barragem foi construida conforme especificações do projeto E A barragem possui programa de inspeção de campo E A barragem dispõe de instrumentação geotécnica suficiente e adequadas E A barragem opera conforme premissas do projeto e manual de operações E A barragem é acompanhada por empresa especializada E A barragem não apresenta nenhum sinal de comportamento anômolo |
| B Satisfatoria com ressalva | Se pelo menos um dos requisitos da classificação A não for atendido plenamente, mas não houve sinais de comportamento anômolo da barragem nem comprometimento de sua estabilidade ou função, a barragem será ainda classificada como Satisfatória com ressalva |
| C1 Indeterminada | Não há informações suficientes para a determinação da condição de segurança da Barragem E A barragem não apresenta nenhum sinal de comportamento anômolo |
| C2 Indeterminada com agravante | Não há informações suficientes para a determinação da condição de segurança da Barragem E A barragem não apresenta nenhum sinal de comportamento anômolo E A barragem é de grande dimensão ou de elevado potencial de dano A barragem exibe sinais de comportamento inadequado OU |
| C3 Insatisfatoria | A barragem não opera conforme as premissas de projeto, com possível comprometimento da sua estabilidade ou função |

Figura 3.8 Descrição dos critérios de avaliação da inspeção de campo. (Geoconsultoria).

v. Módulo Gvista

O sistema de gestão a vista apresenta a situação atual da barragem de rejeitos por meio de apresentação dos dados e documentos de forma atualizada. Demonstra em um quadro tudo o que acontece na barragem, além de conter as informações do módulo Prelim. Apresenta também um laudo final de conclusão afirmando a segurança da barragem.

A figura 3.9 demonstra como deve estar situado este tipo de quadro contendo as informações necessárias deste módulo. Além disso, mostra a transparência da empresa no tratamento do tema em questão.



Figura 3.9 Apresentação acessível de dados em painéis. (Geoconsultoria)

vi. Módulo Treinar

O sistema SIGBAR ainda conta com o módulo treinar, na qual consiste no treinamento e especialização dos técnicos e toda a equipe responsável pela operação e segurança da barragem. Este módulo mantém os profissionais sempre aptos e atualizados para qualquer situação de emergência, reforça a tomada de decisões e garantem a eficiência das ações a serem tomadas de maneira correta e efetiva em casos de problemas com o maciço.

Deve ser oferecidos cursos, demonstrações de campo e avaliações para qualificar o profissional. O treinamento deve ser efetuado por nível de hierarquia da empresa. O motivo é que a demanda de conhecimentos necessários para um operador é diferente de um gerente ou diretor. Desta forma, é possível garantir o conhecimento necessário para cada função da unidade. O treinamento deve ser reciclado anualmente, sendo atualizado conforme a demanda e rotatividade de pessoal dentro da empresa.

Desta forma, seguindo os passos do SIGBAR é possível garantir a segurança e a estabilidade necessárias do maciço.

3.2. Análise FMEA do tipo e efeito de falha

O trabalho em questão previa a implementação de uma metodologia de monitoramento em barragens de uma empresa na cidade de Araxá. Contudo, em decorrência da não confirmação do projeto de pesquisa, o trabalho em questão precisou ser adaptado de forma que não prejudicasse o TCC em questão.

Por este motivo, optou-se por analisar o caso da barragem do lago E, de propriedade da CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais) e sobre o controle da Vale Fertilizantes S.A. O motivo desta escolha é a decorrente localização e acesso da barragem. Por ser uma área pública e de livre acesso, foi possível verificar o estudo FMEA para esta barragem e realizar a parte prática do trabalho. Sabe-se que não é uma solução ideal, contudo foi a alternativa encontrada para a validação do estudo

A barragem a ser analisada é denominada Barragem E que está sob o controle da Vale Fertilizantes S/A. Localizada pelas coordenadas 19°39'10"S e 46°57'09"O no município de Araxá (MG), possui características particulares que podem ser destacadas, como a altura de barramento absoluto que correspondente a 13m e o volume total do reservatório de 100.000 m³.

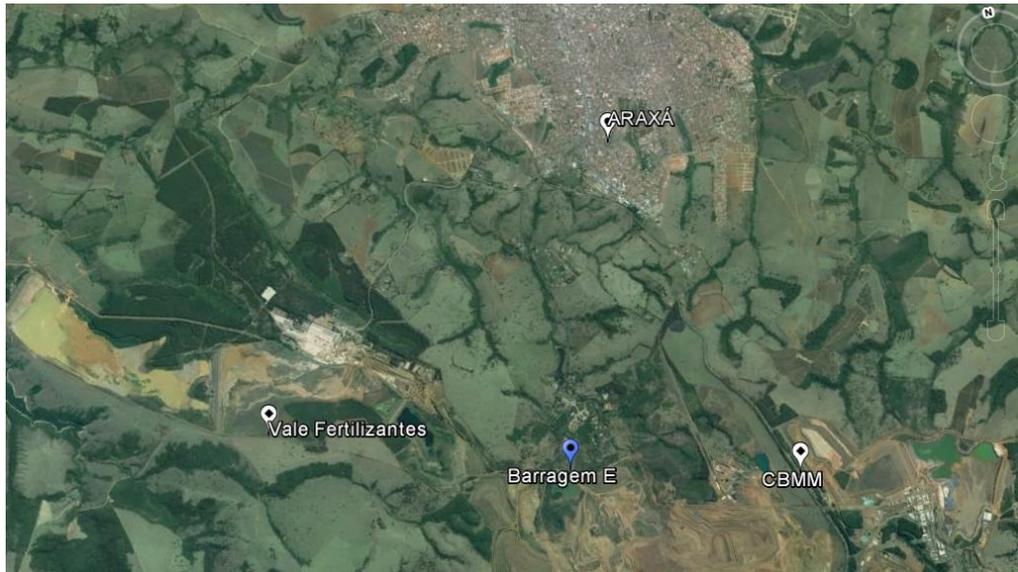


Figura 3.10 Localização da barragem E da Vale Fertilizantes em Araxá (*Google Earth*).



Figura 3.11 Vista ampliada da Barragem E da vale Fertilizantes em Araxá

Esta barragem está inserida dentro do Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Desta forma, é possível classifica lá de acordo com sua em Categoria de Risco (CRI), e Dano Potencial Associado (DPA) conforme mostra a tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 Matriz de classificação de barragens

| Categoria de Risco | Dano Potencial Associado | | |
|--------------------|--------------------------|-------|----------|
| | Alto | Médio | Baixo |
| Alto | A | B | C |
| Médio | A | C | D |
| Baixo | A | D | E |

A classificação por categoria de risco, em alto, médio ou baixo, será feita em função das características técnicas da barragem E, do estado de conservação e do atendimento ao Plano de Segurança da Barragem. Já o dano potencial associado expressa a magnitude das consequências de uma eventual ruptura do maciço.

Desta forma, a barragem E encaixa-se na categoria C de classificação, apresentando um CRI alto e um DPA baixo, que corresponde em uma situação favorável de segurança. Além disto, o maciço é monitorado pela empresa de consultoria Geoconsultoria que aplica o sistema SIGBAR garantindo, desta forma, maior controle do maciço.



Figura 3.12 Vista frontal da barragem

Para a confecção da análise FMEA partiu-se do pressuposto os principais modos de falhas que podiam a vim a ocorrer no maciço, prejudicando

assim a sua estabilidade. Desta maneira, foi feito o estudo de 14 possíveis acidentes que poderiam ocasionar a inconstância da Barragem E. A escolha destes modos de falha foi feito a partir das principais eventualidades que podem ocorrer.

Em cada modo de falha foi elaborado os possíveis efeitos que podem vim a acontecer, mostrando assim a magnitude e a periculosidade das falhas. Assim é possível acrescentar as mitigações e comentários necessários para que se possa evitar ou corrigir as eventualidades.

Foi levado em consideração duas possíveis consequências sobre os efeitos das falhar:

- ✓ Inquietação publica e imagem e
- ✓ Agência reguladora;

As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam a elaboração das matrizes de risco, explicitando a relação entre as probabilidades e as consequências dos efeitos de falha. Sendo assim, passa a ser possível classificar os eventos que podem vir a ocorrer no maciço. As matrizes deixam em evidência os riscos mais elevados e prováveis, assim ficam visíveis as necessidades de tomada de decisões para solucionar as adversidades apresentas.

Tabela 3.2 Matriz de risco- Inquietação Publica e Imagem

| Matriz de Risco - Inquietação Publica e Imagem | | | | | | |
|---|--------------|----------------|-----------|--------------|----------|--------------|
| Unidade Araxá | | | | | | |
| Consequência | | Probabilidade | | | | |
| | | Improvável (I) | Baixa (B) | Moderada (M) | Alta (A) | Esperada (E) |
| | Extrema (E) | | | | | |
| | Alta (A) | | | | | |
| | Moderada (M) | | | | | |
| | Baixa (B) | | | | | |
| Desprezível (D) | | | | | | |

Tabela 3.3 Agência Reguladora

| | | Matriz de Risco - Agência Reguladora | | | | |
|--------------|-----------------|---|-----------|--------------|----------|--------------|
| | | Unidade Araxá | | | | |
| Consequência | | Probabilidade | | | | |
| | | Improvável (I) | Baixa (B) | Moderada (M) | Alta (A) | Esperada (E) |
| | Extrema (E) | | | | | |
| | Alta (A) | | | | | |
| | Moderada (M) | | | | | |
| | Baixa (B) | | | | | |
| | Desprezível (D) | | | | | |

Cada modo de falha apresentado a seguir na tabela 3.4 deve ser devidamente identificado para que assim possa ser projetado dentro nas células da matriz de risco. Com isso, as matrizes de riscos apresentam varias classes e denominações, assim, passam a representar de forma gráfica uma melhor visualização dos modos de falha com base os riscos dos eventos, facilitando a detecção de anormalidades.

A tabela 3.4 a seguir representa a análise FMEA da barragem E. Desta forma, ficam apresentados os 14 modos de falhas, seus respectivos efeitos, as possíveis consequências correlacionadas com as matrizes de risco e assim alguns comentários e mitigações a respeito do maciço:

Tabela 3.4 FMEA Barragem E

| FMEA BARRAGEM E | | | | | | | |
|-----------------|--------|----|-------------------------------|--|----------------------|------------------------------|--|
| ESTRUTURA | ÁREA | ID | MODO DE FALHA | EFEITOS | CONSEQUÊNCIAS | | MITIGAÇÃO E COMENTÁRIOS |
| | | | | | AGÊNCIAS REGULADORAS | INQUIETAÇÃO PÚBLICA & IMAGEM | |
| BARRAGEM E | MACIÇO | A1 | Ruptura do talude à jusante | Ocorrência de vazamento de sedimentos e água em áreas povoadas como o Grande Hotel. | A | A | É necessária a realização de inspeções periodicamente. O maciço possui instalado: 5 indicadores de nível d'água e 4 piezômetros para o monitoramento |
| | | A2 | Ruptura do talude de montante | Favorecimento de linhas de percolação para jusante além de erosões superficiais. | M | M | É necessária a realização de inspeções periodicamente para evitar a ruptura do talude |
| | | A3 | "Piping" pela fundação | Surgimento de subpressões, erosões internas e acarretando em uma instabilidade do maciço (com elevada probabilidade de ruptura global) | E | E | Dar continuidade ao plano de monitoramento dos instrumentos. |
| | | A4 | "Piping" pelo maciço | Erosões internas com provável carregamento de material sólido, evoluindo para futura instabilidade do maciço (provável ruptura localizada). | M | M | A crista é larga e o ângulo geral de jusante é suave, minimizando as chances de ocorrência de "piping". O talude do maciço não apresenta pontos de surgência que possam remeter à existência de "piping". É necessário a inspeções periodicamente. . |
| | | A5 | Baixa resistência da fundação | Provoca a instabilidade do maciço, causa abertura de trincas ou surgimento de depressões, desta forma pode ocorrer a ruptura localizada do maciço. | M | M | Não existem marcos de deformação no maciço, a barragem apresenta boa estabilidade desde sua construção. |
| | | A9 | Galgamento | Desconfiguração dos taludes de jusante e descarga de sedimentos e água em áreas povoadas como o Grande Hotel | E | E | Funcionamento adequado do sistema extravasor, sem galgamento, em casos de eventos chuvosos extremos (PMP). |

| | | | | | | |
|-----------------------|------------|---|--|----------|----------|--|
| | A10 | Sismicidade ou ações de efeitos dinâmicos | Provável ruptura do maciço | E | E | Araxá não se encontra em zona sismogênica ativa nem possui histórico de sismos com magnitudes preocupantes. No local do maciço há a produção de efeitos dinâmicos, relacionados a detonação da mina. |
| | B6 | Obstrução da tulipa (objetos, entulhos, animais etc.) | Redução da capacidade de extravasão, com conseqüente elevação do nível d'água no reservatório e extravasão pelo vertedouro de superfície, com possível inundação do Grande Hotel. | B | A | A tulipa deve ser continuamente inspecionada, e limpeza periódica. |
| EXTRAVASOR EMERGENCIA | C1 | Vazões excedendo à capacidade do extravasor. | Elevação do nível d'água no reservatório da barragem. Possibilidade de galgamento levando a uma provável ruptura do maciço. | E | E | Sistema extravasor tem o funcionamento adequado, sem galgamento, para condições de eventos chuvosos extremos (PMP). |
| | C3 | Obstrução da entrada do canal | Elevação do nível d'água no reservatório da barragem. Possibilidade de galgamento levando a uma provável ruptura do maciço, com descarga de sedimentos e água em área com ocupações humanas. | A | A | O canal deve ser continuamente inspecionado, além de limpeza periódica. |
| RESERVATÓRIO | D1 | Queda de pessoas ou animais | Provável ocorrência de feridos, afogamento ou até mesmo morte de pessoas e animais. | B | A | O acesso não é restrito e controlado. Recomenda-se instalação de placas de advertência e melhorias nos portões e cercas. |
| | D2 | Ruptura ou galgamento da Barragem F, a montante | Galgamento/ ruptura do maciço da barragem, pela propagação de ondas e elevação súbita do nível d'água. | A | A | O reservatório da Barragem E não possui volume de amortecimento suficiente para comportar tal evento |
| | D4 | Assoreamento | Redução no volume de acumulação e de amortecimento do reservatório. Obstrução de estruturas de tomada d'água. | M | M | A barragem E vem sendo constantemente assoreada e não possui programa de limpeza periódica. Necessárias melhorias no programa de manutenção das barragens. |
| | D5 | Erosão e ruptura de taludes naturais no entorno | Redução na capacidade do reservatório; Descarga repentina de água nas estruturas extravasoras. Desconfiguração parcial dos taludes de montante do maciço da barragem | B | B | Os taludes no entorno do reservatório não são íngremes e encontram-se vegetados e sem erosões consideráveis. |

|

Desta maneira, conforme apresentado nas tabelas 3.2 e 3.3, interpolando com as informações contidas na tabela 3.4 é possível perceber os riscos e o grau de periculosidade associados a um determinado tipo de falha. Com isto, é possível tomar medidas preventivas e corretivas para evitar qualquer tipo de acidente ocasionando uma instabilidade do maciço.

Como é visto, têm-se alguns casos que podem se encaixar em situações de elevado risco. Com uma probabilidade esperada de ocorrência atrelada a um elevado risco, geram índices que podem trazer algum tipo de irregularidade na barragem e consequências prejudiciais à situação do maciço. Por outro lado, temos situações apresentadas de forma menos perigosa, em que se têm poucas chances de ocorrências, assim como baixo nível de consequência não trazendo nenhum tipo de risco ou ameaça às atividades de barragem.

Vale ressaltar que uma vez que o risco é definido providências devem ser tomadas. Desta forma, as posições ocupadas dentro da matriz não são fixas, alterando ao longo do tempo, assim, uma verificação constante da metodologia aplicada é fundamental para garantir o correto funcionamento da análise FMEA.

A tabela FMEA acompanhada com as matrizes de risco apresentadas permite realizar uma análise preliminar da barragem E. São técnicas capazes de classificar o maciço, de fácil entendimento e de aplicação simples e rápida. Ao fim da aplicação desta metodologia passa a ser possível:

- ✓ Avaliar os efeitos e sequência de acontecimentos decorrentes de cada modo de falha que podem vir a ocorrer na barragem E;
- ✓ Determinar a importância de cada modo de falha;
- ✓ Avaliar o impacto sobre a confiabilidade e segurança do sistema considerado e, por fim;
- ✓ Classificar os modos de falhas apresentados.

4. DISCUSSÕES E ANÁLISES DAS METODOLOGIAS APRESENTADAS

A importância da compreensão dos conceitos de risco no quesito de segurança de barragens tem se mostrado cada vez mais acentuado. Tendo em mente a periculosidade e severidade de uma eventual ruptura do maciço, dos impactos e danos associados têm-se que impor avanços no entendimento dos modos de falhas e segurança das barragens de rejeito.

Conforme visto e apresentado, o SIGBAR apresenta a funcionalidade ideal para a operacionalidade de uma barragem de rejeitos. Desta forma é um sistema capaz de apresentar as condições ideais e necessárias para o adequado funcionamento do maciço dentro de uma demanda legal, exigindo o levantamento de informações e dados precisos de acordo com o que é requerido.

A utilização deste sistema reforça a segurança e estabilidade de uma barragem. Garantindo maior confiabilidade no projeto, e se torna indispensável durante a execução da gestão de segurança.

É possível perceber que após os dados apresentados na análise de riscos tipo FMEA a sua devida importância dentro dos requisitos de segurança em uma barragem de rejeitos. A tabela FMEA é capaz de correlacionar informações traçando perfis probabilísticos de caráter apenas qualitativos, se torna um fundamental instrumento de segurança.

Torna um suporte indispensável ao programa de segurança de barragens, analisando eventos indesejáveis apresentando suas possíveis correções. Este tipo de análise voltado para as barragens de rejeito se torna um efetivo instrumento de segurança e estabilidade, sendo adaptável dentro de qualquer tipo de maciço.

Uma operação em conjuntos com ambos os métodos tende a tratar sistematicamente os perigos atrelados a uma barragem de rejeitos. Passam a estimar e avaliar riscos potenciais, proporcionando uma melhoria no conhecimento da barragem. A aplicação das análises juntas em um único projeto, são capazes de abordar os aspectos específicos da obra e do local, desta foram se tornam

ferramentas que se auto completam. Em conjunto são capazes de potencializar a sistematização da operação de barragens, adequando o maciço dentro de uma demanda legal exigida de forma segura e precisa.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS COMPLEMENTARES

Os estudos apresentados nesta pesquisa visaram apresentar duas metodologias distintas que quando trabalhadas juntas trazem mais transparência e segurança nas atividades de gestão de barragens. Mostrando serem sistemas práticos e versáteis quando seguidas e garantem a estabilidade do maciço conforme o atendimento às demandas necessárias para o cumprimento da Lei 12.334.

A partir do Sistema SIGBAR e da análise tipo FMEA é possível identificar a severidade das possíveis falhas que podem ser apresentadas durante uma operação de barramento. Desta forma, consegue-se determinar as medidas de mitigação e correção eventualmente necessárias para redução de riscos ou até mesmo de uma eventual ruptura em tempo hábil.

Ainda que o FMEA seja uma metodologia apenas qualitativa e o SIGBAR apresentar um caráter efetivo na segurança de barragens, ambas as técnicas representam muitas vezes apenas dados estatísticos e informativos. Porém, mesmo com este limitante se tornam instrumentos fundamentais, na qual conseguem apresentar análises minuciosas sobre uma barragem de rejeito, sendo capazes de apontar informações objetivas e precisas que permitem o reconhecimento e a análise de eventos indesejáveis.

Além de realçarem a necessidade de alguma mudança, apresentam o desempenho e desenvolvimento do maciço, demonstrando informações para evitar que problemas ocorram. Estes tipos de sistemas podem e devem se tornar parte integrante e obrigatória dentro de um programa de segurança de uma barragem de rejeito. São ferramentas que auxiliam a engenharia de barragens e passam a ser fundamentais para o seu funcionamento garantindo sua segurança e estabilidade dentro de uma demanda legal.

Por fim são metodologias que trabalhadas juntas formam uma forte ferramenta capaz de fornecer a probabilidade de ocorrência de algum erro, reduzindo a probabilidade de falhas.

Recomenda-se para pesquisas futuras a aplicação na prática dos sistemas discutidos, adaptando-os de início para barragens de pequeno porte. É indispensável o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento mais precisa para as barragens de rejeito, visto que o SIGBAR apresenta algumas falhas que precisam de correções.

Além disto, se vê necessário o surgimento de novas técnicas e metodologias que possam ser aplicadas de forma mais transparentes para a comunidade de entorno, evitando desta forma, o surgimento de rumores sobre a segurança do maciço.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas (2012). *Guia rápido sobre Planos de Segurança de Barragens*. Disponível em < <http://www.ana.gov.br> > Acesso em 26 jun. 2016
- Abrão P. C. & Oliveira, S. L. 1998. *Mineração. Geologia de Engenharia*. Editora: Oficina de Textos, São Paulo, SP, 438 p.
- Albuquerque-Filho L. H. 2004. *Avaliação do Comportamento Geotécnico de barragens de Rejeito de Minério de Ferro Através de Ensaios de Piezocone*. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 213 p.
- Araujo C. B. 2006. *Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro*. Dissertação - COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro - RJ, 143p.
- Ávila P. de 2009. *Programa Especial de Segurança em Barragens de Rejeitos*. Disponível em < <http://www.ibram.org.br> > Acesso em: 16 de fevereiro de 2016
- Barbosa L. 2002. *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Ministério da integração Nacional - Secretaria da infraestrutura Hídrica. Brasília - DF. Disponível em: <www.codevasf.gov.br>. Acesso em: 03 de abril. 2016.
- Brasil 2010. *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: 29 de set de 2015
- CNPGB – Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens. 2005. *Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens*. 1º Relatório de Progresso. Portugal, 13p. Disponível em: <<http://cnpgeb.inag.pt/port/actividades.html#grupos> > Acesso em: 16 jun. 2016.
- Cruz J. S. da. & Neves, L. P. *Segurança de Barragens*. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. Disponível em <<http://www.ibram.org.br>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2016
- Duarte A. P. 2008. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco*. Dissertação - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 130p.
- Francisco-Neto, M. 2010 *Análise Dinâmica de Rompimento em Barragem de Rejeitos*. Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia - XIII COBREAP - Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias.
- Lozano F. A. E. 2006. *Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquico*. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 142 p.

- Machado W. G. F de 2007. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo - SP, 156p.
- Mineração & Sustentabilidade. 2016. *Tragédia, crise, exemplo e história*. Revista, março e abril de 2016, Edição 27- Ano 5.
- Nunes C. M. 2012. *Política nacional de segurança de barragens - lei 12.334/2010*. *Dam World Conference*. Maceió, outubro de 2012. Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 28 abr. 2016.
- Oliveira R.; Almeida, L.; Pedro, J. O.; Silva, A. P.; Alves A. 2015. *Manual do empreendedor- volume IV: guia de orientação e formulários dos planos de ação de emergência*. Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2015. Disponível em: <<http://audienciapublica.ana.gov.br/>>. Acesso em: 03 abr. 2016.
- Russo F. de M. 2007. *Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo*. Tese de Doutorado - Curso de Geotecnia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, Brasília - DF, 331 p.
- Santos D. A. M dos. 2010 *Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro*. Mestranda PPGEM. Escola de Minas/UFOP. Ouro Preto - MG, 9 p. Disponível em: <<http://www.cbmina.org.br/>>. Acesso em: 03 abr. 2016.
- Souza A. M. de, Rodrigues, B. V., Santos, C. G. dos, Passos, D. D. V., Rezende H. J. A. de 2010. *Inventário Estadual de Barragens do Estado de Minas Gerais*. FEAM-DQGA-GESOL-IB-01/2010. Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte - MG, 38p.
- Souza M. J. de. 2008. *Barragens de rejeito*. Graduanda do 9º Período da turma do Curso de Direito da Faculdade Atenas. Paracatu - MG. 17p
- Toledo J. C. de & Amaral, D. C. 2006 *FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha*. GEPEQ – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade DEP – UFSCar. São Carlos - SP. Disponível em: <www.gepeq.dep.ufscar.br>. Acesso em: 05 out. de 2015
- Valerius M. B. 2014. *Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás*. Dissertação de Mestrado - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília - DF, 121p.