
ESTUDO DE CASO DA RUPTURA DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MARIANA-MG)

Eduardo Nassar de Souza

Gabrielle Amorim Sena Souza

Igor Ferreira da Silva

Kelly Santos Tatto

Paulo Afonso de Cerqueira Luz

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

A barragem de rejeitos é uma estrutura projetada e elaborada para contenção de grandes quantidades da mistura de líquidos e sólidos advindos do processo de mineração. Este trabalho apresenta, por meio de pesquisas e da análise do relatório Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos do Fundão (MORGENSTERN *et al.*, 2016), as causas que levaram a Barragem de Fundão, localizada na cidade de Mariana, em Minas Gerais, a romper no dia 5 de novembro de 2015. Esse acidente causou 19 vítimas fatais e poluiu o Rio Doce em 600 km de extensão. A lama com rejeitos de minérios de ferro atingiu o Oceano Atlântico, na cidade de Linhares, em Espírito Santo, trazendo prejuízos ambientais e socioeconômicos para moradores e trabalhadores das regiões afetadas pelo desastre. Com base nos estudos realizados, verificou-se que a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão se deu por deslizamento fluido provocado por liquefação e foi consequência de uma cadeia de eventos e condições, pois, ao ocorrer tremores no subsolo, foi gerada uma carga adicional, acelerando o início do processo de liquefação, permitindo assim a ocorrência do deslizamento.

Palavras-chave: Ruptura de barragem. Barragem de Fundão. Deslizamento.

1 INTRODUÇÃO

O termo barragem se refere a uma estrutura presente em um curso de água temporário ou permanente com a finalidade de conter ou acumular substâncias líquidas e/ou sólidas. Essas estruturas, sejam de pequeno ou grande porte, devem ser projetadas de modo a satisfazer as condições necessárias para garantir um adequado funcionamento, pois são essenciais para a infraestrutura de um país, uma vez que são utilizadas para diversas finalidades: armazenamento de água para irrigação, abastecimento público, geração de energia elétrica, controle de cheias, regularização de vazões e até mesmo a contenção de rejeitos de mineração. As barragens podem ser classificadas de acordo com o tipo de material utilizado para a sua construção. A escolha desse material está diretamente ligada às necessidades impostas em função de aspectos geológicos, geotécnicos, condições topográficas do terreno e, principalmente, sua finalidade. De modo geral, as barragens podem ser construídas em solo fino compactado, enrocamento ou concreto.

A barragem de rejeitos, por sua vez, é a estrutura projetada e executada para contenção de grandes quantidades da mistura de líquidos e sólidos advindos do processo de mineração. É frequentemente construída em solo fino compactado e por etapas. Como os rejeitos são materiais totalmente descartados de um processo de mineração, é necessário conhecer todas as suas propriedades, características, resistência e possíveis impactos ambientais decorrentes de contaminação do curso da água, no caso de ruptura de barragem. A barragem precisa ser dimensionada, projetada e executada corretamente para funcionar como um local de disposição de rejeitos de mineração, de forma segura e econômica, evitando a ocorrência de rupturas que acarretem a destruição de comunidades e ecossistemas. Assim, é essencial estudar laudos técnicos de rupturas ocorridas em barragens de rejeitos, para que seja possível evitar concepções e execução de projeto inadequadas, minimizando acidentes que, quando ocorrem, tornam-se tragédias.

O objetivo do artigo é realizar um estudo de caso do rompimento da Barragem de Fundão, situada na cidade de Mariana, em Minas Gerais, de propriedade da Vale, abordando os processos construtivos de barragens de rejeito, a Lei Nacional nº 12.334, referente à política nacional de segurança de barragens, a Norma Brasileira (NBR) 13028 da ABNT (2017), *Mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – requisitos*, a verificação de todo o processo de operação e das etapas de alteamento e, por fim, a análise do relatório Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos do Fundão, considerando, inclusive, o impacto em número de vítimas fatais.

2 METODOLOGIA

Para a consolidação deste artigo, foi realizada uma pesquisa teórica acerca do tema, tendo como base estudos bibliográficos que contemplam as atividades extrativas de minérios, métodos de construção das barragens de rejeitos e seus principais conceitos envolvidos e os parâmetros essenciais para o desenvolvimento do projeto de barragem conforme as normas estabelecidas e as possíveis causas de uma ruptura da estrutura.

Em um segundo momento, foi realizado um estudo de caso da Barragem de Fundão. Após seu acidente, ocorrido em novembro de 2015, uma junta de consultores composta por três estrangeiros e um brasileiro foi contratada para elaborar um relatório técnico sobre as causas do rompimento da barragem, como parte do processo judicial e das investigações de engenharia (peritagem técnica). Esse documento foi utilizado como referência em grande parte da análise deste trabalho.

O estudo de caso contemplou a análise do acidente ocorrido, de modo a apontar as suas principais características, causas e o mecanismo de ruptura correspondente. Foram estudados os procedimentos utilizados para a construção, a operação e a manutenção da barragem de Fundão. Simultaneamente, foram realizadas pesquisas direcionadas aos procedimentos recomendados por norma, a fim de evidenciar os problemas que ocorreram, em função dos erros de manejo dos rejeitos e dos erros decorrentes dos desvios do eixo da barragem. Tal análise pode ser útil para que sejam melhor compreendidos os problemas ocorridos durante o projeto, a execução e o manejo do rejeito, ao longo dos diversos alteamentos executados, evitando que tais erros se repitam em outras barragens de rejeitos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos cinco anos, diversos estudos foram realizados a respeito das barragens de mineração no país. O interesse por esse assunto aumentou após a ruptura da Barragem de Fundão. Essa tragédia causou 19 vítimas fatais e poluiu o Rio Doce em 670 km de extensão, segundo a Fundação Renova (2022). A lama com rejeitos de minérios de ferro atingiu o Oceano Atlântico, atravessando os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e trouxe prejuízos ambientais e socioeconômicos para moradores e trabalhadores das regiões afetadas pelo desastre. Além disso, em 25 de janeiro de 2019,

outro acidente envolvendo uma barragem de mineração ocorreu no município de Brumadinho, em Minas Gerais, com cerca de 270 vítimas – 260 corpos encontrados e dez desaparecidos.

Com essas duas rupturas, ocorridas em um intervalo de três anos e meio, houve a preocupação com as barragens de mineração existentes no país. Análises têm sido feitas a fim de compreender as características dos rejeitos de mineração, os métodos construtivos das barragens, os possíveis erros técnicos, os controles de segurança realizados e as causas que levaram à ruptura dessas duas barragens. Também existem estudos que visam a encontrar uma solução técnica para que tragédias como essas não ocorram novamente.

3.1 Extração de minérios

A atividade de mineração consiste no processo de obtenção de minérios que são separados do solo e tratados em processos industriais para servirem como recursos energéticos ou matéria-prima na fabricação de diversos produtos. A extração de minérios tem grande importância na economia brasileira, pois, de acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM) (2020), só a classe de substâncias metálicas, como ferro e alumínio, obteve lucro de cerca de US\$ 33,8 bilhões, apenas por meio das exportações realizadas em 2019.

Segundo Valerius (2014), antes de finalmente poderem ser utilizados como matéria-prima, os minérios passam por diferentes etapas, como extração, transporte, britagem e separação dos demais componentes do solo e, em seguida, o minério é encaminhado para os processos de espessamento, filtragem, secagem, estocagem, sendo carregado nos trens e encaminhado para o destino de interesse. Enquanto isso, o material sem serventia, que é separado do restante no processo de concentração, também conhecido como *rejeito de mineração*, é disposto no meio ambiente. Sua disposição é feita em cavas a céu aberto, galerias subterrâneas ou, nos casos mais comuns, são construídas barragens para o armazenamento desse material.

Os rejeitos dispostos na Barragem de Fundão são provenientes da extração do minério de ferro, que é utilizado para a fabricação de aço, elemento essencial na construção civil e na montagem de automóveis, máquinas, aparelhos eletrônicos, ferramentas, entre outras finalidades.

3.2 Barragens de rejeito

Barragens de rejeito são estruturas cujo principal objetivo é armazenar o material proveniente do processo industrial de extração mineral e considerado com teor de

minério muito baixo, inviabilizando seu aproveitamento econômico e evitando que esse descarte seja feito em rios limpos e no meio ambiente. Portanto, é um local para que o rejeito de determinado minério seja depositado de forma organizada e confinada, causando o menor impacto ambiental possível. Essas barragens são estruturas que variam de médio a grande porte – considerando-se altura e volume do seu reservatório –, mas que são alteadas constantemente pela necessidade contínua de depósito de rejeitos, e por razões econômicas não são construídas de uma só vez.

3.3 Métodos de construção de barragens de rejeitos

Barragens de rejeitos são estruturas que devem ser estudadas, projetadas e dimensionadas de acordo com o tipo de rejeito que será depositado, a fim de servir como sua disposição permanente.

Conforme mencionado anteriormente, toda barragem de rejeito é construída por etapas, por questões econômicas. Dessa forma, as barragens são construídas por meio de alteamentos sucessivos. Como sistema típico de construção e alteamento, todas as barragens são iniciadas com um dique de partida, uma estrutura construída por aterro ou enrocamento, com altura entre 10 e 15 m, para conter uma quantidade inicial de rejeitos, conforme Figura 1. “O dique de partida possui um controle construtivo melhor, com materiais permeáveis que permitem a drenagem de água e controlam a erosão” (VALERIUS, 2014, p. 9).

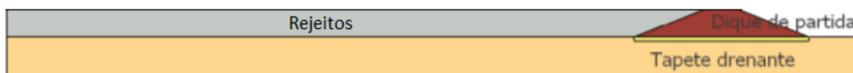


Figura 1 Estrutura inicial da barragem de contenção

Fonte: Adaptada de Valerius (2014, p. 9).

Como a quantidade de rejeitos aumenta continuamente ao longo do tempo, em função da produtividade de extração da mina, esse dique passa a ser insuficiente para conter tantos resíduos. Então, são realizados os alteamentos das barragens, que podem ser feitos por meio de três métodos construtivos: *a montante*, *a jusante* e *por linha de centro*.

A escolha do método de alteamento deve ser feita de acordo com a topografia, a geologia, as características do rejeito e a capacidade de volume que a estrutura deverá suportar e, como em um bom projeto de engenharia, deve ter um custo-benefício adequado.

A seguir, são descritos os três tipos de alteamento das barragens de rejeitos.

3.3.1 Alçamento a montante

Este método consiste na construção de uma nova estrutura a montante do dique de partida. A nova contenção é feita sobre o próprio rejeito já depositado no reservatório da barragem. Segundo Thomé e Passini (2018, p. 58), “O método de alçamento para montante [...] consiste na construção de diques sobre as praias formadas pela decantação do próprio rejeito, deslocando o eixo da obra em direção a montante”. Esse processo é realizado sucessivamente até a elevação final prevista e/ou necessária da barragem. A Figura 2 ilustra como os alçamentos são dispostos.

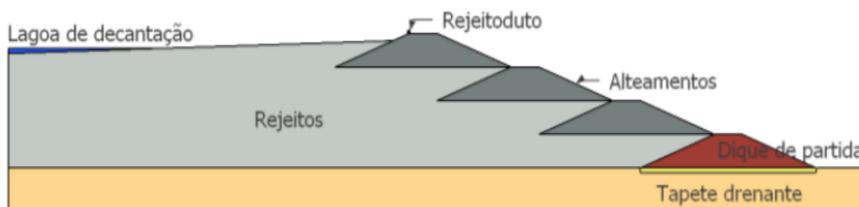


Figura 2 Alçamento a montante

Fonte: Adaptada de Valerius (2014, p. 9).

O método de alçamento a montante tem grande atratividade para as empresas proprietárias das barragens, pois seu processo tem baixo custo de construção e rápida execução, por não requerer um volume grande de terraplanagem e exploração de jazidas. Assim, tornou-se o método mais comum de alçamento em barragens de rejeitos.

Apesar desses pontos positivos, barragens com alçamento a montante têm apresentado diversos problemas nos últimos anos, pois esse tipo de alçamento é o que apresenta maiores riscos de ruptura. Isso se deve a dois aspectos desfavoráveis: 1. os alçamentos são construídos em cima do próprio rejeito, que não tem resistência suficiente para suportar o aterro do alçamento, podendo provocar liquefação, definida por Luz e Lázaro (2019, p. 77) como o processo em que o “solo do aterro da barragem passa ao estado líquido (resistência ao cisalhamento nula), devido aos elevados valores de pressões neutras nos vazios do solo do aterro da barragem [...]”, o que pode ocasionar a ruptura da estrutura; e 2. os alçamentos são estruturas individuais, sem ligação entre si, com o agravante de a linha freática estar situada muito próxima do talude de jusante. Essa situação tem potencial para trazer diversos problemas, como surgimento de água no talude de jusante da barragem e *piping* (erosão interna regressiva).

Após a ruptura da Barragem de Fundão, considerada o maior desastre ambiental do país, e a ruptura da barragem no município de Brumadinho, com aproximadamente 270 vítimas, foi publicada no *Diário Oficial da União* (BRASIL, 2019b), no dia 12 de agosto de 2019, a Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019, a qual estabelece medidas para assegurar a estabilidade de barragens de mineração. A ANM resolve, no art. 2º, que “Fica proibida a utilização do método de alteamento de barragens de mineração denominado ‘a montante’ em todo território nacional”.

Com isso, a Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), referente à política nacional de segurança de barragens, foi alterada e passou a vigorar no seu art. 2º-A, § 2º, em que consta o seguinte:

O empreendedor deve concluir a descaracterização da barragem construída ou alteada pelo método a montante até 25 de fevereiro de 2022, considerada a solução técnica exigida pela entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária e pela autoridade licenciadora do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama). (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020).

A descaracterização de uma barragem consiste na modificação da estrutura para que ela fique estável e possa ser reintegrada ao meio ambiente, sem as características de uma barragem. Assim, o rejeito passa a ser “disposto em cavas exauridas e em pilhas de estéril e de rejeitos” (VALE, 2022).

Considerando os acontecimentos dos últimos anos, é possível compreender quanto o método de alteamento a montante é falho e suscetível a elevados riscos de rupturas, com potencial risco à vida humana e à dos animais, além de ser um processo que causa danos ao meio ambiente. Por isso, não deve mais ser empregado.

3.3.2 Alteamento a jusante

Diferentemente do método anterior, nesse caso, a nova estrutura de alteamento é realizada a jusante do dique inicial de partida da barragem. Nesse método, o alteamento não é construído sobre o rejeito, mas, sim, sobre o aterro executado na etapa anterior, que já foi dimensionado para ter a resistência necessária para suportar uma nova sobrecarga (do aterro do alteamento) sobre o maciço compactado já existente, o que, para Luz e Lázaro (2019), diminui os riscos de uma possível ruptura.

De acordo com Machado (2007), este tipo de alteamento é o mais caro para execução, pois implica grandes volumes de terraplanagem, além de ser um processo mais demorado que o alteamento a montante; por essas razões, não é o método preferido entre as grandes empresas de mineração. Na Figura 3, é possível observar que a largura aumenta proporcionalmente à altura e, a cada etapa, essa base aumenta e garante

maior estabilidade para a estrutura. Sendo assim, é considerado o método mais seguro entre os três citados anteriormente, segundo Luz e Lázaro (2019). Outro ponto positivo citado pelos autores é que a linha freática fica mais afastada do talude de jusante, evitando que ocorra *piping* no aterro e liquefação.

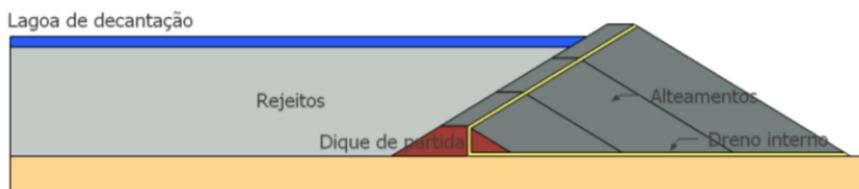


Figura 3 Alteamento a jusante

Fonte: Adaptada de Valerius (2014, p. 9).

3.3.3 Alteamento por linha de centro

O alteamento realizado por linha de centro segue o princípio de não alterar o eixo vertical do dique de partida inicial, conforme Luz e Lázaro (2019) e demonstrado na Figura 4. Para que isso seja possível, é realizada uma técnica intermediária entre os alteamentos a montante e a jusante. Sendo assim, parte do alteamento é feito sobre a praia de rejeitos existente e o restante é feito sobre o aterro de jusante da etapa anterior.

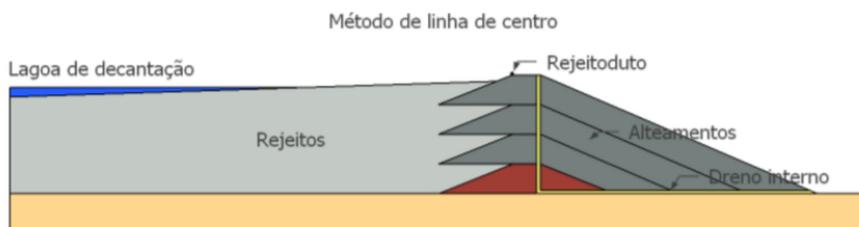


Figura 4 Alteamento por linha de centro

Fonte: Adaptada de Valerius (2014, p. 9).

Dessa forma, consiste em um meio termo entre os dois métodos anteriores, com o aumento da largura de sua base e um custo de execução menor em relação ao alteamento a jusante. Apesar disso, para Valerius (2014), não é mais seguro que o alteamento a jusante, pois a parte da sua estrutura apoiada sobre os rejeitos pode sofrer o processo de liquefação e ocasionar o rompimento da barragem.

3.4 Causas de ruptura das barragens de rejeitos

A barragem de rejeitos é uma estrutura de grande porte que necessita de diversos cuidados no seu projeto, sua execução e sua manutenção, pois seu rompimento geralmente ocasiona grandes tragédias, como mortes e danos ambientais e materiais. Para isso, se faz necessário entender que existem diversos fatores que afetam o bom desempenho da estrutura.

A falta de considerações adequadas ainda na etapa de projeto, como a escolha do tipo de alteamento ou erros no seu dimensionamento, a ocorrência de problemas durante o processo de construção da barragem e o futuro monitoramento inadequado podem provocar danos à barragem.

Em seu funcionamento, essa estrutura de contenção de rejeitos está sujeita a deslocamentos e/ou deformações devido às suas grandes dimensões, mas também pode ter influência de agentes internos e externos. Chaves (1994) aponta que as mudanças geométricas externas são resultado dos deslocamentos da estrutura como um todo e que as mudanças de geometria internas são derivadas de deformações, podendo ambas ocorrer simultaneamente.

Algumas complicações também podem surgir devido ao alteamento. Segundo Luz e Lázaro (2019), o processo realizado a montante faz com que a linha freática fique próxima ao talude externo, ocasionando regiões com umidade no talude a jusante.

A disposição das camadas de alteamento da barragem é outro fator que oferece risco ao seu desempenho. O alteamento a montante traz pontos de fragilidade à estrutura, pois, além de estar apoiada sobre o rejeito existente, que tem baixa resistência ao cisalhamento, existem regiões em que a linha freática fica mais próxima ao talude externo, como indicado na Figura 5, que podem comprometer a estabilidade dos aterros.

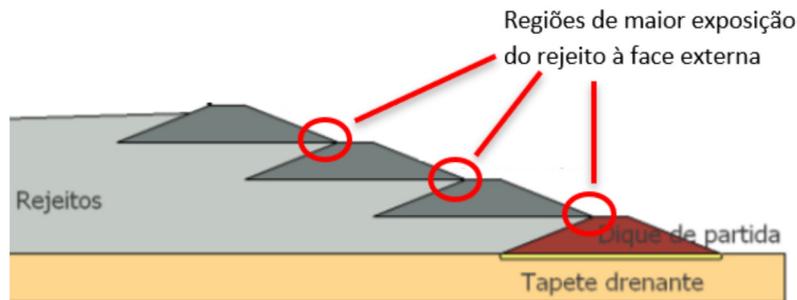


Figura 5 Pontos de fragilidade da barragem

Fonte: Adaptada de Valerius (2014, p. 9).

O sistema de drenagem é importante para o funcionamento da estrutura durante todo o seu período de utilização. Após a desativação da barragem, espera-se que o nível de água presente no reservatório diminua, devido ao sistema. Conforme Luz e Lázaro (2019), caso haja ineficiência do sistema, a água presente no reservatório poderá ser misturada com o solo do aterro, passando para o estado líquido, no qual a resistência ao cisalhamento é nula, criando pontos de fraqueza na estrutura e provocando um possível colapso.

Existem diversos outros fatores que podem apresentar riscos para o desempenho de uma barragem de rejeitos. As ocorrências de acidentes associados a processos geológicos internos (endógenos) da Terra, como as atividades tectônicas que geram terremotos (no Brasil ocorrem somente pequenos tremores de terra), e processos da geodinâmica externa (exógenos) da Terra, tais como os escorregamentos, inundações, erosões, assoreamentos, colapso dos solos e expansão dos terrenos, são aspectos que podem influenciar a estabilidade de uma barragem.

A discussão das causas de ruptura será detalhada de forma mais abrangente no estudo de caso proposto neste trabalho, direcionado para o acidente ocorrido na Barragem de Fundão.

3.5 Instrumentação para barragens de rejeitos

O objetivo principal da instrumentação de uma barragem é monitorar a segurança dela, garantindo que as cargas e os esforços exercidos na estrutura não irão comprometer sua estabilidade. Para tanto, podem ser instalados vários instrumentos geotécnicos.

As técnicas de instrumentação geotécnica “Incluem a seleção do tipo e a determinação da quantidade de instrumentos a serem utilizados, sua localização e instalação, a aquisição dos dados, análise e interpretação dos resultados” (MACHADO, 2007, p. 76). A instrumentação utilizada na barragem deve ter, no mínimo, a mesma vida útil que a própria barragem, considerando que há a possibilidade de haver danos aos equipamentos.

Os principais tipos de instrumentos geotécnicos utilizados em barragens de rejeitos são: marcos topográficos superficiais; piezômetros tubulares; inclinômetros; medidores de nível de água; medidores de vazão de percolação; entre outros.

Um projeto de monitoramento não depende apenas do uso de instrumentos de precisão, mas também de vistorias constantes para inspecionar as condições em que a estrutura se encontra e, com isso, ter um conhecimento claro da atual condição de segurança da barragem. Segundo o Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (BRASIL, 2019a), a inspeção local deve incluir vistorias desde a fundação, os dispositivos de descarga, o reservatório, as áreas a jusante da barragem até os dispositivos de saída.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A descrição e o histórico apresentados neste item foram baseados na análise do relatório Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão, elaborado por Morgenstern *et al.* (2016).

4.1 Histórico da barragem

No reservatório da barragem em Mariana, havia dois tipos de rejeitos: areia e lama. A areia era composta por partículas de areia e silte, enquanto a lama apresentava granulometria argilosa. Esses materiais foram depositados de maneiras diferentes. Enquanto as areias foram dispostas de maneira a formar um reforço para retenção da lama, a lama foi retida por um dique de partida em aterro ou enrocamento situado no pé do talude de jusante.

Para manter a segurança e a estabilidade da barragem, era necessário garantir que houvesse um sistema de drenagem eficiente, principalmente na parte do material arenoso, de forma a evitar acumulação de água e saturação do depósito. Para isso, foi

garantido em projeto um fundo (tapete drenante) permeável por baixo da areia com extensão até o dique de partida.

Os dois primeiros eventos que contribuíram para a ruína da barragem ocorreram em 2005 e em abril de 2009.

O primeiro incidente diz respeito ao fato de a Barragem de Germano ter atingido sua capacidade máxima devido à continuidade da atividade extrativa de minério e os rejeitos excedentes terem sido despejados no Vale do Fundão como carga adicional. Para a disposição desses rejeitos, foi utilizado um empilhamento drenado, que consistiu na deposição inicial a montante do dique 1, a uma elevação de 830 m, com sistema de drenagem interna localizado na face de montante dos diques de alteamento até atingir a elevação final de 920 m, como é possível observar na Figura 6.

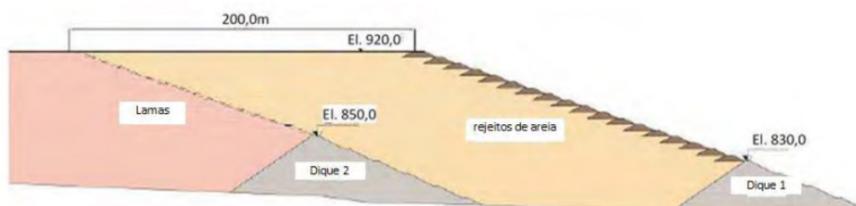


Figura 6 Alteamento a montante do dique 1 pelo conceito de empilhamento drenado

Fonte: Adaptada de Morgenstern *et al.* (2016, p. 6).

O segundo incidente foi desencadeado devido ao alteamento precoce do Dique 2, em abril de 2009, o que fez com que o nível de lama ultrapassasse o de rejeito arenoso. Além disso, houve uma redução na quantidade de areia disponível no local enquanto a disposição de lama manteve-se contínua. Para solucionar esse incidente, entre os diques 1 e 2 foi construído um dique intermediário, denominado dique 1A, para conter o alteamento contínuo de lama.

4.2 Recuo da estrutura

Em julho de 2010, a barragem apresentou várias inconformidades em relação ao sistema de drenagem. Inicialmente, a galeria principal, ao lado da ombreira direita, apresentou um vórtice por onde entrava o rejeito saturado, resultado de trincas que surgiram devido a defeitos na fundação e na construção. Em seguida, o mesmo problema ocorreu na galeria secundária, localizada ao lado da ombreira esquerda. Para conter um possível desastre causado pelos sistemas de drenagem, foi adotado um pro-

cesso de injeção de concreto de alta pressão na parte interna das galerias, o que mais tarde se mostrou ineficiente, devido ao surgimento de um sumidouro próximo a uma das galerias. Desse modo, foi decidido o fechamento total por concretagem de ambos os sistemas. A disposição dos rejeitos já tinha atingido a cota 835 m, 10 m acima do limite de resistência estrutural da galeria secundária e, portanto, não poderia receber mais elevações na região até que toda a galeria fosse fechada.

4.3 Incidente com talude em agosto de 2014

Em janeiro de 2014, foi iniciado um planejamento para um novo alteamento 20 m acima da capacidade máxima, de 920 m, mas seria necessário fazer a ligação dos drenos com um sistema de drenagem interno mais complexo para dar suporte à estrutura.

No dia 27 de agosto de 2014, foram notadas grandes trincas que estavam presentes na crista e no recuo, conforme indicado na Figura 7.



Figura 7 Trincas na crista e recuo na ombreira esquerda

Fonte: Adaptada de Morgenstern et al. (2016, p. 17).

Com a possibilidade de trazer maiores problemas à estabilidade da barragem, foi necessária a execução de uma berm de reforço.

4.4 Abalos sísmicos em 5 de novembro de 2015

O território brasileiro está localizado na região central de uma placa tectônica e, por isso, não é afetado por grandes tremores. Porém, nos entornos da barragem existem detonações constantes devidas ao trabalho de extração mineral e esse fato não deveria atrapalhar o desempenho da grande estrutura.

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), no dia do incidente, houve tremores que antecederam o desastre. Em uma listagem mais detalhada na Tabela 1, foram citados todos os abalos ocorridos naquele dia, com os seus respectivos horários e a identificação do motivo.

TABELA 1

Listagem de abalos ocorridos no dia da ruptura

Hora local	Magnitude de Momento Mw	Distância de Fundão	Identificação
13:01:49	2.1	2.6 km	Detonação na mina
13:06:06	2.3	2.6 km	Detonação na mina
14:12:15	2.2	< 2 km	Abalo precursor
14:13:51	2.6	< 2 km	Abalo principal
14:16:03	1.8	< 2 km	Abalo secundário
15:45			Ruptura da barragem

Fonte: Morgenstern *et al.* (2016, p. 18).

A ruptura ocorreu na tarde do dia 5 de novembro de 2015. Algumas atividades estavam em andamento e muitos trabalhadores presenciaram o acontecimento a partir de diferentes ângulos, como indicado na Figura 8.



Figura 8 Posição dos trabalhadores durante a ruptura

Fonte: Morgenstern *et al.* (2016, p. 19).

A partir de entrevistas com as testemunhas, citadas no Relatório, é possível traçar uma linha de acontecimentos durante o desastre. O início da ruptura, conforme descrito pelo Comitê, foi anunciado por uma nuvem de poeira que surgiu do lado esquerdo da barragem. As testemunhas presentes nos pontos 4 e 6 avistaram a fumaça e a formação de ondas no centro do reservatório, seguidas de trincas no lado esquerdo. Outra testemunha, localizada na posição 5, presenciou o aumento de uma das trincas e a sua propagação (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Os trabalhadores que estavam próximos ao ponto 9 relataram uma avalanche de rejeitos partindo da ombreira esquerda, mas o dique de partida aparentou estar intacto, como consta na documentação da ruptura. Para os especialistas, isso indicou que o dique não teve participação direta no mecanismo de ruptura.

Nota-se na Figura 8 que os pontos 1, 2, 3 e 5 estão próximos ao recuo. As testemunhas de cada um desses pontos descreveram que as movimentações se iniciaram nas partes mais baixas do recuo e depois foram subindo, até que um jato de água suja explodiu para fora do dreno presente na ombreira esquerda.

Diante da sequência de acontecimentos que levaram ao colapso da estrutura, é estimada uma perda de 32 milhões de m³ de rejeitos, cerca de 61% do volume total contido no reservatório, o que levou a mortes e a prejuízos ambientais.

4.5 O que fez o Comitê?

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016), para que fosse possível desenvolver um diagnóstico preciso sobre a ruptura da Barragem de Fundão, foi desenvolvida uma estratégia metódica com o intuito de determinar as causas imediatas do acidente, que se dividia em três partes: formulação de hipóteses, triagem de hipóteses e, por fim, teste das hipóteses, que deveria explicar por que ocorreu um deslizamento fluido por liquefação e por que esse deslizamento ocorreu especificamente na ombreira esquerda.

4.5.1 Método de investigação

Com a ruptura da barragem, segundo o Comitê (MORGENSTERN *et al.*, 2016), a maior parte do material de contenção da estrutura foi levada a jusante pela onda de rejeito, fazendo com que, para se realizar uma análise precisa, fosse necessária uma reconstrução digital da barragem por meio da compilação de dados topográficos, do estudo de projetos anteriores que compõem o histórico de construção da barragem e ensaios laboratoriais para estimar as propriedades dos elementos estruturais antes da ruptura da barragem.

Dadas as evidências e as testemunhas, entre as possíveis causas estudadas pelo Comitê que poderiam ter desencadeado a ruptura da barragem, a *ruptura por liquefação* foi considerada a mais consistente, provocada por um aumento de carga estática, considerando-se o desencadeamento com e sem a série de abalos sísmicos que antecedeu a ruptura.

A liquefação caracteriza-se pela queda na resistência ao cisalhamento de um determinado material, portanto, esse passa a se comportar como fluido. Observa-se inicialmente que a estrutura foi projetada com empilhamento drenado, o que diz respeito à prevenção de saturação do rejeito. Porém, com as várias alterações de projeto, houve um grau de saturação do rejeito, que é um material arenoso, comprometendo sua resistência ao cisalhamento. Durante a investigação, não foi encontrado nenhum registro de sondagens ou ensaios de penetração para verificar a saturação do material.

4.6 Por que ocorreu um deslizamento fluido?

Materiais como os do rejeito, constituídos por areias fofas e argilas moles, são denominados materiais contráteis, pois assim que lhes é aplicada uma carga estática esses materiais tendem a se comprimir. O rejeito foi carregado hidraulicamente à barragem, o que indica que está saturado e, quando o material contrátil se encontra saturado, a

água inibe sua movimentação em conjunto, fazendo, assim, que as partículas se movam como fluido, devido à pressão nos poros preenchidos por água. Observa-se que a Barragem de Fundão entrou em colapso em um curto período, o que indica uma rápida dissipação do excesso de pressão hidráulica por falta de drenagem.

Os autores do relatório realizaram um ensaio utilizando materiais com as mesmas características intrínsecas do rejeito de Fundão, observando que, conforme as tensões aumentam, paralelamente simulando uma continuidade no alteamento, observa-se que o solo tende a ter um comportamento contrátil, equivalente ao de uma areia fofa saturada, o que resulta na movimentação fluida do rejeito.

4.6.1 Saturação

A saturação no interior da barragem foi outro fator que levou ao deslizamento por liquefação. O sistema de drenagem da barragem continha um dreno de fundo altamente permeável, que se prolongava pelos rejeitos até o dique de partida, evitando a acumulação de água, reduzindo a saturação e, conseqüentemente, os riscos de liquefação.

Em 2009, após falhas na construção do dreno de fundo e dos filtros – além do fato de o trecho da saída do dreno nunca ter sido concluído –, houve uma erosão e deslizamento no talude a jusante do dique de partida 1 e, por isso, o projeto original já não tinha a mesma serventia de antes. Assim, o método alternativo encontrado consistia em ter um tapete drenante perto do topo da areia armazenada, na cota 826 m, como uma tentativa de substituir o dreno de fundo que estava inoperante, mas isso não resolveu a situação das areias subjacentes ao tapete drenante, que continuaram saturadas.

Ao ser construído, em 2010, o tapete drenante cobria toda a largura do dique de partida, mas, em 2013, o maciço e o reservatório tinham aumentado em volume e altura, expandindo-se para além do dreno, causando uma limitação no fluxo de percolado para um dreno mais estreito e, como consequência, aumentando o nível de saturação dos rejeitos.

Ainda em 2013, com o realinhamento da barragem (desvio do eixo) para que o tamponamento da galeria secundária fosse realizado, surgências foram observadas na ombreira esquerda na cota 855 m, durante os meses de março e junho. Em novembro, as surgências apareceram na cota de 860 m. Isso foi resultado do nível de saturação, que estava alcançando a superfície dos rejeitos. Os drenos construídos foram efetivos apenas perto da superfície, mas não reduziam a saturação na massa de rejeitos.

Em 2014, o reservatório aumentou em grande escala (altura e volume) e novas surgências apareceram na cota 855 m da ombreira direita. Além disso, à medida que os alteamentos eram realizados, o reservatório se afastava do tapete drenante, que não

conseguia atender aos níveis crescentes de saturação no material arenoso, observando-se então a necessidade de novos drenos na ombreira esquerda.

Em 2015, um novo tapete drenante foi concluído na ombreira esquerda e outro estava sendo construído na ombreira direita, mas, com a barragem ainda em recuo, eles não demonstraram eficácia, tornando o método inoperante. Portanto, a saturação do rejeito não foi controlada e esse aspecto foi fundamental para o deslizamento fluido por liquefação.

4.7 A lama e suas características

Apesar da quase ausência de minerais de argila, a lama encontrada na Barragem de Fundão foi classificada como argila de baixa plasticidade (CL), a partir dos limites de Atterberg (limite de liquidez [LL] e limite de plasticidade [LP]), com baixa permeabilidade correspondente. No caso da barragem, a maneira mais fácil de diferenciar a lama da areia foi por meio da deformabilidade, visto que a lama é mais mole e mais compressível, aspecto de grande importância para a ocorrência da liquefação nas areias.

4.7.1 Mapeamento da lama

Conforme explicado no item 4.1, para que pudesse ser feito um sistema de drenagem eficiente, foi necessário separar a areia da lama. A areia foi contida no dique 1 e a lama no dique 2, em uma proporção de 70% e 30%, respectivamente, para que a areia sempre estivesse em um nível maior do que a lama, impedindo que transbordasse. Após o incidente de *piping*, em 2009, essa proporção foi alterada, pois o enchimento do dique 2 foi iniciado antes do previsto, deixando o nível de lama mais alto que o projetado para as areias.

Depois dos problemas com as galerias principal e secundária, foi necessário o redimensionamento da água e da lama que estavam dispostas a montante do dique 2. Então, em 2011, foi construído um canal extravasor que direcionava a lama para o reservatório do dique 1, conforme apresentado na Figura 9.

Em 2012, o canal extravasor foi fechado, mas a lama já estava sobreposta e misturada à areia entre as cotas 824 m e 850 m.

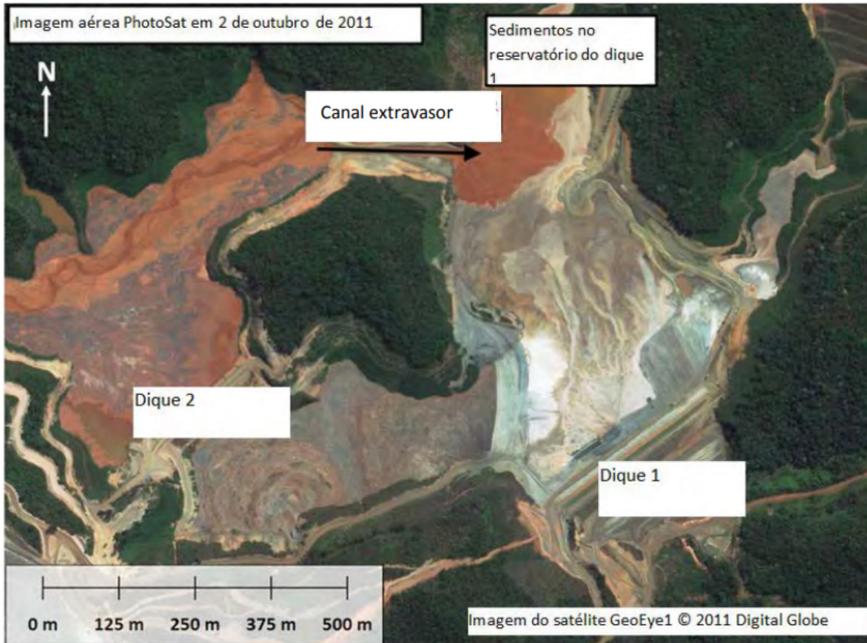


Figura 9 Canal extravasor de lama do reservatório do dique 2 até o reservatório do dique 1

Fonte: Morgenstern et al. (2016, p. 45).

4.7.2 Condições entre as ombreiras direita e esquerda

Uma das características marcantes da ombreira direita era a pouca quantidade de lama sobre o talude do maciço – quase ausente, se comparado com a ombreira esquerda. Devido ao volume de lama depositado sobre o talude do maciço na ombreira esquerda, o nível do lençol freático estava mais elevado em relação à ombreira direita, fazendo com que a lama se estendesse em direção ao tapete drenante.

Considerando a taxa de alteamento da crista do maciço, durante o ano de 2015, a ombreira direita foi alteada em uma taxa de 1,6 m/mês, enquanto a da esquerda ficou em torno de 1,3 m/mês. As condições da alta taxa de alteamento e a maior inclinação do talude poderiam ocasionar uma ruptura na ombreira direita, mas, nesse caso, houve uma redução de riscos por apresentar condições piezométricas mais baixas do que a ombreira esquerda.

4.7.3 Estabilidade da ombreira direita

Em 5 de novembro de 2015, foi realizada uma análise de tensão efetiva (*effective-stress analysis* [ESA]), para o cisalhamento drenado, e uma análise de resistência não drenada (*undrained strength analysis* [USA]), para o cisalhamento não drenado.

Os resultados mostraram um fator de segurança (FS) de 1,91 para a condição ESA e de 0,92 para USA. Sabe-se que, para essas análises, é indicada uma ruptura quando $FS < 1,0$. Sendo assim, uma ruptura com deslizamento de fluidos ocorreria na ombreira direita se as condições não drenadas estivessem presentes. O que evitou essa ruptura foi a quase total ausência de mobilização da resistência saturada e o fato de o cisalhamento drenado ter prevalecido no local.

4.8 Por que ocorreu o deslizamento fluido naquele local?

O deslizamento fluido na ombreira esquerda da Barragem de Fundão ocorreu devido às condições, anteriormente citadas, que levam à ocorrência do deslizamento fluido por liquefação, sendo elas: presença de rejeitos fofos (contráteis), saturação e ruptura rápida, com uma redução na resistência não drenada.

Vale ressaltar, conforme detalhado anteriormente, que a lama mais mole e mais compressível foi depositada no lugar em que deveria estar localizada, exclusivamente, a praia de rejeito arenoso, resultando na presença da lama na região que recebia os sucessivos alteamentos a montante. Sendo assim, de acordo com Morgenstern *et al.* (2016, p. 60), “A razão pela qual o deslizamento fluido ocorreu na ombreira esquerda é que a presença de rejeitos ricos em lama inibiu a drenagem, aumentou a saturação e promoveu cisalhamento não drenado”.

Entre as possibilidades de desencadeadores físicos para a ocorrência de uma ruptura por cisalhamento, há o aumento de carga estática gerada por cisalhamento não drenado da lama ou por deformações na base da areia.

Após a análise do deslizamento da lama e do fator de segurança apresentado, além dos relatos das testemunhas, o Comitê confirmou que a ruptura foi associada a um processo de deformação. Esse desencadeador é denominado *extrusão lateral* (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

4.9 Mecanismo de extrusão lateral

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016, p. 66), o mecanismo de extrusão lateral é constituído por areias fofas e saturadas, dispostas sobre lamelas moles, com confinamento da argila, e que podem sofrer variação conforme o perfil construído.

À medida que são acrescentados os carregamentos devidos aos aterros construídos pelo processo de alteamento a montante da barragem, aumenta a tensão imposta sobre o solo já aterrado de maneira vertical. Contudo, como o rejeito está confinado, o acréscimo de tensão tende a ser resistido de maneira lateral, aumentando então a área de confinamento horizontal e possibilitando movimentações do solo aterrado. Essas movimentações horizontais provocam uma grande redução na resistência ao cisalhamento, principalmente quando o solo aterrado é composto por areias fofas e argilas saturadas não drenadas.

Por meio de ensaios de compressão triaxial drenados, o Comitê pôde demonstrar experimentalmente o mecanismo de extrusão lateral. Para isso, foram utilizadas duas amostras de solos com graus de dilatância (ou contractilidade) diferentes para se realizar o ensaio, simulando a areia fofa e a argila saturada (MORGENSTERN *et al.*, 2016). Mantendo as tensões verticais constantes, foi observada uma redução nas tensões cisalhantes que se aproximam da linha de atrito máximo do solo (envoltória de resistência ao cisalhamento), tornando concreta a conclusão de que o colapso ocorreu de maneira instantânea após deformações de pequenas magnitudes na areia.

4.10 Comparação entre mecanismo de cisalhamento e extrusão lateral

Para avaliar se a liquefação foi causada por extrusão lateral, foi comparado um deslocamento por deslizamento de 600 mm com o escorregamento relacionado ao mecanismo de cisalhamento, que, basicamente, é uma deformação plástica da camada de lama que causa uma ruptura no talude e resulta em uma aceleração do processo de deslocamento, também ocasionando a liquefação.

Assim, foi feita uma estimativa conforme o critério de ruptura de Mohr-Coulomb com as deformações que ocorreriam caso houvesse uma ruptura por cisalhamento em decorrência da deformação plástica da camada de lama.

Sabe-se que, quando o fator de segurança se torna igual a 1,0, há chances de surgir liquefação no local. Porém, as deformações causadas devidas à ocorrência de liquefação por mecanismo de cisalhamento são maiores do que as causadas por extrusão lateral. Portanto, o Comitê considerou que o mecanismo por extrusão lateral foi o fator principal para a ocorrência do deslizamento fluido por liquefação no dia 5 de novembro de

2015, visto que o desenvolvimento da ruptura por cisalhamento só aconteceria depois do surgimento de liquefação por extrusão lateral (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

4.11 O papel dos abalos sísmicos

Os abalos sísmicos naturais que ocorreram naquele dia tiveram uma magnitude de momento de até 2,5 epicentros próximos à barragem e, como essa já estava em um estado de atenção, esses abalos contribuíram para a ruptura da estrutura.

Para confirmar essas determinações, foi simulada a interferência de um conjunto de tremores de terra relacionado à probabilidade de ocorrência de uma resposta dinâmica da estrutura.

A análise foi realizada para definir a magnitude das tensões produzidas pelo abalo sísmico e a duração do carregamento. A primeira análise confirmou que, dentro dos limites de incerteza, os movimentos sísmicos do terreno eram aceitáveis. Além disso, foram realizados ensaios de carregamento cíclico, aos quais são aplicados ciclos de tensões dinâmicas (carga e descarga), simulando o efeito de sismos, comprovando que o carregamento sísmico adotado não foi responsável pelo surgimento de pressões neutras na barragem. No caso da ruptura da barragem em Mariana, os consultores concluíram que os tremores aceleraram o processo de ruptura, em função do nível de segurança precário em que a barragem se encontrava.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a ruptura da Barragem de Fundão, em Mariana, em Minas Gerais, uma investigação técnica foi realizada para compreender quais foram os motivos que possibilitaram a ocorrência dessa tragédia, considerada o maior desastre ambiental do Brasil e o maior do mundo em barragens de rejeito. O presente artigo apresentou a definição de barragem de rejeitos, os métodos construtivos e explorou o relatório Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão: Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão para trazer, de forma simplificada, o histórico da barragem, suas alterações, estudos e resultados que, por fim, possibilitam a compreensão de quais ações implicaram o rompimento da estrutura em estudo.

Por meio desta pesquisa, verificou-se que a sucessão de erros ocorridos na construção da barragem acarretou uma situação de colapso para a estrutura. Partindo da concepção do projeto original, no qual era prevista uma região com areia insaturada para dar o suporte à lama e evitar problemas próximos à estrutura, houve modificações em decorrência das dificuldades enfrentadas que proporcionaram regiões de saturação não previstas e impediram a drenagem. Da mesma forma, foi explicado que, por causa do recuo feito na ombreira esquerda, houve um carregamento do aterro sobre a lama que estava presente em determinadas regiões, afetando a estabilidade e dando início ao deslizamento de fluido. O mecanismo de gatilho para deslizamento é conhecido como extrusão lateral e foi desenvolvido a partir do carregamento vertical das lamelas durante os alteamentos, espalhando a lama e variando as tensões na areia, o que reduziu o seu confinamento e causou a ruptura.

A ruptura da barragem pode ser precedida por uma sucessão de erros na etapa de projeto, durante a execução da obra e de manejo do rejeito. O histórico analisado neste artigo indica que as alterações não previstas no projeto inicial contribuíram para que essa catástrofe ocorresse. Portanto, constata-se que a tragédia ocorreu por falhas no manejo dos rejeitos e adaptações inadequadas no projeto, causando vítimas e um grande impacto ambiental.

Além disso, um dos estudos que deve ser feito pelas mineradoras é o de *dam break*, uma análise hipotética que, de acordo com Tercini *et al.* (2020, p. 1), define o tipo de abertura de brecha da ruptura referente ao tipo de solo utilizado para a construção da barragem, caso ocorra um rompimento. Também calculam-se o tempo e a vazão do material armazenado, mapeiam-se as áreas que seriam atingidas pela inundação e, conhecendo a área em torno da barragem, estimam-se os riscos e potenciais danos causados por eventual ruptura. Dessa forma, é possível tomar ações preventivas para que desastres ambientais, sociais e econômicos não aconteçam novamente.

Tal estudo é solicitado pela ANM e deve ser feito por meio de uma análise dos efeitos causados por uma possível ruptura na região correspondente ao vale a jusante da barragem, por meio de *softwares*, cálculos empíricos e até mesmo com base na literatura. A partir disso, um relatório técnico é emitido e servirá como base para o desenvolvimento do Plano de Ação de Emergência (PAE), essencial para a segurança da barragem.

Esse cuidado é necessário para o conhecimento e gerenciamento dos riscos. A Barragem de Fundão já era considerada de alto risco, por seu tipo de alteamento a montante e por suas características, e a não elaboração do PAE colaborou para que a ruptura se tornasse uma grande tragédia.

Após essa ruptura, os alteamentos a montante foram proibidos no Brasil, visto que são mais propícios à ocorrência de liquefação. Além disso, houve uma pressão imposta sobre as grandes mineradoras para que as devidas manutenções fossem realizadas nas barragens existentes e para que desastres como esse não ocorram novamente. Sen-

do assim, é necessário que, acima de qualquer interesse econômico, as obras de engenharia sejam tratadas com seriedade e segurança pelas empresas, com estudos e técnicas corretas, sempre buscando valorizar a vida humana e animal e preservando o meio ambiente.

Pode-se, então, concluir que o objetivo inicial da pesquisa foi alcançado e, por meio dela, é possível despertar o interesse de demais pesquisadores em realizar estudos similares. O artigo desenvolvido permite avançar nos estudos no que diz respeito a barragens de rejeitos, aperfeiçoando os projetos de engenharia e sua execução, de forma que eventos como a ruptura abordada no artigo, que ainda se perpetuam, possam um dia ser completamente extintos.

CASE STUDY OF THE FUNDÃO DAM'S RUPTURE (MARIANA-MG)

Abstract

The tailings dam is a projected structure that aims at containing liquid and solid waste from mining activities. This article presents, based on the “Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão” report (MORGENSTERN et al., 2016), many causes that led the Fundão dam, located in Mariana, in Minas Gerais, to collapse in November 5th, 2015. This accident caused 19 deaths and polluted 600 km of the Rio Doce. The mud gathered with ore tailings was dragged to the Atlantic Ocean, in the city of Linhares, in Espírito Santo, bringing with it an immense impact on nature and social-economic activity in the surrounding area of the disaster. Based on studies, it was able to verify that the collapse of the Fundão dam happened due to a fluid slide whose trigger was the liquefaction of the mud with ore tailings and it was a consequence of a chain of reactions and conditions since when tremors occurred in the subsoil, a load was generated, accelerating the start of the liquefaction process, thus, resulting in the sliding of the tailings.

Keywords: Dam rupture. Fundão dam. Slipping.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Anuário Mineral Brasileiro*: principais substâncias metálicas. Brasília: ANM, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf. Acesso em: 13 nov. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13028*: mineração – elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – requisitos. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *Relatório de segurança de barragens de 2019*. Brasília: ANA, 2019a. Disponível em: <http://www.snish.gov.br/portall/snish/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2020.

BRASIL. Resolução nº 13, de 08 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 44, ago. 2019b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso: 13 nov. 2020.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, 20 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm#:~:text=Estabelece%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,altera%20a%20reda%C3%A7%C3%A3o%20do%20art. Acesso em: 05 out. 2020.

CHAVES, J. C. *Controle de deformações em barragens*: métodos de monitoramento e viabilidade da utilização do GPS. 1994. Dissertação ((Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265164869_Controle_de_deformacoes_em_barragens_metodos_de_monitoramento_e_viabilidade_da_utilizacao_do_GPS. Acesso em: 1 nov. 2020.

FUNDAÇÃO RENOVA. *A fundação*. 2022. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/a-fundacao/>. Acesso em: 19 nov. 2020.

LUZ, P. A. C.; LÁZARO, A. A. Acidentes em barragens de mineração como Mariana e Brumadinho podem ser evitados? *Sodebras: Soluções para o Desenvolvimento do País*, v. 14, n. 168, p. 76-81, dez. 2019. Disponível em: <http://sodebras.com.br/edicoes/N168.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.

MACHADO, W. G. de F. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos de mineração*. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-31032008-154124/publico/DissertacaoWillianGladstoneMachado.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

MORGENSTERN, N. R. *et al. Comitê de especialistas para análise da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão: relatório sobre as causas imediatas da ruptura da barragem de Fundão*. 2016. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/10/relatorio-sobre-as-causas-imediatas-da-ruptura-da-barragem-de-fundao.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2021.

TERCINI, O. T.; CESTARI JUNIOR, E.; ANDREETTA, A. B. Estudos de Dam Break. *In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES DA ABRHIDRO, 2., 2020, virtual. Anais [...]*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2020. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=7333>. Acesso em: 2 nov. 2021.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, Marechal Cândido Rondon, v. 18, n. 34, p. 49-65, 2018. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/19480>. Acesso em: 18 nov. 2020.

VALE. *Descaracterização de barragens*. 2022. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/de-characterization/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 19 nov. 2020.

VALERIUS, M. B. *Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17348>. Acesso em: 13 nov. 2020.

Contato

Paulo Afonso de Cerqueira Luz
paulo.luz@mackenzie.br

Tramitação

Recebido em julho de 2021.
Aprovado em dezembro de 2021.