

ASPECTOS GEOTÉCNICOS FUNDAMENTAIS NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITOS: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA, MG.

Ronalde Baptista de Lima Júnior¹; Cláudia Francisca Escobar de Paiva².

Resumo – Um fator importante a ser considerado no estudo de barragens é o risco potencial de ruptura das mesmas, pois um acidente pode gerar impactos expressivos no ambiente à jusante de tais estruturas, considerando que existe, na maioria das vezes, represamento de milhões de metros cúbicos de água ou resíduos provenientes da mineração. Desta forma, este artigo tem por objetivo discutir, resumidamente, os aspectos geotécnicos que estão relacionados com a ruptura da barragem de rejeito de Fundão em Mariana, MG. Para realização desta discussão, utilizou-se, entre outras referências, o Relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão criado pelo Comitê de Investigação. Obteve-se como resultado a identificação e breve explanação dos seguintes aspectos geotécnicos envolvidos na ruptura da referida barragem: saturação, impermeabilidade, poropressão, cisalhamento não drenado e liquefação estática. Concluiu-se que a tragédia de Mariana foi resultado de uma série de falhas, da execução do projeto até as práticas operacionais e de segurança, ressaltando a necessidade de ações mais efetivas na regulação da projeção, execução, operação e desativação deste tipo de empreendimento, que requer elevada segurança.

Abstract – An important factor to be considered in the study of dams is the potential risk of failure, because an accident can generate expressive impacts in the downstream environment of these structures, considering that there is, most of the time, the damming of millions of cubic meters of water or mine tailings. Thus this article aims to discuss, briefly, the geotechnical aspects that are related to the rupture of the Fundao tailing dam in Mariana, MG. For the developing of this discussion, it was used, among other references, the Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam created by the Expert Panel. It was obtained as a result the identification and a brief explanation of the following geotechnical aspects in the rupture of this dam: saturation, impermeability, porewater pressure, undrained shear and static liquefaction. It was concluded that the tragedy of Mariana was produced by a series of failures, from the execution of the project until the moment of the operational and security practicing, emphasizing the need for more effective actions of regulation of projecting, execution, and deactivation of this enterprise, which requires high safety.

Palavras-Chave – Barragem de rejeitos; ruptura; aspectos geotécnicos; barragem de Fundão.

¹ Aluno do curso de Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal do ABC - UFABC, (11)93000-9832, ronalde.lima@ufabc.edu.br

² Professora do curso de Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal do ABC - UFABC, (11)99274-8045, claudia.paiva@ufabc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Há diversos estudos que relatam acidentes envolvendo rupturas de barragens de rejeitos ao longo do mundo, sendo que tais eventos afligem desde países de grande poder econômico como os Estados Unidos da América, até países em desenvolvimento, como o caso do Brasil. Torna-se essencial a observação deste cenário global, não só para que haja uma compreensão das principais causas e consequências destes eventos de elevada probabilidade catastrófica, mas também para avaliar e recuperar dados que corroborem para o estabelecimento de sistemáticas e/ou protocolos de projetos, sistemas de gerenciamento e manutenção, além de planos de segurança de barragens que propiciem a redução dos riscos de rupturas. Neste contexto, os aspectos geotécnicos são os principais pontos a serem observados, avaliados e dimensionados.

Entre os parâmetros a serem avaliados, principalmente com relação aos rejeitos, podem ser citados: densidade dos grãos, granulometria, permeabilidade, cisalhamento drenado, limite de plasticidade e liquidez, índice de plasticidade, percolação e porosidade (ESPÓSITO, 1995; ESPÓSITO, 2000; MACHADO, 2017). Estas variáveis são essenciais na análise de estabilidade de uma barragem de rejeito, uma vez que este tipo de empreendimento utiliza do próprio rejeito como material estrutural, o que significa que os processos de alteamento, ou crescimento vertical da crista da barragem, que é responsável por assegurar o barramento de um grande volume de rejeitos, são realizados com o uso da fração grossa arenosa, depositada do topo da barragem.

O método construtivo mais utilizado pelo setor de mineração é o *Upstream*, em inglês, ou método à montante, que é tido como o mais antigo e econômico. O processo de alteamento, neste caso, ocorre a partir da crista do dique principal, ou dique anterior, em direção à montante da barragem, ou seja, utiliza-se a praia de rejeitos como fundação (U.S., 1994).

Uma grande questão é sobre quais os motivos que tornam as barragens de rejeitos mais propensas à ruptura e acidentes que os demais tipos de barragens, como aquelas utilizadas para represar água. RICO et al. (2008), avaliando barragens de rejeitos no mundo, apresentam algumas características que justificam o fato das barragens de rejeitos serem consideradas mais vulneráveis que as demais. Uma das características está relacionada com o fato de que os aterros que compõem tais obras são preenchidos de material local, provenientes do solo da região de instalação do empreendimento ou até mesmo o que sobra das operações de mineração e seus resíduos. Outra característica, também importante, tem relação com as elevações subsequentes das alturas das barragens, com material sólido, junto com o aumento expressivo dos efluentes da mesma, além da somatória do escoamento que advém da precipitação (RICO et al., 2008).

Após diversos estudos realizados em acidentes e incidentes com barragens de rejeitos ao longo do mundo, estimou-se que metade dos rompimentos de barragens de rejeitos seria evitada caso ocorresse o dimensionamento correto do projeto, seguido de boas práticas de gerenciamento de operação e manutenção. Logo, é fundamental a análise e monitoramento dos principais parâmetros geotécnicos condicionadores da estabilidade dos barramentos de rejeitos desde a fase de projeto, até a construção e operação do barramento (RICO et al., 2008).

O estudo de caso da ruptura da barragem de Fundão é crucial para a compreensão do evento e pode gerar subsídios técnicos para o estabelecimento de planos de ações que tenham por objetivo a efetividade da segurança das barragens de rejeitos. E, ainda, acredita-se que tal estudo poderá impulsionar discussões e ações acerca do atendimento dos parâmetros e condições geotécnicas mínimas de projeto necessárias para garantir a segurança desse tipo de obra.

2. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

A barragem de Fundão compunha um conjunto de barragens do Complexo de Germano, situado na região noroeste do município de Mariana, MG, junto a outras duas estruturas: as barragens de Germano e Santarém. As minas de exploração localizadas nesta região são administradas pela Samarco Mineração, contando com jazidas de minerais metálicos e não metálicos, que são extraídos e processados gerando um grande quantitativo de rejeitos, o que explica a grande área que era ocupada pelos três barramentos (SOUZA et al., 2005). Tal Complexo está situado distante da área urbana central do município de Mariana.

2.1. Caracterização geológica e geotécnica da área de implantação

A área de estudo está localizada na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, sendo que este é a delimitação, na forma semelhante à de um quadrado, de uma estrutura geológica presente em uma área de 7000 km². Com relação aos aspectos geológicos, tem-se que essa área possui um embasamento composto de gnaisses tonalítico-graníticos, cuja idade ultrapassa 2,7 bilhões de anos. A região de implantação da barragem se encontra no supergrupo proterozóico Minas, com espessuras que podem alcançar até 6 km e divisão em quatro grupos, dos quais o grupo Itabira é aquele de maior valor econômico e interesse de exploração (ROESER & ROESER, 2010).

Uma das características do Quadrilátero Ferrífero é seu domínio composto por um agrupamento de rochas resistentes que está cercado por áreas mais baixas, sendo que estas últimas são formadas, por sua vez, em rochas menos resistentes (SAMARCO, 2017). A barragem em estudo estava localizada no fundo do Vale do Fundão, que é uma região tida como morrarias, ocorrendo estas, com destaque, sobre embasamento rochoso de xistos, filitos e granitos-gnaisse. Os solos dessa região são caracterizados, principalmente, por uma espessura intermediária na região das encostas dos morros, além da presença de espessuras maiores nas encostas e fundos de vale onde há solo vermelho (SAMARCO, 2017).

2.2. Projeto da Barragem de Fundão

O projeto da barragem no vale do Fundão foi proposto quando a barragem de Germano estava próxima de atingir seu limite de deposição de rejeitos, em 2005, além da existência de uma nova planta de pelotização culminando na geração de mais resíduos. O projeto, em termos estruturais, foi desenvolvido e executado em consonância com o que já fora realizado para a outra estrutura do complexo do Germano, entretanto, dimensionado para o recebimento de 70% e 30%, respectivamente, de rejeitos arenosos e lamas provenientes de toda a unidade produtiva, sendo o mesmo concluído em outubro de 2008. Observa-se na Figura 1 que o Dique 1 foi proposto para realizar o barramento das areias, estando à jusante do Dique 2, onde a lama seria depositada. Tal procedimento implicava que a altura do rejeito arenoso entre os dois diques sempre estivesse mais elevada que o nível de lama; caso contrário, a lama passaria a invadir as praias e, posteriormente, afetaria a permeabilidade desta região do barramento (MORGENSTERN et al. 2016).

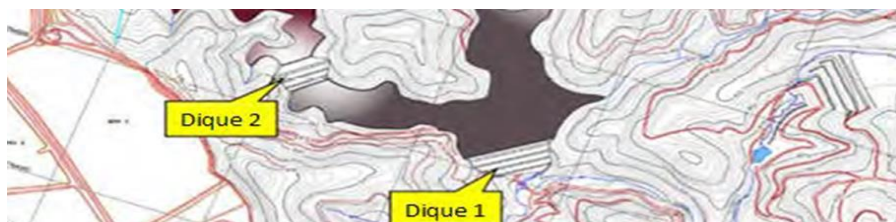


Figura 1. Projeção de dois diques para separação dos rejeitos (Fonte: MORGENSTERN et al., 2016).

2.3. Caracterização do funcionamento da barragem

A caracterização do funcionamento da barragem está diretamente ligada ao método construtivo, pois ele determina alguns processos importantes, tais como o lançamento e disposição dos rejeitos, compactação ou não dos diques de alteamento, a manutenção de uma drenagem eficiente e o devido afastamento dos rejeitos arenosos da lama. A partir do momento que toda a região entre os diques 1 e 2 foi preenchida, tornou-se necessário a escolha do método de alteamento da barragem. A alternativa escolhida foi o alteamento à montante, onde seria alcançada uma elevação máxima de 920 m, com rejeitos de areia depositados entre os diques 1 e 2, mantendo uma praia de rejeitos com 200 m de extensão, utilizando empilhamento drenado (Figura 2). Além disso, ressalta-se que esse sistema requeria um amplo e eficiente sistema de drenagem, como forma de manter as condições estruturais dos alteamentos após o dique de partida.

Neste método construtivo a crista da barragem cresceu, de forma progressiva, em direção à montante da barragem; logo, temos que os alteamentos foram sustentados, em sua base, pelos próprios rejeitos, como pode ser notado na Figura 2. Dada essa configuração de crescimento da barragem, torna-se crucial a realização de lançamento dos rejeitos de forma a manter uma extensão

de 200 m de praia. Sendo assim, por meio da crista da barragem era feito o lançamento do material arenoso e, quando este atingia um nível superior ao da lama, mantendo a distância de referência, ocorria também o lançamento da lama, feito atrás do Dique 2.



Figura 2. Método de alteamento à montante adotado para Fundão (Fonte: MORGENSTERN et al., 2016).

2.4. Caracterização do sistema de drenagem da barragem

Com o método construtivo escolhido para a barragem, tornou-se fundamental a existência de um sistema de drenagem eficiente, como forma de garantir a estabilidade da estrutura. Para isso, o projeto inicial contou com dois drenos de fundo ao longo da região onde seria realizada a disposição dos rejeitos arenosos; tais drenos eram feitos de brita e rocha e tidos como de alta capacidade, estando estes sobrepostos ao Dique 1 e conectados à face de montante do dique de partida da barragem, como pode ser observado na Figura 3 (MORGENSTERN et al. 2016).

Além dos drenos de fundo, também foram construídas duas galerias, com dois metros de diâmetro, visando realizar a drenagem das águas provenientes das chuvas, inundações e polpa de rejeitos descarregada. As duas galerias foram construídas abaixo do depósito de rejeitos e também do Dique 1 (Figura 3). Dada a importância do sistema de drenagem para esse tipo de estrutura, o qual poderia trazer sérios riscos à estabilidade da barragem no caso de funcionamento não adequado, esperava-se uma exímia execução do projeto, o que parece não ter ocorrido (MORGENSTERN et al. 2016).



Figura 3. Sistema inicial de drenagem na barragem de Fundão (Fonte: BERTONI et al., 2016).

2.5. Caracterização do sistema de monitoramento da barragem

O monitoramento da barragem de Fundão acontecia por meio da obtenção de dados instrumentais, sendo que estes eram devidamente apresentados nos relatórios mensais de instrumentação da Samarco. O sistema de monitoramento contava com os seguintes instrumentos instalados: piezômetros de Casagrande e de corda vibrante, indicadores de nível de água, marcos topográficos e estações de monitoramento de vazão (MORGENSTERN et al. 2016).

Os piezômetros instalados foram classificados em grupos, de acordo com a finalidade do monitoramento. Resumidamente, tais instrumentos foram utilizados para monitorar os níveis piezométricos na área dos drenos superficiais instalados a 860 m, as pressões artesianas a jusante do dreno que fora instalado no pé da barragem e os níveis piezométricos no recuo realizado na ombreira esquerda. Acrescenta-se que, os piezômetros de corda vibrante foram instalados com a finalidade de monitorar o tapete drenante que fora instalado na elevação 826 m.

Houve a instalação de marcos topográficos no Dique de partida da barragem, além de alguns na ombreira esquerda, depois de um incidente que ocorreu em 2014. Foram instalados diversos indicadores de nível de água, sendo estes construídos com tubulação de plástico e perfuração na profundidade plena do referido instrumento, sendo que as leituras correspondiam à profundidade da superfície freática no local em que o instrumento estava posicionado, por isso a importância de indicadores em vários pontos da praia (MORGENSTERN et al. 2016).

3. HISTÓRICO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO E DAS MUDANÇAS NO PROJETO

Os relatos aqui apresentados têm como base as informações do Relatório de MORGENSTERN et al. (2016). Alguns eventos ocorreram na barragem de Fundão durante sua operação, sendo estes cruciais para entender o comportamento geotécnico da barragem que culminou em seu colapso. O primeiro dos eventos ocorreu apenas seis meses após a finalização das obras do Dique 1 e do sistema de drenagem. Consta registrado que nesse período ocorreu um grande lançamento de rejeitos arenosos, fazendo com que ocorressem insurgências no talude à jusante, logo acima do dreno principal, o que se caracterizou como um processo de erosão interna, também denominado de *piping*. Tal erosão ocorreu devido à má construção dos drenos de fundo e seus respectivos filtros, fazendo com que a pressão deste ficasse elevada e acabasse por gerar erosões no talude. Um plano emergencial teve que ser adotado, como forma de se evitar o colapso do dique de partida, sendo assim, o reservatório foi rebaixado, o talude foi reforçado com uma berma na região de insurgência de resíduos e a barragem de Santarém, à jusante, foi preparada para um possível rompimento do supracitado talude (MORGENSTERN et al. 2016).

Apesar da insistente concepção de projeto sobre a importância do sistema de drenagem de Fundão, após o evento de *piping*, não foi possível restaurar os drenos de fundo e, simplesmente, os mesmos foram selados, ou seja, o sistema responsável por controlar a saturação nas praias de rejeitos arenosos e manter a estabilidade da barragem ficou inoperante. Também houve uma complicação advinda da planta produtiva, pois a produção de rejeitos arenosos estava reduzida, enquanto a da lama se mantinha e a proporção 70 e 30% para areia e lama foi negligenciada. A medida adotada foi a construção de um novo dique, denominado Dique 1A, presente entre os Diques 1 e 2 como forma de tentar reter a lama. Mais de um ano após o incidente com *piping*, as medidas necessárias foram finalizadas, entretanto, não houve um ajuste de concepção de projeto, haja vista que o projeto original já não contava mais com um sistema de drenagem e uma proporção entre os rejeitos (MORGENSTERN et al. 2016).

Posteriormente, no Manual de Operações de 2011, atualizado em 2012, onde se previa o alteamento do Dique 1 até a elevação de 920 m, fez-se a adição de um tapete drenante na elevação de 826 m, como forma de compensar a inativação integral do dreno de fundo, anos antes. O tapete foi construído sob os rejeitos arenosos já depositados, com o propósito de realizar a drenagem nos próximos alteamentos da barragem. Sob o ponto de vista do comportamento geotécnico, deve-se considerar uma situação de inconformidade: os rejeitos que estavam abaixo do tapete continuavam saturados; além disso, a extensão do tapete drenante era insuficiente para atingir toda a região onde seriam depositadas as próximas cargas de rejeitos, sendo ineficiente no controle da saturação na praia. No Manual de 2012, consideraram-se, também, os 200 m de praia, mas há dados registrados na operação com lama a 60 m da crista (MORGENSTERN et al. 2016).

Segundo MORGENSTERN et al. 2016, uma das mudanças que pode ter corroborado para o colapso da barragem de Fundão ocorreu em 2012, quando o sistema das galerias foi identificado com danificação estrutural devido à defeitos de construção e recalque da fundação. Optou-se, então, pelo tamponamento das galerias do ponto de saída até o ponto da crista. Entretanto, a galeria que estava posicionada sob a ombreira esquerda não poderia ser tamponada, sob risco de colapso, então, ocorreu a mudança mais drástica do projeto: recuo da ombreira esquerda, alterando a geometria da barragem. Observa-se na Figura 4a que este recuo e os sucessivos alteamentos ocorreram acima de uma faixa de lama. Este era o pior cenário para esse tipo de método construtivo: presença de rejeitos arenosos saturados, abaixo do tapete drenante, e acima do mesmo, lama, que ocasionou deficiência de percolação da parte líquida nos próximos lançamentos de rejeitos. Além disso, com o recuo, os próximos alteamentos ficaram ainda mais próximos da parte de maior concentração de lama, que fora jogada por trás do Dique 1 quando da abertura de um canal extravasor, que pode ser notado na Figura 4b (MORGENSTERN et al. 2016).

Embora o recuo da ombreira esquerda fosse provisório, até que ocorresse o tamponamento da galeria, uma série de eventos corroborou para que não fosse realizado o realinhamento da barragem. Em 2013 foram identificadas algumas trincas e surgências no talude à jusante do recuo, algo que se prolongou até um evento mais severo em 2014, com diversas trincas e fraturas no talude, evidenciando que o tapete drenante já não estava sendo capaz de drenar e manter uma baixa saturação nos rejeitos da praia, como já era previsto (MORGENSTERN et al. 2016).

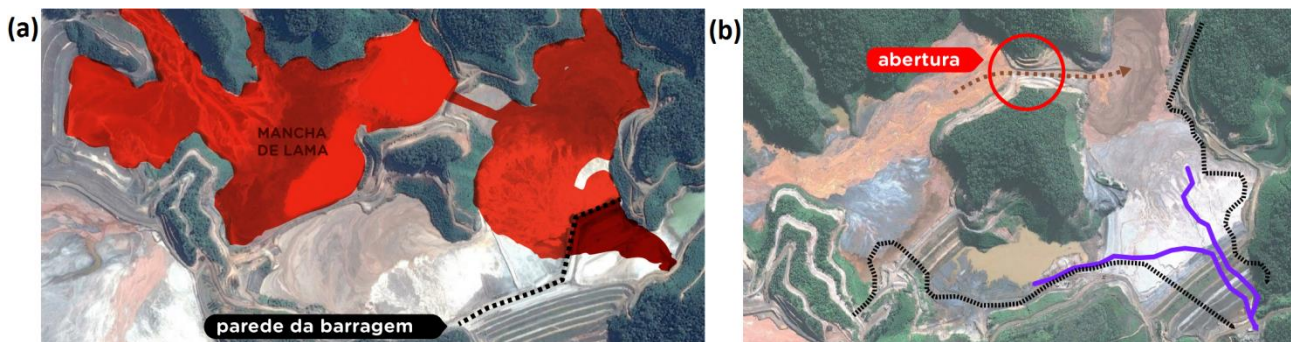


Figura 4. (a) Mancha de lama, documentada em janeiro de 2012, com detalhe da parte que ficou abaixo do recuo da ombreira esquerda, em março de 2012. (b) Abertura do canal extravasor construída de janeiro de 2011 até janeiro de 2012 operando até agosto de 2012 (Fonte: BERTONI et al., 2016).

Com as falhas identificadas no talude em 2013 e 2014 e, também, a proposição de um novo alteamento máximo até 940 m, além da identificação da ineficácia do tapete drenante, optou-se pela criação de um novo sistema de drenagem na ombreira esquerda, o que gerou o adiamento do realinhamento da barragem. A construção dos drenos da ombreira esquerda, apesar da urgência, foi concluída apenas um ano depois, em agosto de 2015, quando a crista da barragem já estava em 900 m, sendo retomada a descarga de rejeitos pela crista do recuo sobre o dreno construído. (MORGENSTERN et al. 2016).

4. A RUPTURA: CAUSAS E LAUDO REALIZADO

Estima-se que o início da ruptura da barragem de Fundão tenha ocorrido às 15:45h do dia 05 de novembro de 2015. Neste dia a maioria das atividades estava concentrada na ombreira direita, que estava recebendo novos drenos. O colapso da estrutura se deu na ombreira esquerda, onde havia o recuo da linha da barragem que, até então, ainda não havia tido seu realinhamento. Na realidade, no que concerne ao projeto original, muitas mudanças foram realizadas, sendo que elas foram cruciais para o entendimento das causas que levaram mais de 61% do total de 32 milhões de m³ de rejeitos à jusante da bacia hidrográfica (MORGENSTERN et al. 2016).

Criou-se um Comitê composto de especialistas na área para que fosse gerado um Relatório que apontasse as causas e condições do rompimento da barragem, que é justamente o trabalho de MORGENSTERN et al. (2016), utilizado neste artigo como principal referência para discutir os aspectos geotécnicos e construtivos da barragem. De acordo com o Comitê de Investigação, para chegar às respostas necessárias, foram realizadas diversas visitas de campo ao local, consulta aos dados de monitoramento e todos os registros de mudanças estruturais da barragem, além da realização de ensaios em laboratório, para que o colapso pudesse ser compreendido.

A barragem de Fundão se rompeu por meio de um deslizamento fluido, sendo que este foi resultado de uma liquefação estática que ocorreu justamente na ombreira esquerda, onde foi feito um recuo na geometria da barragem. O relatório do Comitê de Investigação, liderado por Morgenstern (2016, p. 22), propôs um conjunto de três questões para sistematizar o mecanismo de ruptura: “Por que ocorreu um deslizamento fluido por liquefação? [...] Por que ocorreu o deslizamento fluido naquele local? [...] Por que ocorreu o deslizamento fluido naquele instante?”.

O conjunto das três respostas será brevemente abordado neste trabalho, considerando a devida análise dos autores às informações levantadas. Inicialmente, tem-se que a falha no sistema de drenagem, tanto a inoperância dos drenos de fundo, como o tamponamento das galerias, acabou por gerar colunas de rejeitos depositados em condição totalmente saturada, haja vista a impossibilidade de se drenar a parte líquida que advinha das plantas com os mesmos, mas também as águas das chuvas. Embora tenha sido colocado um tapete drenante, os rejeitos depositados abaixo continuaram saturados. Além disso, o tapete não tinha uma extensão suficiente para abranger toda a extensão de descarga dos rejeitos arenosos e, devido às lamas que foram jogadas por trás do Dique 1, pelo canal extravasor, após algum tempo o tapete teve sua drenagem comprometida, gerando também camadas de rejeitos saturados nos alteamentos mais superiores.

Completando, o recuo da ombreira esquerda foi realizado justamente sobre o depósito de areia com camadas de lama, sendo que tais camadas impediam a drenagem descendente dos rejeitos arenosos depositados acima, criando uma zona de potencial fraqueza, algo que não ocorrera na ombreira direita, por exemplo. O avanço da barragem à montante na região da ombreira esquerda não só era contrário aos 200 m de praia definidos no Manual de Operação, como também invadiu uma região que, como citado anteriormente, já possuía lama em suas camadas inferiores. Sendo assim, os alteamentos sobre o recuo implicaram na sobrecarga da região saturada e com lama, implicando na diminuição da estabilidade e na extrusão lateral das camadas de lama (MORGENSTERN et al. 2016).

Logo, pela análise dos fatos e dos laudos do relatório do Comitê de Investigação, eram satisfeitas as três condições para que o depósito de rejeitos culminasse em um deslizamento fluido: saturação das areias presentes na praia à montante do barramento, dada a ineficiência do sistema de drenagem; areia não compactada e fofa, que comumente ocorre devido ao lançamento hidráulico; e um gatilho, que nesse caso foi gerado pelas camadas inferiores de lama que, ao receberem grande carga de rejeitos, sofreram uma espécie de espalhamento lateral da lama, gerando uma série de variações de tensão nas areias logo acima destas camadas, levando ao colapso, conforme reprodução por modelagem laboratorial e computacional realizada por MORGENSTERN et al. (2016).

Finalmente, deve-se citar que pequenos abalos sísmicos ocorreram horas antes do colapso da barragem. Entretanto, como bem aponta DETZEL et al. (2016) esse seria o primeiro episódio de ruptura de barragem que estaria relacionado com uma sequência de abalos sísmicos de pequena magnitude, caso fosse considerada essa a causa do colapso, que não está evidenciada como uma das causas no relatório de MORGENSTERN et al. (2016). Os autores também realizaram uma investigação quantitativa sobre o papel dos abalos sísmicos, com base no relatório de ATKINSON (2016), mas concluíram que o processo de ruptura já estava avançado e haveria certa possibilidade de que os pequenos abalos apenas poderiam acelerar o desfecho.

5. DISCUSSÃO DOS ASPECTOS GEOTÉCNICOS RELACIONADOS À RUPTURA

A execução do projeto geotécnico deste tipo de barragem requer considerar alguns fatores importantes, não só relacionados aos rejeitos a serem depositados como também com outros aspectos estruturais. Boscov (2008, p. 203) destaca os seguintes parâmetros de projeto: “permeabilidade da fundação; resistência ao cisalhamento, permeabilidade e parâmetro de pressão neutra (poropressão) do material de construção da barragem; características de compressibilidade e permeabilidade dos rejeitos; velocidade de descarga dos rejeitos e teor de sólidos no lançamento”. Quando se trata de uma barragem alteada à montante, há uma grande preocupação na correta consideração dos parâmetros geomecânicos dos rejeitos no projeto, haja vista que estes são parte estrutural, sendo utilizados como fundação dos alteamentos.

O rejeito em forma de polpa passa por três etapas de comportamento: a primeira trata do comportamento de lâmina líquida, onde as partículas de menor tamanho se juntam em pequenos flocos; a posterior trata do processo em que está ocorrendo a sedimentação, onde se identifica um comportamento parcialmente líquido e viscoso; e, por fim, em processo de adensamento, onde o rejeito se comporta como um solo. Reforça-se que o rejeito não é exatamente um solo, mas é realizada uma aproximação de seu comportamento e características condizentes à de um solo de baixa resistência ao cisalhamento, como forma de viabilizar uma adequada avaliação geotécnica para o projeto (RAFAEL, 2012).

Em relação aos rejeitos depositados, coloca-se que a variação da permeabilidade pode ser constatada em função dos grãos do rejeito, levando em conta sua plasticidade, o modo como é lançado, além da profundidade em que está condicionado. A granulometria e o índice de vazios dos rejeitos são parâmetros geotécnicos que afetam, diretamente, o valor do coeficiente de permeabilidade dos mesmos. Relata-se que boa parte dos rejeitos arenosos e também os de baixa plasticidade possuem como característica uma ampla variação da permeabilidade conforme se diminuí o índice de vazios, haja vista que tal condição afeta o fluxo de água entre os vazios interconectados. Vale ressaltar que certas alterações no coeficiente de permeabilidade têm relação com a segregação dos rejeitos na praia de deposição do reservatório da barragem (Figura 5), sendo

que este fenômeno de segregação hidráulica ocorre na etapa de deposição dos rejeitos na barragem de contenção (CASTRO, 2008).

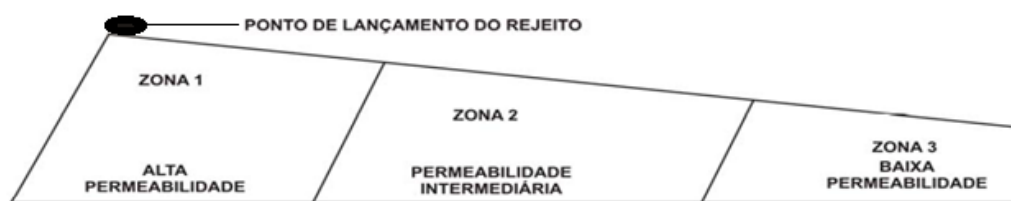


Figura 5. Zonas de permeabilidade na barragem de rejeitos (Fonte: SOARES, 1998 apud CASTRO, 2008).

É crucial entender a variação de permeabilidade ao longo da praia de rejeitos, uma vez que na zona 1 da Figura 5 estão presentes, principalmente, os rejeitos arenosos de maior granulometria, com características que oferecem elevada permeabilidade, dado maior número de vazios existentes entre os grãos, além de uma boa resistência ao cisalhamento, que é fundamental já que esses rejeitos sustentam os alteamentos da barragem (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Sendo assim, quando o rejeito é disposto, há uma grande quantidade de água, que é retirada gradativamente por meio de um robusto e importante sistema de drenagem, que no caso da barragem de Fundão, ficou completamente comprometido em termos do projeto original. Como já abordado, o sistema de drenagem possibilita que, principalmente na zona de alta e intermediária permeabilidade, ocorra a remoção da água presente no rejeito, evitando uma condição de elevada saturação nessa região, que pode acarretar em impactos na estabilidade da barragem.

Dados os problemas com o projeto inicial de drenagem, desativação do dreno de fundo e da galeria secundária de Fundão, gerou-se um elevado nível de saturação na zona de alta permeabilidade, implicando na presença de água nos vazios dos grãos arenosos, corroborando para o desenvolvimento de poropressão. Em condições normais de projeto, Rafael (2012, p. 48) alerta que a “velocidade dos alteamentos no método de construção à montante deve ser cuidadosamente controlada para prevenir um acréscimo significativo das poropressões”. Em condições normais de projeto há a previsão de uma drenagem eficiente da água, quer seja pelos drenos, quer seja pela alta permeabilidade, o que possibilita a movimentação ou escape da água dos vazios dos componentes arenosos, mantendo as propriedades de resistência quando há o alteamento da barragem, ou seja, quando são aplicadas cargas sobre o depósito de rejeitos.

A barragem de Fundão já contava com um material bastante saturado, porém, para desenvolver poropressão foi preciso mais um elemento importante: impermeabilidade ou impossibilidade de escape da água nos vazios, que ocorreu devido ao recuo da ombreira esquerda ter sido sobreposto sobre camadas de lama, evento este já descrito. Sendo assim, conforme houve crescimento da crista da barragem à montante, aplicou-se carga sobre os rejeitos depositados já saturados, acarretando relevantes tensões de cisalhamento no depósito. Como resultado desse processo teve-se a redução da resistência, que já era precária, da massa de rejeitos saturados.

A existência de um depósito de rejeitos saturados, impermeáveis em algumas camadas, com sistema de drenagem deficiente, e o desenvolvimento de poropressão foram fatores fundamentais para que ocorresse a liquefação estática, culminando no deslizamento fluido; entretanto, ainda há de se apresentar mais um fator: cisalhamento não drenado. Para que ocorra cisalhamento drenado, o mesmo deve ser tão lento que possibilita uma rápida dissipação da pressão existente na água. Contrariamente, o cisalhamento não drenado é aquele que ocorre muito rápido, impossibilitando que ocorra a dissipação da pressão na água. Como afirma Morgenstern (2016, p. 28) “no caso de Fundão, a ruptura aconteceu em questão de minutos e claramente sob condições não drenadas”.

Sobre o fenômeno de liquefação, tem-se que o mesmo está relacionado com a produção de elevadas pressões na água presente nos vazios da massa de solo, neste caso dos rejeitos depositados na barragem, implicando em uma redução das tensões efetivas para valores que passam a concordar com uma linha de ruptura. Sendo assim, todo o depósito de rejeitos que tinha função estrutural como fundação dos diques de sucessivos alteamentos, passou a se comportar como uma massa fluida, que pode ter sua consistência comparada à de um líquido pesado, sem capacidade de suporte (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

6. CONCLUSÕES

No relatório que apresenta as causas do rompimento da barragem de Fundão, as concepções de projeto, essenciais para garantir a estabilidade da estrutura, não foram executadas ao longo da operação, por meio de um considerável conjunto de falhas, desde a construção até a operação. Os aspectos geotécnicos pertinentes à concepção do projeto de uma barragem de rejeitos com alteamento à montante, tais como condições de saturação, cisalhamento drenado, resistência e comportamento dos rejeitos arenosos sob cargas de alteamento, controle de poropressões, baixa permeabilidade das lamias, entre outros, ficaram comprometidos devido às mudanças advindas das falhas e na iminente possibilidade de ruptura do barramento, dos quais se destacam: a falha na construção do sistema de drenagem e o recuo da ombreira esquerda sobre a praia com camadas de lama subjacentes.

Por meio do relatório foi possível delinear algumas diretrizes quanto à construção e operação de barragens de rejeito que utilizam o método construtivo à montante: os aspectos geotécnicos devem ser mantidos e monitorados durante a construção e operação do barramento; criação de um sistema de drenagem com drenos de fundo, galerias e, para garantir a não-saturação dos rejeitos arenosos, tapetes drenantes ao longo das camadas de alteamento, cujo distanciamento deve ocorrer conforme monitoramento da saturação e nível d'água; manutenção da largura mínima da praia de rejeitos conforme Manual de Operação definido para a barragem, ainda considerando a existência de dique que separe a lama, em fase inicial de operação; e disposição de lama somente enquanto o nível de rejeitos arenosos estiver acima do nível da lama, corroborando para manutenção da largura mínima da praia, como forma de manter a propriedade dos rejeitos arenosos em situações de elevada carga, corroborando para a estabilidade dos alteamentos.

Ressalta-se, com sustentação no documento da EUROPEAN COMMISSION (2009), que nos casos de incidentes é provável a necessidade de paralisação temporária das operações de mineração até que se estabeleça uma solução definitiva para o barramento. Neste contexto, cabe lembrar: em empreendimentos desse porte existe uma grande pressão econômica na fase de operação que, muitas vezes, impede medidas corretivas que possam comprometer o uso da barragem, mesmo que por curto período de tempo, como a paralisação do alteamento ou até mesmo a retirada de rejeitos para execução de obras necessárias a manutenção do barramento.

Além das diretrizes compiladas para construção e operação de barragens, com esse catastrófico evento é possível ressaltar alguns pontos importantes no âmbito da segurança de barragens de rejeitos, que são apresentados no trabalho de ZUQUETTE (2015): elaboração de um projeto adequado, operação estruturada e condizente com o próprio Manual de Operações, avaliação e gestão permanente dos riscos contando com monitoramento efetivo, além da adoção de um plano de ações emergenciais que realmente seja implementado. Apesar de outros eventos, o conjunto de falhas propicia um aprendizado que deve ser discutido pelas autoridades e órgãos públicos regulamentadores, para que, futuramente, não sejam necessárias medidas e mudanças decorrentes de catástrofes dessa magnitude de Fundão, pois como afirma Zuquette (2015, p. 302) “a maneira como essa cultura de segurança de barragens tem entrado no Brasil passa infelizmente – como em outras partes do mundo – no rastro de algumas rupturas de barragens de rejeito”.

O relatório de ROCHE et al. (2017) é enfático e relata que apesar da existência de boas iniciativas no âmbito da prevenção da ruptura de barragens, a tragédia de Fundão demonstra que há a necessidade de mais progressos na área. Duas recomendações são feitas neste relatório, considerando diversas discussões e apresentações de estudos de caso: a primeira estabelece que segurança sempre está em primeiro lugar nas barragens de rejeito, enfatizando que fatores de segurança deveriam ser avaliados separados das questões econômicas e que os custos não seriam um fator determinante; a segunda recomendação é o estabelecimento de um fórum na ONU visando a facilitação de uma atuação internacional frente às regulações para barragens de rejeitos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. 2004. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto.

- ATKINSON, G. M. (2016) **Analysis of ground motion from Nov. 5, 2015 earthquake sequence near Fundao Dam, Brazil.** Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/wp-content/uploads/general/PR/en/SeismologistsReport.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- BERTONI, E.; ALMEIDA, R.; TONGLET, A. (2016) **Mariana: a gênese da tragédia.** Disponível em: <<https://www.nexojournal.com.br/especial/2016/11/04/Mariana-a-g%C3%AAAnese-da-trag%C3%A9dia>>. Acesso em: 30 mar. 2018.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada à montante.** 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- DETZEL, H. A. et al. **The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence.** *Geophys. Res. Lett.*, 43, p. 4929–4936, 2016.
- ESPÓSITO, J. T. **Controle geotécnico da construção de barragens de rejeito: análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação.** 1995. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- ESPÓSITO, J. T. **Metodologia probabilística e observacional aplicada à barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** 2000. 363 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Brasília. Brasília.
- EUROPEAN COMMISSION. (2009) **Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities.** Disponível em: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2018.
- MACHADO, N. C. **Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação.** 2017. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- MORGENSTERN, N. R. et al. (2016) **Relatório sobre as causas imediatas da ruptura da barragem de Fundão.** Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/pt-br/relatorio-do-painel/>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- RAFAEL, H. M. A. **Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito.** 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- RICO, M. et al. **Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the world wide context.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, p. 846-852, 2008.
- ROCHE, C.; THYGESEN, K.; BAKER, E. (Eds.) (2017). **Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident.** Disponível em: <<https://europa.eu/capacity4dev/unep/documents/mine-tailings-storage-safety-no-accident>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. **O Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados.** *Geonomos*, v. 18, n. 1, p. 33-37, 2010.
- SAMARCO. (2017) **Relatório de impacto ambiental – RIMA – EIA integrado do Complexo Germano.** Disponível em: <<http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2017/11/rima-samarco-2017.pdf>>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G.; PRADO FILHO, J. F. **Cartografia e diagnóstico geoambiental aplicados ao ordenamento territorial do município de Mariana – MG.** *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 57, p. 189-203, 2005.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Design and evaluation of tailings dams.** Technical Report EPA530-R-94-038. Washington, 1994.
- ZUQUETTE, Lázaro Valentin et al (Org.). **Geotecnia ambiental.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.