

SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS NO BRASIL: AVALIAÇÃO DOS ACIDENTES RECENTES

Safety of Tailings Dams in Brazil: Assessment of Recent Accidents

Joaquim Pimenta de Ávila^a, Marta Sawaya^b, Alberto S. F. Sayão^c, Leonardo A. Ferreira^d

^a Consultor Geotécnico, Brasil.

^b Consultora Geotécnica, Brasil.

^c Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil.

^d PUC-Rio, Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasil.

RESUMO – As rupturas recentes de barragens de rejeitos no Brasil têm causado graves impactos ambientais, mortes e perdas financeiras. Este artigo apresenta uma breve descrição da evolução das atividades de mineração no Brasil e dos principais acidentes ocorridos nas últimas 4 décadas. As falhas são apontadas, com o intuito de sugerir os itens que demandam a atenção de técnicos, empresários e governantes. Alterações da gestão e operação dos rejeitos são necessárias para uma melhoria das condições de segurança das barragens de mineração.

ABSTRACT – Recent failures of tailings dams in Brazil have caused serious environmental impacts, deaths and financial losses. This article presents a brief description of the evolution of mining activities in Brazil and the main accidents in the last 4 decades. The management flaws are pointed out, in order to suggest the main points requiring more attention from technicians, administrators and legislators. Changes in the management and operation of tailings are needed for improving the safety conditions of mining dams.

Palavras Chave – segurança de barragens, rejeitos, causas e consequências de rupturas.

Keywords – dam safety, tailings, failures, causes and consequences of failures.

1 – INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma síntese atual da segurança de barragens de rejeitos no Brasil. Como introdução, apresenta-se um resumo histórico e estatísticas dos acidentes nas últimas três décadas, com uma descrição concisa de várias rupturas de barragens de rejeitos no Brasil, desde os anos 1980, com o rompimento da barragem de Fernandinho, que inaugurou uma série de acidentes com graves impactos econômicos, sociais e ambientais.

2 – HISTÓRICO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

As atividades de mineração tiveram início no Brasil há mais de 300 anos. Registros históricos indicam que, no início dos anos 1690, o sertanista Antônio Rodrigues Arzão, paulista de Taubaté, descobriu ouro nas cercanias da cidade de Sabará, em Minas Gerais, em uma de suas expedições à procura de esmeraldas e minerais valiosos. As atividades de garimpo e mineração deram início à produção de rejeitos provenientes da exploração e beneficiamento dos minérios. No início, o volume

E-mails: joaquim.pimenta@pimentadeavila.com.br (J. Ávila), martasawaya@yahoo.com.br (M. Sawaya), sayao@puc-rio.br (A. Sayão), leonardo.ferreira@mdr.gov.br (L. Ferreira)

de rejeitos era reduzido e não causava impactos ambientais significativos. No entanto, a introdução das máquinas a vapor e o processamento dos minerais de maior valor econômico, causaram um aumento expressivo dos volumes de rejeitos. Em relação ao Brasil, alguns marcos temporais definem a disposição de rejeitos de mineração, conforme está resumido a seguir. No século XVIII, o desenvolvimento tecnológico facilitou a exploração em áreas com menor teor de minério, o que promoveu o aumento da produção de rejeitos. Entre 1720 e 1820, várias permissões foram concedidas pelo governo imperial para exploração da propriedade mineral de Passagem, na Vila de Mariana, a sudeste de Belo Horizonte, em Minas Gerais. Em 1819, a mina e concessões vizinhas foram adquiridas pelo Barão de Eschwege, que criou a primeira companhia mineradora de capital privado do país, com o nome de Sociedade Mineralógica da Passagem, e instalou um engenho com nove pilões e moinhos para pedras - então inéditos no Brasil. A Mina da Passagem está localizada na Vila de Passagem, entre Ouro Preto e Mariana. No século XX, os pequenos distritos minerários começariam a crescer, atraindo indústrias de apoio e desenvolvendo as sociedades locais. Com esse crescimento, surgiram conflitos pelo uso da terra e da água, por interesses agrícolas. Os rejeitos acumulados no solo obstruíam os poços de irrigação, e contaminavam as áreas a jusante. Com o tempo, os produtores rurais começariam a associar a redução da colheita à disposição de rejeitos nas áreas próximas. Os conflitos relacionados ao uso da terra e da água também surgiriam em outros países, resultando na aprovação de leis sobre o gerenciamento de resíduos da mineração. Na década de 1920, a disposição descontrolada dos rejeitos seria finalmente eliminada nos países ocidentais. Os impactos negativos incentivaram a busca de alternativas mais adequadas. Surgia, assim, a necessidade de encaminhar os rejeitos para locais convenientes. Seriam, então, iniciadas as operações de despejo controlado dos rejeitos em barramentos, distantes da área de produção. A partir de 1930, as indústrias de mineração investiriam na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos, com o intuito de mitigar os impactos ambientais da mineração. As primeiras barragens seriam projetadas em posição transversal aos cursos d'água e ignoravam a possibilidade de inundações. Assim, sob chuvas intensas, poucas barragens permaneciam estáveis. Além disso, critérios técnicos e equipamentos de terraplanagem não eram usados na construção das barragens, que raramente envolviam engenheiros no projeto ou na construção. Um pequeno dique era inicialmente preenchido com rejeitos depositados hidraulicamente, sendo depois ampliado por pequenas bermas. Na década de 1940, a disponibilidade de equipamentos de grande porte viabilizou a construção de barragens de contenção de rejeitos com as novas técnicas de compactação. Surgiram, então, as primeiras barragens de rejeitos construídas com o método convencional, similar às barragens para reservar água, o que resultava em maior segurança. Mesmo assim, as barragens com rejeitos depositados hidraulicamente continuavam a ser frequentes (Ávila, 2011).

A primeira grande barragem para armazenamento de rejeitos do Brasil seria construída no Vale do Queiroz, em Nova Lima (Região Metropolitana de Belo Horizonte), na antiga Mineração Morro Velho (hoje denominada Anglo Gold Ashanti). A. Em 1954, a Barragem do Queiroz já acumulava 2,5 milhões de m³ de rejeitos da mineração. O desenvolvimento da tecnologia para construção de barragens de rejeitos seguia de forma empírica, em função das práticas e equipamentos de construção então disponíveis. Apesar do progresso tecnológico, as barragens de mineração continuavam pouco confiáveis, pois a filosofia corrente não exigia rigor na aplicação das técnicas da engenharia para barragens de rejeitos. Em muitas minas, prevaleciam técnicas e conceitos rudimentares. Não eram raras a construção e a operação de barragens de rejeitos com equipamentos usados na lavra, sob orientação de engenheiros de minas, não geotécnicos, especializados em tecnologias de lavra. Com o avanço da mineração, surgiam barragens cada vez mais altas e com maior capacidade de armazenamento, aumentando os riscos de acidentes. Ao mesmo tempo que os acidentes com barragens provocavam tragédias cada vez piores, eles também passaram a catalisar o advento de legislações mais rigorosas e novas tecnologias da engenharia de barragens. A cada catástrofe, a sociedade tornava-se mais intolerante aos riscos e os dispositivos legais passavam a induzir progressos tecnológicos. Bradlow et al. (2002) sugerem que há uma relação direta entre acidentes com barragens, pressão da sociedade, exigências legais e avanços tecnológicos. A seguir,

é apresentado um resumo desta relação entre acidentes com rejeitos e os avanços da legislação e da tecnologia. Na década de 1950, os princípios fundamentais da Geotecnia já eram compreendidos e utilizados em barragens para acumulação de água, mas não eram ainda aplicados às barragens para contenção de rejeitos. Em 1965, um forte terremoto em Valdivia, no Chile, causou a ruptura de muitas barragens de rejeitos e mobilizou a atenção das autoridades do país e do setor de mineração mundial. O caso mais conhecido é a ruptura da barragem El Cobre, com mais de 200 mortes. A partir dessa época, o Chile criou regulamentos para a mineração e o meio técnico passaria estudar as causas dos acidentes. Na década de 1970, aspectos técnicos como liquefação e estabilidade da fundação já eram considerados pelos projetistas. Na década de 1980, os aspectos ambientais cresceriam em importância e a atenção passaria para a estabilidade física e econômica das barragens, com a consideração do potencial de dano ambiental e dos mecanismos de contaminação:

- I. Nos anos 2000, as rupturas das barragens da Mineração Rio Verde, na localidade de Macacos, e da indústria de papel de Cataguases, em Minas Gerais, motivaram uma nova legislação estadual sobre a disposição de rejeitos em barragens, e um programa pioneiro de gestão de barragens.
- II. Em 2007 a ruptura da barragem de rejeitos de bauxita em Mirai voltaria a mobilizar a sociedade, para um projeto de lei federal, que tramitava no Congresso, e seria aprovada em 2010 (Lei 12.334).
- III. Atualmente, após as rupturas da Barragem de Mount Polley (no Canadá) e de Fundão (Mariana) e B1 (Brumadinho), o setor de mineração ganhou novo incentivo para rever os procedimentos de segurança de barragens e a desenvolver novas técnicas de disposição de rejeitos. Antes dos acidentes, as empresas mineradoras tinham bom conceito junto à sociedade no que se refere à gestão de rejeitos.

Os itens a seguir abordam os principais acidentes de barragens de rejeitos, com perdas de vidas humanas e severos impactos ambientais e econômicos. O Quadro 1 resume os acidentes recentes no Brasil.

Quadro 1 – Acidentes com barragens de rejeitos no Brasil nos últimos 35 anos.

ANO	BARRAGEM	DANOS
1986	Fernandinho	7 mortes.
2001	Rio Verde	5 mortes.
2003	Florestal Cataguases	Vazamento de lixívia negra, contaminação da água a jusante.
2006/ 2007	São Francisco	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação da água a jusante.
2014	Herculano	3 mortes.
2015	Fundão	19 mortes, contaminação da água a jusante.
2019	Córrego do Feijão	270 mortes, contaminação ambiental a jusante.

3 – ACIDENTES RECENTES COM BARRAGENS DE REJEITOS NO BRASIL

Este item mostra que os impactos dos acidentes foram relevantes para impor regulamentos e promover o progresso tecnológico na disposição de rejeitos.

3.1 – Mina de Fernandinho (1986)

Este item apresenta um resumo sobre o rompimento da barragem de contenção de rejeitos da Mina de Fernandinho, em 1986, reportado por Parra e Lasmar (1987).

3.1.1 – Dados da Barragem

A barragem de contenção de rejeitos era propriedade da Itaminas, empresa de extração de minério de ferro, e estava situada no município de Itabirito, a 40 km de Belo Horizonte, na margem da rodovia para Ouro Preto. A barragem e o depósito de rejeitos situavam-se em zona de contato de quartzito do Grupo Caraça e Itabirito Cauê. Na margem direita do vale, o quartzito encontra-se muito fraturado. Nos acessos da margem esquerda, ocorre um filito de cor cinza clara, antes da transição para o itabirito. Esta situação geológica teria importância apenas pela existência de depósitos de areia branca, resultantes da erosão do quartzito, e acumulados no talvegue. Os rejeitos depositados na barragem exibiam uma distribuição granulométrica na faixa de silte grosso a areia fina, Figura 1.

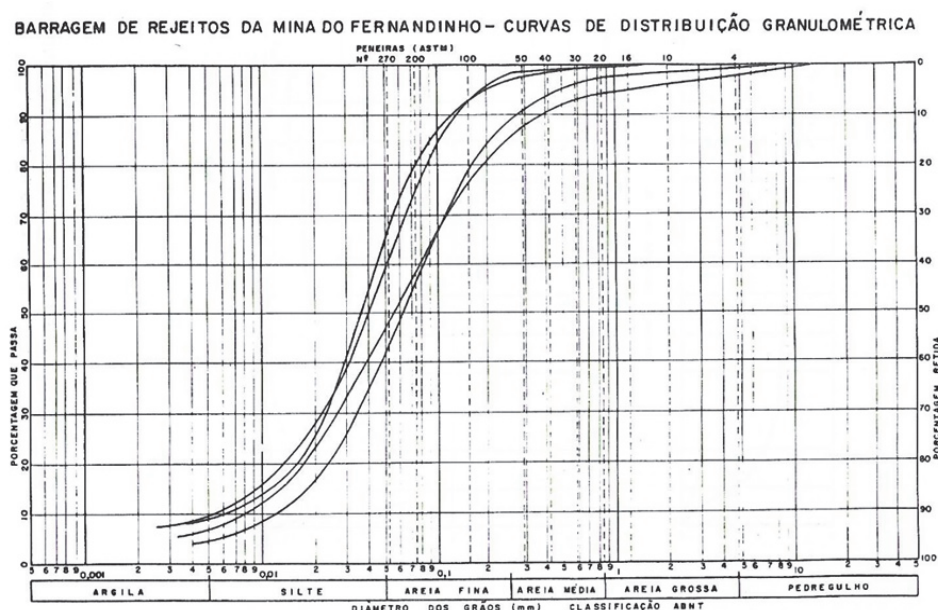


Fig. 1 – Curvas Granulométricas dos rejeitos da Mina de Fernandinho.

O maciço da barragem foi construído por estéril (canga) e matacões de itabirito até a altura de 10 metros e depois alteado com cascalho de canga até 20 metros. Daí em diante, os alteamentos eram feitos pelo método de montante, utilizando o próprio rejeito seco até a altura final de 40 metros, Figura 2.

No trecho rompido, o talude de jusante da barragem tinha uma inclinação média de 42°, correspondente ao ângulo de atrito efetivo obtido em ensaios triaxiais CU, executados em corpos de prova do rejeito lançado na barragem, moldados na densidade de campo. Os resultados estão apresentados na Figura 3.

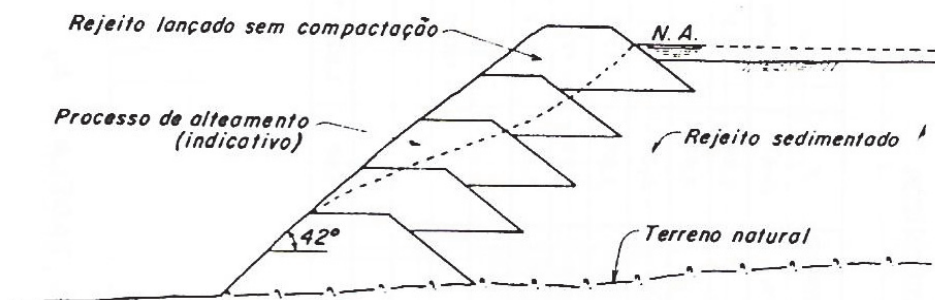


Fig. 2 – Seção transversal da Barragem, da Mina de Fernandinho antes da ruptura (Parra e Lasmar, 1987).

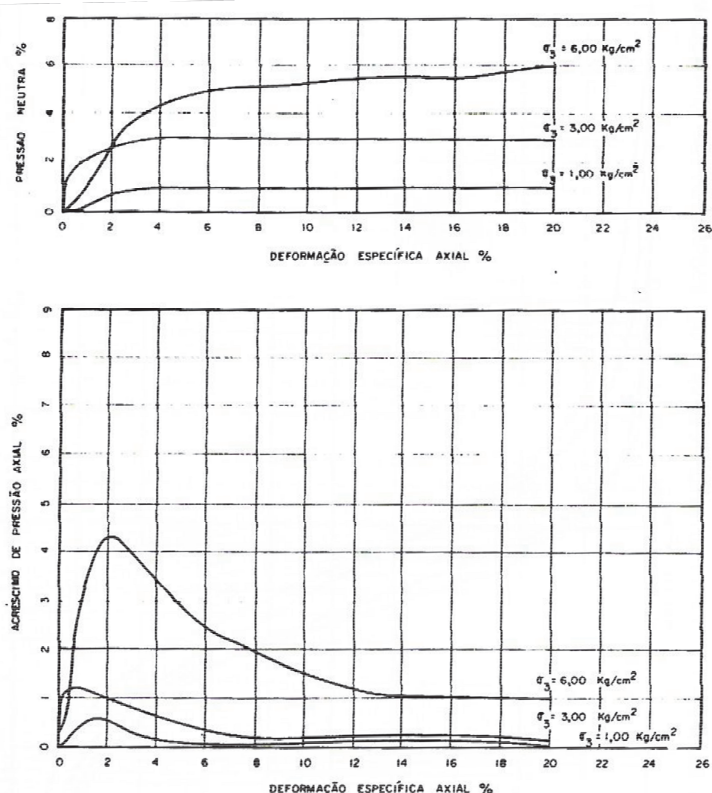


Fig. 3 – Resultados dos ensaios triaxiais com o rejeito lançado na barragem da Mina de Fernandinho (Parra e Lasmar, 1987).

Os rejeitos foram lançados em pontos afastados do maciço da barragem. Os alteamentos sucessivos foram apoiados sobre o rejeito fino, sedimentado no reservatório. Nos alteamentos, o rejeito foi lançado em camadas de grande espessura (1 a 2 metros), sem compactação. A partir das informações obtidas e observações de campo, não foi possível concluir a respeito da existência de um tapete drenante sob o talude de jusante da barragem. Por outro lado, o quartzito na fundação e nas ombreiras da barragem apresenta permeabilidade elevada. A partir do último alteamento, foi construído um dique dividindo o reservatório em dois setores, sendo um para o lançamento do rejeito, enquanto no outro setor se procedia o desassoreamento, (Figura 4). Este processo de desassoreamento nos dá uma indicação que o maciço da barragem e/ou a fundação possuía/possuíam uma permeabilidade elevada, suficiente para drenar o rejeito de um setor, abaixo do nível d'água do setor adjacente.

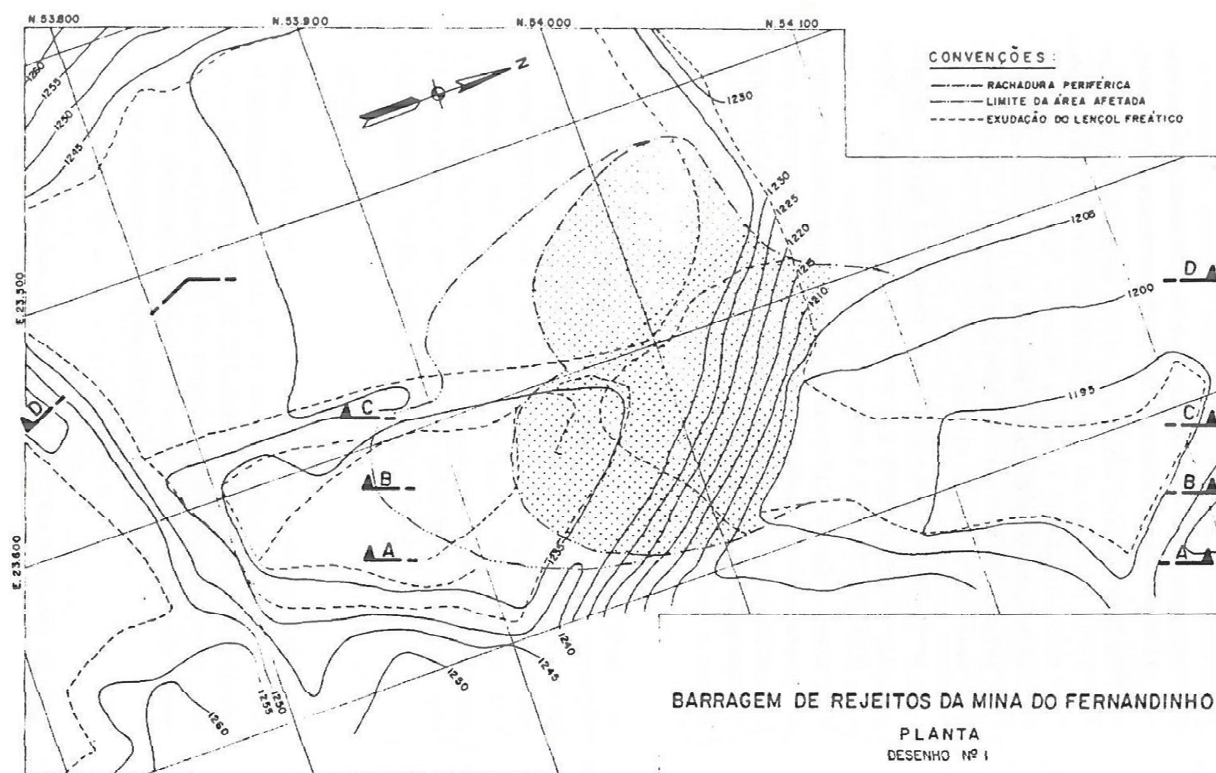


Fig. 4 – Planta da Barragem de Rejeitos da Mina do Fernandinho, com a divisão do reservatório (Parra e Lasmar, 1987).

Na ocasião do rompimento, a crista da barragem estava 2m acima do nível do rejeito contido no reservatório.

3.1.2 – Descrição da Ruptura

No dia 16 de maio de 1986, três caminhões e uma pá-carregadeira encontravam-se na crista da barragem. Um dos caminhões fora incumbido de reparar uma erosão próxima à ombreira direita, mas ficou atolado na barragem. Os outros equipamentos teriam sido enviados para tentar liberar o caminhão imobilizado. Segundo as testemunhas do acidente, a ruptura teria ocorrido em duas etapas. Inicialmente, ocorreu uma ruptura perto da ombreira direita, envolvendo as 4 máquinas e trabalhadores no trecho danificado. Depois, na segunda etapa, foi ouvido um forte estrondo, seguindo-se o colapso total, que daria origem a uma onda de lama com alta velocidade. Um trabalhador que estava na parte externa do laboratório de química, a 500 metros do pé de jusante da barragem, presenciou a primeira etapa do fenômeno e alertou os colegas no interior do laboratório. Todos conseguiram sair e correr dezenas de metros encosta acima, para um local seguro. Segundo os relatos, teriam transcorrido apenas alguns segundos entre o alerta e a passagem da lama, tempo suficiente para a fuga do pessoal antes da onda devastar o local, inclusive o laboratório de química. 10 a 15 minutos depois, e antes do trabalho de buscas e socorro, ocorreu o segundo episódio, envolvendo o material próximo à ombreira esquerda. Os sinais deixados pelo acidente confirmariam a rapidez do fenômeno e a alta velocidade do fluxo de lama, com alto grau de saturação. As irregularidades do terreno a jusante permaneceram vazias. Caso a lama apresentasse uma maior viscosidade, ou menor fluidez, as maiores cavidades poderiam capturar parte da massa em movimento, o que reduziria a energia de destruição do fluxo. Nas margens havia evidências de um grande desnível nas alturas alcançadas pela lama, devido à oscilação da massa nas mudanças bruscas

de direção impostas pela topografia irregular do terreno. A vegetação e o solo superficial foram removidos pela energia da massa em movimento, deixando um terreno de aspecto desértico. A declividade acentuada do talvegue, a jusante da barragem, foi importante para definir a extensão da área afetada. Próximo ao pé da barragem restaram porções de material, possivelmente da fase final, menos fluída. No corpo da barragem e no depósito a montante, restaria um anfiteatro de contorno irregular, delimitado por faces escarpadas, em alguns pontos, e suaves em outros, as quais seriam logo desgastadas pela erosão, em diversas direções. Nas faces desses taludes irregulares, podia-se notar a sequência dos alteamentos e a transição em degraus para as partes a montante, ainda não afetadas. O volume de material movimentado seria depois estimado em 350.000 m³. A Figura 5 mostra as etapas da ruptura da barragem da Mina de Fernandinho.

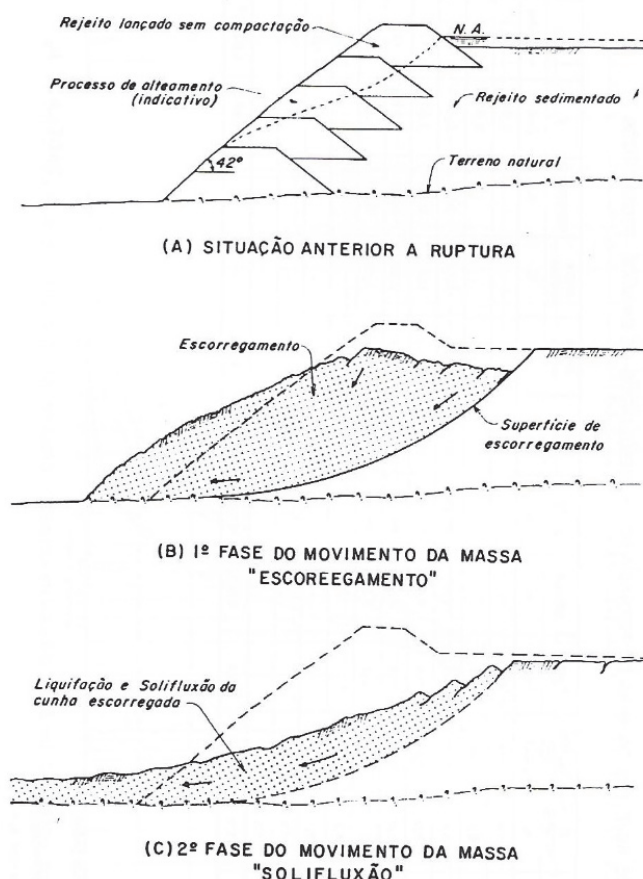


Fig. 5 – Etapas da ruptura da barragem de rejeitos da Mina de Fernandinho (Parra e Lasmar, 1987).

De acordo com os estudos da Comissão de Sindicância constituída pelo CREA-MG para analisar a ruptura da barragem de contenção de rejeitos da Mina de Fernandinho, 6 aspectos principais foram observados e merecem registro:

- a. O rompimento do maciço não ocorreu até a base da barragem, permanecendo um pequeno corpo que se encontrava mascarado pela cobertura de rejeito. Este fato mostra que a barragem, no trecho rompido, estava apoiada em terreno com resistência ao cisalhamento superior à do aterro;
- b. A paralisação dos alteamentos dois anos antes do acidente descarta duas das possíveis causas de acionamento do processo de ruptura: uma sobrecarga eventual no topo da massa ativa (envolvida no escorregamento) e um excesso de poropressão devido ao lançamento rápido das camadas superiores;

- c. O método de lançamento do rejeito (em pontos afastados do maciço) fazia os alteamentos serem apoiados em material fino. Em função do método de construção e de alteamento descrito, o maciço (barragem e rejeito adjacente) apresentava uma estrutura fofa, com densidade abaixo da crítica, ou seja, o material, quando submetido a um esforço cisalhante ou qualquer outra perturbação do equilíbrio dos grãos, apresentaria uma forte tendência à contração. O desenvolvimento de excessos positivos de poropressão durante a fase de cisalhamento nos ensaios de triaxiais CU executados com o rejeito na densidade de campo corroboram esta tendência. A condição de densidade do rejeito associada à sua característica granulométrica de areia fina e seu alto grau de saturação tornaram o maciço susceptível à liquefação espontânea (Pereira, 2005);
- d. O setor de reservatório onde ocorreu a ruptura apresentava uma lâmina d'água de 1 metro, podendo ter contribuído para a elevação da poropressão.

3.1.3 – Causas do Acidente

A comissão de investigação concluiu que a ruptura ocorreu porque o talude de jusante da barragem apresentava inclinação e altura incompatíveis com a resistência ao cisalhamento do material e com as poropressões desenvolvidas no maciço. As principais conclusões foram:

- a. No momento do acidente não havia detonações ou chuva. O único agente externo no momento da ruptura era a presença de quatro equipamentos em atividade perto da crista da barragem.
- b. O talude de jusante do trecho rompido da barragem tinha uma inclinação média igual ao ângulo de atrito efetivo do rejeito lançado na barragem, condição correspondente a um coeficiente de segurança próximo de 1,0, quanto ao escorregamento.

Como a barragem se mantinha estável por cerca de dois anos com a altura e inclinação finais, é improvável que estes itens possam ter causado a ruptura. Ademais, não há indícios de ter havido alteração significativa da resistência ao cisalhamento nestes dois últimos anos. Portanto, o nível d'água no depósito de rejeitos era a única condição que poderia ter sido alterada antes da ruptura. Como não houve chuva no período da ruptura, foi admitida como provável uma falha no sistema de drenagem na fundação da barragem, o qual teria sofrido uma redução de sua eficiência devido a uma obstrução ou colmatção gradativa pelos finos dos rejeitos. A ascensão da linha freática seria então o fator que teria causado a ruptura da barragem, como confirmado em análises simplificadas da estabilidade do talude. O provável gatilho que deflagrou o escorregamento deve ter sido a presença dos equipamentos em operação no topo da barragem, cujo talude já estaria em condição crítica de equilíbrio quanto à liquefação.

3.2 – Barragem da Cava C-1, Mineração Rio Verde (2001)

Este item apresenta um resumo sobre o rompimento da barragem de contenção de rejeitos da Cava C-1, da Mineração Rio Verde, em 2001, reportado por Oliveira (2001) para a FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais).

3.2.1 – Dados da Barragem

A empresa então denominada Mineração Rio Verde Ltda, localizava-se no km 543 da Rodovia BR-040, no município de Nova Lima, MG, onde desenvolvia a lavra e o beneficiamento de ferro e manganês, em três áreas adjacentes, denominadas de Mina Norte, Mina Sul e Mina Técnica. Os trabalhos de lavra na área foram iniciados em 1917, de maneira rudimentar, por terceiros, que constituíam firmas individuais, prática comum naquela época. Em 1960, a Mineração Rio Verde começou a atuar, inicialmente na Mina Norte, e depois adquirindo a Mina Sul em 1977 e a Mina

Técnica em 1994. A cava C-1 localiza-se na Mina Norte, onde o minério foi lavrado até a mina ser exaurida em 1989. O uso da cava C-1 para disposição dos rejeitos constava do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, elaborado pela empresa Leme Engenharia, para o órgão ambiental em 1990. Para garantir a ancoragem segura e a estabilidade no conjunto de contenção, seria implantado um dique de arranque em enrocamento, na base do barramento de estéril. A declividade do talude seguiria o curso da estrada de terra existente, com a drenagem das águas pluviais conduzida para o Córrego Taquaras. O barramento de estéréis evoluiria para englobar o talude da antiga cava e manter os taludes com altura de 10 m, e bermas com largura de 5 m. O alteamento ficaria apenas um nível de bancada acima do existente. O volume de recepção de material indicado nos estudos era de 513.000 m³. A cota final do dique de alteamento prevista no projeto era de 1.297,0 m, porém os diques continuariam a ser alteados sem projeto específico até a ruptura, na cota 1.310,0 m. A Figura 6 mostra o reservatório e a Barragem C-1 antes do acidente.



Fig.6 – Mineração Rio Verde, vista aérea do reservatório e da barragem da Cava C-1, antes da ruptura

3.2.2 – Descrição da Ruptura

O rompimento da Barragem da Cava C-1 ocorreu às 16 h 45 min do dia 22 de junho de 2001, com o vazamento dos rejeitos de minério de ferro. O acidente que causou a morte de dois operários que trabalhavam nas obras de alteamento da barragem e o rompimento de uma adutora da COPASA, Companhia de Saneamento de Minas Gerais, uma ponte, além de obstruir a rodovia de ligação a São Sebastião das Águas Claras. O evento causou um grave acidente ambiental, com destruição da flora e a fauna na micro bacia do Córrego Taquaras. Devido ao rompimento da barragem, o reservatório, formado pela Cava C-1 e pelo barramento construído em sua borda mais baixa, perdeu o confinamento lateral, tendo a lama vazado para o vale do córrego Taquaras, situado a jusante. A ruptura ocorreu na seção de maior altura do barramento, em elevação acima do nível da estrada para São Sebastião das Águas Claras, envolvendo os diques de alteamento construídos para o fechamento da borda da Cava C-1. Estes diques foram implantados até uma elevação acima da indicada no projeto. Na Figura 7 mostra a área da Cava C-1 após a ruptura.

3.2.3 – Causas do Acidente

Segundo Ávila (2011), os aspectos mais relevantes para a ruptura da barragem foram relacionados à desconsideração das determinações do projeto, fundação do dique sobre rejeitos não drenado e susceptíveis a liquefação, bem como, deficiência de detalhamento de projeto executivo e



Fig. 7 – Mineração Rio Verde, vista aérea dos rejeitos após a ruptura

manual de operação. Verificou-se uma inclinação exagerada do talude externo dos diques, ausência de um sistema de drenagem interna no barramento, fora o arranjo desfavorável das tubulações de descarga, criando as condições de instabilidade que provocaram a ruptura. As ações para implantação do conjunto cava/barramento/reservatório de rejeitos foram desenvolvidas segundo uma sequência inadequada das atividades à luz do conhecimento geotécnico, isto é, elaboração do projeto, construção e monitoramento. Concluindo-se por meio da investigação pós-acidente, que esta sequência de atividades, uma vez aplicadas, poderiam ter evitado o acidente.

3.3 – Barragem da Florestal Cataguases, Indústria de Papel (2003)

3.3.1 – Dados da Barragem

A fábrica de papel Florestal Cataguases Ltda, situada à época no município de Cataguases, MG, era proprietária da Fazenda Bom Destino, onde se situavam duas barragens denominadas A e B, que recebiam efluente industrial do processo de fabricação de celulose, um resíduo líquido conhecido como lixívia ou “licor negro”. A fazenda localizava-se a 12 km da fábrica, e a lixívia transportada para os reservatórios em caminhões tanque. A Figura 8 mostra as Barragens A e B.

As duas barragens tinham apenas 5m de altura e foram construídas pelo método convencional, com aterro de solo homogêneo compactado, filtro chaminé para a drenagem interna, e fundação em solo residual de rocha granito-gnáissica. O maior reservatório ocupava uma área de 8,5 ha e o menor uma área de 5,5 ha. As Figuras 9 e 10 mostram respectivamente a Barragem B rompida e o respectivo filtro chaminé.

O resíduo armazenado nas Barragens A e B era composto por água, lignina e soda cáustica. Inicialmente, a fábrica de papel lançava os efluentes gerados no processo diretamente no Rio Pomba. Depois, o órgão de controle ambiental autorizou o armazenamento do “licor negro” nas Barragens A e B, até que a empresa adquirisse uma caldeira para queimar o resíduo. A lixívia armazenada nas Barragens A e B possuía um valor de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) média de 8.200 mg/l, muito acima do máximo de 60 mg/l permitido pela legislação para descarte livre no meio ambiente.



Fig. 8 – Florestal Cataguases, localização das Barragens A e B. (Google Earth, 2003)



Fig. 9 – Florestal Cataguases. Imagem da seção da Barragem B, após a ruptura.



Fig. 10 – Florestal Cataguases. Detalhe da seção da Barragem B, sendo possível notar o solo homogêneo compactado com o filtro chaminé (drenagem interna).

3.3.2 – Descrição da Ruptura

Na madrugada de 29 de março de 2003, a Barragem B da Indústria de Papel Cataguases rompeu, liberando 1,4 bilhões de litros de lixívia nos cursos d'água a jusante, e atingindo cerca de 200 km do Rio Paraíba do Sul, até chegar ao mar, no Norte Fluminense. Este foi um dos mais graves acidentes ambientais do país, com grande repercussão, por ser o rio responsável pelo abastecimento de água para mais de 60 municípios e parte dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. O vazamento da lixívia causou ainda a mortandade de peixes, espécies vegetais e destruição de ecossistemas ribeirinhos e áreas de pastagem e cultivos.

3.3.3 – Causas da Ruptura

A barragem rompeu no contato do maciço com a ombreira direita. O projeto indicava que a durabilidade das barragens seria limitada e que a agressividade do fluido represado poderia alterar quimicamente os feldspatos do solo residual e provocar erosão interna no maciço. A Figura 11 mostra uma vista da porção remanescente da barragem.

Com a exposição do filtro vertical da barragem, foi possível observar que a areia que o



Fig. 11 – Florestal Cataguases. Vista de parte do maciço remanescente



Fig. 12 – Florestal Cataguases. Indícios da impregnação da lignina no filtro vertical

compunha encontrava-se colmatada por impregnação da lignina, como mostra a Figura 12. Desta forma, o mecanismo apontado como o provável gatilho da ruptura foi o *piping*, havendo erosão interna no maciço, provocada pela reação química entre o resíduo (licor negro) e o feldspato existente no aterro. De acordo com Ávila (2011), o rompimento seria diretamente relacionado ao abandono e à falta de manutenção do barramento.

3.4 – Barragem de São Francisco, Mineração Rio Pomba (2007)

3.4.1 – Dados da Barragem

A barragem São Francisco entrou em operação em 1995, sendo parte das instalações da Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda, situada na Fazenda São Francisco, distante 8 km da cidade de Mirai, MG. O reservatório recebia o efluente gerado no processo de lavagem de bauxita. A barragem foi construída transversalmente ao Córrego Bom Jardim, tributário do Rio Fubá, afluente da margem esquerda do Rio Muriaé, que desemboca no Rio Paraíba do Sul. A distância entre a barragem e a foz do Rio Muriaé no Paraíba do Sul é de 200 km. Até final de 2005, o barramento tinha 90 m de comprimento, 9 m de largura e altura superior a 30 m, tendo sido construído em três etapas de alteamento, Figura 13. Constituída de aterro compactado de solo argilo-arenoso, com sistema de drenagem interna composto por filtro chaminé de areia, combinado a um tapete drenante sub-horizontal, acima da superfície de fundação. No início de 2006, a barragem passou por novo alteamento de 2 m para jusante, com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento, conforme é mostrado na Figura 14.



Fig. 13 – Vista da Barragem São Francisco (CAOMA, 2005)

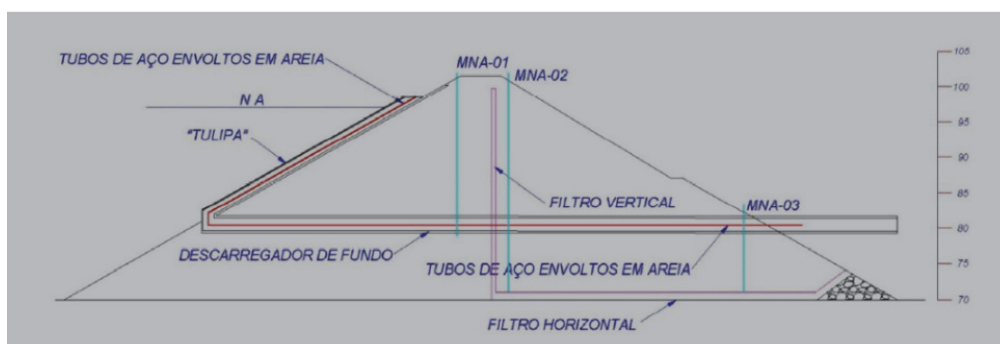


Fig. 14 – Seção típica da Barragem São Francisco (Ávila, 2011)

As figuras 15 e 16 mostram os taludes de montante e jusante da Barragem São Francisco, após o alteamento em 2006.



Fig. 15 – Vista do talude de montante da Barragem São Francisco, após o alteamento de 2m (CAOMA, 2006b)

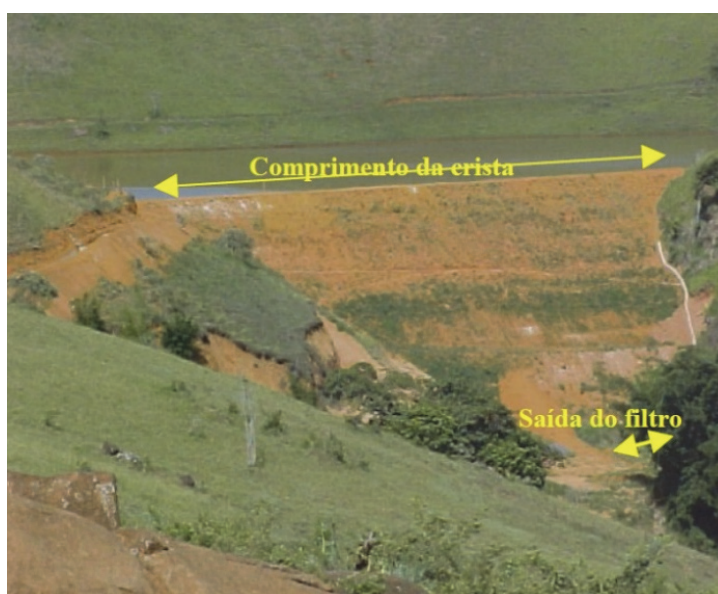


Fig. 16 – Vista do talude de jusante da Barragem São Francisco, após o alteamento (CAOMA, 2006b)

O rejeito era lançado diretamente no reservatório, em forma de lama. Após um tempo de retenção na barragem, ocorria a decantação das partículas sólidas e a água livre era bombeada para reutilização no processo de beneficiamento. A capacidade de armazenamento do reservatório, até o final de 2005, era de aproximadamente 4 milhões de m³. A bacia de contribuição da barragem São Francisco abrangia uma área de drenagem de 17,6 km², constituindo uma razão bacia de contribuição/espelho d'água bastante desfavorável. O sistema extravasor para o controle do nível d'água no reservatório foi constituído por placas de concreto, que foram instaladas à medida que o nível do reservatório aumentava. O vertedouro, do tipo Tulipa, interligava-se a um canal de restituição que desembocava no Córrego Bom Jardim, visto na Figura 17.



Fig. 17 – Saída do vertedouro da Barragem São Francisco, liberando o efluente no córrego Bom Jardim (CAOMA, 2006a).

3.4.2 – Descrição da Ruptura

A Barragem São Francisco passou por dois momentos críticos, tendo a ruptura ocorrido em 10 de janeiro de 2007. O projeto indicava o barramento com um vertedouro tipo Tulipa, apoiado no talude de montante do maciço e conectado a uma galeria horizontal (Figura 18).



Fig. 18 – Barragem São Francisco. Detalhe da torre inclinada onde ocorria a tomada d’água do sistema extravasor (CAOMA, 2006b)

O vertedouro dispunha de duas células abertas para drenagem da água (Figura 19). A galeria de concreto que compunha a estrutura vertente, atravessava o corpo do aterro, em direção à ombreira esquerda, para lançar o efluente no pé do talude de jusante, em um canal de restituição ligado ao Córrego do Fubá, conforme ilustra a Figura 20.

No dia 01 de março de 2006, pouco tempo após ter sido executado o alteamento da barragem, ocorreu a abertura de uma brecha entre as placas de concreto submersas do vertedouro e o maciço da barragem, provocando a saída de lama pelo sistema extravasor e depois atingindo o Córrego Fubá. O vazamento de material continuou até o dia 3 de março, quando se conseguiu obstruir o

vazamento da lama. O volume total do vazamento foi de 135.000 m³, sendo 65.000 m³ de lama com 12% de argila, e 70.000 m³ de água limpa, retirada para baixar o nível do reservatório e reduzir as poropressões no local da brecha. Assim, 7.800 m³ de sólidos vazaram pelo vertedor da barragem. Os sólidos eram constituídos por sílica e óxidos de ferro e alumínio, materiais inertes, sem a presença de metais pesados.

Conforme consta no Laudo do Ministério Público Estadual de Minas Gerais (CAOMA, 2006b), além dos danos ambientais, foi afetada a qualidade da água destinada ao abastecimento público das cidades de Laje do Muriaé e Itaperuna, no Estado do Rio de Janeiro. Na Figura 21 é apresentada a situação do Rio Fubá, próximo ao bairro Indaiá, na cidade de Mirai, após o incidente de 2006.

O incidente registrado na Barragem São Francisco em 2006 resultou na adoção de medidas corretivas determinadas em um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) celebrado entre a Mineradora Rio Pomba e o Ministério Público Estadual. Dentre as medidas propostas, estava a construção de um reforço do maciço e a implantação de um novo vertedouro. As obras propostas no



Fig. 19 – Barragem São Francisco. Células, abertas do lado do reservatório, para drenagem da água (CAOMA, 2006b)



Fig. 20 – Vazamento da lama pela galeria do sistema extravasor da Barragem São Francisco (CAOMA, 2006b)



Fig. 21 – Situação da área a jusante da Barragem São Francisco após o vazamento de 2006 (CAOMA, 2006b)

TAC estavam quase finalizadas, quando na madrugada de 10 de janeiro de 2007, o maciço da Barragem São Francisco rompeu, provocando o vazamento de lama no córrego Bom Jardim, chegando ao rio Muriaé em poucas horas. De acordo com os depoimentos de pessoas que presenciaram o episódio, depois de algumas horas de chuva forte, por volta das 3 horas da manhã, o nível de água do reservatório foi elevando-se rapidamente até atingir a soleira do vertedouro de superfície recém-construído. No instante que o nível da água alcançava a soleira do vertedouro atingiu também uma região rebaixada da crista da barragem, no contato do maciço com a ombreira direita da barragem, promovendo o galgamento do maciço e por consequência sua ruptura.

3.4.3 – Causas do Acidente

A ruptura da Barragem São Francisco, da Mineradora Rio Pomba, em Mirai deu-se pelo volume e a energia cinética da água que galgou o maciço, em local adjacente ao vertedouro, que foi rebaixado na ocasião das obras executadas após o incidente de 2006. Com o galgamento do maciço na região da crista rebaixada, iniciou-se um rápido processo erosivo junto à ombreira direita do barramento, que culminou no colapso da estrutura. Segundo Pimenta de Ávila Consultoria Ltda (2007), o escoamento pelo leito da estrada de acesso pode ter ocorrido devido à ruptura da parede lateral do antigo vertedouro de emergência ou devido à existência do rebaixo da crista que servia de passagem de veículos sobre o barramento. A parede lateral do antigo vertedouro de emergência era em solo, e delgada no ponto de junção com a estrada de acesso. Já o rebaixo na crista teria sido acentuado devido à comunicação direta entre o reservatório e a estrada de acesso, durante um evento de cheia (Figura 22).

O vigilante que trabalhava no local na ocasião da ruptura relatou que, ao perceber a elevação do nível do reservatório, alertou a direção da empresa, que verificou a provável ruptura da barragem e logo acionou as autoridades locais. Assim, por ação ativa e conjunta de alarme, várias pessoas percorreram as ruas da cidade de Mirai na madrugada, orientando os moradores a saírem de suas casas e procurarem abrigo, o que evitou uma tragédia com mortos e feridos em decorrência da passagem da onda liberada pela ruptura do maciço. A lama invadiu as cercanias da Barragem de São Francisco, provocou a turbidez das águas e alagamentos nas cidades banhadas pelo Rio Muriaé em Minas Gerais e Rio de Janeiro. Em função disso, ocorreu mortandade de peixes e interrupção do abastecimento de água para as cidades de Mirai, Muriaé, e Patrocínio do Muriaé, em MG, e Laje do Muriaé, RJ. Imagens aéreas da destruição ocasionada pelo rompimento da barragem foram obtidas horas após o desastre, estão apresentadas na Figura 23.



Fig. 22 – Barragem São Francisco. Canal do antigo vertedouro de emergência, erodido pela água em janeiro de 2007



(a) Vista aérea da região atingida



(b) Detalhe das residências atingidas

Fig. 23 – Fotos da região atingida pela lama liberada na ruptura da Barragem São Francisco

3.5 – Barragem de Rejeitos B1 – Mineração Herculano (2014)

Este item apresenta um resumo do laudo apresentado por Pimenta de Ávila Consultoria (2015) para o Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), sobre as causas da ruptura da barragem de contenção de rejeitos da Mina Retiro do Sapecado, pertencente ao Grupo Herculano, ocorrida em setembro de 2014.

3.5.1 – Dados da Barragem

A Barragem B1 pertence à Mineração Herculano Ltda., com a finalidade de armazenar rejeitos do beneficiamento de minério de ferro, na região rural do Município de Itabirito, em Minas Gerais.

Além da Barragem B1, a mina contava com as barragens B2, B3 e B4 (Figura 24).

A geologia na região das barragens pode ser caracterizada por rochas dolomíticas da Formação Fecho do Funil, predominantemente compostas por filitos, mármore e brechas, podendo ocorrer localmente porções manganésíferas e depósitos terciários de pacotes espessos de argila. Alguns destes litotipos seriam confirmados com os testemunhos das sondagens realizadas após o acidente com a Barragem B1. Em muitos pontos, a superfície do terreno mostra uma camada de solo coluvionar ou cobertura laterítica. Segundo o mapa geológico (Figura 25), indica as Barragens B1 e



Fig. 24 – Mineração Herculano. Imagem de satélite da região do empreendimento.
(Google Earth, imagem de junho de 2014)

B4 sobre maciços de rochas carbonáticas (mármore e brecha dolomítica). Nos afloramentos cadastrados, os filitos, os diques máficos e os metarritmitos apresentam-se muito alterados e pouco resistentes, enquanto a brecha dolomítica é muito resistente e pouco alterada. Na estrada de acesso, ocorrem também afloramentos de dolomito muito resistentes.

As informações das investigações feitas após a ruptura (sondagens, inspeções e mapeamentos) indicam que o local da ruptura da Barragem B1 estava assentado sobre cobertura terciária, composta de solo argiloso muito consistente, pouco arenoso, avermelhado. A parte não rompida da barragem B1 está apoiada sobre o maciço composto por rochas carbonáticas (mármore e brecha dolomítica), metarritmitos e filito dolomítico. Quando a Herculano iniciou suas operações na Mina Retiro do Sapecado, a Barragem B1 já existia em baixa altura. Havia processos erosivos em seu maciço, tendo sido iniciada a construção dentro de uma voçoroca, que foi então preenchida com rejeitos. Os aterros de alteamento foram feitos com rejeito compactado. Registros da Herculano indicam que em 1995 ou 1996 houve um rompimento parcial da Barragem B1, sem outras informações. No ano seguinte, a Barragem seria reformada e teria um extravasor lateral de soleira livre, e drenos no contato com a fundação. Após o reinício da sua operação, em 1997, a Barragem B1 sofreria alteamentos sucessivos, em etapas de 2,5 m de altura, conforme informações verbais obtidas em reuniões com técnicos da Herculano. A Figura 26 mostra a geometria da Barragem B1 em 2007.

A partir de 2007 o lançamento de rejeito foi transferido para o dique construído lateralmente à estrutura da Barragem B1. O Dique da Barragem B1 sofreria alteamentos sucessivos até ficar nivelado com a barragem, em 2009. De 2008 a 2009, o talude de jusante da Barragem B1 seria escavado e recomposto, acima da Elevação 1270,0. Essas modificações no talude da barragem podem ser identificadas nos levantamentos topográficos realizados no período (Figura 27).

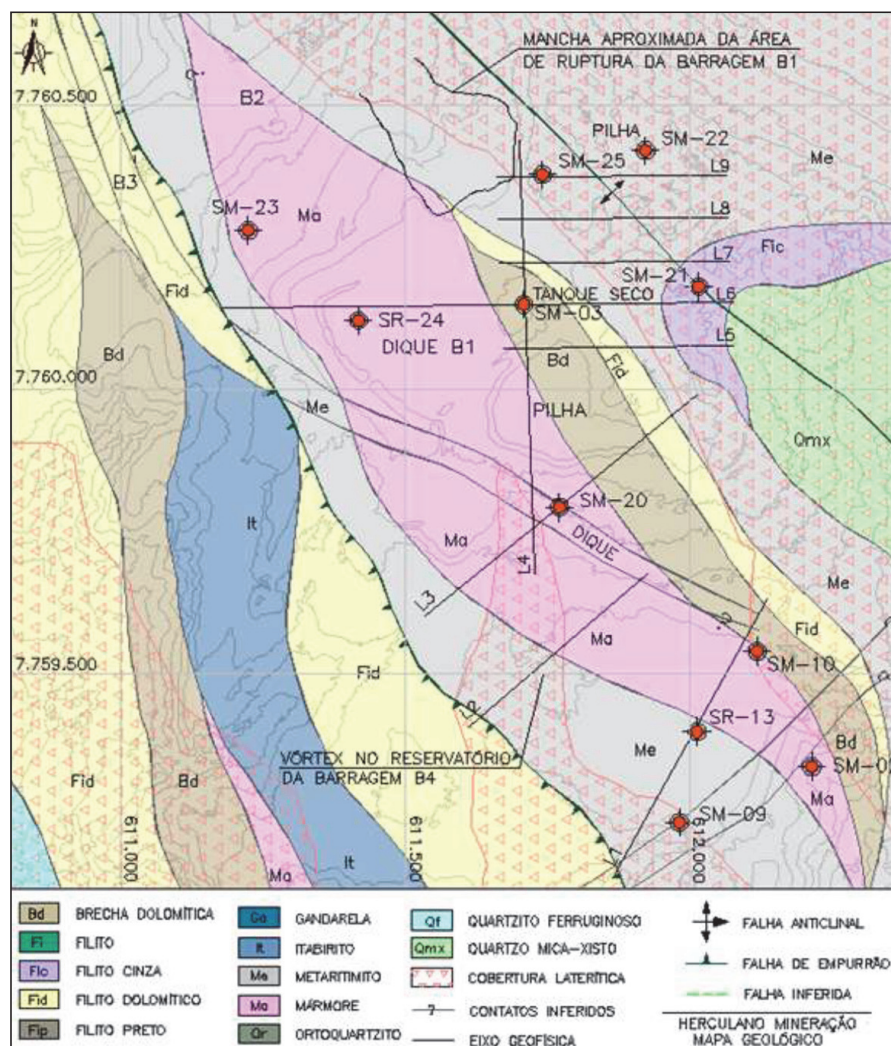


Fig. 25 – Mapa geológico da região rural de Itabirito, MG (Pimenta de Ávila Consultoria Ltda, 2015)

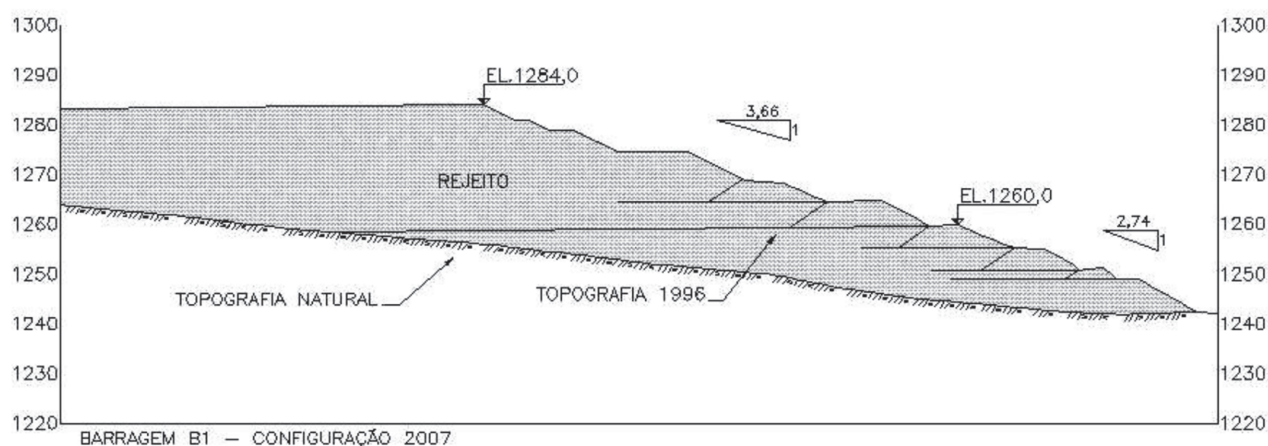


Fig. 26 – Mineração Herculano. Seção transversal da Barragem B1 em 2007

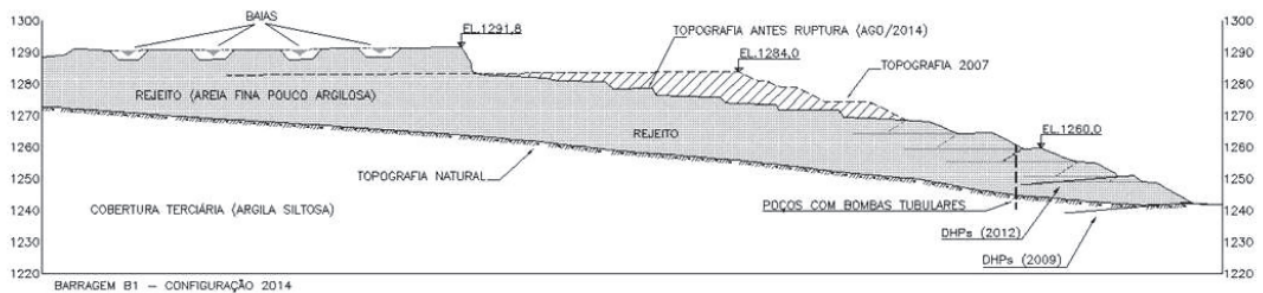


Fig. 27 – Mineração Herculano. Seção transversal da Barragem B1, mostrando as modificações da geometria até a ocasião da ruptura

Em 2009, foi constatada uma surgência de água a jusante da barragem. Para resolver o problema, foi instalada uma linha de drenos sub-horizontais na parte inferior da Barragem B1, no contato com a ombreira direita, região onde ocorreria a ruptura. O sistema de drenagem seria reforçado em 2012, com duas linhas de poços de 20 m de profundidade e 200 mm de diâmetro, com bombas tubulares instaladas na parte lateral direita da barragem (região onde ocorreu a ruptura). A Figura 28 mostra a configuração da Barragem B1 em 2009.



Fig. 28 – Mineração Herculano. Vista aérea da Barragem B1 em 2009

A partir de 2009 o do rejeito passaria a ser lançado no reservatório da Barragem B4, recém-construída. Em abril de 2014, o rejeito voltaria a ser lançado em baias de secagem na Barragem B1, com extravasamento da água excedente. O levantamento topográfico de agosto de 2014, característico das condições existentes antes da ruptura, indica a parte superior da barragem na Elev. 1291,8. A imagem de satélite (Google Earth) mostra a baia de deposição e secagem de rejeito, Figura 29.



Fig. 29 – Mineração Herculano. Imagem de satélite da Barragem B1.
(Google Earth, em junho de 2014)

As baias de secagem tinham 3 m de profundidade e o processo de secagem durava de 1 a 3 dias, sendo depois o rejeito removido com retroescavadeira e caminhão. Assim, a baía ficava liberada para novo ciclo de deposição e secagem. A operação era contínua, com o uso alternado das duas baias, para o processo não ter interrupções. O teor de ferro do rejeito lançado na barragem por ciclonação ou espigotamento era de 60% até 2006. Depois, com as modificações no processo de beneficiamento, o teor de ferro passou para 40%. O resíduo disposto na barragem era considerado como Classe 3 (Inerte), segundo a Norma Brasileira 10.004/87.

3.5.2 – Descrição da Ruptura

A Barragem B1 da Herculano Mineração rompeu no dia 10 de setembro de 2014, pouco antes das 08h. A ruptura ocorreu de forma abrupta, envolvendo cerca de 300.000m³ de lama de rejeitos. Nos dias do acidente e nas vésperas, não houve registro de chuvas. O último registro de chuvas no local foi referente a uma semana antes da ruptura. Apesar disso, o material do talude rompido encontrava-se saturado no momento do acidente, conforme indicavam as fotos então disponíveis sobre o acidente. Havia muitos pontos de surgência de água no local da ruptura, os quais perduraram por alguns dias. Além disso, o material escorregado apresentava alta fluidez e exibia um o aspecto líquido ou pastoso como lama, que escorreu pela encosta e pelo vale a jusante, até o córrego João Dias. A lama assoreou ainda os reservatórios das barragens B2 e B3. A ruptura ocorreu em mais de uma etapa, segundo superfícies de deslizamento distintas. O acidente causou três mortes e envolveu dois caminhões, uma escavadeira e um automóvel, que estavam na porção superior do talude. Na porção superior do talude da Barragem B1, próximo às extremidades laterais da zona de ruptura, houve rotação do material rompido, preservando algumas estruturas após escorregamento. O fenômeno ocorrido pode ser comparado com o movimento de uma porta se abrindo, movimentando em torno de um eixo fixo, como se deslizasse em cima de uma superfície escorregadia, conforme pode ser observado na Figura 30. Deve-se registrar que, por vários dias, a brecha de ruptura continuou a evoluir e o maciço da barragem continuou instável nas proximidades da região rompida.

3.5.3 – Causas do Acidente

A seguir é apresentada uma síntese da análise sobre os modos de ruptura frequentes em barragens de rejeitos, considerados na avaliação do acidente com a Barragem B1. A hipótese de galgamento foi logo descartada, tendo em vista que o acidente ocorreu no final de um período sem chuvas, estando o reservatório sem volume de água suficiente para causar o transbordamento pela crista da barragem. A hipótese de *piping* foi também afastada, por não serem encontrados indícios de erosão interna no talude de jusante da barragem. A hipótese de um problema da fundação foi estudada, considerando a deficiência de estudos geotécnicos nas fases de projeto da Barragem B1 e a presença de rochas carbonáticas no local. A possibilidade de ocorrência de fenômenos cársticos envolvendo formação de cavernas e dolinas foi reforçada devido a um incidente ocorrido em abril de 2014, no reservatório da Barragem B4, nas proximidades da B1. Na ocasião, ocorreu uma infiltração brusca da água do reservatório da B4, formando um “vórtex”, por onde a água se esvaiu rapidamente. No local da ruptura, predomina, porém, uma espessa cobertura terciária sobreposta a metaritimitos não solúveis, material com características adequadas de resistência. A possibilidade de cavernas e túneis em rochas carbonáticas foi também descartada, após avaliação dos dados piezométricos e das condições geológicas e topográficas da área. Por fim, o lapso temporal significativo entre o incidente na B4 e a ruptura da B1 afasta a hipótese de vínculo entre as duas ocorrências. Não havia, portanto, evidências para afirmar que a ruptura da Barragem B1 teria sido devido a problemas na fundação. Como as outras hipóteses foram descartadas, restou proceder uma retroanálise para definir os mecanismos que teriam instabilizado o talude de jusante da barragem. As análises de estabilidade consideraram dois modelos, com base nas seções topográficas representativas do momento anterior à ruptura da barragem no local do escorregamento, utilizando seções com inclinações médias dos diques iguais a 17° ou 19°. Detalhes da metodologia e características geométricas e geotécnicas consideradas estão reportadas em Pimenta de Ávila Consultoria Ltda (2015). As retroanálises de ruptura utilizaram o programa Slide (2013) da Rocscience Inc, sendo adotado o método tradicional de Morgenstern-Price (1965). São apresentados os resultados das análises de estabilidade em função da variação dos ângulos de atrito adotados para o rejeito e dos diferentes níveis d’água atribuídos ao modelo de análise. Para realização das análises de susceptibilidade à liquefação, foram inicialmente avaliados os ensaios de caracterização, realizados pela empresa Geolabor, em dezembro de 2014. Com estes resultados, foi possível concluir que as faixas granulométricas das amostras dos rejeitos depositados na Barragem B1 coincide com as faixas propostas de suscetibilidade à liquefação. Para a avaliar a hipótese de liquefação estática, foi utilizada a metodologia de Olson (2001), com base na razão de resistência obtida de correlações com valores de resistência à penetração, e no método de estabilidade USSA (*Undrained Strength Stability Analysis*). Nas análises de estabilidade, foi utilizado o programa Slide (2013) da Rocscience Inc. As razões de resistência foram atribuídas à camada de rejeitos utilizando a função “*Vertical Stress Ratio*”, que relaciona a resistência ao cisalhamento com as tensões verticais efetivas ao longo da camada suscetível à liquefação (Olson, 2001). As resistências ao cisalhamento dos materiais foram definidas a partir do modelo clássico de Mohr-Coulomb. No cálculo dos fatores de segurança foi utilizado o tradicional método Morgenstern-Price (1965). A Figura 30 apresenta o resultado das análises de estabilidade para as rupturas iniciais a montante (talude do aterro das baias) as quais foram o gatilho (agente deflagrador) do processo de liquefação.

Na Figura, foi apresentada apenas as rupturas iniciais, que atuam como gatilho da liquefação. As rupturas sucessivas não são aqui representadas, pois o que ocorre no processo de ruptura por liquefação é o deslocamento do material granular como um líquido viscoso. A liquefação do solo ocorre devido à substancial perda de resistência em regiões da massa, e não apenas ao longo de determinada superfície de ruptura. A análise numérica não reproduz a fluência do material por meio das rupturas progressivas, contudo, seus resultados mostram uma superfície pós-ruptura muito semelhante à observada em campo.

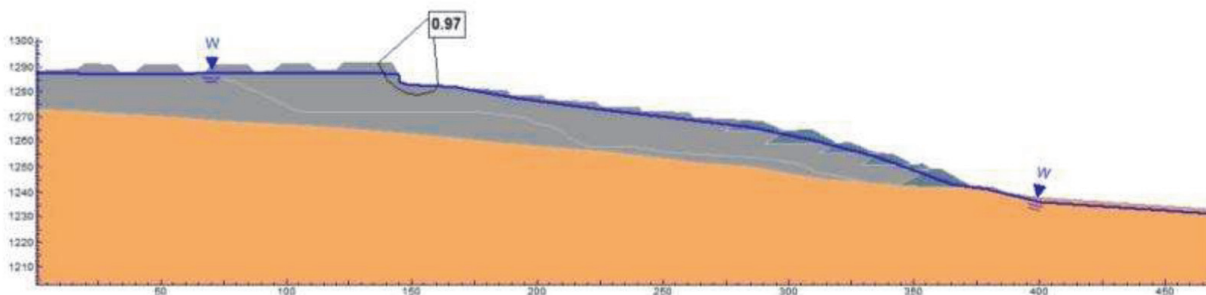


Fig. 30 – Mineração Herculano. Ruptura inicial a montante (talude do aterro das baias)

3.6 – Barragem do Fundão, Mineração Samarco (2015)

3.6.1 – Dados da Barragem

A barragem do Fundão está localizada no vale do Córrego do Fundão, nos domínios da Mina de Germano, da Samarco, no município de Mariana, MG. A barragem é parte do sistema de disposição de rejeitos da mineração de ferro, em continuidade à barragem do Germano, a qual estava com a capacidade de armazenamento de rejeitos quase esgotada. A operação iniciou-se em 2007, com o projeto e a construção do dique de partida e, em sequência, com alteamentos sucessivos, interrompidos pelo colapso da barragem principal, em novembro de 2015. Na ocasião da ruptura, a Barragem do Fundão tinha altura superior a 90 m, na cota 920,0 m. Esta ruptura, com grande repercussão mundial, seria tema inúmeras reportagens na mídia brasileira e internacional, e provocaria uma investigação técnica do acidente pela Samarco, proprietária da Mina do Germano. Para os estudos, a Samarco contratou uma junta de consultores, liderada pelo Professor Norbert Morgenstern, do Canadá. O relatório final foi apresentado no ano seguinte (Morgenstern et al., 2016) e é a versão oficial da Samarco para o episódio da ruptura da Barragem do Fundão. O relatório considera o projeto com duas zonas do reservatório, uma a jusante, represando os rejeitos arenosos (*sand tailings*), e outra a montante, com os rejeitos argilosos, na consistência de lama (*slimes*). Os dois tipos de rejeitos seriam separados de forma que os rejeitos arenosos, provenientes da flotação do minério de Itabirito, ficariam logo atrás do barramento alteado para montante, na em forma de uma pilha drenada. O volume da lama (*slimes*), era contido pelo maciço de rejeitos arenosos, como mostra esquematicamente a Figura 31.

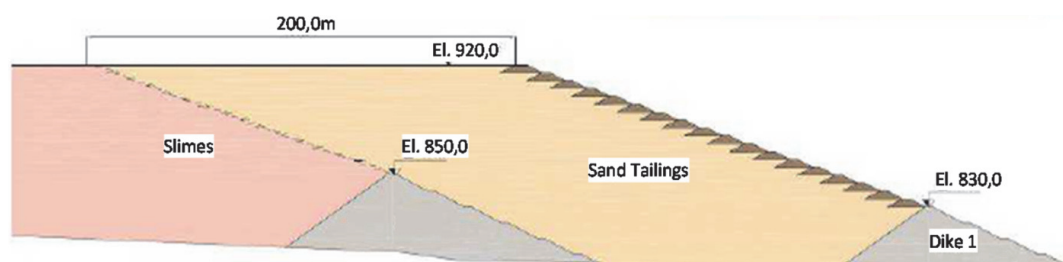


Fig. 31 – Barragem de Fundão. Seção esquemática do barramento e do represamento dos rejeitos (Morgenstern et al., 2016).

Como relatado por Morgenstern et al. (2016) houve contratempos nos anos iniciais da operação do reservatório. Os defeitos de construção da barragem resultaram em modificações no projeto e algumas correções no sistema de drenagem interna, com o tamponamento (“plugagem”) das duas galerias de concreto inseridas no reservatório, sob a barragem, que se estendiam para montante. Ocorreram interferências entre as atividades de reparos e lançamento dos rejeitos. Não obstante, houve mudança no eixo da barragem acima da elevação 860,0 m, com alteração no projeto original

da barragem, na forma de um recuo para montante, o que levou o novo eixo da barragem a situar-se em área cuja fundação era afetada pela presença de lamas lançadas anteriormente. As Figuras 32 e 33 mostram, respectivamente, o projeto original com a barragem à meia altura e a alteração de eixo evidenciando o recuo.

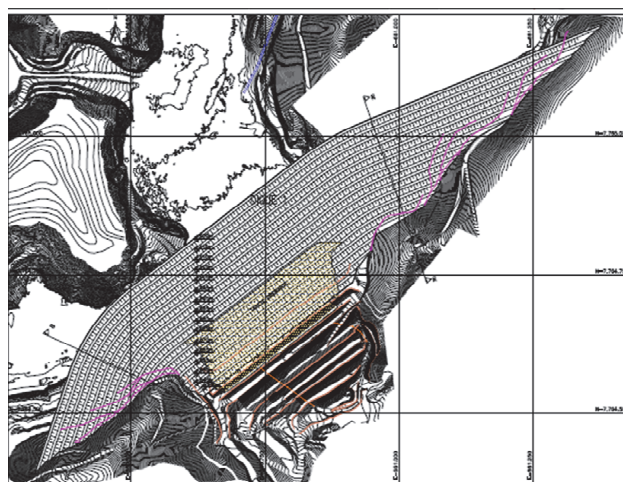


Fig. 32 – Vista em planta do projeto da Barragem de Fundão em 2011, ainda à meia altura.



Fig. 33 – Barragem de Fundão. Vista da barragem com a alteração do eixo, feita após 2012.

Segundo o relato de Morgenstern et al. (2016) sobre uma série de trincas na área do recuo (Figura 34), indicando um princípio de ruptura, que seria estabilizada pela construção de uma berma e um tapete drenante construído a jusante do recuo, entre agosto de 2014 e novembro de 2015.

3.6.2 – Descrição da Ruptura

A ruptura da Barragem de Fundão foi relatada por Morgenstern et al. (2016), com base em relatos de testemunhas do acidente, e em evidências observadas após o colapso da estrutura. A Figura 35 mostra as posições de nove testemunhas da ruptura.

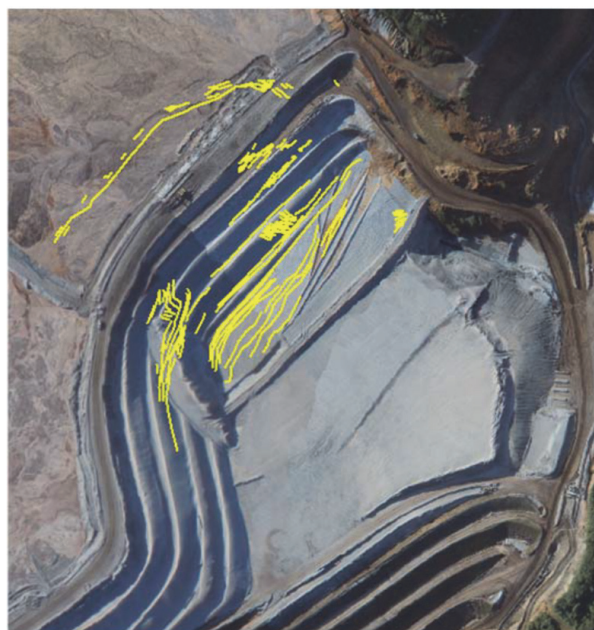


Fig. 34 – Barragem de Fundão. Trincas observadas em agosto de 2014 (Morgenstern et al., 2016).



Fig. 35 – Barragem de Fundão. Posições dos observadores que testemunharam a ruptura.

As testemunhas relataram suas observações nos 4 minutos posteriores à ruptura da Barragem de Fundão, ocorrida em 05 de novembro de 2015. Com base nestes relatos, Morgenstern et al. (2016) apresentaram o registro e a sequência cronológica do desastre, conforme resumido a a seguir:

- i. Os observadores das posições 4 e 6, situados no lado direito, observaram uma nuvem de poeira no lado esquerdo como primeira ocorrência relatada;
- ii. O observador na posição 4 observou ondas na porção central e trincas formadas no lado esquerdo do recuo com propagação para os dois lados;
- iii. O observador na posição 9 observou uma “cascata” de lama, descendo o talude, porém sem movimentos no dique de partida, na parte inferior;

- iv. Os observadores situados em 1 e 2 notaram o início da ruptura junto à ombreira esquerda, onde um jato de água suja saía do dreno;
- v. Os observadores em 2, 3 e 5 descreveram o movimento de subida das bermas inferiores na região do recuo;
- vi. Os observadores em 4, 5 e 6, relataram um movimento dos taludes do lado direito, para dentro do reservatório;
- vii. A correia transportadora situada a 1.300 m a jusante da barragem parou de funcionar 4 minutos depois do início da ruptura, o que indica uma velocidade de fluxo da lama (*mudflow*), de 11 m/s.

Para Leite et al. (2019), na ruptura da Barragem de Fundão, foram liberados 34 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro que percorreram diversos rios da Bacia do Rio Doce, desde o ponto do rompimento até a foz no município de Regência, no Espírito Santo, onde a lama invadiu o oceano Atlântico. O acidente provocou na morte de 18 pessoas e o desaparecimento de uma, além da destruição da localidade de Bento Rodrigues e da fauna aquática da Bacia do Rio Doce. O acidente comprometeria ainda o abastecimento de água da região afetada, com cerca de 3,2 milhões de habitantes. As Figuras 36 e 37 mostram imagens de Bento Rodrigues, antes e depois da ruptura.

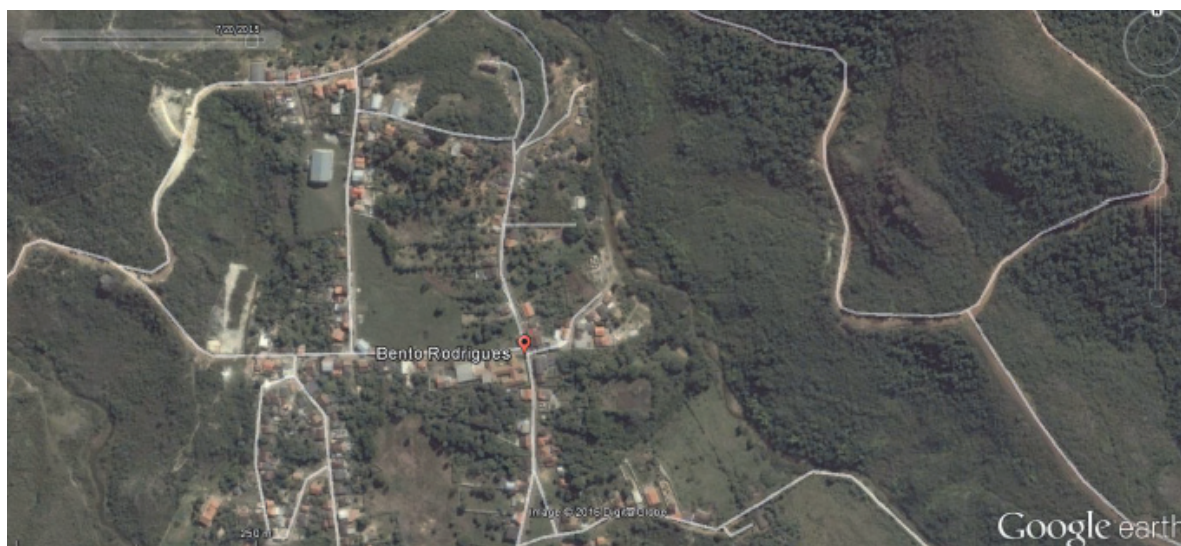


Fig. 36 – Bento Rodrigues em julho de 2015. (Google Earth, em julho de 2015)

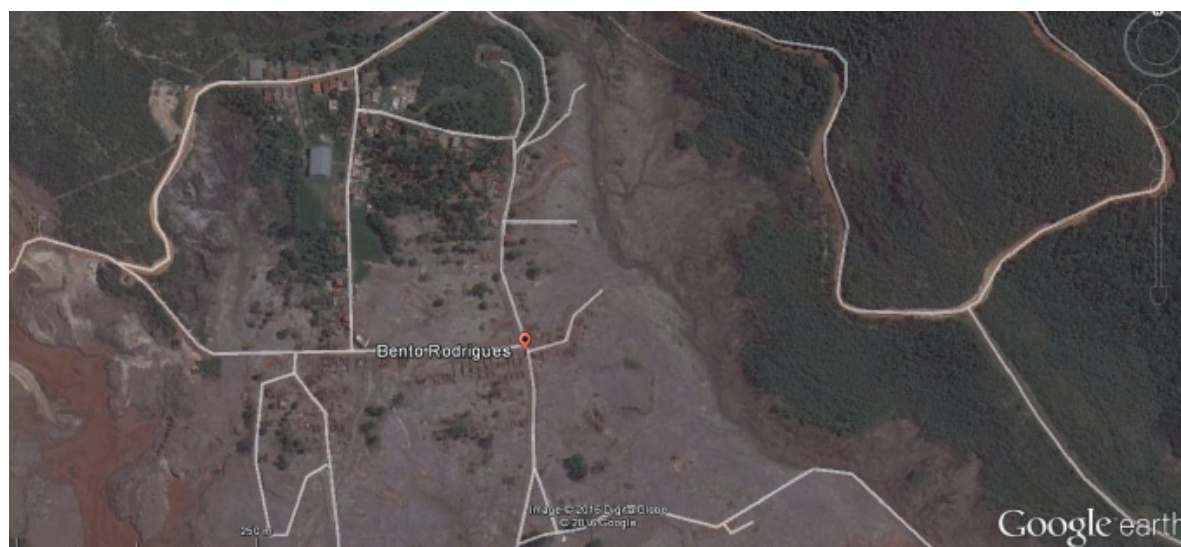


Fig. 37 – Bento Rodrigues em dezembro de 2015. (Google Earth, em dezembro de 2015)

3.6.3 – Causas do Acidente

As causas da ruptura, foram detalhadamente investigadas por Morgenstern et al. (2016), incluindo as condições de saturação e suscetibilidade à liquefação dos rejeitos do Reservatório de Fundão, e os possíveis gatilhos para a liquefação, como sismos na ocasião e antes da ruptura, e o efeito da existência de lammas na fundação do recuo do dique. As análises foram bem detalhadas e o seu estudo pode ser examinado em detalhe no próprio relatório do painel de consultores. O presente artigo tem a intenção apenas de realçar os principais fatores apontados por Morgenstern et al. (2016), listados a seguir:

- a) A presença de lammas finas entremeadas nos rejeitos arenosos, que seriam supostamente drenantes, pelo conceito do projeto;
- b) Modificação da posição original dos diques de alteamento para montante, introduzindo o recuo do eixo e a fundação do dique em rejeitos arenosos com camadas de lammas, existentes nas posições a montante;
- c) A presença de lammas na fundação não apenas prejudicou a drenagem vertical da massa de rejeitos, mas facilitou deslocamentos horizontais do rejeito, com alteração do estado de tensões.

Assim, as principais conclusões elencadas por Morgenstern et al. (2016) referem-se à existência de lammas (*slimes*) sob os diques do recuo.

4 – CONCLUSÃO

A existência de mais de 800 barragens de rejeitos cadastradas no Brasil constitui um importante passivo socioambiental para o País. Recentemente, com os graves acidentes ocorridos em Mariana – MG (2015) e Brumadinho (2019), tornou-se essencial, para o setor de mineração, a adoção de procedimentos para reforçar a segurança de suas barragens. Morgenstern (2018), cita vários fatores que afetam a segurança das barragens, com indicação da ordem de importância.

O estudo das rupturas descritas de forma resumida no presente trabalho permite concluir que os seis fatores mais relevantes a serem avaliados para minimizar o risco de ruptura das barragens de rejeitos são:

- a) Deficiência de investigações geológicas e geotécnicas nas diversas etapas de projeto, quando são tomadas as principais decisões sobre as localizações do eixo da barragem e das estruturas adjacentes;
- b) Ausência de procedimentos de gestão do empreendimento;
- c) Ausência ou deficiência dos projetos de engenharia;
- d) Ausência ou deficiência de supervisão e assistência técnica durante a construção;
- e) Ausência de manuais e procedimentos de operação e manutenção;
- f) Ausência ou deficiência de inspeções e avaliações periódicas de segurança.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as valiosas sugestões oferecidas pelos professores Anna Laura Nunes, Luciano J. Moraes e Paulo C. Maia.

6 – REFERÊNCIAS

Ávila, J. P. (2011). *As Barragens de Rejeitos no Brasil: Sua Evolução nos Últimos Anos*. Parte I do livro Barragens de Rejeitos no Brasil, CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens, 310p.

- Bradlow, D. D.; Palmieri, A.; Salman, M. A. (2002). *Regulatory Frameworks for Dam Safety: A Comparative Study*. Law, justice and development series. Washington, DC: World Bank. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13826>.
- CAOMA (2005). Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça de Defesa do Meio Ambiente, Patrimônio Cultural, Urbanismo e Habitação de Minas Gerais. *Laudo de Vistoria. Ofício No. 140/04*, referência SGDP No 321.798, setembro.
- CAOMA (2006a). Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça de Defesa do Meio Ambiente, Patrimônio Cultural, Urbanismo e Habitação de Minas Gerais. *Laudo de Vistoria. Ofício No 120/05*, referência SGDP No 453.354, Mirai, fevereiro.
- CAOMA (2006b). Centro de Apoio Operacional, Promotorias de Justiça, Defesa do Meio Ambiente, Patrimônio Cultural, Urbanismo e Habitação de Minas Gerais. *Relatório de Atividades da Força Tarefa do MPMG sobre o vazamento de lama da barragem de rejeitos de lavagem de Bauxita. Ofício. No. 03/06*, referência SGDP No 507.433, Mirai, fevereiro.
- Lei nº 12.334 (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*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm
- Leite, J. A. O.; Aguilar, C. G.; Bastos, K. S.; Luiz, V. R. (2019). *Estudo dos Impactos Socioambientais Causados pelo Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, MG*. Revista O Meio Ambiente Sustentável. Atena Editora. CDD 363.7, pp. 143-158.
- Morgenstern, N. R.; Price, V.E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, 15(1): 79–93.
- Morgenstern, N.; Vick, S. G.; Viotti, C. B.; Watts, B. D. (2016). *Fundão Tailings Dam Review Panel Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam, Samarco*, August 25, 2016. 88p.
- Morgenstern N. (2018). *Geotechnical Risk, Regulation, and Public Policy*. 6th Victor de Mello Lecture, Soil and Rocks. ABMS-SPG, 41 (2), pp. 107-129.
- Oliveira, R. J. (2001). *Rompimento da barragem de contenção de rejeitos da Cava C1, da Mineração Rio Verde, Relatório do Subgrupo de trabalho para avaliação das barragens de rejeitos e demais estruturas na região de Macacos, Nova Lima, Belo Horizonte*, elaborado pelos consultores da FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais), sob a coordenação do eng. Rubens José de Oliveira, julho de 2001.
- Olson, S.M. (2001). *Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance*. Ph.D. thesis, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, USA, 564p.
- Parra, P. C.; Lasmar, N. T. (1987). *Ruptura da Barragem de Rejeitos da Mina de Fernandinho*. Simpósio Sobre Barragens de Rejeitos e Deposição de Resíduos Industriais e de Mineração, ABMS. Rio de Janeiro, pp. 423-443.
- PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. (2007). *Relatório sobre a ruptura da barragem de São Francisco, da Mineração Rio Pomba Cataguases, em Mirai, MG*. FE-100. RL-11318-00.

- PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA (2015). *Laudo Técnico Sobre a Ruptura da Barragem B1 em 10/09/2014*. MP-200-LT-40204-00. Belo Horizonte, junho.
- Pereira, E. L. (2005). *Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático*. Dissertação de Mestrado, Dep.de Eng. Civil da Escola de Minas da UFOP. Univ. Federal de Ouro Preto.
- SLIDE (2013). Version 6.026, Rocscience Inc., Int. 2013. (User's Manual).