

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ FELIPE LIMA BEVILAQUA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS
DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE BRUMADINHO.**

DOURADOS – MS

2019

JOSÉ FELIPE LIMA BEVILAQUA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS
DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE BRUMADINHO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Grande Dourados como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Lôide Angelini Sobrinha.

DOURADOS – MS

2019

ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA DETERMINAÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE BRUMADINHO.

José Felipe Lima Bevilacqua¹ ; Lôide Angelini Sobrinha²

jf.bevilacqua@gmail.com ; loidesobrinha@ufgd.edu.br

¹ Aluno autor do trabalho; ² Professora orientadora do trabalho

RESUMO - Este trabalho tem por objetivo identificar a causa mais provável do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro, ocorrida no dia 25 de janeiro de 2019 no município de Brumadinho, em Minas Gerais, através da aplicação de ferramenta de análise multicritério. A metodologia consiste basicamente na análise do cenário do acidente, adotando-se pesos para fatores considerados de risco. O resultado demonstra que os fatores relacionados às características da barragem resultavam em baixo fator de segurança, tornando-a suscetível a ocorrência de liquefação (52%) e de efeito *pipping* (46%). Entende-se também que, a partir da causa provável para o colapso, faz-se necessário mudanças em relação a forma de fiscalização e técnicas construtivas utilizadas no país.

Palavras-chave: Liquefação. Efeito *pipping*. Rejeito de mineração.

ABSTRACT – This paper aims to identify the most probable cause of the iron ore tailings dam disruption occurred in January 25, 2019, in Brumadinho, Minas Gerais, through the application of a multicriteria analysis tool. The methodology basically consists of the analysis of the accident scenario, adopting weights for risk factors. The result shows that factors related to dam characteristics resulted in a low safety factor, making it susceptible to liquefaction (52%) and pipping (46%). It is also understood that, from the probable cause of the collapse, changes are needed regarding the form of inspection and constructive techniques used in the country.

Keywords: Liquefaction. Pipping effect. Mining Tailings.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico e econômico mundial, aliado ao processo de urbanização em países emergentes, aumentou a demanda por minerais, e levou a Indústria Mineral Brasileira a um crescimento vigoroso nas últimas décadas, chegando a 550% na primeira década dos anos 2000. Diante deste contexto se criou a necessidade de novas áreas para construção de estruturas geotécnicas e disposição de subprodutos oriundos da produção mineral (IBRAM, 2012).

No caso da construção de barragens para aproveitamento hidrelétrico ou para rejeitos de mineração, a falta da garantia da segurança e da estabilidade pode gerar desastres em grande escala, que comprometem a vida da população que habita na região e a qualidade dos recursos ambientais envolvidos. Como a engenharia de barragens trabalha com o risco de falha, deve-se ter como prioridade a segurança das barragens em todo o seu desenvolvimento e utilização (SOUZA, 2016). Sua importância para as atividades de desenvolvimento de uma nação faz seu uso indispensável, e o risco de colapso que apresenta um expressivo poder de destruição é um dos pesos inevitáveis que a humanidade deve carregar, segundo Jansen (1983).

Em alguns casos a segurança e a estabilidade das estruturas geotécnicas construídas são comprometidas em função de diversos fatores: como elevado nível de saturação do aterro, abalo sísmicos, controle deficiente da disposição hidráulica de rejeitos ou por procedimentos inadequados na construção e/ou operação de uma barragem (DAVIES e MARTIN, 2002).

O Brasil recentemente vivenciou um exemplo desse caso, ocorrido no dia 25 de janeiro de 2019 e, considerado o maior acidente entre mineradoras do Brasil em número de mortos: o rompimento da barragem de rejeitos de mineração na mina do Córrego do Feijão, localizada na cidade de Brumadinho, na região metropolitana de Belo Horizonte (MG), onde 252 pessoas morreram e 18 permanecem desaparecidas, além de impactos ambientais graves gerados com a grande quantidade de rejeitos dispostos no leito do rio Paraopeba e na região (G1, 2019).

O rompimento da barragem em Brumadinho gerou danos incalculáveis e irreversíveis de diversas naturezas, tais como socioambientais, socioeconômicos, trabalhistas e mercadológicos. Os impactos ambientais causados são diversos, afetando: os ecossistemas aquáticos e terrestres, à flora, à fauna, o solo, à qualidade da água, à população, o modo de vida das populações tradicionais, à produção local e o turismo (SOS MATA ATLÂNTICA, 2019).

Diante do exposto, este artigo realizou uma análise sobre as possíveis causas do acidente de forma a subsidiar uma reflexão sobre as práticas utilizadas nas construções de barragens no Brasil e seus impactos na sociedade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – Barragens, definições e características

Ao longo da história da humanidade as barragens e canais de irrigação se destacam entre as primeiras grandes estruturas registradas concebidas pelo homem, presente em nações consideradas berços da civilização como Egito, Babilônia, Pérsia, Índia e países do extremo oriente (JANSEN, 1983). A necessidade de reservatórios para armazenamento de água, principalmente em áreas secas, era de fundamental importância no desenvolvimento econômico das nações, sendo os diques e barragens responsáveis pelo abastecimento de água, irrigação e uso doméstico (VIZEU, 2015). É impossível datar com exatidão onde se deu o início da construção de barragens, porém segundo Jansen (1983), em seu trabalho acerca da história de construção de barragens ao longo da história, o registro da mais antiga barragem bem-sucedida se dá as margens do Rio Nilo, no Egito, em algum período entre 5.700 e 2.700 a.C.

Nos dias atuais, estruturas de barragens são tidas como essenciais para o desenvolvimento de um país e utilizadas para diferentes finalidades, sendo as mais comuns para abastecimento de água, controle de cheias, irrigação, produção de energia elétrica e armazenamento de rejeito de mineração (VIZEU, 2015)

Para o Ministério de Integração Nacional – MI (2005), barragem é definida como uma estrutura construída transversalmente à direção de escoamento de um curso permanente ou intermitente de água, com o objetivo de retenção e acúmulo de um material, podendo ele ser rejeitos de processos industriais ou reservatório artificial de água. Segundo a normativa brasileira de número 13028 (ABNT, 2017), é definido como “qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, para sedimentos e/ou para formação do reservatório de água”.

Para a construção de uma barragem e escolha do método construtivo adequado para a estrutura é preciso definir suas características geotécnicas, geológicas, sua finalidade, as características topográficas, como a seção transversal do vale e profundidade da rocha de suporte à fundação, além das condições climáticas, como o regime hidrológico do local (CHUGH, 2011).

O responsável pela contenção do material retido é o corpo da barragem, portanto sua construção pode ocorrer em locais com variadas características topográficas e geotécnicas, utilizando diferentes materiais de barramento. Há estruturas de enrocamento, terra, concreto e mistas, que pode ser subdividido em outros tipos distintos. De maneira geral, existem diversos critérios de classificação de uma barragem, sendo o mais utilizado aquele que diz respeito aos materiais de construção: barragem de concreto e barragem de aterro (terra, enrocamento) (CHUGH, 2011).

Para o presente estudo, aprofundou-se nas barragens de aterro (terra) que tem como finalidade a disposição de rejeito, classificação da barragem que se rompeu em Brumadinho-MG, uma vez que

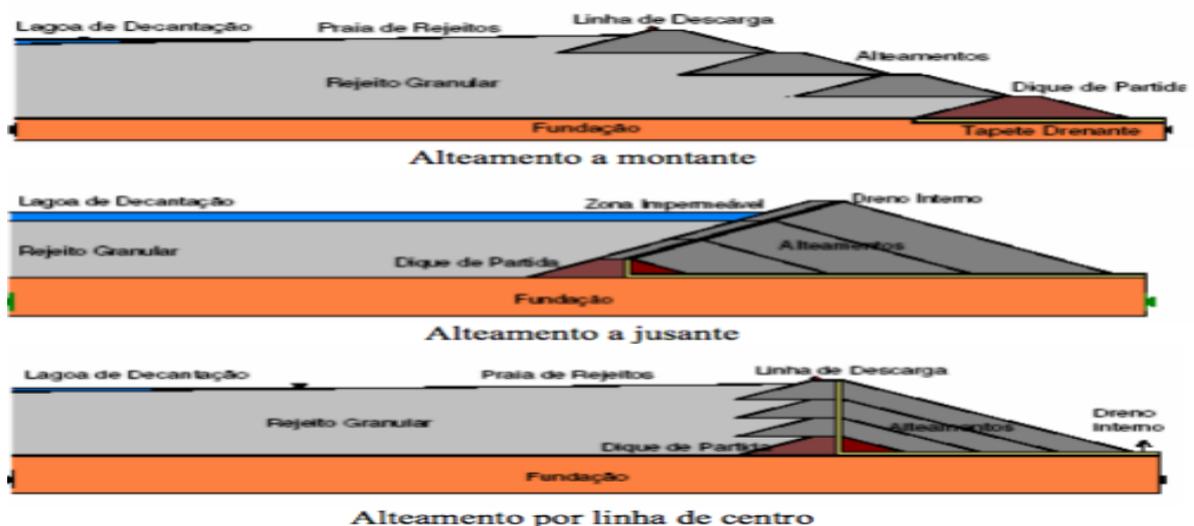
é importante conhecer suas características construtivas e seu comportamento para apontar possíveis causas da tragédia.

As barragens de aterro são feitas de materiais soltos, como o solo (desde argila até solos arenosos), de enrocamento ou misturas de solo-enrocamento (SILVEIRA, 2006). Em comparação com barragens de concreto, são em certo ponto, sensíveis à erosão (SOUZA, 2016). São de grande utilização no setor de extração mineral, devido a facilidade para obtenção do material de construção, resultando em um custo mais competitivo e na possibilidade do aumento de sua capacidade de reservatório (MACHADO, 2007).

Uma barragem de rejeitos, é uma estrutura de terra que tem como finalidade a disposição de resíduos de mineração com alto grau de toxicidade, oriundos do processo de extração e beneficiamento do minério (IBRAM, 2012). No processo de extração, o resíduo gerado é chamado de estéril, onde geralmente são dispostos em pilhas. Já no processo de beneficiamento do minério separa-se o produto bruto extraído, por meio de processos mecânicos e/ou químicos, em duas formas: em concentrado e rejeito (SILVEIRA, 2006).

De maneira geral, para a construção da estrutura de contenção de uma barragem de terra é utilizado aterro compactado ou enrocamento para levantamento do dique de partida, o qual deve ter a capacidade de suportar os rejeitos dispostos inicialmente (MACHADO, 2007). Posteriormente, conforme a capacidade do reservatório diminui podem ser feitos alteamentos, técnica que consiste na elevação da altura da barragem a partir de degraus (SILVEIRA, 2006). Isso é feito construindo-se novos diques sobre o inicial, podendo ser executados com o próprio rejeito, pilhas de estéreis oriundos do processo de extração, ou por material de empréstimo (MACHADO, 2007). De acordo com Vick (1983), existem basicamente três métodos construtivo de alteamento e são classificados em relação à direção da construção do alteamento ao dique de partida: barragens de alteamento a montante, de linha de centro e a jusante, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Métodos construtivos de barragens de rejeito.



Fonte: adaptado de VICK, 1983.

A barragem com alteamento à montante possui diques que são construídos uns sobre os outros, com o eixo da barragem se deslocando na direção da montante, tendo como fundação o próprio rejeito sedimentado na praia (CAVALCANTE, 2000; LOZANO, 2006). Isso resulta em economia do volume de material para construção dos alteamentos, resultando em menor custo (ESPÓSITO, 2000). Porém a utilização de menor volume de material resulta em depósitos de menor coeficiente de segurança, sujeito a ruptura pelo fenômeno de liquefação, estando esse método relacionado ao maior número de casos de ruptura de barragens de rejeitos com consequências ambientais graves em todo o mundo (ICOLD e UNEP, 2001).

Já uma barragem com alteamento pela linha de centro é considerada uma solução com fator de segurança intermediário, onde os diques são construídos uns sobre os outros, tendo como referência o ponto central do dique de partida, garantindo maior estabilidade em relação ao método a montante (CAVALCANTE, 2000; LOZANO, 2006). Como desvantagem existe a necessidade de se complementar a face externa do dique de partida com material adicional, ocasionando em maior consumo de aterro e tornando-o mais caro, além de cuidados específicos em sua construção, uma vez que parte da barragem (zona de montante) é construída apoiada sobre o rejeito (LOZANO, 2006). Neste caso, os aterros exercem pressões de compressão e de cisalhamento sobre os depósitos de rejeitos, de modo que os materiais sedimentados deverão apresentar propriedades de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade suficientes para assegurar a estabilidade da barragem (DUARTE, 2008).

E por fim, o método de alteamento à jusante é utilizado para reduzir o risco de liquefação em áreas de atividade sísmicas (SOUZA, 2016). Este método exige que o novo alteamento seja maior do que o dique inferior, para apoiar o dique superior completamente, que é alinhado em direção da jusante, de modo que cada alteamento é estruturalmente independente da disposição de rejeito, melhorando assim a estabilidade, por ter mais massa de material na barragem de contenção e pelos alteamentos não serem construídos em cima do rejeito adensado (LOZANO, 2006). Por outro lado, a principal desvantagem é o custo de implantação, uma vez que a solução exige a construção de aterros mais volumosos, exigindo explorações de jazidas de materiais terrosos, ou volumes de rejeitos suficientes para o alteamento, caso este material seja escolhido na construção (DUARTE, 2008).

Os rejeitos são partículas sólidas que em função do tipo de minério e do seu processo de beneficiamento apresentam diferentes características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas (IBRAM, 2012). Podem ser formados por areias com granulometria mais grossa, chamados de rejeitos granulares, ou depositados sob forma de lama, quando são finos, composto de siltes e argilas (SILVA, 2010). É chamado de polpa (lama) a mistura de rejeitos e água, usualmente abrasiva e de alta viscosidade, devido à grande parcela de água (PEREIRA, 2005). O rejeito em forma de polpa passa por três etapas de comportamento: comportamento de lâmina líquida, processo de sedimentação

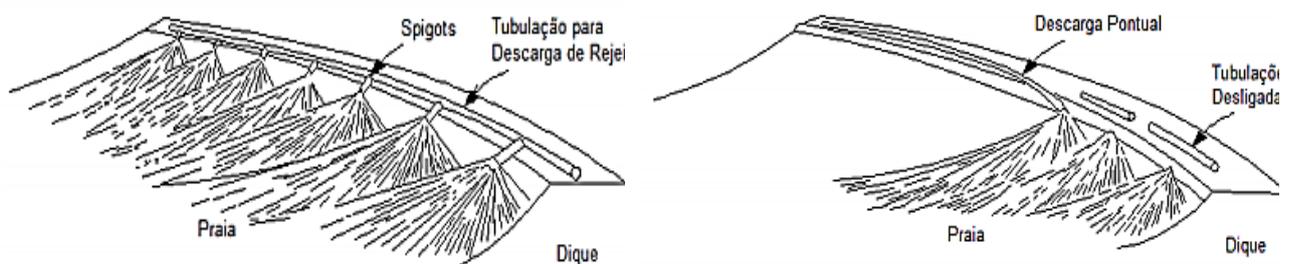
e processo de adensamento (ESPÓSITO, 2000). No estado de lâmina líquida ocorre o processo de floculação das partículas menores. Já no processo de sedimentação, o rejeito assume comportamento semilíquido e semi-viscoso. E por fim, no processo de adensamento, o rejeito comporta-se como um solo, apresentando baixa resistência ao cisalhamento (SILVA, 2010).

O descarte do rejeito ao local de disposição pode ser realizado de duas formas: granel ou polpa. No primeiro caso, o transporte é realizado por caminhões ou correias transportadoras. A polpa, por sua vez, é transportada por meio de tubulações, e dispostos em reservatórios através de bombeamento ou por ação da gravidade (DUARTE, 2008).

O rejeito saturado de água é lançado geralmente conforme o processo chamado de “aterro hidráulico”, de modo a formar uma “praia”, onde as partículas mais grossas (arenosas), que sedimentam rapidamente, ficam próximas do dique, enquanto as mais finas (siltosas e argilosas) sedimentam vagarosamente, a partir da suspensão líquida, na região mais distante do dique. (CAVALCANTE, 2000; LOZANO, 2006).

O lançamento pode ser através de vários pontos de descargas (*spigotting*) ou localizados, por meio de ciclones ou canhões na crista da barragem (LOZANO, 2006). No lançamento por meio de ciclones uma primeira separação granulométrica acontece por efeitos de pressão, onde as partículas menos densas e finas saem pela parte superior do ciclone, e as partículas mais grossas e densas saem pela parte inferior. Já no caso de lançamento por canhão, a separação granulométrica ocorre na praia em função da velocidade de descarga e das características do rejeito (DUARTE, 2008).

Figura 2 - Métodos de disposição de rejeito em barragens



Fonte: adaptado de VICK, 1983.

Para análise da estabilidade do talude da barragem, é necessário a determinação da posição da linha freática do rejeito, através de aparelhos de auscultação e acompanhamento de campo (SILVA, 2010; ESPÓSITO, 2000). O posicionamento da linha freática está condicionado a três fatores: distância do lago de decantação, em relação a crista da barragem; variação da permeabilidade no reservatório, devido a segregação hidráulica; e, condições de permeabilidade da fundação da barragem (VICK, 1983; SILVA, 2010).

Para garantir a estabilidade é recomendável uma praia de rejeitos granulares de comprimento considerável, uma vez que a praia ajuda no rebatimento da linha freática e evita saturação dos rejeitos (DAVIES E MARTIN, 2002). Quanto menor for a distância entre o lago de decantação e a crista da barragem, maior será a posição da linha freática nas camadas de rejeitos, e assim maior o risco de ruptura (VICK, 1983; ESPÓSITO, 2000). Para que ocorra redução da superfície freática nas camadas próximas à crista, o funcionamento do sistema de drenagem é de suma importância, sendo ela responsável por direcionar o fluxo de água na barragem e prevenir excesso de poro pressão, força favorável ao movimento das partículas. (GOMES, 2009).

Caso a drenagem não seja feita de forma eficiente, poderá ocorrer percolação excessiva e consequente erosão interna, que provoca a remoção de partículas formando tubos de vazios no interior do solo, contribuindo para colapsos e escorregamentos laterais do terreno, tal fenômeno é chamado de *pipping* e geralmente ocorre em solos onde o gradiente hidráulico é maior que a coesão do solo (CAVALCANTE, 2000).

Outro cuidado presente em barragens construídas pelo próprio rejeito, principalmente as construídas com o método de alteamento a montante, é em relação ao processo de liquefação. Os rejeitos lançados por aterro hidráulico, formados pelo transporte e deposição de material em meio aquoso, sedimentam-se no estado fofo (não compactado), favorecendo a segregação hidráulica (processo que afeta a distribuição granulométrica e condições de fluxo ao longo da praia da barragem) e a formação de pontos favoráveis a liquefação (ESPÓSITO, 2000).

A liquefação ocorre quando são aplicadas cargas sobre as camadas inferiores de rejeito, criando uma força de compressão que reduz o volume dos grãos abaixo. Com a redução de volume, a água presente nos vazios dos grãos também sofre compressão, aumentando repentinamente sua poropressão (AMANN, 2019). Não havendo locais para ocorrer percolação, a água suporta praticamente toda a tensão, aliviando os grãos de parte da carga e deixando-os soltos, diminuindo o atrito entre eles e provocando uma perda brusca de cisalhamento entre as partículas sólidas de rejeito (DAVIES E MARTIN, 2002). Neste momento o rejeito antes sólido passa a se comportar como um fluido, e a água sobrecarregada acaba por ser expulsa violentamente em direção ao ponto de menor resistência, o talude da barragem (AMANN, 2019). As cargas aplicadas podem ser provocadas por falhas na drenagem, sismos naturais, vibrações decorrentes de movimento de máquinas, excesso de chuvas e velocidade excessiva de alteamentos (PEREIRA, 2005).

2.2 – Caso de Estudo

A barragem da Mina Córrego do Feijão, que rompeu, fazia parte do Complexo de Paraopeba, propriedade da empresa de mineração Vale S.A. Esse complexo tinha como principal finalidade a exploração do minério de ferro, consistindo em 13 estruturas, que eram usadas para diversas

operações como: disposição de rejeitos, retenção de sedimentos, regulação de vazão e captação de água (G1, 2019), como visto na Figura 3. A parte economicamente importante do minério de ferro explorado é a hematita, o qual é separado do material de menor valor (MACHADO, 2007). Segundo Gomes (2009), os processos de lavra e beneficiamento chegam a gerar um volume de rejeitos de até 40 % do minério de ferro, assumindo uma forma lamacenta quando separados da matéria prima, sendo dispostos em barragens como já mencionado anteriormente.

Figura 3 – Mapa da mina do Córrego do Feijão.



Fonte: G1, 2019.

Existe pouca documentação sobre o início da construção da barragem, tais como projetos de construção e alteamentos. O fato é que a construção da barragem se deu a partir de 1976 pela Ferteco, empresa alemã que em 2001 foi adquirida pela Vale. Iniciou-se com um dique de partida com altura de 18m, e posteriormente foram feitos mais 9 alteamentos em 14 etapas, conforme Quadro 1, elevando a estrutura a altura total de 86 m, com 720m de comprimento de crista construída.

Quadro 1 – Descrição da construção da Barragem B1.

Etapa	Ano	Alteamento	El. (m)	Altura máx. (m)	Tipo de alteamento	Projetista	Construtora
1	1976	Bar. Inicial	874	18	-	Christoph Erb	Emtel
2	1982	2°	877	21	montante	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23	montante		?
4	1984		884	28	Linha de centro		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33	montante		?
6	1990		891,5	35,5	montante		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991		3°	895	39		montante
8	1993	899		43	montante	.	
9	1995	4°	905	49	montante	Tecnosolo	CMS Constr. S.A
10	1998	5°	910	54	montante		U&M
11	2000	6°	916,5	60,5	montante		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	7°	922,5	66,5	montante		Construtora Impar Ltda.
13	2004	8°	929,5	73,5	montante		Integral
14	2008	9°	937	81	montante	Geoconsultoria	Integral
15	2013	10°	942	86	montante	Geoconsultoria	Salum Enga.

Fonte: adaptado Relatório Final da CPI de Brumadinho, 2019.

Com o rompimento da barragem, no total, foram lançados no meio ambiente cerca de 13 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração contendo diversos metais pesados e substâncias químicas oriundas do processo minerário. A onda de rejeitos atingiu, inicialmente, a área administrativa da companhia e parte da comunidade da Vila Ferteco, tirando a vida de 270 pessoas (entre mortos e desaparecidos) (G1, 2019). Sequencialmente, foram atingidos dezessete municípios, causando severos danos ao longo de toda a Bacia do Rio Paraopeba, de difícil reversão, com prejuízos incalculáveis aos recursos hídricos, à flora, à fauna, ao ar, ao solo, e ao patrimônio cultural (material e imaterial) da região, conforme levantamentos preliminares realizados pelos órgãos competentes e setores técnicos do Ministério Público do Estado de Minas Gerais (CPI, 2019). É importante ressaltar, uma característica determinante da barragem para o elevado número de vítimas fatais, o refeitório e a área administrativa, entre outras estruturas, estavam localizados pouco mais de 1 km a jusante da barragem, sendo atingidos pela lama em poucos minutos sem chance de evacuação (G1, 2019). Mesmo não sendo possível dimensionar totalmente as consequências, já é possível classificá-la como altamente significativa, pelo elevado grau de impacto causado à população, à fauna, à flora e aos recursos hídricos, além das questões sociais e de saúde pública (CPI, 2019).

Na Figura 4 são apresentadas imagens da barragem antes e depois do rompimento.

Figura 4 – Barragem de Córrego do Feijão em Brumadinho, antes e depois do rompimento.



Fonte: Metro Jornal, 2019.

3 METODOLOGIA

Para o entendimento das questões envolvidas na barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão e as buscas pelo esclarecimento das possíveis causas que levaram ao seu rompimento, o estudo consiste em uma revisão bibliográfica com abordagem técnica, que se relaciona ao assunto. A pesquisa se desenvolveu de acordo com matérias jornalísticas e laudos técnicos não oficiais, além do relatório realizado pela Comissão Parlamentar de Inquérito (CPI), de biografias e dissertações disponíveis sobre o tema. É importante ressaltar que as investigações sobre os motivos causadores estão em andamento, e diante da falta de um laudo técnico oficial, o estudo trabalha com possíveis causas responsáveis pelo colapso.

Para o levantamento das possíveis causas foi aplicada uma análise multicritério que relaciona os fatores que podem estar relacionados ao desabamento e seu grau de importância.

3.1 – Análise Multicritério

O resultado da possível causa responsável pelo rompimento da barragem da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, foi analisado por meio de uma matriz multicritério TOPSIS, proposta por Hwang e Yoon (1981). A análise baseia-se na ideia que a alternativa escolhida deve apresentar a menor distância do fator positivo ideal, bem como a maior distância da negativa ideal, não havendo distinção de preferência (ANGELINI SOBRINHA, 2016).

Nesta matriz, são relacionados os critérios determinantes a serem avaliados e definidos pesos de acordo com o seu grau de importância para a ocorrência da causa do rompimento. Em seguida, elaborada a matriz de **decisão** (de acordo com os pesos atribuídos), **normalizada** e **ponderada**. Foram determinados os fatores ideais positivos e negativos e calcularam-se as distâncias que separam cada alternativa da positivo ideal, assim como da negativo ideal e, por último, calcularam-se as proximidades relativas de cada alternativa ao fator ideal (causa mais provável). A proximidade

relativa da causa ideal à alternativa resulta na alternativa mais provável em relação aos critérios envolvidos (ANGELINI SOBRINHA, 2016).

A análise TOPSIS foi aplicada em um conjunto de três critérios com duas possíveis causas, de forma a levantar a alternativa mais provável do rompimento. O peso atribuído ao critério foi determinado de acordo com o Quadro 2, conforme sua importância para ocorrência da causa provável do rompimento em relação aos demais critérios.

Quadro 2 – Tabela de importância utilizada na atribuição de pesos aos critérios e alternativas

Tabela de Importância	Peso
Não afeta	1
Afeta pouco	3
Afeta parcialmente	5
Afeta muito	7
Afeta drasticamente	9

Através do histórico estatísticos de rompimento de barragens de terra realizado pelo ICOLD (1973) e por meio de documentos e relatórios disponíveis na CPI de Brumadinho, apresentada pelo Senado Federal foram adotadas como as mais prováveis causas do rompimento: Liquefação estática e efeito *pipping*.

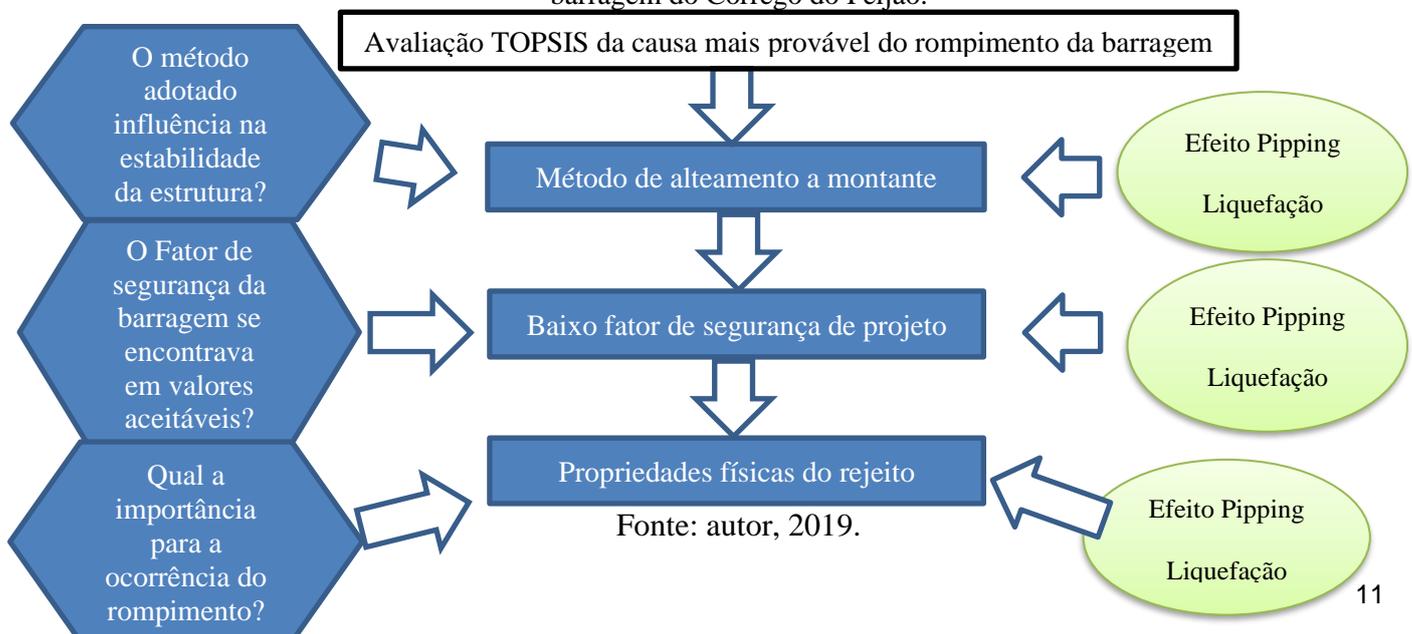
E por fim, os critérios adotados, são características determinantes presentes na estrutura para a ocorrência do colapso na barragem de Brumadinho, de forma que se relacionam diretamente com as possíveis causas do rompimento, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios adotados como determinantes para a ocorrência do rompimento.

Critério
1 - Alteamento a montante
2 – Baixo fator de segurança do projeto
3 - Propriedades físicas do rejeito

Abaixo é apresentado um fluxograma da aplicação da análise multicritério TOPSIS.

Figura 5 – Critérios utilizados na análise TOPSIS para avaliar as possíveis causas do rompimento da barragem do Córrego do Feijão.



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise multicritério TOPSIS

Diante das informações expostas anteriormente, é possível afirmar que, falhas que levam à ruptura em estruturas geotécnicas não acontecem repentinamente, salvo em casos de eventos catastróficos, como os terremotos, por exemplo (SILVA, 2010). Pelo contrário, a estrutura apresenta sinais do que pode vir a acontecer ao longo de um período de tempo considerável, caso providências mitigadoras não sejam efetuadas a tempo (SILVEIRA, 2006). Essas falhas são influenciadas por uma série de fatores que incluem a localização da estrutura, a concepção de seu projeto, sua construção, sua operação, seu monitoramento e seu descomissionamento (SILVA, 2010).

A análise multicritério TOPSIS, aplicada ao conjunto de alternativas e critérios teve como finalidade classificar por pontuação a causa mais provável para o colapso da barragem da mina do Córrego do Feijão, e através de análise do acervo do material de investigação disponível realizou-se um comparativo, de forma a subsidiar a causa responsável. Os pesos atribuídos aos critérios considerados determinantes para avaliação da causa mais provável estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Peso dos critérios utilizados na análise da possível causa do rompimento da barragem.

Critério	Relação entre critérios	Peso atribuído à alternativa em relação ao critério	
	Peso	Liquefação	Pipping
1 - Alçamento a montante	7	9	9
2 - Baixo fator de segurança do projeto	9	9	9
3 - Propriedades físicas do rejeito	7	9	7

Para melhor entendimento dos pesos adotados, exemplifica-se a relação entre os critérios utilizados. No critério 1, considera-se o método construtivo de alçamento a montante como um fator que afeta muito a estabilidade da barragem, uma vez que tal método contém menor volume de material de contenção no corpo da barragem, sendo considerado a alternativa menos segura em detrimento das outras. Também é levado em consideração na adoção do peso, o método estar relacionado ao maior número de casos de rupturas de grandes proporções (ICOLD, 2001), devido ao fato da construção dos alçamentos ocorrerem em cima do rejeito disposto por aterro hidráulico, de forma que se sedimentam no estado fofo com um número elevado de vazios, contribuindo para a ocorrência da liquefação e pipping.

Em relação aos pesos atribuídos no critério 3 é considerado que as propriedades físicas dos rejeitos utilizados na construção de uma barragem afetam muito sua estabilidade. Isso é explicado por SILVA (2010), onde ele conclui que a disposição hidráulica de rejeitos em uma barragem alteada pelo método a montante e seu gerenciamento sugere preocupações, uma vez que a estabilidade dessas

estruturas está diretamente ligada ao tipo de rejeito nelas depositado e ao comportamento do rejeito ao longo do tempo.

Segundo ESPÓSITO (2000), à falta de controle do método de lançamento da polpa de rejeito e, conseqüentemente, a dificuldade em se prever o comportamento geotécnico deste tipo de estrutura, resultam em maiores fatores de riscos de acidentes. Sabe-se que o rejeito pode sofrer alterações nas suas características físico-químicas, ao longo do tempo, que influenciam na estabilidade da estrutura geotécnica que os contenha, de forma que a estabilidade de uma barragem de rejeitos pode variar em curto espaço de tempo (SILVA,2010).

Seguindo o mesmo raciocínio, em relação aos pesos atribuídos às alternativas de ruptura, adota-se que o Critério 1 e 3, método de alteamento a montante e Propriedades físicas do rejeito respectivamente, são afetados drasticamente pela ocorrência de liquefação. Tal fato foi comprovado na dissertação de Pereira (2005), em que o mesmo avaliou o potencial de liquefação dos rejeitos de minério de ferro, concluindo através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que alguns rejeitos de minério de ferro apresentam um arranjo não-uniforme e mal graduado em sua granulometria, tendo por consequência um elevado índice de vazios quando dispostos hidraulicamente, aumentando seu potencial de liquefação.

Em 1973, a *International Commission on Large Dams* (ICOLD) compilou uma estatística de barragens com altura acima de 15 metros, as quais vieram a se romper entre 1900 e 1973, onde verificou-se que 70% dos rompimentos acontecem em barragens de terra e de enrocamento. Para este tipo de barragem, o ICOLD (1973) observou-se que o maior responsável por rupturas é o *pipping* e percolação (38%), acompanhado de perto pelo galgamento (35%), que consiste no transporte de massa de água na crista da barragem, por falhas de fundação (21%) e por outros fatores (6%).

O critério 2, baixo fator de segurança do projeto (FS) é considerado uma característica primordial, recebendo importância máxima em todas as alternativas, de forma que para a realização das análises de estabilidade e determinação dos FS, são três os aspectos necessários: a geometria da barragem (seção transversal), os níveis piezométricos atuantes e os parâmetros geotécnicos considerados para os materiais (SILVEIRA, 2006). Diante de tal fato, o FS é considerado como um critério determinante que afeta drasticamente a estrutura da barragem, uma vez que apresentar valores abaixo do valor mínimo consagrado e amplamente aceito pela engenharia geotécnica ($FS < 1,5$), pode significar que a estrutura apresenta problemas (MENDES, 2007).

O resultado da aplicação da metodologia TOPSIS para análise da possível causa do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, é apresentado na Tabela 2. A causa mais provável para o rompimento da barragem B1 do córrego do Feijão foi a liquefação estática, de forma que obteve a maior nota percentual. Esta classificação se deve a maior chance de ocorrer este fenômeno para os seguintes critérios: i) Método de alteamento a montante; ii) Baixo fator de segurança; iii)

Propriedades físicas do rejeito. É válido enfatizar a baixa diferença entre as duas alternativas proposta, de forma que como visto no estudo, as características da barragem em estudo também a tornava suscetível ao efeito *pipping*.

Tabela 2 – Resultado da análise multicritério do rompimento da barragem

Análise TOPSIS para a possível causa do rompimento da barragem de Brumadinho	
Liquefação estática	0,519
Efeito <i>pipping</i>	0,461

É possível constatar a eficácia do método TOPSIS e a veracidade do resultado obtido através do relatório da *World Mine Tailings Failures* (2019) sobre a tragédia de Brumadinho, e documentos utilizados no relatório final da CPI (2019), em que é possível verificar que a barragem apresentava problemas de projeto, de construção e de drenagem, tais como: baixo coeficiente de segurança ($FS < 1,3$); local inadequado para uma barragem destinada à contenção de finos, que são suscetíveis a liquefação; método construtivo a montante, inadequado para barragens de rejeito em vale; taxa de alteamento elevada (2,2 m/ano) para as propriedades do rejeito; e sistema de drenagem inadequado, permitindo que a superfície freática passasse dentro do maciço da barragem.

Conforme documentos que descrevem a barragem disponíveis na CPI (2019), os primeiros alteamentos foram construídos sem drenagem interna e havia dúvidas se o dique de partida era dotado de dreno de fundo. No Quadro 4 são elencados relatórios elaborados por consultorias contratadas pela Vale que tratam, dentre outros assuntos, do fator de segurança para a barragem.

Quadro 4 - Relatórios que tratam do fator de segurança para a barragem.

Item	Relatório	Nº Documento	Fator de Segurança	Data	Consultoria
1	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2008	RD-425-LT-13515-00	1,53	Set./08	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
2	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2009	RD-480-LT-18734-00	1,53	Set./09	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
3	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2010	RD-490-LT-21651-00	1,53	Set./10	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
4	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2011	RD-486-LT-23976-00	1,53	Set./11	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
5	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2012	RD-538-LT-27664-00	1,53	Jul./12	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
6	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Laudo Técnico de Segurança de Barragem/2013	RD-578-RL-32822-00	1,53	Set./13	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
7	Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Relatório de Inspeção de Segurança Regular/2014 – Laudo Técnico de Segurança de Barragem 2014	RD-375-RL-37368-00	1,53	Set./14	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.

ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE BRUMADINHO

8	Complexo Paraopeba - Mina Córrego do Feijão - Barragem I – Relatório de Inspeção de Segurança Regular/2015 – Laudo Técnico de Segurança de Barragem 2015	RD-639-RL-40142-01	1,53	Ago./15	Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
9	Análise de Estabilidade – Projeto: Estudo de Liquefação Estática – Barragem B1 – Córrego do Feijão	VL47MC01-RO	1,0	Jul./16	Geoconsultoria
10	Auditoria/2016 – Comum/Geral – Barragem B1 – Relatório Técnico da Auditoria Extraordinária – Relatório de Inspeção de Segurança Regular	VL55-RT05	1,3	Ago./16	Geoconsultoria
11	Comum/Geral – Barragem B1 – Avaliação Técnica Complementar – Análise de Estabilidade Sob Carregamento Não Drenado	VL55-RT31	1,3	Mar./17	Geoconsultoria
12	Auditoria Técnica de Segurança 2017 – Fase VI A – Complexo Paraopeba – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Relatório de Inspeção de Segurança Regular – Laudo Técnico de Segurança de Barragem	VALE.AT-LT-PFE-107- 01.17	1,3	Set./17	Tractebel Engie
13	Apresentação da Engenheira Maria Regina Moretti no PIESEM 2017	Apresentação	1,06	Nov./17	Potamos
14	Auditoria Técnica de Segurança 2018 – Fase VI B – Complexo Paraopeba - Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Relatório de Inspeção de Segurança Regular – Laudo Técnico de Segurança de Barragem	VALE.AT-LT-PFE-107- 01.18	1,3	Mar./18	Tractebel Engie
15	Revisão Periódica de Segurança de Barragem – Mina Córrego do Feijão – Barragem I – Relatório Técnico	RC-SP-117/17	1,09	Mar./18	Tüv Süd Bureau de Projetos
16	Auditoria Técnica de Segurança 2º Ciclo 2018 – Complexo Paraopeba – Mina Córrego Feijão – Barragem I – Relatório de Auditoria Técnica de Segurança de Barragem – Laudo Técnico de Segurança de Barragem /2018.	RC-SP-102/18	1,09	Set./18	Tüv Süd Bureau de Projetos

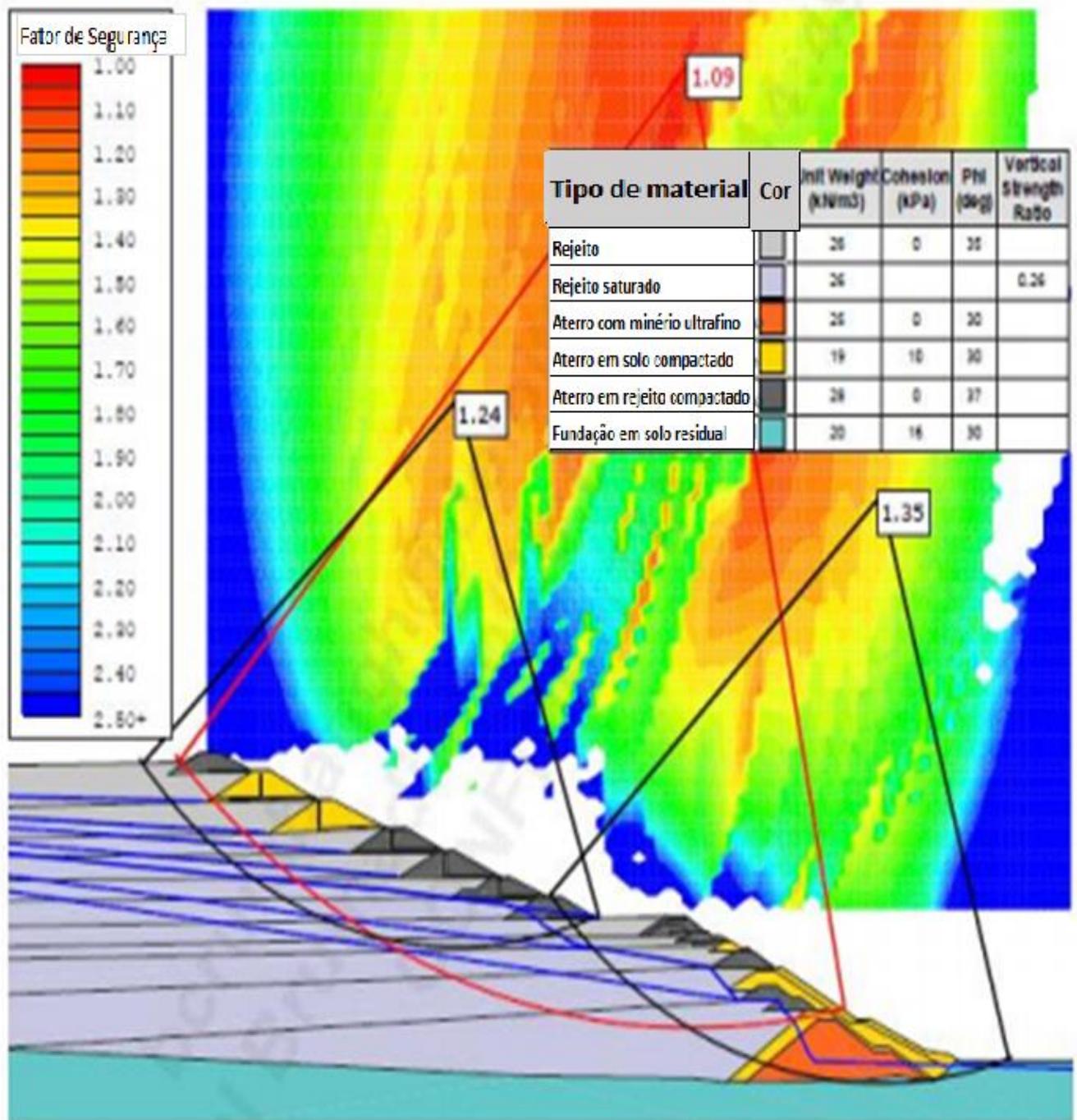
Fonte: CPIBRUM/Senado nº 006, 2019.

Interpretando o Quadro 4, é possível observar que os fatores de segurança da barragem decresceram nos seus últimos três anos antes do colapso. É importante mencionar pontos importantes descritos no relatório da última auditoria técnica antes rompimento, realizado pela Tüv Süd no ano de 2018. O documento informa que essas análises tiveram o objetivo de quantificar o FS do talude de jusante, e foram feitas por software próprio para essa finalidade, conforme observado na Figura 6.

Figura 6 – Informações contidas no relatório apresentados à CPI.

Tabela 5.3 – Informações sobre a análise de estabilidade da Barragem I.

Referência do Documento	RC-SP-117/17-R3			
Tipo de Documento	RPSB			
Empresa Responsável	TÜV SÜD Bureau de Projetos			
Data	05/07/2018			
Menor F.S.:	Condição drenada	1,60	Condição não drenada	1,09



Fonte: adaptado do Relatório Final da CPI de Brumadinho, 2019.

O FS foi calculado aplicando o método do Equilíbrio Limite, por meio do método de cálculo de Spencer, método considerado rigoroso para superfícies de ruptura circulares. Foram realizadas análises drenadas considerando o critério de resistência de Mohr-Coulomb (c' e ϕ') e análises não-drenadas considerando para os rejeitos saturados sua resistência não-drenada (su). Como resultado, como mostra a Tabela 5.3 da Figura 6, o referido relatório técnico determinou que o fator de segurança para a condição drenada seria $FS = 1,60$, atendendo, portanto, ao mínimo recomendado pela ABNT (2017), qual seja $FS = 1,5$. Para a condição não-drenada, o FS encontrado foi de 1,09, que como citado anteriormente estava abaixo do recomendado ($FS < 1,3$).

Há que destacar que a superfície crítica de ruptura ($FS = 1,09$), em vermelho na Figura 6, se mostra compatível com a dinâmica da ruptura da barragem (Figura 7). Conforme se verificou nas imagens de monitoramento da barragem, a ruptura se iniciou na porção inferior do maciço, imediatamente acima do dique de partida, justamente na porção na qual os alteamentos foram erigidos sem sistema de drenagem interna, tendo como a causa mais provável do rompimento a liquefação estática, que está associada ao nível de água dentro do reservatório de rejeitos, que teria se originado a partir de múltiplas e sucessivas falhas.

Figura 7 – Momento exato da ruptura da barragem.



Fonte: Relatório Final da CPI de Brumadinho, 2019.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a revisão bibliográfica feita no presente trabalho, com relação à disposição de rejeitos, é possível concluir que a prática de disposição por meio de aterro hidráulico em barragens de alteamento a montante, é pratica comum em meio a indústria de minério. Sabe-se que este método de alteamento apresenta vantagens pela simplicidade e o baixo custo de construção, porém possui menores fatores de segurança e está associado à maioria dos acidentes de barragens de rejeitos já ocorridos pelo mundo.

Observou-se também, que os aspectos relacionados com a ocorrência de liquefação e efeito *pipping* em barragens de rejeitos, demonstram a importância do tema abordado, tendo em vista a necessidade de mitigar a ocorrência de falhas em estruturas de armazenamento de mineração, devido ao grande dano ambiental envolvido.

A implantação da metodologia TOPSIS possibilitou ainda a análise das possíveis causas de ruptura, coincidindo com as fontes de informações e recursos utilizados, conforme apresentado na revisão da literatura. Assim, a aplicação da metodologia mostrou-se ser uma eficiente ferramenta na determinação das possíveis causas, de fácil e rápida aplicação, devido à grande liberdade de atribuição de valores às classes de critérios e importância.

Para se fazer uma discussão sobre o acidente ocorrido em Brumadinho, avaliando os fatores que levaram a ruptura, conclui-se que para o êxito de uma estrutura tão complexa quanto uma barragem de rejeitos de minério, se faz necessária a elaboração de um bom projeto, que tenha uma relação custo/benefício (financeiro e ambiental) aceitável quando avaliadas todas as variáveis envolvidas, assegurando métodos adequados de construção, análise de comportamento, operação e manutenção, mantendo a eficiência das condições de segurança e os riscos em valores aceitáveis para toda população, de forma que os impactos não acarretem prejuízos.

Estudos independentes e constantes, são fundamentais para a compreensão dos impactos em função do desastre de Brumadinho, para que se consiga mensurar a real dimensão de todo o dano causado e que se exija todas as medidas necessárias em termos de reparação e compensação ao meio ambiente e a população afetada.

Por fim, de forma a minorar os riscos de novos rompimentos de barragens de contenção de rejeitos de mineração, recomenda-se a adoção de um monitoramento das barragens de maneira direta pelos órgãos fiscalizadores, sem a intermediação das empresas interessadas, de forma que os dados sejam obtidos por instrumentação automatizada e telemétrica, e apresentado problemas graves, uma situação emergencial seja instaurada por iniciativa do poder público.

6 SUGESTÕES

Para estudos futuros relacionados a este trabalho, é sugerido:

- ▶ Comparar a viabilidade econômica entre os métodos de alteamentos de barragens de terra;
- ▶ Buscar métodos alternativos para reaproveitamento do rejeito;
- ▶ Realizar um estudo dos impactos ambientais e econômicos gerados com o rompimento da barragem de Brumadinho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água.** Rio de Janeiro: ABNT, nov. 2017.

AMANN, K. **Entendendo a liquefação na barragem de rejeitos de Brumadinho.** Portal eletrônico Engenharia, Educação e Progresso. Disponível em: <http://www.kurtamann.com.br/blog/2019/02/04/entendendo-a-liquefacao-na-barragem-de-rejeitos-de-brumadinho/> Acesso em: 23/06/2019.

ANGELINI SOBRINHA, L. **Classificação semiautomática de imagens de satélites e suas implicações na modelação do escoamento superficial direto em bacias urbanas.** Tese de doutorado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2016.

CAVALCANTE, A. L. B. **Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante.** Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Universidade Federal de Brasília, Brasília – DF, 2000.

CHUGH, A. **Embankment Dams** – Chapter 1: General Design Standard Phase 4. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO – USA, 2011.

CPI - COMISSÃO PARLAMENTAR DE INQUERITO - **RELATÓRIO FINAL DA CPI DE BRUMADINHO DO SENADO**, Distrito Federal, Brasil, 2019. disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividadelegislativa/comissoes/comissoes-temporarias/parlamentar-de-inquerito/56a-legislatura/cpi-rompimentoda-barragem-de-brumadinho/documentos/outros-documentos/relatorio-final-cpi-senado-federal>. Acesso em 29/10/2019.

DAVIES, M. P.; LIGHTHALL, P. C.; RICE, S.; MARTIN, T. E. **Design of tailings dams and impoundments.** Keynote address, Tailings and Mine Waste Practices SME, AGM Phoenix, 2002.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2008.

ESPÓSITO, T.J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico.** Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

GOMES, R.C. **Caracterização Tecnológica e Sistema de Disposição de Resíduos de Mineração**, 220p. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2009.

GLOBO - G1 – Rio de janeiro, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/31/tragedia-em-brumadinho-animacao-mostra-ponto-a-ponto-o-deslocamento-do-mar-de-lama-video.ghtml>. Acesso em: 15/10/2019.

HWANG C.L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making:** lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin: Springer, 1981.

IBRAM, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira.** 7º edição. 2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002786.pdf> Acesso em: 15/06/2019.

ICOLD - International Commission on Large Dams. **Lesson from dams incidents**, Abridged edition, USCOLD, Boston, Massachusetts, 1973.

ICOLD & UNEP - International Commission on Large Dams. **Bulletin 121: Tailings Dams - Risk of dangerous occurrences, Lessons learnt from practical experiences.** Paris, 2001.

JANSEN, R. B. **Dams and public safety, A Water Resources Technical Paper.** U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver - CO, EUA, 1983.

LOZANO, F.A.E. **Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica.** Dissertação de Mestrado para Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2006.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 155 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

MENDES, M.B. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante.** Dissertação de Mestrado para Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2007.

METRO JORNAL. Minas gerais, 2019. Disponível em:
<https://www.metrojornal.com.br/foco/2019/01/31/brumadinho-antes-e-depois-fotos.html>. Acesso em 25/10/2019.

MI - MINISTERIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Preenchimento da Ficha de Inspeção de Barragem.** Brasília – DF, 2005. Disponível em: <http://www.mi.gov.br> Acesso em: 20/06/2019.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2005.

SILVA, W.P. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica pelo Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – MG, 2010.

SILVEIRA, J.F.A. **Instrumentação e segurança de Barragens de Terra e Enrocamento.** Oficina de Textos, 413p, São Paulo, 2006.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Observando os rios. O retrato da qualidade da água na bacia do rio Paraopeba após o rompimento da barragem Córrego do Feijão – Minas Gerais.** Brasil, 2019. Disponível em: https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2019/02/SOSMA_Expedicao-Paraopeba_Relatorio.pdf Acesso em: 15/10/2019.

SOUZA, D.H.C. **Análise probabilística e de Sensibilidade dos Parâmetros de um Estudo de Rompimento Hipotético: Barragem de Terra.** Dissertação de Mestrado para Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas-SP, 2016.

VICK, S. G. **Planning, design and analysis of tailings dams.** 1973, New York: John Wiley & Sons.

VIZEU, M. T.; MARCELINO, J.; MENDES, S.; MARTINS, T.; FERNANDES, J. **Treinamento de planos de ação de emergência em barragens.** Agência Nacional de Águas. Brasília, 2015.

WORLD MINE TAILINGS FAILURES – **Córrego do Feijão tailings failure 1/25/2019.** 2019. Disponível em: (<https://worldminetailingsfailures.org/corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/>), acesso em 25/10/2019.