

Relatório de Revisão Barragem I – Brumadinho

Relatório Técnico

GPHI-PJ120-RT-010-33-001-R0

07. Junho. 2021

Relatório de Revisão

Barragem I - Brumadinho

Relatório Técnico

GPHI-PJ120-RT-010-33-001-R0



		Cliente: <p style="text-align: center;">MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL</p>																				
		Projeto: <p style="text-align: center;">RELATÓRIO DE REVISÃO BARRAGEM I - BRUMADINHO</p>																				
N°. GEOPHI: GPHI-PJ120-RT-010-33-001-R0		Documento: <p style="text-align: center;">RELATÓRIO TÉCNICO</p>																				
N°. Cliente:																						
CONTROLE DE REVISÃO DAS PÁGINAS																						
1		19		37		55		73		91		109		127		145		163		181		199
2		20		38		56		74		92		110		128		146		164		182		200
3		21		39		57		75		93		111		129		147		165		18		201
4		22		40		58		76		94		112		130		148		166		184		202
5		23		41		59		77		95		113		131		149		167		185		203
6		24		42		60		78		96		114		132		150		168		186		204
7		25		43		61		79		97		115		133		151		169		187		205
8		26		44		62		80		98		116		134		152		170		188		206
9		27		45		63		81		99		117		135		153		171		189		207
10		28		46		64		82		100		118		136		154		172		190		208
11		29		47		65		83		101		119		137		155		173		191		209
12		30		48		66		84		102		120		138		156		174		192		210
13		31		49		67		85		103		121		139		157		175		193		211
14		32		50		68		86		104		122		140		158		176		194		212
15		33		51		69		87		105		123		141		159		177		195		213
16		34		52		70		88		106		124		142		160		178		196		214
17		35		53		71		89		107		125		143		161		179		197		215
18		36		54		72		90		108		126		144		162		180		198		216
Rev	DESCRIÇÃO DAS REVISÕES																					
0	Emissão Inicial																					
	REV. 0	REV.	REV.	REV.																		
DATA	07/06/2021																					
EXECUTADO	A.Sayão R. Terzariol																					
VERIFICADO	Anna L. Nunes																					
APROVADO	Anna L. Nunes																					

ÍNDICE

RESUMO.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	2
1.1 Objetivo	6
1.2 Escopo	6
2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	8
3 ANTECEDENTES.....	9
4 EVOLUÇÃO DA BARRAGEM I.....	13
4.1 Construção da Barragem.....	13
4.2 Fechamento da Barragem e Atividades Subsequentes	14
4.3 Execução de Drenos Sub-Horizontais Profundos (2018)	14
4.4 Perfuração Geotécnica na Barragem em 2018-2019	16
4.5 Ações Pós Acidente.....	17
5 Considerações sobre o Relatório CIMNE.....	19
5.1 Caracterização dos Materiais	19
5.2 Hipóteses das Causas da Ruptura	19
5.3 Modelagem Numérica e Resultados	21
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24

RESUMO

O presente relatório trata do rompimento da Barragem I do Complexo Minerário Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, Minas Gerais, ocorrido em 25/01/2019. A barragem de rejeitos de ferro de 85m de altura rompeu subitamente, apesar das operações da mina estarem paralisadas. As câmeras de segurança das instalações da mina registraram em vídeo o momento do colapso abrupto da barragem, indicando que a ruptura foi causada pela liquefação dos rejeitos ali armazenados na barragem. Por sugestão do Ministério Público Federal (MPF), a Vale estabeleceu acordos com consultores independentes, para indicar as possíveis causas que provocaram o rompimento da Barragem I: Centro de Investigação de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) da Universidade Politécnica da Catalunha (Espanha) coordenado pelos Prof. Marcos Arroyo e Antonio Gens e Geophi Engenharia Ltda com os consultores Alberto S. F. J. Sayão (PUC-Rio, Brasil) e Roberto Terzariol (Univ. Córdoba, Argentina). O objetivo principal do presente Relatório de Revisão consiste na avaliação do relatório do CIMNE e as principais considerações finais são: 1. Os ensaios laboratoriais, a modelação dos materiais e a modelagem numérica desenvolvida são pertinentes e adequados para a finalidade do relatório CINME; 2. Os ensaios no Laboratório da FEUP foram corretamente executados e os resultados foram corretamente interpretados e utilizados na modelação CINME; 3. São corretas as indicações das comissões EPR, CIAE-SB e CINME referentes ao fato de que os rejeitos apresentavam elevado potencial de liquefação; 4. Ações dinâmicas devem ser desconsideradas como gatilho da ruptura da barragem; 5. O aumento repentino da poropressão é a causa mais provável da ruptura, possivelmente devido ao ingresso localizado de água, tal como a execução dos drenos verticais e furos para piezômetro; 6. A liquefação parece ser a causa mais provável para a ruptura da barragem; 7. As análises numéricas com modelo de comportamentos mecânico e hidráulico acoplados apresentadas no relatório CIMNE são adequadas. *Portanto, pode-se concluir que o relatório CINME está correto, em especial quanto à causa mais significativa apontada como o gatilho da liquefação, que seria o aumento das poropressões devido à recarga de água no plano de ruptura, possivelmente causada pela perfuração realizada para a instalação de um piezômetro.*

Rio de Janeiro, 07 de Junho de 2021



Alberto S. F. J. Sayão
Prof. PhD PUC-Rio, Brasil
CREA 1976103580



Roberto Terzariol
Prof. MSc Univ. Cordoba, Argentina
Passaporte AAD20493

1 INTRODUÇÃO

O presente relatório trata do rompimento da Barragem I do Complexo Minerário Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, Minas Gerais, ocorrido no dia 25 de janeiro de 2019. Na ocasião, a barragem de rejeitos de ferro, com 85m de altura, rompeu subitamente. Naquela data, a mina estava em processo de encerramento das atividades e, portanto, não houve aporte de material de rejeito para a barragem que estava desativada.

O colapso produziu um fluxo de lama com o rejeito saturado, que devastou as instalações industriais do complexo minerário e destruiu parte da linha férrea, uma ponte ferroviária e diversas propriedades rurais de Brumadinho.

O acidente provocou a morte de 270 pessoas, além de elevados prejuízos econômicos para a empresa Vale, operadora da Mina Córrego do Feijão.

As câmeras de segurança das instalações da mina registraram em vídeo o momento do colapso da barragem, mostrando claramente que o mesmo ocorreu abruptamente. Do ponto de vista técnico, as imagens dos vídeos são importantes porque indicam que a ruptura da barragem foi causada pela liquefação dos rejeitos ali armazenados.

Este desastre gerou ações diversas da empresa mineradora, que precisou revisar os laudos de segurança existentes antes do colapso, e encomendar uma investigação técnica minuciosa a um painel de consultores internacionais, sob a liderança do Prof. Peter Robertson. O painel apresentou o relatório final EPR (*Expert Panel Report*, Relatório do Painel de Especialistas) em 12 de dezembro de 2019.

Além disso, o Conselho de Administração da Vale criou, em fevereiro de 2019, o CIAE (Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Segurança de Barragens), coordenado pelo Eng. Flávio Miguez de Mello, com autonomia para fazer um diagnóstico das condições de segurança e propor ações para mitigar os riscos relacionados às barragens da Vale.

Paralelamente, a Justiça Estadual de Minas Gerais, responsável pelos aspectos ambientais da exploração mineral, conduziu um processo judicial para o qual foi realizada uma perícia oficial, encomendada a especialistas brasileiros.

O Ministério Público Federal solicitou ainda um relatório independente de consultoria à Universidade Politécnica da Catalunha (Espanha), por meio do Centro de Investigação de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE), para indicar as possíveis causas que provocaram o rompimento da Barragem I. O CIMNE, por sua vez, confiou à FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal) a execução e interpretação dos ensaios geotécnicos de laboratório. A informação sobre os laudos técnicos e periciais foi disponibilizada pelo referido Ministério.

O presente relatório foi solicitado pelo Ministério Público Federal (MPF) da República Federativa do Brasil, em conformidade com o Contrato de Prestação de Serviços Nº 5500066743, celebrado entre a Vale S.A. e a Geophi Engenharia Ltda em 14 de agosto de 2019 e foi preparado pelos consultores indicados pelo MPF e que assinam o presente documento:

- i. Alberto S. F. J. Sayão, brasileiro, engenheiro civil, inscrição de CPF 494.496.727-68, professor da PUC-Rio, Brasil; e
- ii. Roberto Terzariol, argentino, engenheiro civil, passaporte AAD20493, professor da Univ. Córdoba, Argentina.

Os trabalhos de consultoria foram iniciados em janeiro de 2020, quando foram realizadas reuniões em Belo Horizonte com procuradores do Ministério Público e técnicos da Polícia Federal, representada pelo Eng. Leonardo Mesquita, que tem estudado detalhadamente o acidente da Barragem I. Na ocasião, foi efetuada uma visita à Mina Córrego do Feijão, quando foram obtidas as fotografias a seguir (Figuras 1 a 6), que ilustram a área da mina um ano após o acidente.

Devido às restrições impostas pela COVID19, as atividades dos consultores da Universidade Politécnica da Catalunha foram acompanhadas em mensagens eletrônicas e reuniões remotas, quando foram apresentados e discutidos os resultados preliminares e a metodologia das análises que constam do relatório do CIMNE (*Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijão Mine in Brumadinho*), apresentado em 21 janeiro de 2021.



Figura 1. Vista da cava da mina em janeiro de 2020, alagada após o encerramento da exploração do minério.



Figura 2. Vista da área dos rejeitos da Barragem I, em janeiro de 2020.



Figura 3. Área original de armazenamento dos rejeitos da Barragem I, em janeiro de 2020.



Figura 4. Vista do vale a jusante da Barragem I, soterrado pela lama de rejeitos, em janeiro de 2020.



Figura 5. Ponte Ferroviária destruída pelo fluxo de lama, em janeiro de 2020.



Figura 6. Área do reservatório da Barragem I, com os rejeitos remanescentes em janeiro de 2020.

1.1 Objetivo

A avaliação do relatório do CIMNE é o objetivo principal do presente Relatório de Revisão, de forma a fornecer ao Ministério Público a opinião de especialistas geotécnicos independentes sobre o referido relatório encomendado à Universidade Politécnica da Catalunha.

1.2 Escopo

O escopo deste documento de revisão é avaliar se as metodologias, os ensaios geotécnicos, os modelos numéricos utilizados e as conclusões apresentadas no Relatório CIMNE são relevantes e coerentes com a solicitação do MPF e compatíveis com a melhor técnica e o estado atual de conhecimento.

Este Relatório Técnico apresenta uma análise dos antecedentes consultados para o relatório do CIMNE e uma breve descrição da construção, operação e situação atual da Barragem I.

Destaca-se que os relatórios técnicos do EPR, CIAE e MPF são avaliados no âmbito do Relatório CIMNE.

Com uma análise da evolução histórica da barragem, são enquadradas as condições anteriores à ruptura, com as ações realizadas durante a exploração do minério e após o encerramento das atividades de mineração.

O conteúdo do Relatório CIMNE é avaliado em termos da caracterização dos materiais, das hipóteses dos estágios antes e durante o acidente, para além da metodologia e resultados dos estudos numéricos apresentados pela equipe de consultores da universidade espanhola.

Finalmente, são apresentadas as conclusões e as recomendações relacionadas com o conteúdo do relatório CIMNE.

2 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Os documentos consultados para a elaboração do presente Relatório Técnico são:

- i. CIMNE (2021) Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho, Draft Report for Technical Review, Centro de Investigação de Métodos Numéricos em Engenharia, emitido em 21/01/2021, 534 p.;
- ii. CIAE-SB (2021) Relatório Final, Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Segurança de Barragens, 30/04/2021, 100 p.;
- iii. Grebby, S; Sowter, A.; Gluyas, J.; Toll, D.; Gee, D.; Athabi, A.; Girindran, R. (2021) Advanced analysis of satellite data reveals ground deformation precursors to the Brumadinho Tailings Dam collapse, Communications Earth & Environment, 2:2, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00079-2> | www.nature.com/commsenv, 9 p.
- iv. SETEC/SR/PF/MG (2019) Laudo de Perícia Criminal Federal N° 1070/2019, Serviço Público Federal MJSP - Polícia Federal Superintendência Regional em Minas Gerais Setor Técnico-Científico, 207 p.;
- v. de Carvalho, G. (2019) Video do exato momento da ruptura da Barragem em Brumadinho, G1 Minas Gerais; <https://g1.globo.com/google/amp/mg/minasgerais/noticia/2019/02/01/video-mostra-o-momento-exato-em-que-barragemda-vale-rompe-em-brumadinho.ghtml>;
- vi. Robertson, P. K.; de Melo, L.; Williams, D. J.; Wilson, G. W. (2019) Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I; <http://www.b1technicalinvestigation.com/>, emitido em 10/2019;
- vii. SEA (2019) Susceptibilidade à Liquefação com Ensaios de Cone - Estudos Geotécnicos das Causas da Ruptura de 25 de janeiro de 2019, Relatório Técnico R1240-190630, SEA Sandroni Engenheiros associados, 64 p.
- viii. TÜV SÜD (2018) Revisão Periódica de Segurança de Barragem - Mina Córrego Feijão - Barragem 1, Relatório Técnico RC-SP-117/17 (Revisão 4), emitido por Tüv Süd Bureau em 24/08/2018, 265 p.

3 ANTECEDENTES

No Relatório CIMNE, foram considerados os relatórios EPR e CIAEA e as informações fornecidas pelo MPF, conforme indicado a seguir:

i. EPR (*Expert Panel Report*)

Relatório Técnico das causas da ruptura: estudo encomendado pela Vale, com execução organizada pela empresa de assessoria jurídica da mineradora (*Skadden, Arps, Slate, Meagher & Flom LLP*, sediada em Nova York). O painel de especialistas internacionais foi formado por quatro consultores reconhecidos, com Ph.D. em engenharia geotécnica: Peter Robertson, (coordenador); Lucas de Melo, David Williams e Ward Wilson. O relatório (EPR) inclui 10 apêndices e foi apresentado em dezembro de 2019;

ii. CIAE-SB (Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Segurança de Barragens)

Investigação Independente das Causas Gerais da ruptura, encomendada pelo Conselho de Administração da Vale. Inclui questões técnicas e gerenciais. Os estudos foram iniciados em fevereiro de 2019 e o relatório apresentado em fevereiro de 2020. O relatório do CIAE-SB não é público, mas foi disponibilizado para os consultores do presente documento;

iii. CIMNE (Centro de Investigação de Métodos Numéricos em Engenharia), da Univ. Catalunha, Espanha

Análises computacionais do rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão. Minuta de Relatório para Revisão Técnica, apresentada em fevereiro de 2021. Em 14 de agosto de 2019, a Vale assinou com o Ministério Público Federal (MPF) um Termo de Cooperação, pelo qual a mineradora se comprometeu a contribuir e colaborar na apuração técnica das causas da ruptura. Um dos principais aspectos acordados entre a Vale e o MPF foi a necessidade de análises computacionais especializadas da Barragem I para esclarecimento das causas da ruptura. Na sequência do referido acordo, o CIMNE foi indicado pelo MPF e contratado pela Vale para realizar as atividades de análise e simulação computacional para auxiliar na investigação das prováveis causas determinantes e /ou concorrentes para o rompimento da Barragem I. O Relatório apresenta o trabalho realizado pelo CIMNE para esclarecer a causa do rompimento da Barragem I. A equipe do CIMNE foi liderada pelos professores Marcos Arroyo e Antonio Gens, que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do relatório. Contribuições significativas para o trabalho foram fornecidas por Dr. Miguel Angel Mánica, Sr. Daniel Tarragó, Dr. Lluís Monforte, Prof. Nieves Lantada, Dr. Enrique Escolano e Sr. Davide Besenzon. O Prof. Antônio Viana da Fonseca, da FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), atuou como consultor da equipe do CIMNE.

Os autores do relatório do CIMNE expressam dúvidas quanto à representatividade dos materiais testados, e aos poucos dados de ensaios em condições não drenadas, condições que certamente existiram na barragem na ocasião da ruptura, e não há informações relativas à incidência de deformações nas condições de resistência, como seria de se esperar em uma eventual fluência, conforme postulado no referido relatório.

Assim, optou-se por realizar uma ou mais visitas no campo para coleta de amostras dos rejeitos remanescentes, representativas dos materiais existentes antes do acidente no reservatório da barragem. Estas atividades de amostragem e ensaios foram confiadas à Universidade do Porto (FEUP), sob a coordenação do Prof. Antônio Viana da Fonseca.

A partir das informações e relatórios disponibilizações pela Vale, constata-se que no momento da ruptura, a barragem tinha 85m de altura e 700m de comprimento na crista. A barragem foi construída em 15 etapas desde o ano de 1977, quando teve início a exploração do minério. A mina foi operada pela Vale de 2001 a 2016. As etapas de construção foram realizadas pelo método de alteamento a montante (com parte apoiada no rejeito recém depositado), com exceção da Etapa 4, que foi realizada pelo método de Linha de Centro. No oitavo alteamento (Etapa 8) foi feita uma berma, deslocando a barragem para montante, por motivos não especificados.

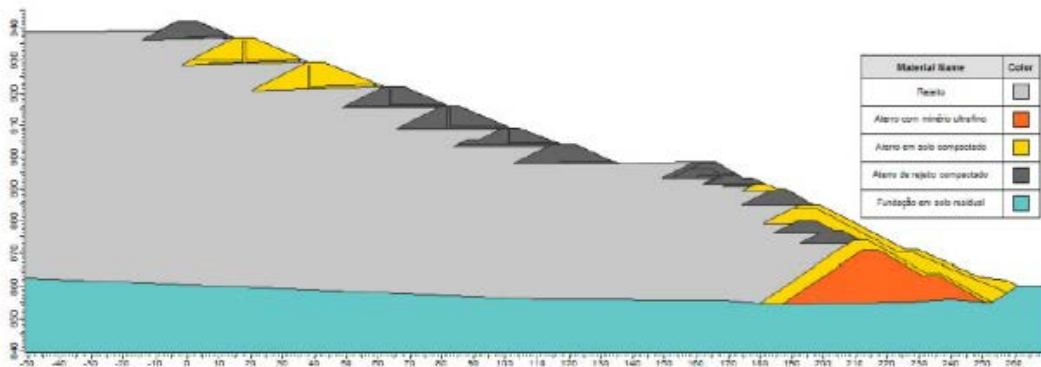


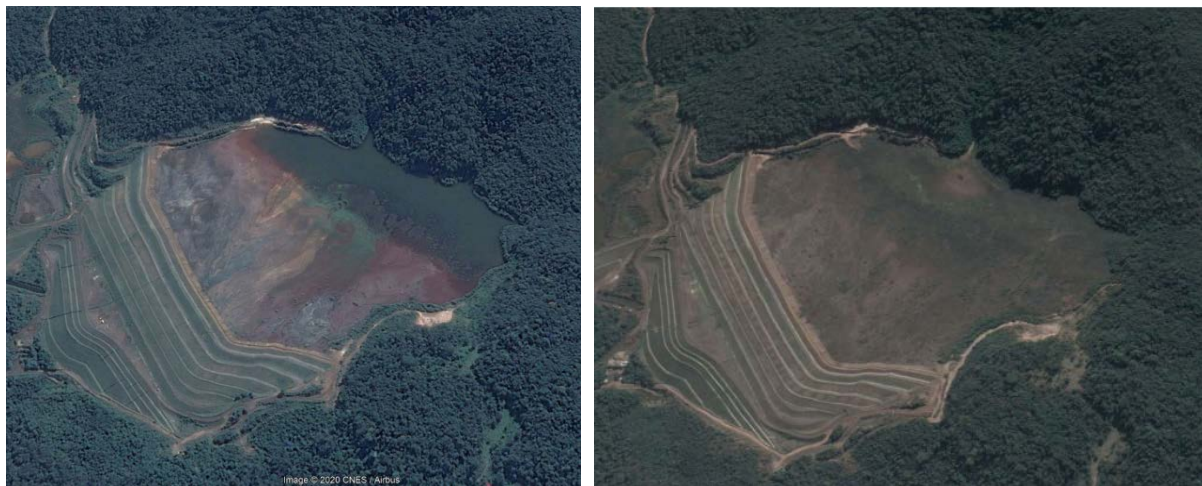
Figura 7. Seção típica da Barragem I (Fig. 2 do Relatório CIMNE).

Os relatórios do EPR e da CIAE-SB descrevem um histórico de problemas de drenagem na Barragem I, endossados pelos relatórios da consultoria TUV SUD, referentes ao fechamento das operações da mina.

É importante citar que o relatório EPR ressalta que os ensaios de piezocone (CPTU) indicaram a tendência à liquefação dos rejeitos.

O relatório do CIAE-SB reporta o fato de, na ocasião do encerramento da mina em 2016, já existirem sérias dúvidas quanto à segurança em relação ao fenômeno da liquefação do solo.

Os relatórios da TUV SUD indicam que todas as tarefas após o fechamento da mina (exceto para a última campanha de estudos) foram relacionadas à redução dos níveis de água no aterro de rejeitos. Isto se verifica tanto para drenos internos quanto para canaletas superficiais. Nas fotos de satélite é possível observar que não há águas superficiais em 2018 (Figura 8).



(a) Registro de abril de 2016 (Fig.1 do CIMNE) (b) Registro de julho de 2018 (Fig.3 do CIMNE)

Figura 8. Imagens de satélite da Barragem I (*Google Earth*).

O relatório da TUV SUD mostra que havia previsão para executar 30 drenos horizontais de 100m de comprimento para rebaixar o lençol freático dentro da barragem. Infelizmente, foram construídos drenos com comprimentos médios de apenas 50m, com pouca eficiência na drenagem final. Também reporta a ocorrência de um incidente durante a execução do dreno DHP-15.

Os relatórios do CIAE-SB e EPR descrevem duas campanhas de perfuração. A primeira campanha não estava associada à ruptura, mas sim a segunda campanha, solicitada pela TUV SUD, na qual os piezômetros são colocados e os ensaios de CPT são realizados. O relatório do CIAE-SB não é conclusivo quanto ao impacto desta campanha no rompimento da barragem.

Os instrumentos de medição instalados foram conectados a uma estação central de monitoramento. Além disso, o nivelamento topográfico foi realizado em estações fixas e por meio de determinações de satélite. Antes da ruptura, nenhum movimento significativo foi detectado na barragem, tampouco na crista.

As medições de satélite produziram valores mais significativos na data da ruptura, mas geralmente referem-se à subsidência relativamente geral.

Medições por radar instalado ao nível do terreno mostram, minutos antes da ruptura, deslocamentos horizontais em dois pontos próximos à base da barragem, localizados em ambos os lados da mesma. Um terceiro ponto no centro da barragem e próximo a um furo para instalação de piezômetro mostra um deslocamento, no mesmo momento, para baixo e para frente.

O Relatório da CIAE-SB conclui que os deslocamentos que poderiam colocar em risco a barragem não foram detectados antes da ruptura. Os afundamentos de enchimento são típicos de processos de consolidação de solo fino. O relatório indica que podem haver movimentos devido às perfurações realizadas e a condições sazonais como a entrada de água na época das chuvas.

4 EVOLUÇÃO DA BARRAGEM I

Os principais marcos na evolução histórica da Barragem I são resumidos nesta seção do presente documento.

4.1 Construção da Barragem

A estrutura que rompeu estava em uso há mais de 40 anos. A história da Barragem I foi compilada no relatório EPR e, anteriormente, com menos detalhes, apresentada pela TUV SUD, em sua última revisão técnica da barragem em 2018.

Cronologicamente, os aspectos mais relevantes da história da Barragem 1 são:

- i. 1977 - Início da construção;
- ii. 2001 - Início da operação da Vale; e
- iii. 2016 - Encerramento da disposição de rejeitos na barragem em julho de 2016.

Das 15 etapas construtivas já mencionadas, pode-se dizer que:

- i. Seção inferior (entre as Etapas 1 e 8).

A drenagem e os materiais utilizados nas diferentes etapas são obtidos do relatório EPR, onde se observa que persistem várias incertezas sobre o que foi efetivamente construído, principalmente durante o segundo e terceiro alteamento da barragem (ou seja, do estágio 2 ao estágio 8).

Em geral, as condições de drenagem no fundo da barragem eram inadequadas, com a barragem inicial e alguns estágios de alteamento sem dispositivos claros de drenagem (relatório CIAE-SB). Além disso, os drenos realmente construídos estavam propensos a entupimento químico (colmatação).

- ii. Seção superior

O nono estágio (quarto alteamento) introduziu um recuo (berma) na seção da Barragem I. A documentação de projeto existente para esta fase inclui relatórios que apontam para problemas de infiltração na frente dos estágios iniciais da barragem e cálculos de estabilidade que indicaram valores de fatores de segurança reduzidos. Não há justificativa técnica para a introdução da berma, mas era certamente relacionada aos problemas de instabilidade da barragem.

4.2 Fechamento da Barragem e Atividades Subsequentes

A CIAE-SB documentou o fechamento da Barragem I em julho de 2016, o que parece ter sido motivado pela preocupação quanto ao risco de liquefação da barragem (CIAE-SB, p. 44). É importante lembrar que o rompimento da barragem do Fundão ocorrera em novembro de 2015. Em decorrência, no Brasil havia uma maior preocupação quanto ao risco de liquefação das barragens de rejeitos. De fato, em julho de 2016 foram realizados vários estudos que indicaram claramente que grande parte dos rejeitos da Barragem I apresentavam elevado potencial de liquefação.

As atividades após o fechamento da barragem incluíram:

- i. Redução da profundidade da lâmina d'água na lagoa de rejeitos. As fotografias aéreas disponíveis indicavam uma extensa praia de rejeitos durante a última fase de operação da barragem. Após o fechamento, várias melhorias no sistema de drenagem superficial e o uso ocasional de bombeamento reduziram significativamente a extensão da lagoa;
- ii. Limpeza e melhorias do sistema de drenagem da superfície da barragem;
- iii. Instalação de drenos sub-horizontais profundos (DHP). 15 drenos sub-horizontais profundos foram instalados entre fevereiro e junho de 2018, por perfuração sub-horizonta. As características desta intervenção e os problemas observados durante a instalação do dreno são discutidos posteriormente;
- iv. Perfuração para instalação de novos instrumentos e obtenção de mais informações geotécnicas sobre as condições da barragem. Esta atividade envolveu a perfuração de poços verticais, que foi iniciada em setembro de 2018, e ainda continuava no dia do colapso da barragem. As características desta intervenção são discutidas posteriormente.

Importante ressaltar que todas as atividades após o encerramento visavam à redução do nível d'água na barragem. A avaliação dos dados piezométricos disponíveis mostra que as ações foram bem-sucedidas e que, em geral, o nível d'água diminuiu continuamente após 2016.

4.3 Execução de Drenos Sub-Horizontais Profundos (2018)

A instalação de 30 drenos sub-horizontais profundos (DHP) teve como objetivo reduzir significativamente o nível d'água na barragem. Eles foram concebidos como drenos sub-horizontais de 100m de comprimento instalados em dois níveis distintos: próximo à base da barragem e na berma principal (logo abaixo do quarto alteamento).

O procedimento de instalação do DHP envolveu a perfuração por percussão de uma ponteira com três cones com o auxílio de fluido pressurizado (ar, água e/ou bentonita) e a instalação simultânea de um revestimento provisório. O tubo de drenagem era colocado dentro do revestimento e o mesmo era removido enquanto um filtro de areia era executado. O fluido de pressurização durante a perfuração podia atingir 2MPa.

O processo de instalação do DHP foi difícil e o comprimento médio dos 14 drenos iniciais instalados era de apenas 51m.

Análises numéricas indicaram que para baixar o lençol freático da Barragem I em 10m em um ano e meio, seria necessário extrair água em taxa de 115m³/h. Entretanto, o fluxo total medido de todos os DHPs era inferior a 4m³/h. A maior parte da vazão era originada de apenas três drenos (DHP-11, DHP-12 e DHP-14), cujas posições são indicadas na Figura 9.



Figura 9. Posição dos drenos sub-horizontais profundos, instalados em 2018 (CIAE-SB).

A instalação dos DHPs teve efeito reduzido nas leituras piezométricas, com ligeira tendência de queda, já observada após o fechamento da barragem, nas medições acima do nível da berma. Não houve alterações significativas abaixo do nível da berma.

Em 6 de junho de 2018, um grave incidente ocorreu durante a perfuração do dreno DHP-15. A instalação parou repentinamente quando foi observado um fluxo localizado de água e lama próximo a um canal de drenagem em um ponto vizinho ao local de perfuração. O dreno foi vedado e o fluxo contido com sacos de areia. Essa vazão perdurou por 8 dias, até 14 de junho, quando as bocas de dois drenos mais antigos foram desobstruídas, liberando importantes

vazões de água com material sólido em suspensão. Esses drenos mais antigos estão localizados 150m à esquerda do ponto de injeção. Simultaneamente, foram observados fluxos emergentes de drenos mais antigos, 250m à direita do DHP-5, na mesma altura do DHP-15. Com os antigos drenos desbloqueados, o vazamento de lama foi gradualmente diminuído. O incidente aumentou, por alguns dias, o nível piezométrico em 0,6m no piezômetro PZ-07 e 3,5m no piezômetro PZ-09, localizados nas proximidades do DHP-15.

Análises detalhadas do registro sismográfico reportadas pelo EPR identificaram um pequeno tremor, associado ao incidente no DHP-15, em 06/11/2018. Destaca-se que o EPR observa que o registro do evento no DHP-15 é similar ao registro inicial do rompimento da barragem.

4.4 Perfuração Geotécnica na Barragem em 2018-2019

As campanhas de perfuração em andamento no momento do rompimento da barragem foram documentadas nos relatórios CIAE-SB e EPR. No momento da ruptura, duas campanhas de perfuração distintas estavam em andamento, a saber:

- i. A primeira campanha de perfuração foi motivada pela exigência de incluir uma descrição do status da barragem ou do projeto como recomendam os planos gerais de segurança de barragens. A perfuração para esta campanha ocorria fora da área da barragem e visava a investigar os solos de fundação. Devido à sua localização (fora da ruptura) e ao material a perfurar (saprólito e rocha), os relatórios CIAE-SB e EPR afastaram qualquer relação entre esta campanha de perfuração e a ruptura; e
- ii. A segunda campanha de perfuração foi motivada pelas sugestões da TUV SUD na última inspeção periódica de segurança da barragem, em agosto de 2018. O certificado de inspeção foi acompanhado por uma recomendação de investigações adicionais do solo, incluindo a realização de ensaios de CPTu e sondagens contínuas, além da instalação de instrumentação adicional, correspondente a piezômetros e inclinômetros. A informação obtida nesta campanha pretendia ser útil tanto para o projeto *As Built* (“como construído”, norma técnica NBR 14645) e para o projeto de desativação da barragem. A perfuração para esta campanha foi realizada na crista da barragem.

O relatório CIAE-SB não confirmou nem descartou a possibilidade da perfuração ter sido o gatilho do colapso. Por outro lado, as análises numéricas levaram o EPR a descartar a possibilidade de que as perfurações tivessem contribuído para a ruptura.

As características desta campanha estão detalhadas no relatório CIMNE. A informação sobre a execução foi compilada a partir das fichas de campo e de um relatório preliminar da campanha que estava sendo elaborado pelo empreiteiro responsável pelas perfurações.

O relatório EPR não esclarece a posição dos poços de instrumentação no campo. Em particular, destaca-se que o EPR tem a maioria deles localizados de forma diferente ao iniciado pelo relatório CIMNE. O local considerado pelo CIMNE é baseado no programa planejado pela TUV-SUD.

A localização do poço que estava sendo perfurado no dia da ruptura foi obtida do vídeo das câmeras de segurança. Há também uma imagem de sobrevoo anterior realizado com drone confirmando a posição considerada para o poço, que foi perfurado algumas semanas antes do acidente.

A campanha de instrumentação incluiu a perfuração para instalação de inclinômetros e piezômetros. A profundidade de alguns furos de piezômetro foi bem maior que furos anteriores executados na barragem. Os dois últimos furos nesta campanha de instrumentação foram os mais profundos já realizados na barragem. O furo que estava sendo executado no dia da ruptura já havia atingido 65m de profundidade e, de acordo com o comunicado da equipe que sobreviveu ao colapso, deveria atingir 76m de profundidade naquele mesmo dia.

De acordo com a empresa de perfuração, o procedimento de execução do poço de instrumentação tinha as seguintes características:

- i. Empregado um sistema com cabos;
- ii. O avanço ocorria em seções de 1m, alternando 45cm de SPT e 55cm de furação rotativa;
- iii. A perfuração continuava a seco até que o lençol freático fosse localizado ou uma camada rígida fosse encontrada;
- iv. Utilizado sistema de revestimento, com circulação de água descendo pela tubulação interna e subindo pela externa.

De acordo com a empresa de perfuração, a água foi usada em todos os poços para resfriar a broca e remover o material perfurado. Não havia controle contínuo da pressão ou fluxo do fluido, mas havia um medidor de pressão e regulador de fluxo manual. Não foram observadas perdas hidráulicas significativas em nenhum furo. O registro do nível da água nos furos foi errático, ora realizado durante a perfuração, ora após lapso de 24 horas.

4.5 Ações Pós Acidente

Em 25 de janeiro de 2019, a Barragem 1 do complexo mineiro de Paraopeba, localizado em Brumadinho (Minas Gerais, Brasil), rompeu abruptamente. Como consequência direta do fracasso, várias centenas de pessoas morreram e foram causados grandes danos econômicos, sociais e ambientais. O complexo de mineração de Paraopeba pertencia e era operado pela Vale S.A.

As principais ações e eventos após o colapso da Barragem I foram:

- i. Em 14 de agosto de 2019 a Vale assinou um Termo de Cooperação com o Ministério Público Federal (MPF), no qual a VALE se comprometeu a contribuir e colaborar com as Autoridades na investigação técnica das causas da ruptura. Um dos principais aspectos acordados entre a VALE e o MPF foi a necessidade de realização de análises computacionais especializadas da Barragem I para esclarecimento das causas da ruptura; e
- ii. No seguimento do referido acordo, o CIMNE foi nomeado pelo MPF e posteriormente contratado pela VALE para realizar as atividades de análise, modelação e simulação computacional para auxiliar na investigação das prováveis causas determinantes e/ou concomitantes do rompimento da Barragem I.

5 Considerações sobre o Relatório CIMNE

5.1 Caracterização dos Materiais

Os estudos são relatados para estabelecer as características de tensão-deformação dos materiais, considerando dois aspectos:

i. Identificação dos solos afetados

O EPR fez um resumo das campanhas de sondagem de solos anteriores, com quantidade significativa de ensaios SPT. No entanto, sua utilidade é limitada, tendo em vista a área em que estão localizados e a profundidade atingida. Os estudos do EPR consideraram os ensaios CPT, que indicam que o rejeito depositado no reservatório da barragem é um silte arenoso com baixa permeabilidade; e

ii. Os parâmetros tensão-deformação dos rejeitos nos relatórios anteriores ao rompimento foram baseados em ensaios de compressão triaxial. No entanto, o EPR considerou que estes ensaios não apresentaram qualidade suficiente para serem utilizados nas análises da ruptura.

Conseqüentemente, ensaios adicionais foram realizados para melhorar a caracterização dos materiais envolvidos na ruptura.

O Relatório Técnico de Peter Robertson em 2018, complementado pelas campanhas de 2005 e 2006, contem importantes informações derivadas dos ensaios de campo tais como CPTU, infiltração e velocidade de propagação de ondas.

Finalmente, os ensaios realizados na FEUP, com amostras de rejeitos coletadas em 4 locais da barragem, permitiram a obtenção de parâmetros para aplicação na modelagem reportada pela equipe do CIMNE.

5.2 Hipóteses das Causas da Ruptura

Analisando os antecedentes e os estudos de caracterização dos materiais, o relatório CIMNE considera o conceito de liquefação como base da análise. Nesse sentido, o relatório ressalta que “é indiscutível que o processo de rompimento da Barragem I é a liquefação”. Com base nas imagens de vídeo, o EPR afirmou que “a ruptura é o resultado da liquefação dos materiais da barragem.” O relatório da CIAE-SB também é claro a esse respeito, afirmando que “a falha da Barragem I foi produzida pela instabilidade estrutural da liquefação”.

As condições gerais em que se encontrava o rejeito da barragem permitem considerar que esta forma de ruptura é a que apresenta maior probabilidade de ocorrência. A hipótese é consistente com as trajetórias de tensão de testes de cisalhamento não drenados executados na FEUP.

Sobre este ponto, o estudo do CIMNE considera a liquefação como condição básica para a explicar a situação que deu início ao processo de ruptura.

Na análise dos possíveis gatilhos do processo, existem elementos que podem ser descartados por serem de incidência baixa ou nula, a saber:

- i. Aumento das pressões efetivas devido ao maior acúmulo de rejeitos no reservatório. Os antecedentes mostram que não houve deposição recente de rejeitos desde 2016;
- ii. Aumento da poropressão dentro do reservatório, devido ao acúmulo de água na superfície do reservatório. Os registros mostram que este componente foi controlado pelas canaletas de drenagem superficial;
- iii. Erosões no pé da barragem. Não há evidências da ocorrência generalizada de *piping* na barragem;
- iv. Erosões localizadas no reservatório de rejeitos. As obras de drenagem com perfuração sub-horizontal, principalmente no caso do dreno DHP-15, apresentaram um fluxo de água e sólidos, que foi controlado após um período de vários dias. Este fator foi descartado em estudos anteriores, por contribuir para a redução de pressões efetivas no solo. Para descartar esta proposição, deve-se considerar que o processo de liquefação parece iniciar-se muito longe do setor onde possivelmente ocorreu a maior perda de sólidos. Além disso, deve-se considerar que esse evento ocorreu 6 meses antes da ruptura;
- v. Ações sísmicas, naturais ou artificiais. Eventos de maior magnitude não foram registrados para serem considerados como situações que poderiam causar um aumento localizado nas poropressões. Esta condição foi analisada pelo EPR e CIAE-SB, que reportam conclusão semelhante;
- vi. Tráfego de equipamentos pesados no setor de barragens. Não havia nenhum equipamento em operação no momento da ruptura.

Consequentemente, com os possíveis gatilhos descartados, é necessário encontrar uma situação que gere um aumento da poropressão na região da superfície da ruptura. Ao revisar esses itens, deve-se focar em:

- i. Possível aumento da poropressão gerado pelo processo de perfuração que estava ocorrendo no momento da ruptura; e
- ii. Possível efeito da fluência de solo argiloso sujeito a cisalhamento não drenado. Este conceito foi rejeitado pelo EPR, mas não há dados disponíveis para eliminar a fluência como fator desencadeante da ruptura.

5.3 Modelagem Numérica e Resultados

A modelagem numérica do CIMNE utiliza o modelo Plaxis 2D. O uso de um modelo com estas características implica na aceitação das limitações inerentes. Em particular, a análise corresponde a uma simulação bidimensional, a qual aceita a "continuidade" do problema em análise na direção normal ao plano de cálculo.

No caso em análise, o fenômeno apresenta, em seus extremos, um efeito tridimensional que foi descartado. Deve-se reconhecer que o uso deste tipo de modelo pode ser considerado satisfatório e compatível com a qualidade das informações disponíveis.

Com os resultados dos ensaios triaxiais feitos na FEUP é viável estabelecer um modelo baseado em solos argilosos do tipo *Cam Clay*, que foi ajustado na forma de um modelo de argila e areia (*Comprehensive Aquatic Systems Model, CASM*).

No Modelo CASM é de particular interesse a identificação dos seguintes parâmetros:

- i. Ângulo de atrito do solo.
Foi adotado para os materiais na zona de ruptura valor da ordem de 33° a 34°. O comportamento contráctil mostrado para os solos envolvidos na ruptura indica que as trajetórias de tensão correspondem a condições de baixa resistência ao cisalhamento. No entanto, e como parte de uma verificação complementar quanto ao comportamento do modelo e sua validade para explicar a causa da ruptura, poderia ser aconselhável uma análise paramétrica da influência do ângulo de atrito; e
- ii. Parâmetros de compressibilidade do meio (λ).
Embora a compressibilidade (κ) nas seções de recarregamento também faça parte deste modelo, este parâmetro é considerado de menor influência nos resultados, uma vez que se entende que a maior parcela da compressão ocorre nas argilas normalmente adensadas.

Na constituição do modelo 2D, a divisão do aterro da barragem em solos argilosos, arenosos e misturas dos dois é satisfatória, considerando que o uso dos resultados das campanhas de CPTu para estabelecer o arranjo espacial é uma solução válida tendo em vista as informações disponíveis.

Um modelo acoplado (hidráulico e mecânico) também foi empregado nos estudos numéricos. O acoplamento requer a identificação dos valores de permeabilidade em condições de solo não saturado, para o qual a modelagem foi baseada na função de *Van Genuchten*. Em geral, isto pode ser considerado uma limitação da modelagem, uma vez que a calibração específica da equação básica do problema não foi realizada. Porém, o efeito pode ser considerado desprezível, considerando que a maior parte da superfície de ruptura se desenvolve em solos saturados.

Uma vez que o modelo de análise foi desenvolvido no programa Plaxis 2D, foi realizada a validação do mesmo em relação ao comportamento da barragem. Este é um ponto de especial importância para a aceitação dos resultados finais apresentados pelo CIMNE. Considera-se pertinente o detalhamento das simulações realizadas para a verificação do modelo.

Na análise dos resultados da modelagem, podem ser feitas as seguintes observações:

- i. De acordo com os resultados apresentados, observa-se um recalque da crista da barragem que ultrapassa 6,5m. Considera-se que este valor não reproduz a condição efetivamente alcançada ao final da construção, uma vez que a altura de coroamento pré-estabelecida foi efetivamente atingida. O problema aqui observado deriva da forma de desenvolvimento da simulação no próprio modelo. É contraditório em relação ao esperado em um processo convencional de crescimento de barragem, no qual os recalques mais significativos ocorrem na parte média da altura da barragem, enquanto a crista apresenta recalque nulo no momento da conclusão da construção;
- ii. Concluída a construção, pode-se simular um processo de adensamento no tempo e com isso determinar numericamente o desenvolvimento dos recalques pós-construção da crista, os quais podem ser avaliados e comparados com os registros de campo;
- iii. Os efeitos de recalque pós-construção também implicam em recalque na região do depósito de rejeitos e, principalmente, nos solos argilosos no final da área de depósito. Tratando-se de solos finos com elevada deformabilidade, é aconselhável determinar os recalques do reservatório de rejeitos por meio da simulação numérica, de forma a avaliar a possível geração de uma zona de acumulação de águas superficiais;
- iv. Como complemento à modelagem numérica geral, foi realizado um modelo pseudo-analítico para avaliar a distribuição das poropressões nas proximidades do furo para instalação de um piezômetro, que estava em execução no momento da ruptura. A simulação não parece totalmente desenvolvida em termos de extensão para permitir uma visualização adequada da extensão potencial da zona com aumento da poropressão;

-
- v. Os resultados da modelagem numérica mostram que, com o aumento da poropressão na área da sondagem, chega-se a uma condição de instabilidade equivalente à superfície crítica. A Figura 162 no relatório do CIMNE apresenta a geração de um plano de deslizamento que responde à forma da ruptura. A este respeito, surgem as seguintes questões de interesse:
- a. Na simulação da condição de ruptura, a escala dos deslocamentos e tensões de cisalhamento devem ser indicadas na Figura 162 do relatório; e
 - b. A partir da condição indicada na Figura 162, se for aplicado o conceito de redução c -phi, deve ser obtido um valor de redução próximo da unidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais considerações deste documento são as seguintes:

1. Os ensaios laboratoriais, a modelação dos materiais e a modelagem numérica desenvolvida são pertinentes e adequados para a finalidade do relatório CINME;
2. Os ensaios laboratoriais no Laboratório da FEUP foram corretamente executados de acordo com o estado da arte na matéria e os seus resultados foram corretamente interpretados e utilizados na modelação CINME;
3. São corretas as indicações das comissões EPR, CIAE-SB e CINME referentes ao fato de que os rejeitos apresentavam um elevado potencial de liquefação. É particularmente correto o parecer da CIAE-SB ao afirmar que a barragem antes do rompimento apresentava um elevado risco de ruptura;
4. A liquefação parece ser a causa mais provável para a ruptura da barragem;
5. Devem ser descartadas as ações dinâmicas como gatilho da ruptura da barragem, visto que, de acordo com os dados disponíveis, não foram registradas magnitudes com intensidade compatível para produzir liquefação;
6. O aumento repentino da poropressão é a causa mais provável, possivelmente devido ao ingresso localizado de água, que pode ser acompanhado de outros fatores, tais como infiltração, erosão local, entre outros;
7. Drenos verticais e furos para piezômetro podem ser fontes de ingresso localizado de água com aumento da poropressão;
8. Além disso, as diminuições de densidade de rejeitos em áreas localizadas, as quais foram registradas nos ensaios CPTU, podem ter reduzido significativamente os parâmetros de resistência;
9. As análises numéricas apresentadas no relatório CIMNE são adequadas, considerando que se trata de um modelo de comportamentos mecânico e hidráulico acoplados;
10. Os tipos de materiais ensaiados em laboratório pela FEUP foram confirmados com aqueles definidos nas campanhas de CPTU com base na permeabilidade, mas foram identificadas inconsistências com os ângulos de atrito, que não são relevantes uma vez que os valores residuais são baixos;

11. A definição dos parâmetros g_a , h_n e g_l , utilizados na modelagem numérica, é muito importante, pois pode ser o ponto crítico para entender se o modelo faz a alocação adequada da permeabilidade com base nas variações do grau de saturação. Os autores do relatório CINME indicaram que uma análise detalhada será apresentada no relatório final;
12. O aumento da permeabilidade do dreno sub-horizontal não foi considerado na análise, mas não deveria afetar significativamente os resultados;
13. Embora, ao analisar o passo a passo da construção da barragem com o programa PLAXIS, não tenha sido considerado o aumento dos recalques produzidos na etapa anterior, os resultados obtidos não deveriam ser incorretos. No entanto, seria desejável corrigir este item no relatório final, para ser consistente com a metodologia empregada.

Portanto, e apesar das observações acima, pode-se concluir que, em geral, o relatório CINME está correto, em especial quanto à causa mais significativa apontada como o gatilho da liquefação, que seria o aumento das poropressões devido à recarga de água no plano de ruptura, possivelmente causada pela perfuração realizada para a instalação de um piezômetro.

Esta opinião é confirmada pelo fato de que os deslocamentos no momento do colapso são coerentes com a posição da perfuração que atingia a profundidade da superfície de ruptura no momento do acidente.