



Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão

Painel de Especialistas:

Peter K. Robertson, Ph.D. (Chair)

Lucas de Melo, Ph.D.

David J. Williams, Ph.D.

G. Ward Wilson, Ph.D.

December 12, 2019

A versão oficial deste Relatório é a versão em língua inglesa. Em caso de qualquer contradição ou divergência de interpretação entre a versão traduzida e a versão em língua inglesa deste Relatório, prevalecerá a versão em língua inglesa.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

SUMÁRIO EXECUTIVO

Aproximadamente às 12h28min horário local no dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeitos B-I na mina de minério de ferro do Córrego do Feijão (“Barragem I”) da Vale SA, localizada a 9 quilômetros (km) a nordeste de Brumadinho, em Minas Gerais, Brasil, sofreu um rompimento repentino, resultando em um fluxo de lama catastrófico que se deslocou rapidamente a jusante.

Esse rompimento da barragem foi um evento único pois existem imagens de vídeo de alta qualidade do evento que fornecem informações sobre o mecanismo de rompimento. Os vídeos mostram claramente um rompimento do talude da barragem, começando da crista e estendendo-se para uma área logo acima do primeiro alteamento (a Barragem Inicial). A crista da barragem caiu e a área acima da região do pé se abaulou para fora antes que a superfície da barragem se rompesse. O rompimento se estendeu por grande parte da face da barragem e o colapso do talude ocorreu em menos de 10 segundos, com 9,7 milhões de metros cúbicos (Mm³) de material (representando aproximadamente 75 por cento (%) dos rejeitos armazenados) se esvaindo da barragem em menos de 5 minutos (min). O material depositado na barragem mostrou uma súbita e significativa perda de resistência e rapidamente se tornou um líquido pesado que escorreu a jusante em alta velocidade. Os vídeos mostram que a superfície de ruptura inicial foi relativamente rasa e foi seguida por uma série de deslizamentos rápidos e rasos com taludes íngremes que progrediram para trás até os rejeitos. Com base nestas observações, fica claro que o rompimento foi resultado da liquefação estática dos materiais da barragem. A perda de resistência significativa e repentina indica que os materiais retidos pela barragem apresentavam comportamento frágil.

O rompimento também é um evento único sob a perspectiva de que ocorreu sem sinais aparentes de instabilidade antes do rompimento. Vídeos de alta qualidade de um drone sobrevoando a Barragem I apenas sete dias antes do rompimento também não mostraram sinais de instabilidade. A barragem foi monitorada extensivamente usando uma combinação de marcos topográficos ao longo da crista da barragem, inclinômetros para medir deformações internas, radares de solo para monitorar as deformações de superfície da face da barragem e piezômetros para medir mudanças nos níveis internos de água, entre outros instrumentos. Nenhum desses métodos detectou deformações ou alterações significativas antes do rompimento. As análises de imagens de satélite pós-rompimento indicaram pequenas deformações descendentes, lentas e essencialmente contínuas de menos de 36 milímetros por ano (mm/ano) ocorrendo na face da barragem no ano anterior ao rompimento, com alguma aceleração da deformação durante a estação chuvosa. Na parte inferior da barragem, as deformações medidas nos 12 meses antes do rompimento incluíram deformações horizontais variando entre 10 a 30 mm. Tais deformações são compatíveis com recalque lento e de longo prazo da barragem e não seriam, sozinhas, um indicativo de um precursor do rompimento.

O histórico de construção da barragem fornece informações sobre as possíveis razões para o rompimento. A barragem foi construída usando o método de construção a montante durante um período de 37 anos em 10 alteamentos. Não foram construídos novos alteamentos após 2013 e o lançamento de rejeitos cessou em julho de 2016. A Barragem Inicial continha características que impediam a drenagem através do pé da barragem. Nenhuma drenagem interna significativa foi instalada durante a construção dos alteamentos posteriores, exceto pequenos tapetes drenantes

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

abaixo de alguns dos alteamentos posteriores e drenos verticais em alguns dos alteamentos superiores. Os tapetes drenantes e os drenos verticais nos alteamentos posteriores foram inseridos em resposta à infiltração observada a partir da face da barragem acima do pé durante trabalhos de construção. O projeto inicial da barragem estabeleceu uma inclinação relativamente íngreme. Após o Terceiro Alteamento, um recuo foi construído para que o alinhamento da crista da barragem ficasse reto. O recuo reduziu a inclinação geral da barragem, mas moveu a parte superior da barragem para mais perto do lago de decantação e também do futuro nível da água interno. Imagens aéreas e de satélite pré-rompimento mostram que, em alguns momentos durante a vida útil da barragem, a água estava próxima à crista da barragem, levando a rejeitos fracos próximos à crista, e camadas intercaladas de rejeitos finos e grossos retidos pela barragem. O recuo também moveu a parte superior da barragem para cima de rejeitos mais fracos e de granulometria mais fina.

A falta de recursos de drenagem significativos, juntamente com a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis dentro da própria barragem, resultaram em um nível de água alto dentro da barragem. Uma percolação na face da barragem logo acima do pé era observada periodicamente, desde a época do Quarto Alteamento. Apesar da cessação do lançamento de rejeitos em meados de 2016, a análise dos dados dos piezômetros instalados dentro da barragem mostrou que o nível de água não reduziu significativamente após a cessação do lançamento de rejeitos. Os níveis de água na parte superior da barragem estavam caindo lentamente, mas permaneciam altos na região do pé da barragem. Isto ocorreu principalmente devido à alta precipitação regional na estação chuvosa, combinada à drenagem interna limitada na barragem. Drenos horizontais profundos (DHPs) foram instalados no início de 2018, em um total de 14, principalmente ao longo do pé do recuo. Após um incidente durante a instalação do DHP 15, não se prosseguiu com a instalação de outros DHPs.

Os dados das investigações geotécnicas pré-rompimento foram significantes e incluíram furos de sondagem, amostragem, ensaios de penetração de cone (CPTu), ensaios de palheta de campo (FVT) e perfis de velocidade de ondas de cisalhamento (V_s) *in situ*. Estes dados forneceram informações detalhadas sobre a natureza, consistência e distribuição de materiais, bem como as pressões de água, dentro da barragem. Estes dados, combinados com as imagens aéreas e de satélite disponíveis, permitiram ao Painel desenvolver perfis estratigráficos detalhados bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) dos materiais retidos pela barragem.

O Painel realizou novas investigações para fornecer informações adicionais sobre os materiais dentro e sob a barragem. Uma descoberta significativa foi que os rejeitos retidos pela barragem tinham um teor muito alto de ferro (ferrosos) (superior a 50%), com muito pouco quartzo (inferior a 10%). O alto teor de ferro deu aos rejeitos um alto peso específico total, de aproximadamente 26 quilonewtons por metro cúbico (kN/m^3). Os dados históricos dos ensaios de CPTu, juntamente com pesos específicos e pressões da água apropriados, indicam que os rejeitos eram predominantemente fofos, saturados e contráteis sob grandes deformações específicas. Testes laboratoriais avançados realizados como parte da Investigação em amostras reconstituídas representativas dos rejeitos mostraram um comportamento frágil quanto à perda de resistência e indicaram a presença de cimentação. Este comportamento frágil quanto à perda de resistência também foi observado em dados históricos de ensaios de FVTs, CPTu e em alguns dados históricos

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

de testes de laboratório. Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) analisadas pelo Painel atribuíram este comportamento frágil à cimentação, provavelmente devido à oxidação do ferro. Os testes laboratoriais avançados também mostraram que amostras fofas de rejeitos acumulariam deformação específica sob carga constante. Este acúmulo de deformação específica sob carga constante é chamado de *creep*. Em resumo, os rejeitos estavam fofos, predominantemente saturados e cimentados. A cimentação tornava os rejeitos rígidos e potencialmente com comportamento frágil. Combinadas, estas características resultaram em um material com potencial de perda de resistência significativa e rápida devido às deformações específicas em andamento. As características de rigidez e comportamento frágil dos rejeitos são compatíveis com a falta de observações de deformações antes do rompimento e as reações rápidas e repentinas durante o rompimento.

Análises do estado de tensão dentro da barragem mostraram que partes significativas da barragem estavam sob carregamentos muito elevados devido à inclinação da barragem, ao alto peso dos rejeitos e ao alto nível de água. A combinação de uma barragem íngreme construída a montante, alto nível de água, rejeitos finos fracos dentro da barragem e a natureza frágil dos rejeitos gerou as condições para o rompimento.

A investigação do Painel se concentrou em possíveis gatilhos para a perda súbita e rápida de resistência que fossem capazes de causar o rompimento global visto no vídeo. Reconheceu-se que os gatilhos poderiam ser relativamente pequenos, devido às altas tensões de cisalhamento e a natureza frágil dos rejeitos dentro da barragem antes do rompimento. Também foi reconhecido que os gatilhos poderiam decorrer do efeito cumulativo de vários pequenos eventos.

Nenhum sismo foi registrado na região no dia do rompimento. Embora tenham ocorrido detonações nas minas a céu aberto na área, não houve detonação registrada pelo sismógrafo mais próximo da Barragem I no dia 25 de janeiro de 2019, antes do rompimento. Portanto, sismos e detonações não foram os gatilhos do rompimento.

Entre outubro de 2018 e a data do rompimento, uma série de nove furos de sondagem foi perfurada na região central e superior da barragem. Estes furos foram perfurados para instalar inclinômetros e piezômetros e geralmente se estenderam através da barragem até o solo natural abaixo. A barragem não mostrou sinais de instabilidade durante esta perfuração e não foram detectadas deformações relacionadas às atividades de perfuração. No momento do rompimento, pessoas estavam trabalhando na barragem e uma sonda de perfuração estava sendo usada para instalar piezômetros no topo do Oitavo Alçamento, na parte superior central da barragem. A profundidade deste furo de sondagem, no momento do rompimento, foi estimada em cerca de 80 metros (m) abaixo da superfície da barragem, e o fundo do furo de sondagem estava provavelmente no solo original. A perfuração localizada do furo de sondagem no dia do rompimento não teria desencadeado o rompimento global observado na barragem, como confirmado por simulações computacionais.

Em geral, os níveis de água dentro da barragem estavam caindo lentamente ou permanecendo essencialmente constantes antes do rompimento; portanto, alterações dos níveis da água não são consideradas como um gatilho do rompimento. No entanto, uma forte precipitação durante a estação chuvosa anual (de outubro de 2018 à época do rompimento) provavelmente resultou em

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

uma perda de sucção, produzindo uma pequena redução de resistência nos materiais não-saturados acima do nível da água. Uma análise dos dados pluviométricos revela que a precipitação perto da barragem durante a estação chuvosa antes do rompimento foi mais alta e mais intensa que nos anos anteriores, embora a precipitação foi menor do que a precipitação ocorrida anualmente entre 2008 e 2011. Simulações computacionais mostraram que uma pequena perda de resistência (até 15 quilopascals (kPa)) na zona não-saturada acima do nível da água por si só não seria suficiente para desencadear a instabilidade observada, mas pode ter contribuído para o rompimento, conforme discutido mais adiante.

Simulações computacionais mostraram ainda que tensões de cisalhamento elevadas na barragem resultaram em pequenas deformações específicas internas na barragem ao longo do tempo devido ao *creep*, que são compatíveis com as pequenas deformações superficiais observadas nas imagens de satélite do ano anterior ao rompimento. As simulações confirmaram que este *creep* pode ser suficiente para desencadear a perda de resistência nos rejeitos e o rompimento da barragem, um fenômeno conhecido como “ruptura por *creep*”.

As simulações mostraram ainda que o *creep*, quando combinado com a perda de sucção discutida acima, seria suficiente para desencadear o rompimento global da barragem no dia 25 de janeiro de 2019.

Em resumo, o histórico descrito abaixo gerou as condições de instabilidade na Barragem I:

- Um projeto que resultou em um talude íngreme construído a montante;
- O controle de água dentro da bacia de rejeitos que às vezes permitia que a água do lago de decantação chegasse perto da crista da barragem, resultando no lançamento de rejeitos fracos perto da crista;
- Um recuo de projeto que empurrou as partes superiores do talude para cima dos rejeitos finos mais fracos;
- A falta de drenagem interna significativa que resultou em um nível de água persistentemente alto na barragem, principalmente na região do pé da barragem;
- Alto teor de ferro, resultando em rejeitos pesados com cimentação entre partículas. Esta cimentação gerou rejeitos rígidos que apresentavam comportamento potencialmente muito frágil se submetidos a um gatilho que ensejasse uma resposta não drenada; e
- Precipitação regional alta e intensa na estação chuvosa, o que pode resultar em perda significativa de sucção, produzindo uma pequena perda de resistência nos materiais não-saturados acima do nível da água.

O Painel constatou que o rompimento e o deslizamento de lama resultante decorreram da liquefação estática dos rejeitos dentro da barragem. O histórico descrito acima gerou uma barragem composta principalmente por rejeitos fofos, saturados, pesados, e de comportamento frágil, com altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, resultando em uma barragem

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

marginalmente estável (i.e., próximo ao rompimento em condições não drenadas). Ensaios de laboratório mostraram que a quantidade de deformação específica necessária para desencadear a perda de resistência poderia ser muito pequena, especialmente nos rejeitos mais fracos. Estes foram os principais componentes que tornaram possível a liquefação estática.

O Painel concluiu que a súbita perda de resistência e o rompimento resultante da barragem marginalmente estável foram devidos a uma combinação crítica de deformações específicas internas contínuas devido ao *creep* e uma redução de resistência devida à perda de sucção na zona não-saturada causada pela precipitação intensa no final do ano 2018. Isso seguiu vários anos de precipitação crescente depois de que o lançamento de rejeitos cessou em julho de 2016. As deformações específicas calculadas pré-rompimento a partir de esta combinação de gatilhos correspondem bem às pequenas deformações específicas da barragem detectadas na análise pós-rompimento das imagens de satélite do ano anterior ao rompimento. As deformações específicas internas e a redução de resistência na zona não-saturada alcançaram um nível crítico que resultou no rompimento observado no dia 25 de janeiro de 2019.

**Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento
da Barragem I do Feijão**

ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO.....	i
ÍNDICE	vi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Termos de Referência	1
1.2 Organização do Relatório	1
1.3 Atividades do Painel de Especialistas.....	2
2 O ROMPIMENTO	3
2.1 Descrição do Rompimento	3
2.2 Impactos do Rompimento	13
3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO.....	13
3.1 Por Que o Rompimento Ocorreu?	13
3.2 O Que é Liquefação Estática?	14
3.3 Potenciais Gatilhos de Rompimento.....	15
3.4 Etapas da Investigação	16
4 HISTÓRICO DA BARRAGEM I.....	17
4.1 Abordagem de Projeto e Etapas da Construção.....	17
4.1.1 Drenagem Interna	20
4.1.2 Estabilidade.....	21
4.2 Investigações Geotécnicas.....	22
4.3 Instrumentação da Barragem I.....	22
4.4 Atividades Pós-lançamento de Rejeitos.....	23
4.4.1 Sistema de Gerenciamento de Águas Superficiais.....	24
4.4.2 Drenos Horizontais Profundos (DHPs)	24
4.4.3 Percolação.....	26
4.4.4 Programa de Sondagem em Andamento no Momento do Rompimento.....	27
5 DEFORMAÇÃO DA BARRAGEM I ANTES DO ROMPIMENTO.....	28
6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	30
6.1 Dados Históricos.....	31
6.1.1 Campo.....	31
6.1.2 Laboratório.....	36
6.2 Distribuição do Material.....	36
6.3 Estudos de Campo Realizados Pelo Painel	37
6.4 Ensaios Laboratoriais Realizados Pelo Painel.....	41
6.5 Ensaios Laboratoriais Avançados Realizados Pelo Painel.....	47
6.6 Parâmetros do Material	54

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

7	MOVIMENTO DE ÁGUA DENTRO DA BARRAGEM I ANTES DO ROMPIMENTO.....	57
7.1	Introdução.....	57
7.2	Abordagem.....	58
7.3	Precipitação e Infiltração.....	58
7.4	Análises Bidimensionais.....	58
7.5	Análises Tridimensionais.....	63
7.6	Observações das Análises.....	64
8	ANÁLISES DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO – INVESTIGANDO DIVERSOS GATILHOS.....	64
8.1	Abordagem.....	64
8.2	Estabilidade da Barragem 1.....	64
8.3	Análise de Deformação da Barragem 1.....	66
8.3.1	Abordagem Geral.....	66
8.3.2	Avaliação dos Mecanismos de Desencadeamento (Gatilhos).....	66
8.3.3	Análises de Deformação da Etapa 2.....	69
8.3.4	Etapa 3 das Análises de Deformação.....	71
9	CONCLUSÕES.....	74
10	PERGUNTAS.....	75
	AGRADECIMENTOS.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Localização da Mina do Córrego do Feijão, com vista para o norte com relação a Belo Horizonte e Brumadinho (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018) (texto acrescentado pelos autores).....	4
Figure 2:	Panorama da Mina do Córrego do Feijão, com vista para oeste (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018) (texto acrescentado pelos autores).....	4
Figura 3:	Localização da Barragem I, com vista para oeste (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018) (texto acrescentado pelos autores).....	5
Figura 4:	Barragem I, com vistas ao norte (fonte: Google Earth 3D, imagem de 7 de julho de 2018).....	5
Figura 5:	Deformação inicial observada da parte central da crista.....	6
Figure 6:	Abaulamento acima do pé da Barragem, aproximadamente a um terço da ombreira esquerda (lado direito da fotografia), iniciado cerca de 0,2 s após a primeira deformação observada na crista.....	6
Figura 7:	Continuação do recalque da crista e abaulamento acima do pé com erupção de água acima do pé da barragem em direção à ombreira direita (lado esquerdo da fotografia), cerca de 5,5 s após a primeira deformação observada na crista.....	7

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Figura 8:	Recalque extenso da crista e abaulamento acima do pé com uma segunda erupção de água na região do abaulamento, a cerca de 5,8 s após a primeira deformação observada na crista.....	7
Figura 9:	Desenvolvimento completo do rompimento do talude, com rompimento em massa movendo além do pé da barragem, a cerca de 6,7 s após a primeira deformação observada na crista.....	7
Figura 10:	Regressão do rompimento a 11 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1	8
Figura 11:	Regressão do rompimento a 18 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1	8
Figura 12:	Regressão final do rompimento a 6 minutos e 25 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1	8
Figura 13:	Pouco antes da primeira deformação observada, conforme capturada pela CAM2.....	9
Figura 14:	Recalque inicial da parte central da crista, capturada pela CAM2.....	9
Figura 15:	Regressão do rompimento de liquefação aos 60 s após a primeira deformação observada, conforme capturada pela CAM2	10
Figura 16:	Regressão do rompimento de liquefação aos 98 s após a primeira deformação observada na crista, conforme capturada pela CAM2	10
Figura 17:	Regressão final do rompimento por liquefação 7 minutos e 44 s após o início da primeira deformação observada do rompimento, conforme capturado pela CAM2.....	11
Figura 18:	Rompimento da Barragem I: (a) iniciação observada no centro da crista; (b) 0,2 s após a iniciação observada, mostrando abaulamento inicial da face; (c) 1,4 s após a iniciação observada, mostrando escalonamento; (d) 2,4 s após a iniciação observada, mostrando o colapso alargado da crista e o aumento do abaulamento da face; (e) 2,6 s após a iniciação observada; e (f) 3,6 s após o início observado quando a crista e o abaulamento se juntam em rompimento.	12
Figura 19:	Seção transversal da Barragem I, mostrando alteamentos e estágios da construção.....	20
Figura 20:	Seção transversal mostrando vetores de deformação para os quatro trimestres anteriores ao rompimento	30
Figura 21:	Layout dos ensaios de CPTu realizados em 2005, 2016 e 2018.....	32
Figura 22:	Exemplo do perfil CPTu para o PZE-29-35	33
Figura 23:	Exemplo de ensaio de CPTu (PZE-29-35, a partir da elevação 910 m msl para 878 m msl).....	35
Figura 24:	Seção transversal 3-3 recriada com base em dados históricos, expandida para mostrar detalhes sob a barragem.....	37

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Figura 25:	Vista aérea do rompimento da Barragem 1, aproximadamente na direção sudeste, fotografada em 28 de março de 2019.....	38
Figura 26:	Vista aérea do rompimento da Barragem 1, em direção ao norte, fotografada no dia 28 de março de 2019.....	38
Figura 27:	Exemplo de locais de junho de 2019 na imagem pós-rompimento	39
Figura 28:	Locais de Amostra de Rejeitos Grossos S6a (Esquerda) e S6b (Direita)	40
Figura 29:	Imagem do Google Earth mostrando locais de ensaio para o programa de campo de julho de 2019	41
Figura 30:	Comparação das curvas granulométricas das amostras de 2019 com dados históricos pré-rompimento	42
Figura 31:	Imagem de MEV da amostra 3 sacola 2 – rejeitos grossos	45
Figura 32:	Imagem de MEV da amostra 1 sacola 2 - lamas	45
Figura 33:	Imagem de MEV de rejeitos grossos	46
Figura 34:	Imagem de MEV de rejeitos grossos (detalhe da caixa mostrada na Figura 33). A região destacada com seta mostra a cimentação entre partículas	46
Figura 35:	Gradações criadas para representar gradações médias, grossas e finas para os ensaios	47
Figura 36:	Comparação de CSLs para os rejeitos representativos testados	49
Figura 37:	Comparação de ensaios triaxiais isotropicamente adensado drenados em amostras de gradação média em diferentes parâmetros de estado densos de CS.....	49
Figura 38:	Resultado do ensaio triaxial cid em uma amostra de gradação média adensada para 50 kPa preparada para um estado livre de CS ($\psi = +0,09$)	51
Figura 39:	Resultados dos CAU ($K_0 = 0,5$) ensaios triaxiais controlados por deformação (gradações grossas e finas)	52
Figura 40:	Comparação entre um ensaio de deformação controlada adensado isotropicamente (CID-TX14) e um ensaio de carga controlada adensado anisotropicamente (TXDW01) com o mesmo estado ($\psi = +0,09$) e gradação Grossa.....	53
Figura 41:	Comparação entre um ensaio adensado anisotropicamente e controlado por deformação (CAU-TX25) e um ensaio controlado por deformação controlada por carga (CAU-TXDW02) com o mesmo estado ($\psi = +0,09$) e gradação grossa.....	54
Figura 42:	Distribuição cumulativa de parâmetros de estado para gradações grossas e finas.....	56
Figura 43:	Influência do zoneamento interno na superfície freática (modificado por Vick, 1990)	57

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Figura 44:	Localização dos piezômetros selecionados, indicadores de nível de água e CPTu usados para calibração de infiltração	59
Figura 45:	Níveis médios piezométricos e de água em relação às medições finais no dia 25 de Janeiro de 2019.....	60
Figura 46:	Valores de piezômetros calculados versus observados para um modelo de infiltração 2D na seção transversal 3-3	61
Figura 47:	Pressões de água computadas do modelo de infiltração 2D para a seção transversal 3-3.....	62
Figura 48:	Perfil de pressão da água nos poros ao lado da berma superior na seção transversal 3-3.....	63
Figura 49:	Comparação esquemática no comportamento entre solo que não apresenta perda de resistência, solo com perda de resistência e ausência de cimentação ou com presença de cimentação	66
Figura 50:	Seção 3-3, mostrando as deformações calculadas antes do rompimento devido ao <i>creep</i> junto com uma redução de resistência devido a uma perda de sucção a partir das simulações computacionais tridimensionais (3D)	73
Figura 51:	Seção 3-3, Mostrando as Deformações Calculadas no Rompimento Devido ao <i>Creep</i> , Junto Com Uma Redução de Resistência Devido a Uma Perda de Sucção A Partir das Simulações Computacionais Tridimensionais (3D)	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Detalhes da Construção da Barragem I.....	19
Tabela 2:	Resultados XRD – Amostra de Junho de 2019	43
Tabela 3:	Resultados XRD – Julho de 2019	44

LIST OF APPENDICES

Apêndice A:	Histórico da Construção
Apêndice B:	Dados Geotécnicos Históricos
Apêndice C:	Dados do Histórico da Instrumentação
Apêndice D:	Análise de Imagens
Apêndice E:	Dados Geotécnicos e Interpretação das Investigações de Campo e Laboratório
Apêndice F:	Desenvolvimento de Modelo Computacional 3D
Apêndice G:	Análise de Percolação
Apêndice H:	Análise de Deformação e Estabilidade
Apêndice I:	Análise Sísmica
Apêndice J:	Glossário de Termos

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Termos de Referência

Este relatório apresenta os resultados da avaliação das causas técnicas do rompimento da Barragem I na Mina de Minério de Ferro do Córrego do Feijão da Vale S.A. (“Vale”) (a “Investigação”) realizada por um painel de quatro especialistas em engenharia geotécnica com especialização em barragens de água e rejeitos: Peter K. Robertson, Ph. D. (Presidente); Lucas de Melo, Ph.D.; David Williams, Ph.D.; e G. Ward Wilson, Ph.D. (o “Painel”). A Investigação foi requerida pela Vale.¹ Nenhum membro do painel trabalhou anteriormente para a Vale ou em qualquer assunto relacionado à Barragem I.

O Painel foi instruído a usar sua experiência e julgamento profissional para analisar e avaliar os dados e informações técnicas solicitadas e relevantes para determinar as causas técnicas do rompimento da Barragem I. O Painel não avaliou questões relacionadas à potencial responsabilidade corporativa ou pessoal pelo rompimento; em vez disso, sua incumbência foi expressamente limitada à determinação das causas técnicas do rompimento.

O Painel contou com a assistência de consultores para analisar dados e documentos históricos, avaliar áreas temáticas específicas, realizar ensaios de campo e de laboratório e realizar modelagem computacional. Entre estes consultores estavam: Geosyntec Consultants; Klohn Crippen Berger Ltd. (KCB); Bentley Systems (anteriormente conhecidos como SoilVision); e Geoapp s.r.l. Embora o Painel tenha trabalhado com os consultores durante toda a investigação, as conclusões apresentadas neste relatório refletem o julgamento profissional do Painel e são exclusivamente atribuíveis ao Painel.

1.2 Organização do Relatório

O relatório está dividido em 10 seções e inclui 10 apêndices. A Seção 2 descreve o rompimento, incluindo um comentário das imagens de vídeo que capturam o início do rompimento e um resumo do impacto do rompimento. A Seção 3 explica a metodologia do Painel na condução da Investigação. Ela detalha como o Painel identificou o mecanismo de rompimento, discute os possíveis gatilhos de rompimento e descreve as várias investigações e análises realizadas pelo Painel para determinar os gatilhos. A Seção 4 trata do histórico da Barragem I, incluindo o projeto e a construção dos 10 alteamentos da barragem ao longo de aproximadamente 37 anos, a atividade registrada pelos dispositivos de instrumentação e monitoramento instalados na barragem e certas atividades ou observações registradas após a fase final de construção. A Seção 5 apresenta a análise das deformações pré-rompimento realizada pelo Painel, que analisou o comportamento da barragem antes do rompimento usando imagens de satélite, radar e dados topográficos, além de vídeos disponíveis, inclusive feitos com drones. A Seção 6 detalha a caracterização do solo e rejeitos retidos pela barragem, assim como dos solos naturais abaixo da barragem, usando dados históricos de campo e laboratório

¹ Os especialistas e consultores do Painel foram contratados pelo Escritório de Advocacia Skadden, Arps, Slate, Meagher & Flom LLP (a “Skadden”), que presta consultoria jurídica à Vale. O Skadden assistiu o Painel, inclusive facilitando a coleta e organização de documentos e informações relacionadas à Investigação.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

registrados antes do rompimento, bem como estudos recentes de campo e laboratório realizados pelo Painel. A Seção 7 resume a análise do movimento da água dentro da barragem ao longo do tempo, bem como o papel da precipitação. A Seção 8 apresenta as análises de estabilidade e deformação realizadas pelo Painel e discute as possíveis causas técnicas do rompimento. A Seção 9 resume as conclusões do Painel das perguntas finais apresentadas pela Investigação: quais foram as causas técnicas do rompimento e por que a Barragem I se rompeu naquele dia? A Seção 10 fornece respostas curtas a uma série de perguntas relacionadas ao rompimento.

Os Apêndices do Relatório fornecem detalhes técnicos subjacentes, além de figuras e tabelas adicionais. O Apêndice A apresenta um histórico completo da construção da barragem, começando com a configuração do terreno pré-barragem e continuando com a construção de cada alteamento da barragem, seguido de uma descrição de certas atividades e observações na barragem após a conclusão da construção. O Apêndice B apresenta os dados históricos geotécnicos e de laboratório registrados nos anos anteriores ao rompimento. O Apêndice C descreve os dispositivos de instrumentação e monitoramento utilizados na barragem e apresenta os dados registrados por estes dispositivos nos cinco anos anteriores ao rompimento. O Apêndice D apresenta uma análise detalhada de imagem, utilizando dados de satélite, radar, vídeo, drone e LiDAR. O Apêndice E apresenta os resultados dos estudos de campo e de laboratório conduzidos pelo Painel. O Apêndice F descreve o processo de desenvolvimento do modelo usado para executar as análises de estabilidade e deformação. O Apêndice G detalha a análise de percolação realizada para entender o movimento da água na barragem. O Apêndice H detalha as análises de estabilidade e deformação. O Apêndice I descreve as análises dos registros sismográficos. Um glossário dos principais termos usados está incluído como o Apêndice J ao Relatório.

1.3 Atividades do Painel de Especialistas

O Painel iniciou sua investigação em março de 2019 e concluiu seu trabalho em dezembro de 2019. O Painel analisou documentos, dados e informações obtidos da Vale e também de alguns terceiros,² incluindo o seguinte:

- Imagens de vídeo da Barragem I no dia do rompimento;
- Documentos que refletem o histórico de projeto e construção da barragem;
- Registros relacionados às atividades na barragem;
- Análises, relatórios e apresentações sobre a barragem;
- Dados dos dispositivos de instrumentação e monitoramento instalados na barragem;

² O Painel solicitou certas informações à TÜV SÜD, uma empresa de engenharia e consultoria que realizou trabalhos na Barragem I durante o período relevante, mas a TÜV SÜD não forneceu estas informações.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- Dados de satélite, *light detection and ranging* (LiDAR) e interferometria por radar de abertura sintética (InSAR);
- Imagens de drones e fotografias da barragem; e
- Dados de dispositivos de monitoramento sísmico situados na barragem ou nas proximidades.

Membros do Painel visitaram a Barragem I em março e junho de 2019, a fim de observar suas características, as estruturas vizinhas, a topografia local, e de obter amostras de campo representativas. O Painel também realizou entrevistas com vários funcionários da Vale e terceiros. Em julho de 2019, o Painel realizou um extenso programa de ensaios de campo, e as amostras obtidas durante os ensaios de campo foram examinadas por meio de análises laboratoriais detalhadas. O Painel também realizou modelagem computacional, incluindo análises de percolação e análises de estabilidade e deformação.

2 O ROMPIMENTO

2.1 Descrição do Rompimento

Aproximadamente às 12h28min horário local, no dia 25 de janeiro de 2019, a Barragem I sofreu um rompimento repentino e catastrófico. A barragem liberou um fluxo de lama que rapidamente se deslocou através do refeitório e escritórios da mina, e também sobre casas, fazendas, pousadas, pontes e estradas a jusante. O fluxo de lama se deslocou a jusante, alcançando o Rio Paraopeba.

A localização da Mina do Córrego do Feijão, com relação à cidade de Belo Horizonte ao norte e à cidade de Brumadinho a sudoeste, é mostrada na Figura 1. As Figuras 2 a 4 mostram detalhes da Mina do Córrego do Feijão e da Barragem I antes do rompimento. A barragem estava aproximadamente com 80 metros de altura e com um comprimento de crista de aproximadamente 700 m.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 1: Localização da Mina do Córrego do Feijão, com vista para o norte com relação a Belo Horizonte e Brumadinho (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018) (texto acrescentado pelos autores)



Figura 2: Panorama da Mina do Córrego do Feijão, com vista para oeste (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018) (texto acrescentado pelos autores)

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 3: Localização da Barragem I, com vista para oeste (fonte: Google Earth 3d, imagem de 7 de julho de 2018 (texto acrescentado pelos autores))



Figura 4: Barragem I, com vistas ao norte (fonte: Google Earth 3D, imagem de 7 de julho de 2018)

O rompimento iniciou e se desenvolveu muito rapidamente. O material rompido criou uma onda de lama com uma altura de cerca de 30 m, que primeiro subiu na face jusante da barragem VI adjacente. O fluxo então invadiu parcialmente a área da usina de processamento em frente à Barragem I, antes de envolver o pátio de estocagem. O fluxo varreu o refeitório e os escritórios a jusante antes de parar no rio Paraopeba, próximo a Brumadinho.

Uma característica única do rompimento é que câmeras de vídeo capturaram o momento em que ela começou. Duas câmeras de vídeo estavam instaladas na frente e atrás da barragem.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Uma câmera de vídeo (CAM1) estava localizada acima da usina de processamento no lado oposto do vale da Barragem I e estava voltada para a face a jusante da Barragem I. A outra câmera de vídeo (CAM2) estava localizada na extremidade a montante da barragem e estava voltada para a parte de trás da crista da Barragem I. Uma análise detalhada das imagens de vídeo é fornecida no Apêndice D.

A primeira deformação observada e a progressão inicial do rompimento da Barragem I são capturadas em uma série de fotografias tiradas pela CAM1, mostradas nas Figuras 5 a 11. Estas imagens mostram a progressão do rompimento, começando com o recalque na parte central da crista, estendendo-se por cerca de 80% da barragem (Figura 5). Isto foi seguido de perto, cerca de 0,2 segundo (s) depois, por um abaulamento acima do pé da barragem, aproximadamente a um terço da ombreira esquerda (ou seja, o lado direito da fotografia) (Figura 6). O recalque da crista e o abaulamento continuaram a se desenvolver rapidamente, sem nenhuma deformação observável no pé da barragem.

Cerca de 5 s após a primeira deformação observada na crista, ocorreram outros recalques na crista e abaulamentos acima do pé da barragem e a água parece jorrar na região do pé da barragem a cerca de um terço da ombreira direita (Figura 7). Uma segunda erupção de água mais turva surgiu da área do pé da barragem, quando a superfície da barragem na região do abaulamento começou a se romper (Figura 8).



Figura 5: Deformação inicial observada da parte central da crista



Figura 6: Abaulamento acima do pé da Barragem, aproximadamente a um terço da ombreira esquerda (lado direito da fotografia), iniciado cerca de 0,2 s após a primeira deformação observada na crista

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 7: Continuação do recalque da crista e abaulamento acima do pé com erupção de água acima do pé da barragem em direção à ombreira direita (lado esquerdo da fotografia), cerca de 5,5 s após a primeira deformação observada na crista



Figura 8: Recalque extenso da crista e abaulamento acima do pé com uma segunda erupção de água na região do abaulamento, a cerca de 5,8 s após a primeira deformação observada na crista



Figura 9: Desenvolvimento completo do rompimento do talude, com rompimento em massa movendo além do pé da barragem, a cerca de 6,7 s após a primeira deformação observada na crista

A CAM1 mostra claramente que o rompimento se estende por grande parte da face da barragem e ocorre por dentro do talude da barragem, estendendo-se da crista até a região logo acima do pé da barragem (Figura 9). O rompimento do talude parece ter uma profundidade relativamente rasa.

À medida que a massa de rompimento progredia a jusante, o rompimento regredia para dentro dos rejeitos armazenados na forma de uma série de deslizamentos rápidos, deixando escarpas quase verticais, conforme mostrado nas Figuras 10 a 12. A captura de mais imagens da progressão do rompimento pela CAM1 ficou obscurecida pela poeira e bruma que se elevaram acima da massa de rompimento.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 10: Regressão do rompimento a 11 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1



Figura 11: Regressão do rompimento a 18 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1



Figura 12: Regressão final do rompimento a 6 minutos e 25 s após a primeira deformação observada, conforme capturado pela CAM1

A CAM2 confirmou que o rompimento inicial era relativamente raso e começou logo atrás da crista. A CAM2 também mostra claramente a regressão do rompimento para dentro dos rejeitos armazenados, eventualmente parando perto do solo natural, conforme visto nas Figuras 13 a 17. A CAM2 também mostra que após cada fatia de rompimento, o material do rompimento parece se tornar um líquido pesado.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 13: Pouco antes da primeira deformação observada, conforme capturada pela CAM2



Figura 14: Recalque inicial da parte central da crista, capturada pela CAM2

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 15: Regressão do rompimento de liquefação aos 60 s após a primeira deformação observada, conforme capturada pela CAM2



Figura 16: Regressão do rompimento de liquefação aos 98 s após a primeira deformação observada na crista, conforme capturada pela CAM2

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 17: Regressão final do rompimento por liquefação 7 minutos e 44 s após o início da primeira deformação observada do rompimento, conforme capturado pela CAM2

Uma análise suplementar do vídeo foi realizada, na qual 4 s do rompimento foram extraídos em 120 quadros, como resumido na Figura 18. Inicialmente, a crista da barragem pareceu se deformar para baixo, seguida décimos de segundos depois pelo abaulamento externo inicial acima do pé. Isto foi seguido por deformação inicialmente para cima da área logo acima do pé, que rapidamente mudou para deformação para baixo, enquanto a crista continuava caindo verticalmente. O talude mostra sinais de rompimento completo após cerca de 4 s.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

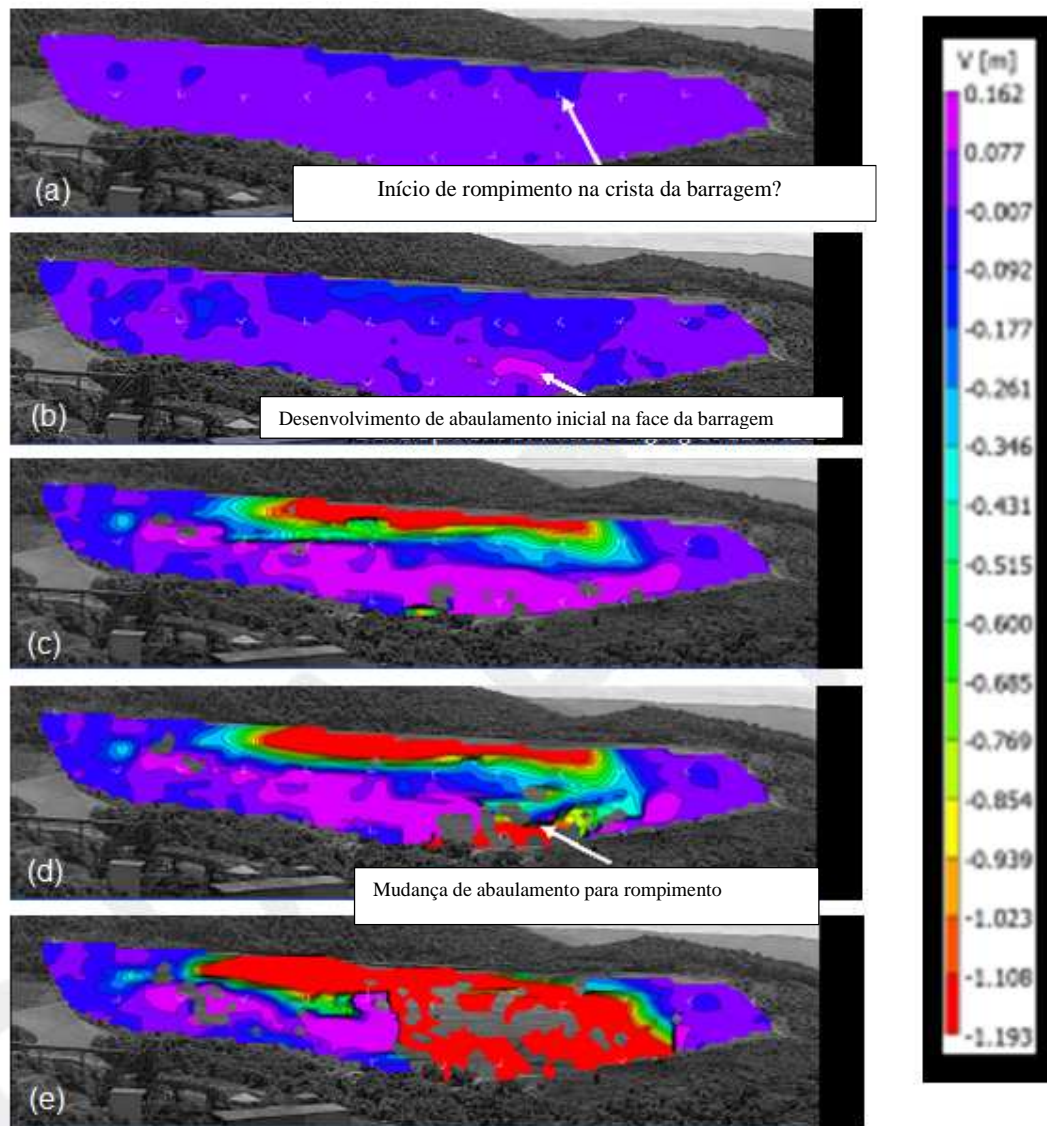


Figura 18: Rompimento da Barragem I: (a) iniciação observada no centro da crista; (b) 0,2 s após a iniciação observada, mostrando abaulamento inicial da face; (c) 1,4 s após a iniciação observada, mostrando escalonamento; (d) 2,4 s após a iniciação observada, mostrando o colapso alargado da crista e o aumento do abaulamento da face; (e) 2,6 s após a iniciação observada; e (f) 3,6 s após o início observado quando a crista e o abaulamento se juntam em rompimento.

O Painel analisou os registros sísmicos do dia do rompimento obtidos de um sismógrafo próximo à barragem. Os registros sísmicos detectaram vibrações no solo de baixa amplitude começando cerca de 28 s antes das primeiras deformações observadas da barragem relacionadas ao rompimento. Essas vibrações de baixa amplitude parecem ser o início da perda de resistência interna que ocorre na barragem antes que todo o mecanismo completo de rompimento fosse visível na superfície. Essas vibrações não tinham as características de um terremoto natural ou

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

de uma detonação. Uma detonação foi registrada cerca de 6 minutos após o rompimento ter sido observado. Detalhes completos são fornecidos no Apêndice I.

2.2 Impactos do Rompimento

Conforme descrito mais adiante no Apêndice D, o satélite *light detection and ranging* LiDAR foi usado para determinar os volumes antes e depois do rompimento, e revela que aproximadamente 9,7 milhões de metros cúbicos (Mm³) de material estiveram envolvidos no rompimento. Esse volume representa aproximadamente 75% do volume pré-rompimento de cerca de 12,7 Mm³ de rejeitos e aterro. A espessura máxima de rejeitos era de aproximadamente 76 m antes do rompimento e o rompimento erodiu até 3 m de solo natural na área central da barragem.

Mais de 250 pessoas morreram como resultado do colapso, a maioria delas funcionários da mina. O refeitório e escritórios da administração da mina, bem como três locomotivas e 132 vagões foram soterrados na área da mina. O fluxo de lama destruiu algumas partes do distrito do Córrego do Feijão, incluindo uma pousada, várias propriedades rurais, e também seções de uma ponte ferroviária e cerca de 100 m de ferrovia. Áreas agrícolas no vale abaixo da barragem também foram afetadas pelo do rompimento.

3 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

A investigação do Painel aborda as três perguntas a seguir:

- Por que ocorreu o rompimento?
- Quais foram os gatilhos do rompimento?
- Por que o rompimento ocorreu quando ocorreu?

Esta seção explicará que o rompimento foi o resultado de um fenômeno chamado liquefação estática. Em seguida, explicará a metodologia do Painel para avaliar a segunda e a terceira questões relacionadas ao(s) gatilho(s) do rompimento.

3.1 Por Que o Rompimento Ocorreu?

Conforme discutido acima, os vídeos do rompimento fornecem uma imagem clara do mecanismo de rompimento e revelam que o rompimento ocorreu dentro do talude da barragem como resultado de uma perda de resistência significativa e repentina.

A superfície do rompimento parece ser relativamente rasa, estendendo-se da crista da barragem até uma área ligeiramente acima do pé da barragem e se estendendo por aproximadamente 80% da área da barragem. A crista da barragem cai, quase verticalmente, enquanto a área ligeiramente acima do pé da barragem, apresenta um abaulamento. A CAM1 mostra que o rompimento inicial do talude resultando no rompimento completo do maciço ocorreu dentro de um período de cerca de 10 s. Após o rompimento do primeiro talude, rompimento subsequentes de fatias finas, estendendo-se progressivamente até a bacia de rejeitos. Cada fatia

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

de rompimento parece ser relativamente fina e ocorre em rápida sucessão aproximadamente a cada 10 s. CAM1 e CAM2 mostram que os rejeitos parecem agir como um líquido pesado imediatamente após o rompimento. A CAM2 mostra que dentro de um período de cerca de 5 min, a grande maioria dos rejeitos da barragem foi removida da bacia.

Com base nas imagens de vídeo, o rompimento é o resultado da liquefação estática dos materiais retidos pela barragem. A perda de resistência significativa e repentina indica que os materiais apresentavam comportamento frágil.

3.2 O Que é Liquefação Estática?

O fenômeno da liquefação do solo é reconhecido há muitos anos. Terzaghi e Peck (1967)³ se referiram à “liquefação espontânea” para descrever a súbita perda de resistência de solos muito fofos, como areia, que causaram deslizamentos devido a um leve distúrbio. Fluxo por liquefação também é chamada de liquefação estática.⁴ No entanto, como o fenômeno pode ser desencadeado por carga estática ou cíclica, o termo “fluxo por liquefação” (*flow liquefaction*) é comumente utilizado.* A liquefação estática pode ocorrer em qualquer solo metaestável saturado ou quase saturado, como areias e silte muito fofos, bem como argilas sensíveis. A liquefação estática foi observada em argilas sensíveis na Noruega e no leste do Canadá,⁵ bem como em barragens de rejeitos.⁶ Para o rompimento de uma estrutura do solo, como um talude ou uma barragem, um volume suficiente de material deve sofrer perda de resistência. O rompimento resultante pode ser um deslizamento ou fluxo, dependendo das características dos solos e da geometria do terreno. As deformações resultantes do rompimento são devidas a tensões internas induzidas pela gravidade e podem ocorrer após a ocorrência do mecanismo de gatilho.

O solo é constituído por partículas, e a resistência ao cisalhamento deve-se principalmente ao atrito entre essas partículas. A magnitude da resistência ao cisalhamento é controlada pela tensão normal (efetiva) entre as partículas do solo, que é controlada pelo peso do solo acima (i.e., a tensão geostática) e a pressão da água nos espaços vazios. Quanto maior a tensão geostática efetiva, maior a resistência ao cisalhamento. Quando os solos são saturados com água, quanto maior a pressão da água, menor a resistência ao cisalhamento. Em um talude, as tensões de cisalhamento que conduzem à uma potencial instabilidade também se devem ao peso dos solos acima. Quanto mais íngreme o talude e quanto mais pesados os solos dentro do talude, maior a tensão de cisalhamento.

³ Terzaghi, K., & Peck, R. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2nd ed.). New York: John Wiley.

⁴ E.g., Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil liquefaction: A critical state approach* (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

* O termo “liquefação estática” é normalmente utilizado na língua portuguesa e será utilizado nesta tradução.

⁵ E.g., Geological Survey of Norway. (n.d.). Quick clay and quick clay landslides. Retrieved from <https://www.ngu.no/en/topic/quick-clay-and-quick-clay-landslides>

⁶ E.g., Martin, T., & McRoberts, E. (1999). Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams. Proceedings from Tailings and Mine Waste '09: *The 13th International Conference on Tailings and Mine Waste*. Edmonton, AB: University of Alberta Geotechnical Centre.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Existem espaços vazios entre as partículas do solo. As partículas podem se mover sob carregamento ou descarregamento (cisalhamento), e os espaços vazios podem diminuir (contração de solos fofos) ou aumentar (dilatação de solos densos) em volume. A perda de resistência durante a liquefação estática é devida a uma tendência do solo sofrer uma rápida contração de volume quando cisalhado. A rápida contração do volume é essencialmente um colapso interno da estrutura do solo ao nível das partículas. Em alguma profundidade, os espaços vazios do solo são preenchidos com água e, quando a tendência para a rápida contração do volume ocorre rapidamente, a tensão no solo é transferida para a água, resultando em um rápido aumento da pressão da água. Esse rápido aumento da pressão da água causa uma rápida diminuição da tensão efetiva normal entre as partículas do solo, e as partículas podem essencialmente flutuar na água. Essa diminuição da tensão efetiva normal entre as partículas do solo pode então resultar em perda rápida e significativa da resistência ao cisalhamento.

A perda de resistência devido à liquefação estática ocorre quando o carregamento ou o descarregamento resultam em deslizamento entre as partículas do solo, produzindo uma tendência à rápida contração do volume.

Para ter instabilidade em uma barragem devido à liquefação estática, são necessárias as seguintes condições:

- Materiais saturados fofos que apresentam uma tendência a rápida contração de volume sob carregamento, resultando em baixas resistências de cisalhamento não drenadas (liquefeitas);
- Altas tensões de cisalhamento no talude em relação às resistências não drenadas liquefeitas;
- Evento(s) que podem servir de gatilho à perda de resistência nos materiais; e
- Um volume suficiente de materiais saturados fofos para que a instabilidade se manifeste.

3.3 Potenciais Gatilhos de Rompimento

Existem muitos eventos que podem desencadear a liquefação estática. A seguir, apresentamos uma lista dos potenciais gatilhos que foram considerados pelo Painel:

- Carregamento rápido, como construção ou lançamento de rejeitos;
- Carregamento cíclico rápido, como sismos ou detonações;
- Carga por fadiga, como detonações repetidas;
- Descarregamento, como:
 - Aumento dos níveis de água no solo; e

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- Movimentos, como dentro da fundação ou devido à presença de camadas fracas;
- Erosão interna e/ou *piping*;
- Interação humana;
- Perda localizada de resistência devido ao fluxo de nascentes subterrâneas;
- Perda de sucção e resistência em zonas não-saturadas acima do nível da água; e
- *Creep* (deformações específicas que se desenvolvem com o tempo sob carga constante).

3.4 Etapas da Investigação

Para determinar quais desses eventos desencadearam o rompimento da Barragem I e por que o rompimento ocorreu quando ocorreu, o Painel realizou a Investigação em uma série de etapas resumidas abaixo:

- Observar o rompimento através da análise de vídeo;
- Revisar os documentos de referência;
- Entrevistar pessoal relevante;
- Observar a barragem através de visitas de campo;
- Investigar possíveis deformações específicas antes do rompimento, como:
 - Medições de deformação:
 - Marcos topográficos
 - Inclinômetros
 - Análises integradas das imagens disponíveis, como:
 - Vídeo
 - Radar
 - Laser (LiDAR)
 - Satélite (InSAR e fotografias)
 - Vídeos de drone
- Compreender a distribuição e condição dos materiais dentro e sob a barragem;
- Compreender o comportamento dos materiais;

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- Compreender o papel da água;
- Avaliar potencial atividade sísmica;
- Revisar as interações e atividades humanas na barragem; e
- Modelar e testar numericamente o comportamento da barragem para investigar e eliminar possíveis eventos que acionaram o gatilho.

4 HISTÓRICO DA BARRAGEM I

O histórico da Barragem I, incluindo aspectos do projeto e construção, é discutido em detalhes no Apêndice A. O Apêndice A inclui uma descrição do local e da área adjacente, bem como o projeto e a construção de cada alteamento da barragem. Também resume atividades significativas e eventos importantes que informam a compreensão da estrutura e características da barragem.

Investigações de campo e testes de laboratório realizados antes do rompimento da barragem são apresentados no Apêndice B. Detalhes dos dispositivos de instrumentação e monitoramento instalados na barragem e os dados associados são apresentados no Apêndice C.

4.1 Abordagem de Projeto e Etapas da Construção

A Barragem I foi desenvolvida para armazenar rejeitos produzidos durante as operações de mineração na mina Córrego do Feijão. A Barragem I foi construída em uma área constituída por rochas de gnaisses, sobrepostas por solos saprolíticos, residuais e colúviais. A barragem estava localizada em um vale próximo à mina, onde a construção da barragem poderia criar uma capacidade substancial para descarte de rejeitos. Ao construir a barragem, o riacho na base do vale foi bloqueado, necessitando de um processo para encaminhar a água do córrego para o riacho Feijão a jusante da barragem. A construção da barragem e da bacia de rejeitos eliminou o riacho como ponto de descarga de águas subterrâneas, resultando em um aumento nas elevações das águas subterrâneas nos rejeitos à medida que o desenvolvimento prosseguia.

A Barragem I foi construída ao longo de um período de 37 anos, de 1976 a 2013, em 15 etapas, correspondendo a 10 alteamentos. Um resumo do histórico é mostrado na Tabela 1, e os alteamentos e as etapas são ilustrados esquematicamente na seção transversal da Figura 19. Como mostrado na Figura 19, o Quarto Alteamento foi recuado em comparação com os três alteamentos anteriores, resultando no endireitamento e na modificação da linha central da barragem. O recuo reduziu a inclinação geral da barragem, mas moveu a parte superior da barragem sobre rejeitos mais fracos e finos e aproximou a água de sua face. Ter água mais próxima da face também pode limitar a secagem dos rejeitos na superfície, em razão de sua exposição ao sol e ao vento. Não foram construídos novos alteamentos após 2013 e o depósito de rejeitos na estrutura cessou em julho de 2016.

A barragem foi construída usando o método a montante, com cada alteamento consistindo de uma berma construída sobre os rejeitos previamente depositados e drenados. Na maioria dos

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

casos, os materiais utilizados para a construção dos alteamentos da barragem foram obtidos a partir dos rejeitos da praia, perto da crista da barragem. Quando os rejeitos foram escavados na praia perto da barragem, as escavações resultantes criariam pontos fracos sob os futuros alteamentos devido ao rápido preenchimento com rejeitos de todos os tamanhos.

A construção a montante resultou em movimento da crista a montante ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 19. Usando esse método, a barragem foi construída a uma altura total de 86 m (pé a crista), com a cota final da crista de 942 metros acima do nível médio do mar (m nmm) e um comprimento de crista de 720 m. A altura de cada alteamento variou de 5 a 18 m. Os taludes a montante e a jusante das bermas construídas em cada alteamento variaram de 1,5 na horizontal a 1 na vertical (1,5H:1V) a 2,5H:1V; no entanto, inclinações de 2H:1V foram usadas na maioria dos casos.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Tabela 1: Detalhes da construção da Barragem I⁷

Estágio	Ano	ID do alteamento	Cota da crista (m nmm)	Altura máxima (m)	Empresa do Projeto	Empresa de Construção
1	1976	Barragem Inicial (Primeiro)	874	18	Christoph Erb	Emtel
2	1982	Segundo	877	21	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23		Desconhecido
4	1984		884	28		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33		Desconhecido
6	1990		891,5	35,5		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991	Terceiro	895	39.	Chammas Engenharia	Construtora Sul Minas
8	1993		899	43		Desconhecido
9	1995	Quarto	905	49	Tecnosolo	CMS Constr. SA
10	1998	Quinto	910	54		U & M
11	2000	Sexto	916,5	60,5		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	Sétimo	922,5	66,5		Construtora Impar Ltda.
13	2004	Oitavo	929,5	73,5		Integral
14	2008	Nono	937	81	Geoconsultoria	Integral
15	2013	Décimo	942	86	Geoconsultoria	Salum Enga

⁷ A tabela foi modificada da Revisão Periódica de Segurança de Barragem Mina Córrego Feijão – Barragem I Relatório Técnico (TÜV SÜD 2018) (“Revisão Periódica de Segurança da TÜV SÜD de 2018”).

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

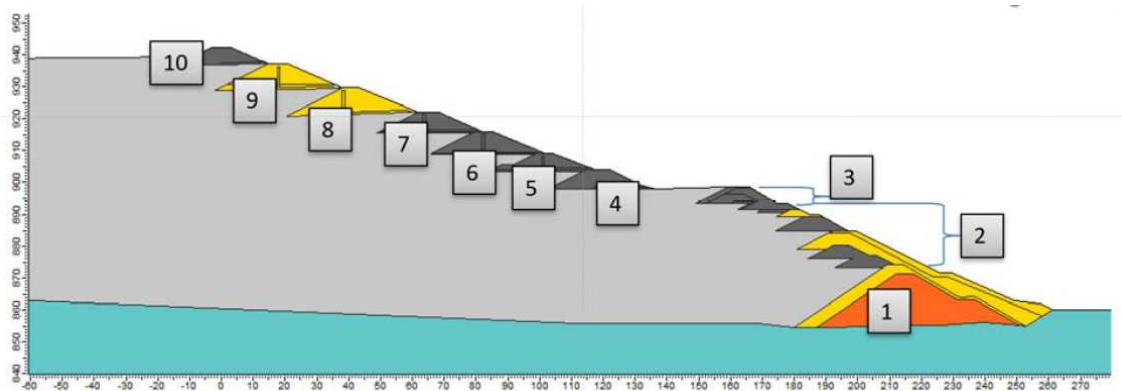


Figura 19: Seção transversal da Barragem I, mostrando alteamentos e estágios da construção⁸

As subseções abaixo fornecem um resumo das principais características e especificações de projeto para a barragem, com base nos desenhos e no texto fornecidos nos documentos de projeto para cada alteamento. Como os desenhos “*as built*” não foram preparados ou não estavam disponíveis para análise, muitas das características e especificações de projeto descritas abaixo são baseadas no entendimento do Painel sobre o plano de construção da barragem, em vez de na confirmação do que foi construído.

4.1.1 Drenagem Interna

A Barragem Inicial não possuía recursos de drenagem interna para direcionar a percolação da bacia para a face da barragem, o que poderia ter reduzido a pressão da água agindo contra a barragem e aumentado sua estabilidade. O projeto previa a construção de uma camada de solo laterítico nas faces a montante e a jusante da Barragem Inicial. O Painel não encontrou nenhum registro de projeto ou construção de recursos de drenagem para a transferência de percolação de dentro ou de trás da Barragem Inicial através dessas camadas de laterita.

O projeto de cada alteamento subsequente, exceto em algumas etapas do Segundo Alteamento, incluía recursos de drenagem interna destinados a facilitar a secagem dos rejeitos adjacentes. Para o Segundo, Terceiro e Quarto alteamentos, o projeto incluiu recursos de drenagem interna que normalmente consistiam em uma camada de drenagem horizontal na base da berma, composta por síter ou cascalho e um tubo de coleta longitudinal que drenava para um canal de concreto no talude a jusante. Para o quinto e subsequentes alteamentos, os projetos especificaram sistemas de drenagem interna consistindo de camadas de drenagem verticais e horizontais (“filtros”) construídas em forma de “L” e pequenos tubos de policloreto de vinila (PVC) de plástico projetados para direcionar a drenagem para canais de concreto ao longo do pé do talude a jusante do alteamento.

Os projetos para o Segundo, Terceiro, Quarto e Quinto alteamentos especificaram uma camada de baixa permeabilidade no talude a montante. O projeto para o Nono e o Décimo Alteamentos especificava que o talude a montante e a crista da berma seriam cobertas de cascalho laterítico.

⁸ Revisão periódica de segurança 2018 da TÜV SÜD. Numeração adicionada pelos autores.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Para quase todos os alteamentos, os documentos de projeto especificaram que as encostas a jusante das bermas devem ser cobertas de grama, presumivelmente para evitar a erosão da superfície.

Embora os drenos de pé e os tapetes drenantes tenham sido construídos na maioria dos alteamentos, a barragem de rejeitos em geral teve muito pouca drenagem, porque as bermas a montante foram construídas com materiais de baixa permeabilidade. Isso, além do fato de uma drenagem interna inadequada ter sido instalada na barragem durante a construção inicial, contribuiu para altos níveis de água na barragem e bacia.

4.1.2 Estabilidade

Os documentos de projeto indicam que os cálculos de estabilidade, e fatores de segurança de projeto correspondentes (FS), foram concluídos para cada alteamento, embora o tipo e a complexidade dos cálculos de estabilidade variassem entre os alteamentos e geralmente se tornassem mais sofisticados e detalhados com o passar do tempo. Os cálculos históricos de estabilidade usavam parâmetros de resistência ao cisalhamento que variavam dependendo das premissas de engenharia, e essas variações contribuíram para algumas das mudanças no FS calculado ao longo do tempo.

Os cálculos de estabilidade foram realizados para vários alteamentos; condições não drenadas foram consideradas nos cálculos de estabilidade para o Quinto Alteamento em diante. Com base em análises para a Barragem Inicial, e para o Segundo e Terceiro Alteamentos, os projetistas concluíram que o projeto alcançou FS satisfatório para condições drenadas. Nos documentos de projeto para o Quarto Alteamento, os cálculos de estabilidade resultaram em FS que foram considerados pelos projetistas como abaixo dos valores que considerariam o ideal. Além disso, durante o projeto e/ou construção do Quarto Alteamento, observou-se percolação na face da barragem, representando condições consideradas pelos projetistas como “muito desfavoráveis” e “não recomendadas para a segurança da barragem.”⁹⁹

Os cálculos de estabilidade para o Quinto Alteamento identificaram mais condições potencialmente instáveis, incluindo a possibilidade de liquefação dinâmica, levando a uma condição de resistência não drenada. Os documentos de projeto para o Sexto Alteamento indicaram que os cálculos de estabilidade foram realizados, considerando cenários em que os materiais exibiram resistências drenadas e não drenadas. O relatório de projeto do Sexto Alteamento também reconheceu os efeitos desestabilizadores de condições piezométricas elevadas, e os projetistas indicaram que o FS calculado era menor do que o necessário. Para o Sétimo Alteamento, os valores de FS resultantes de cálculos de estabilidade para condições drenadas e não drenadas foram considerados aceitáveis pelos projetistas.

Os cálculos de estabilidade não foram incluídos nos documentos de projeto disponíveis para o Oitavo Alteamento. Nos documentos de projeto para o Nono e Décimo Alteamentos, foram realizadas análises de estabilidade para 10 seções transversais. Um modelo de percolação foi

⁹ Veja o Apêndice A.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

criado para estimar a elevação da água na barragem (isto é, condições freáticas) que existiria após as bermas serem elevadas e os rejeitos depositados.

4.2 Investigações Geotécnicas

As investigações geotécnicas ocorreram em conexão com o desenvolvimento do projeto de vários alteamentos. O Painel geralmente não se ateve aos dados coletados durante as investigações anteriores porque o Painel não considerou que os dados estavam adequadamente documentados. Várias investigações geotécnicas abrangentes foram conduzidas em 2005, 2016 e 2018, cujos detalhes serão discutidos na Seção 6 e mais detalhadamente no Apêndice B.

4.3 Instrumentação da Barragem I

Os seguintes dispositivos de instrumentação e monitoramento foram instalados na Barragem I ou nas proximidades:

- Piezômetros e indicadores de nível de água;
- Inclinômetros;
- Medidores de vazão;
- Marcos topográficos;
- Pluviômetros;
- Estações meteorológicas; e
- Um medidor de nível do reservatório.

As informações sobre cada tipo de instrumento e os dados registrados durante o período de cinco anos antes do rompimento são apresentadas no Apêndice C. Os marcos topográficos são discutidos na Seção 5 e são descritos mais detalhadamente no Apêndice D.

Piezômetros e Indicadores de Nível de Água: Os piezômetros eram, na sua maioria, do tipo Casagrande, com uma zona de medição de aproximadamente 1 m de comprimento próximo à parte inferior do tubo. Os piezômetros foram instalados em várias profundidades e maioritariamente agrupados na região central da barragem. Dados de piezômetros estavam disponíveis para 113 piezômetros instalados desde abril de 1996 até o rompimento, embora nem todos os dados fossem suficientemente confiáveis para serem usados pelo Painel. Antes de setembro de 2018, quase todos os piezômetros eram lidos manualmente e em periodicidade mensal, aproximadamente. Por volta de agosto de 2018, as medições em aproximadamente metade dos piezômetros foram automatizadas usando sensores elétricos (transdutores de pressão) que foram colocados dentro dos tubos preexistentes. As leituras mensais foram realizadas nos sensores automatizados até dezembro de 2018. A partir de 10 de janeiro de 2019,

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

os piezômetros automatizados foram conectados a um registrador de dados (*data-logger*) e os dados eram registrados em intervalos de 5 min, até o rompimento.

Os indicadores de nível de águas rasas (INAs) também foram instalados na face a jusante e adjacentes à barragem, e eram compostos por um tubo vertical aberto com uma zona de medição completa. Os dados estavam disponíveis para 50 indicadores de nível de água, alguns deles desde 1995, embora nem todos os dados fossem suficientemente confiáveis para serem usados pelo Painel. Mais de 40 indicadores de nível de água eram medidos ativamente, em vários intervalos.

Inclinômetros: Foram relatados dados de seis inclinômetros ativos instalados ao longo da Barragem I, dentro do aterro e rejeitos. Estes inclinômetros eram lidos manualmente. Os dados para dois inclinômetros estavam disponíveis de maio de 2016 a dezembro de 2018, com leituras realizadas aproximadamente a cada dois meses durante esse período. Os quatro inclinômetros restantes foram instalados no início de dezembro de 2018 e foram medidos apenas uma vez no final de dezembro de 2018, o que não permitiu determinar medidas relativas. Os dados dos inclinômetros não indicaram deformações relativas ou absolutas significativas.

Medidores de vazão: Medidores de vazão foram usados para medir o fluxo de água proveniente de drenos subterrâneos no local onde eram descarregados nos canais de drenagem de superfície. As informações estão disponíveis para mais de 50 drenos, que foram instalados desde 1990. Os dados desses medidores de vazão geralmente mostram vazões relativamente baixas, apesar dos altos níveis de água presentes na barragem, o que indica que os drenos servem como atributos próximos à superfície ao invés de um sistema de drenagem em toda a barragem.

Além dos drenos relativamente rasos que foram instalados durante a construção, há dados disponíveis dos drenos horizontais profundos (DHPs) instalados em 2018. Dados de medição para estas localizações eram disponíveis de maio até julho de 2018 e de outubro até dezembro de 2018, e indicavam que o fluxo dos DHPs era entre 2.6 e 7.3 m³/h (Apêndice C).

Pluviômetros e estações meteorológicas: Dados pluviométricos e climáticos estavam disponíveis em vários pluviômetros e estações meteorológicas localizadas na barragem ou nas proximidades da barragem, monitoradas pela Vale ou pelo governo federal brasileiro. Dados de chuva e clima foram usados no cálculo do movimento da água dentro da barragem e são discutidos na Seção 7, bem como nos Apêndices C e G.

Medidor de nível do reservatório: Um medidor de nível do reservatório foi instalado para medir a elevação da água da superfície dentro da bacia de rejeitos. Os níveis dos reservatórios foram medidos manualmente entre 2006 e 2017. Entende-se que, depois que os rejeitos não foram mais colocados na bacia, o nível de água na bacia de rejeitos caiu para um nível abaixo do que poderia ser medido usando o medidor de reservatório.

4.4 Atividades Pós-lançamento de Rejeitos

Após a conclusão da décima berma de alteamento em 2013, nenhuma construção adicional ocorreu para alterar a elevação da Barragem I. Nenhum rejeito foi lançado após julho de 2016,

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

mas algumas atividades foram realizadas e observações registradas que fornecem informações relacionadas às condições e desempenho da Barragem I após julho de 2016. Esta seção descreve as atividades e eventos que ocorreram após a conclusão do Décimo Alteamento, relacionados às atividades de gerenciamento de águas superficiais, instalação de DHPs, ocorrência de percolação e trabalhos de sondagem. Mais detalhes estão disponíveis no Apêndice A.

4.4.1 Sistema de Gerenciamento de Águas Superficiais

Entre julho de 2016 e a data do rompimento, as atividades associadas ao sistema de gerenciamento de águas superficiais envolveram o controle do nível da água no lago de decantação e a manutenção dos recursos de controle de águas superficiais na face da barragem para que eles pudessem transmitir água para longe da barragem.

Depois que a Barragem I parou de receber rejeitos em julho de 2016, foram feitos esforços para remover a água da área de bacia de rejeitos. O volume de água no lago de decantação foi reduzido significativamente após maio de 2016, bombeando água para o extravasor, resultando em uma profundidade rasa de água parada no lago de decantação longe da barragem. Em 2018, o desvio de água de uma nascente de superfície na parte traseira da bacia para o extravasor foi concluído. Durante o período operacional restante, houve vários relatórios de necessidades de manutenção e reparos no sistema de esgotamento de água no lago de decantação. Nos vários meses anteriores ao rompimento, houve relatos de que as bombas na barragem não estariam funcionando e estariam sendo reparadas, além de relatos de desconexão e reparo da tubulação usada para encaminhar a água das bombas para o extravasor.

O projeto da barragem incluía recursos de drenagem de águas superficiais para direcionar a água a partir da face da barragem. O sistema de drenagem superficial consistia em um conjunto de canais revestidos de concreto para direcionar a água lateralmente, descendo a face da barragem, até o riacho. A manutenção incluiu a remoção periódica de sedimentos que se acumulavam nos canais e a reconstrução dos canais de superfície. Em particular, em 2018, vários canais foram limpos de sedimentos, nivelamento foi realizado para melhorar a drenagem inadequada em várias áreas e a vegetação foi removida para impedir a restrição do fluxo. Em julho de 2018, o barramento da nascente que entra no fundo da bacia foi concluído com o objetivo de evitar que água entrasse na bacia. As melhorias nos sistemas de barramento e desvio de água continuaram até o final de 2018, conforme detalhado nos Apêndices A e D.

Além disso, como parte dos esforços associados ao aprimoramento do gerenciamento das águas superficiais, dois canais foram reconstruídos entre setembro e dezembro de 2018. Um desses canais estava localizado próximo à ombreira esquerda da barragem; o outro canal estava localizado nas proximidades do DHP 15.

4.4.2 Drenos Horizontais Profundos (DHPs)

A partir do final de 2017, a instalação de DHPs foi considerada como um possível mecanismo para reduzir os níveis de água dentro da barragem para melhorar a estabilidade. O procedimento de instalação para os DHPs incluiu as seguintes etapas principais:

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- A perfuração foi avançada com pressão de ar, usando uma broca descartável em um ângulo ascendente de 5% através das bermas compactadas;
- O revestimento de aço foi introduzido e o furo foi estendido com água, com retorno de água limpa normalmente alcançado, o qual foi direcionado para um canal de superfície descendente; e
- Um dreno horizontal de PVC de 50 mm foi instalado e os primeiros 25 m foram então vedados com uma mistura de cimento/bentonita.

O tamanho do compressor foi especificado para atingir 100 m de profundidade, e os procedimentos de instalação declararam que o compressor “opera sob demanda” até 600 kPa (ou seja, até 60 m de água). Os rejeitos na barragem mostraram-se muito moles, exigindo pouco torque para avançar a broca. O avanço da perfuração foi alcançado principalmente por pressão (ar e/ou água), com rotação mínima para aliviar o atrito da haste. Uma pressão constante de água de cerca de 400 kPa foi então adicionada à pressão do ar (nominalmente 600 kPa), fornecendo uma pressão total de até 1000 kPa, para avançar a perfuração além de uma profundidade de 40 m.

A instalação dos DHPs começou em março de 2018 e, em maio de 2018, 13 DHPs estavam instalados. Oito dos DHPs iniciais estavam localizados ao longo do pé do recuo, através do Quarto Alçamento. Dois DHPs foram instalados no Oitavo Alçamento e um no Sexto Alçamento, mas pouca ou nenhuma vazão foi registrada nesses três DHPs. Dois DHPs foram instalados próximos ao pé da barragem: um próximo à ombreira direita e outra perto da ombreira esquerda. Os registros de campo estavam disponíveis para análise e indicaram que nenhum dos DHPs alcançou o comprimento pretendido originalmente (ou seja, 100 m); o comprimento típico era de cerca de 60 m, com um comprimento máximo relatado de pouco mais de 80 m. Registros de vazão registrados a partir dos DHPs são fornecidos no Apêndice C.

Em junho de 2018, a instalação dos DHPs restantes começou e nenhum problema foi relatado com a instalação do DHP 14 através do Quarto Alçamento, no pé do recuo. No entanto, durante a instalação, em 11 de junho de 2018, do DHP 15 na Barragem Inicial, no pé da região central da barragem, mas um pouco mais perto da ombreira direita, foi observado o seguinte:

- A perfuração começou por volta das 8h20 horário local e prosseguiu até o meio-dia, até 83 m de comprimento;
- A perfuração foi retomada às 13h00 horário local com revestimento instalado a um comprimento de 61 m;
- A perfuração parou entre 14h00 e 16h30 horário local devido à perda de pressão observada no furo quando o mesmo passou do aterro da berma para os rejeitos;
- Houve uma perda de recirculação de água no furo, condição sob a qual a perfuração não pôde ser avançada;

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- Ocorreu um colapso do furo em torno da haste de perfuração e a haste de perfuração foi perdida no furo;
- Havia fluxo de lama (água com colóides) do furo;
- Percolação e fluxo superficial foram observados em uma área localizada a aproximadamente 15 m do furo em direção à ombreira esquerda, perto de um canal de vertedouro de superfície;
- O furo foi vedado com uma mistura de cimento e o revestimento foi perdido; e
- Os níveis piezométricos nos piezômetros próximos PZM-7 e PZM-9 aumentaram aproximadamente 0,6 m e 3,5 m, respectivamente, logo após o evento; o PZC-16 e o PZC-24 também apresentaram aumentos nos níveis piezométricos, embora muito menores, de aproximadamente 0,3 m.

Após o incidente com o DHP 15, as atividades de instalação do DHP cessaram e os técnicos trabalharam por aproximadamente três dias para remediar o incidente através da remoção de água e uso de sacos de areia. A área foi monitorada a cada 30 minutos, inclusive durante a noite, até que os níveis piezométricos retornassem ao normal, o que ocorreu em algumas horas. Um tubo bloqueado foi identificado e liberado próximo ao local onde o DHP 15 foi instalado. Outro tubo bloqueado foi encontrado a aproximadamente 20 m da localização do DHP 15; quando este tubo foi desobstruído, os fluxos no DHP 15 diminuíram significativamente, assim como o fluxo no tubo encontrado próximo ao DHP 15. Em alguns dias, os relatórios indicaram que os fluxos próximos à área do DHP 15 caíram significativamente. Após esse incidente, um filtro invertido foi instalado no local onde os fluxos de superfície foram observados. Nenhum outro DHP foi instalado após o incidente com o DHP 15.

A análise do Painel de registros sísmográficos próximos à barragem registrados em 11 de junho de 2018, mostrou vibrações no solo de baixa amplitude registradas por volta das 13h36min hora local (veja o Apêndice I). Esses registros tiveram amplitude semelhante às vibrações do solo registradas pouco antes do rompimento no dia 25 de janeiro de 2019. No entanto, não se sabe se esses dois eventos tiveram uma causa semelhante. As vibrações registradas são extremamente pequenas e podem ser atribuídas a inúmeros eventos. Dado o que se sabe sobre o horário do incidente do DHP, é possível que as vibrações registradas em 11 de junho de 2018 possam refletir a fratura hidráulica localizada, causada pelo DHP 15, juntamente com alguma perda de resistência localizada. As vibrações registradas no dia 25 de janeiro de 2019, pouco antes do rompimento visível, provavelmente também refletem uma perda de resistência que pode estar associada ao início interno do rompimento.

4.4.3 Percolação

O projeto da Barragem I incluiu um sistema de drenos laterais e subterrâneos, conforme descrito na Seção 4.1.1. Os fluxos desses recursos de drenagem foram coletados nos canais e tubulações de superfície e monitorados por meio de medidores de vazão, conforme discutido no Apêndice C.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Percolação foi observada e relatada em vários momentos ao longo da história da Barragem I. Por exemplo, percolação foi relatada na superfície da berma do Segundo Alteamento já em 1983, e percolação foi relatada na Barragem Inicial durante o projeto do Quarto Alteamento. Foi observada percolação ao longo do talude a jusante, perto do pé do Quarto Alteamento, na época do projeto do Nono e Décimo Alteamento em 2006.

Com base em observações informais, a percolação era recorrente nas partes inferiores da face a jusante da barragem, desde pelo menos a construção do Quarto Alteamento. No entanto, as auditorias técnicas anuais de segurança da barragem realizadas após a conclusão do Décimo Alteamento geralmente não identificavam preocupações com a percolação, até cerca de 2018. Uma auditoria de 2018 indicou a transição de percolação de “boas práticas” para “não conformidade moderada” a partir do início de 2018.¹⁰ Em julho de 2018, uma avaliação de desempenho da Barragem I indicou a observação de umidade na seção central da barragem durante a construção do sistema de divergência da água de superfície. O período de 1º de janeiro de 2018 ao rompimento da barragem em 25 de janeiro de 2019 identifica numerosos casos de percolação e esforços subsequentes de mitigação de percolação. No entanto, a interpretação de dados desde período (incluindo níveis piezométricos e dados de medidores de fluxo) não sugerem uma mudança de condições que poderia conduzir a um aumento de percolação no ano anterior ao rompimento. Assim, é provável que o aumento de percolação relatado durante este período de tempo é atribuível a alterações nas práticas de relatórios dentro da Vale, em vez de um aumento real da percolação.

4.4.4 Programa de Sondagem em Andamento no Momento do Rompimento

No momento do rompimento, duas campanhas de sondagem estavam em andamento no local. Uma das campanhas de sondagem foi o projeto *As-Is*, que era um programa de exploração subterrânea destinado a coletar informações sobre as propriedades materiais da barragem e do solo natural. A segunda campanha foi a instalação de instrumentação adicional em preparação para o descomissionamento da barragem. De acordo com os registros disponíveis, como parte do projeto *As-Is*, oito sondagens foram realizadas entre o dia 11 de dezembro de 2018 e o rompimento; uma sondagem adicional estava em andamento no dia do rompimento (B1-SM-21). Essas sondagens foram realizadas próximo ao pé da barragem, aparentemente para investigar as condições naturais do solo daquela região. Como parte do projeto de instrumentação, nove sondagens foram realizadas antes do rompimento, entre outubro de 2018 e o rompimento: quatro para instalar novos inclinômetros e cinco para instalar diversos piezômetros elétricos (corda vibrante). Os detalhes estão refletidos no Apêndice A.

No dia do rompimento, um décimo furo de sondagem (B1-SM-13) estava sendo perfurado na porção central da barragem, na crista do Oitavo Alteamento, para instalar novos piezômetros. Não há nenhum registro de furo de sondagem ou outro relatório do sondador disponível para a atividade que ocorreu no dia 25 de janeiro de 2019. De acordo com os registros disponíveis, o furo de sondagem BM-SM-13 foi iniciado no dia 21 de janeiro de 2019 e, no dia anterior ao

¹⁰ Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (ANM) (TÜV SÜD 2018) (“TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM”).

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

rompimento, a sondagem foi relatada como tendo avançado até uma profundidade de 65,5 m abaixo da elevação do solo, de aproximadamente 929 m nmm até uma elevação inferior de aproximadamente 863,5 m nmm. Essa é a profundidade e elevação em que a sondagem provavelmente começou no dia do rompimento. Além disso, no dia anterior ao rompimento, a sondagem foi relatada como tendo sido executada usando métodos de sondagem rotativos, com recirculação de água no furo de sondagem, o que é consistente com todos os outros furos de sondagem executados como parte desta campanha de sondagem de instrumentação. Abaixo do nível da água, foi usado revestimento para apoiar o furo de sondagem através dos rejeitos. No momento do rompimento, sondadores haviam trabalhado durante a maior parte da manhã e provavelmente haviam avançado o furo de sondagem a partir do ponto final do dia anterior, possivelmente em até 15 m adicionais, até uma profundidade de aproximadamente 80 m. Com base nessas profundidades, era esperado que o furo de sondagem no final do dia anterior e no dia do rompimento tivesse atingido o terreno natural. Os nove furos de sondagem anteriores também foram perfurados usando o mesmo método e estendidos através dos rejeitos para o solo natural. Não foram relatados sinais de instabilidade durante os outros furos de sondagem.

5 DEFORMAÇÃO DA BARRAGEM I ANTES DO ROMPIMENTO

O Painel realizou uma análise detalhada para determinar se ocorreu alguma deformação da Barragem I antes do rompimento. Os detalhes dessa análise estão contidos no Apêndice D. Foi realizada uma análise integrada usando os dados disponíveis, inclusive dados topográficos, leituras dos marcos topográficos, radar de solo, satélite (InSAR), vídeo e drone.

Havia 14 marcos topográficos (prismas) localizados ao longo da crista da barragem que foram lidos manualmente aproximadamente uma vez por mês. Um total de oito inclinômetros foram instalados na barragem; seis deles estavam ativos antes do rompimento. Dois inclinômetros possuíam dados de maio de 2016 a dezembro de 2018, enquanto os outros quatro foram instalados entre outubro e novembro de 2018, com somente uma leitura realizada no final de dezembro de 2018. As leituras dos dois inclinômetros ativos com dados foram realizadas manualmente em duas direções, com leituras realizadas aproximadamente em meses intercalados (ou seja, a cada 60 dias). Os marcos topográficos e inclinômetros não conseguiram detectar pequenas deformações e nenhuma tendência clara foi detectada acima das variações de medição.

Os dados de radar de solo da Barragem I estavam disponíveis de março de 2018 até ao momento do rompimento. A unidade de radar foi instalada no pátio de estocagem a aproximadamente 1.000 m da face da barragem e coletou dados a cada três minutos (480 varreduras/dia). A precisão informada pelo fabricante é de 3 mm/mês (ou seja, 36 mm/ano). Os mapas de deformação do radar produzidos antes do rompimento indicavam ocasionalmente grandes deformações de até 700 mm/mês. Após a análise e reanálise dos dados do radar, essas não são deformações verdadeiras, e parecem ser principalmente o resultado da detecção de “ruído” pelo radar devido à sensibilidade do radar à presença de vegetação na face da barragem, umidade variável retida na vegetação e no solo, umidade na atmosfera e frequência da varredura rápida, o que não facilitou a filtragem do ruído. Os dados do radar foram analisados ao longo das descidas d’água de concreto na superfície da face a jusante da barragem, que não

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

foram influenciadas pela vegetação, e elas não mostraram deformações detectáveis. Os dados do radar também foram analisados por meio de uma análise de “movimento lento” usando uma imagem a cada 24 horas. Essa análise tem o potencial de reduzir o nível de ruído, permitindo uma interpretação mais exata. As análises de “movimento lento” não detectaram deformações significativas ao longo da linha de visão (LOS – *line-of-sight*) do radar durante o período de março de 2018 a dezembro de 2018.

Foram registradas pequenas deformações rápidas pelo radar no dia 11 de junho de 2018, na parte central da Barragem 1, aproximadamente 35 m e 55 m acima do DHP 15 após sua instalação. Como essas deformações foram rápidas e ocorreram em um período de tempo relativamente curto, as deformações detectadas são consideradas confiáveis. Em área mais próxima do DHP 15, foram registradas deformações positivas (para fora) iniciais de até 6,4 mm, com uma deformação média de 2,4 mm, seguidas de deformações negativas (para dentro) de até 14,1 mm, com média de 3,9 mm. Em locais mais afastados do DHP 15, foram registradas somente deformações positivas, até no máximo 8,3 mm, com uma média de 3,6 mm. O que tornou o registro dessas deformações pelo radar mais confiável é que elas ocorreram de modo relativamente rápido, o que reduz efeitos de ruído.

Em janeiro de 2019 foram detectadas pequenas deformações pelo radar na parte inferior da barragem em direção à ombreira esquerda, mas estavam muito próximas da velocidade detectável mínima do radar para serem confirmadas como deformações reais. Além disso, essas deformações relatadas pelo radar não se correlacionam com as deformações relatadas pelo satélite InSAR (discutidas abaixo). Sob as condições prevalecentes no local, como superfícies cobertas por vegetação, climas úmidos e procedimentos de operação do equipamento e de processamento, o radar de solo não conseguiu detectar pequenas e lentas deformações na barragem.

O Painel obteve e usou os dados do InSAR para avaliar as deformações da barragem e rejeitos retidos no período de um ano anterior ao rompimento. As imagens do InSAR fornecem uma precisão uma ordem de magnitude mais alta que o radar de solo, já que o comprimento de onda do radar usado no InSAR é mais longo, tornando os resultados menos sensíveis à umidade e, portanto, gerando menos ruído. A análise dos dados do InSAR indica pequenas deformações para baixo próximas à crista e ao meio da barragem de não mais de 30 mm/ano. Nas partes inferiores da barragem na região central, a análise indica pequenas deformações de até 36 mm/ano, predominantemente para baixo. A Figura 20 mostra as velocidades trimestrais de deformação nos 12 meses anteriores ao rompimento na região central da barragem. Também mostra que as deformações próximas à crista são na maior parte verticais, enquanto mais próximo ao pé da barragem as deformações têm um leve componente horizontal para fora da barragem. As deformações horizontais (na direção leste-oeste (L-O)), próximas ao pé da barragem, eram na maioria inferiores a 10 mm/ano nesse período, mas incluíam algumas pequenas áreas com até 30 mm/ano. Os vetores de deformação inferidos do InSAR não incluem o componente norte-sul (N-S), uma vez que a LOS de órbitas ascendentes e descendentes era quase perpendicular a essa direção e, portanto, provavelmente não são uma estimativa confiável de deformações reais. Uma comparação entre os dados do InSAR e dados pluviométricos indica uma correlação em que as deformações tendem a aumentar levemente

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

durante a estação chuvosa. As deformações observadas no InSAR foram pequenas e lentas demais para serem detectadas com segurança pelos marcos topográficos, inclinômetros e radar de solo usados. Os dados dos ensaios de CPTu mostram que os rejeitos na barragem propriamente dita estavam totalmente adensados. Sendo assim, essas deformações na barragem são consistentes com recalque lento e de longo prazo da barragem, provavelmente o resultado de *creep* contínuo e não são indicativas de um precursor do rompimento.

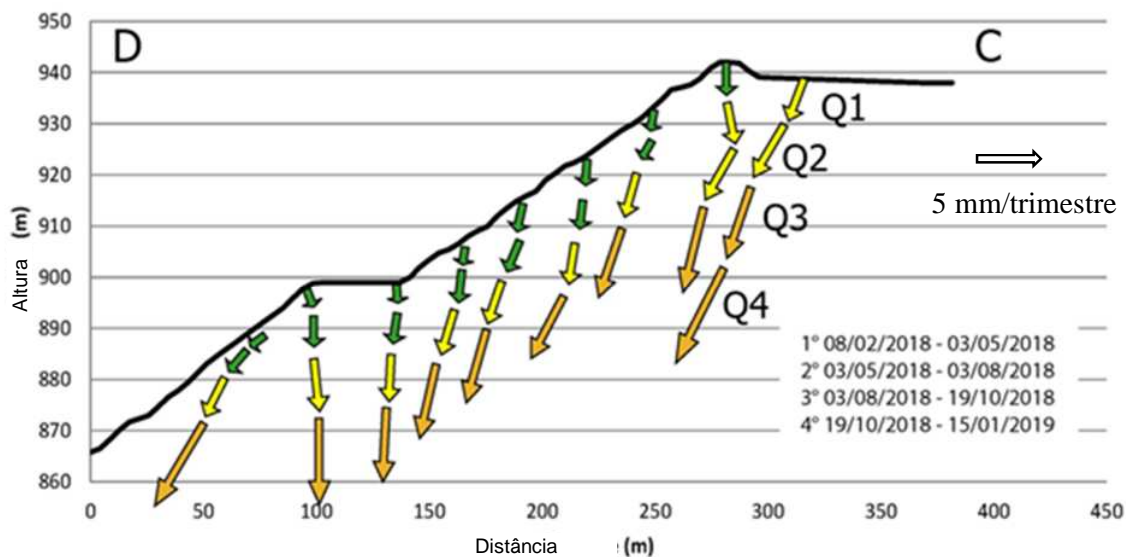


Figura 20: Seção transversal mostrando vetores de deformação para os quatro trimestres anteriores ao rompimento

Foram detectadas deformações verticais maiores, até um máximo de 140 mm/ano, na bacia de rejeitos. Com base nos dados disponíveis, é difícil separar o recalque em curso nos rejeitos devido ao adensamento dos rejeitos mais moles e finos localizados muito atrás da barragem, da efetiva deformação da barragem. No entanto, como os recalques eram na maioria verticais e estavam bem distantes da crista, é provável que elas fossem predominantemente o resultado do adensamento em longo prazo.

Imagens de vídeo de alta qualidade da barragem a partir de um drone foram realizadas sete dias antes do rompimento e não mostraram sinais de instabilidade nem indicações de percolação excessiva.

6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Foram realizados diversos estudos geotécnicos importantes entre 2005 e 2019 para caracterizar os materiais dentro da barragem. Esses estudos incluíram furos de sondagem, amostragem, ensaios de CPTu, FVT e Vs e instalação de instrumentos adicionais. Também foram realizados ensaios laboratoriais nas amostras. Os detalhes estão contidos no Apêndice B.

Os dados históricos foram suplementados com investigações de campo e ensaios laboratoriais avançados realizados pelo Painel após o rompimento. Os dados combinados fornecem uma

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

imagem clara da distribuição, comportamento e consistência do material na barragem antes do rompimento. O objetivo foi determinar parâmetros a partir dos dados de campo e dados laboratoriais para realizar análises de deformação e estabilidade destinadas a simular as condições anteriores ao rompimento e testar os gatilhos potenciais de rompimento. As seções a seguir descrevem as conclusões principais obtidas dos dados históricos e os dados obtidos pelo Painel.

6.1 Dados Históricos

6.1.1 Campo

As principais investigações geotécnicas foram realizadas entre 2005 e 2019. Uma parte significativa dessas investigações foi uma série de ensaios de CPTu que fornecem um perfil detalhado das condições do subsolo. Os ensaios de CPTu realizados em 2005 foram geralmente de profundidade rasa devido a limitações no equipamento de sondagem. No entanto, os ensaios de CPTu realizados em 2016 e 2018 foram de boa qualidade e frequentemente estenderam-se pela profundidade total dos rejeitos. Os ensaios de CPTu de 2016 e 2018 também incluíram diversos ensaios de dissipação que fornecem informações sobre o tipo de solo e perfis de pressão de equilíbrio da água. A Figura 21 mostra o layout dos ensaios de CPTu na barragem e as principais seções transversais e longitudinais utilizadas neste estudo.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

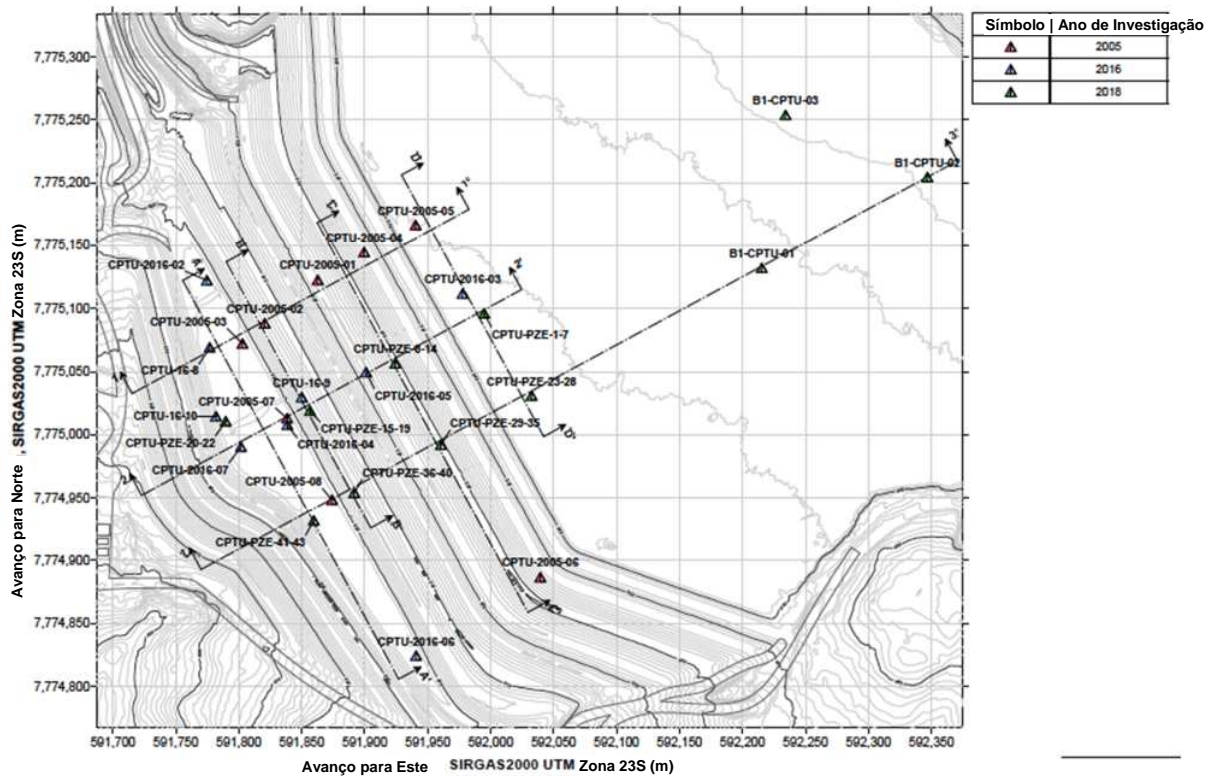


Figura 21: Layout dos ensaios de CPTu realizados em 2005, 2016 e 2018

O conceito de construção a montante é formar uma praia drenante, composta de rejeitos de granulometria mais grossa, com rejeitos mais finos depositados mais longe da crista e lamas depositadas na região do lago de decantação. Fica claro, a partir das fotos aéreas e imagens de satélite, que os comprimentos das praias variaram consideravelmente ao longo da vida da barragem e que mais rejeitos de granulação fina foram depositados perto dos locais próximos das cristas anteriores, resultando em camadas de rejeitos finos sob a barragem. Os perfis dos ensaios de CPTu confirmam isso e mostram que os materiais sob a barragem eram compostos de camadas intercaladas de rejeitos grossos e finos. A Figura 22 mostra um exemplo de perfil de ensaio de CPTu (PZE-29-35) da parte central da barragem realizada na crista do Oitavo Alçamento durante o programa de 2018. Esse perfil se estende por quase a toda a altura da barragem e parece penetrar no solo natural a uma elevação de 872 m nmm. O ensaio de CPTu mostrado na Figura 22 ilustra os rejeitos predominantemente grossos com finas camadas de rejeitos finos.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

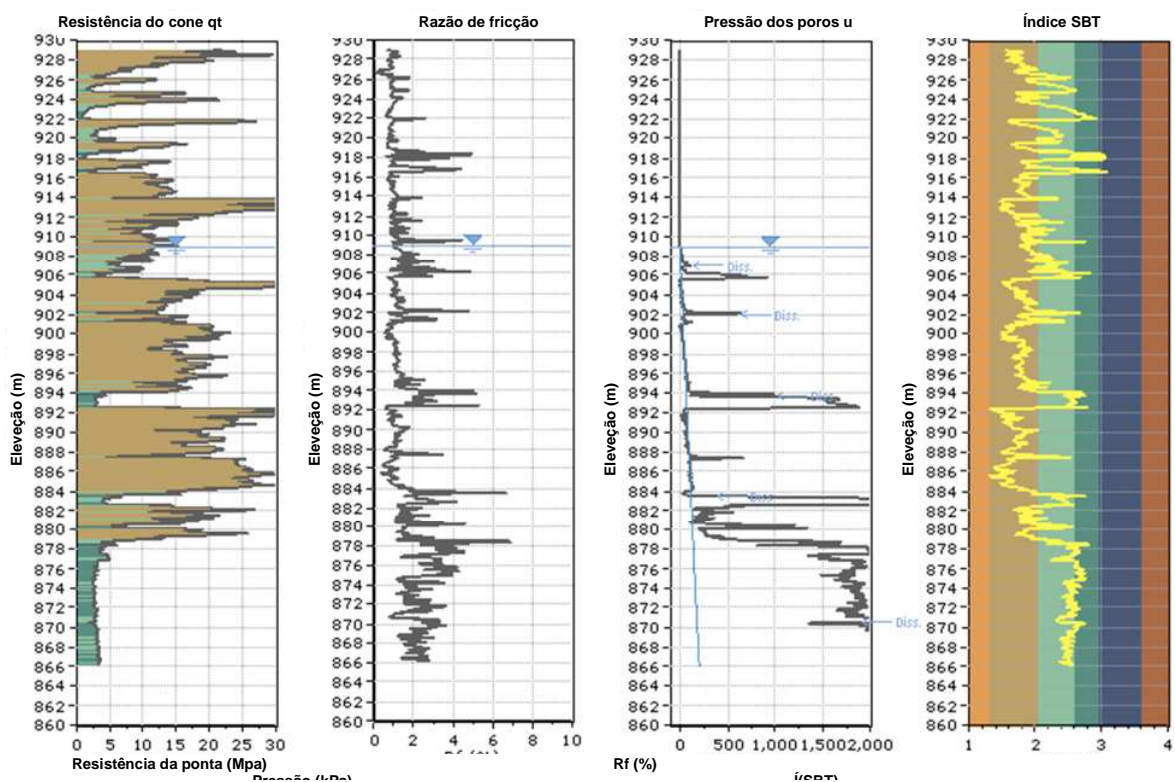


Figura 22: Exemplo do perfil CPTu para o PZE-29-35

Para entender a distribuição dos rejeitos, os materiais foram agrupados por regiões com resistências de materiais e tipos de comportamento de CPTu semelhantes. De modo geral, observou-se que os rejeitos grossos apresentaram um menor conteúdo aparente de finos¹¹ e um índice de classificação dos solos (I_c) menor que 2,6, enquanto as camadas de rejeitos finos apresentaram um maior conteúdo aparente de finos e um I_c maior que 2,6.

Os ensaios de CPTu indicam que os níveis de água eram de um modo geral elevados, especialmente nas regiões mais baixas da barragem; os rejeitos grossos essencialmente drenam livremente durante os ensaios de CPTu; e os rejeitos finos são essencialmente não drenados durante os ensaios de CPTu. Ensaios de dissipação foram realizados predominantemente nos rejeitos finos e mostram que as taxas de dissipação foram relativamente rápidas (por exemplo, tempo para dissipação de 50%, $t_{50} < 400\text{sec}$) e que as poro-pressões de equilíbrio resultantes mostram um gradiente descendente. Em média, o gradiente descendente produziu um perfil de pressão da água que é cerca de 50% do perfil de pressão hidrostática da água. As taxas de dissipação de CPTu relativamente rápidas indicam que os rejeitos finos são compostos predominantemente por partículas de tamanho de silte. Os rejeitos estão aparentemente

¹¹ Baseado em Robertson, P.K., & Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 442-459.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

saturados abaixo do nível da água, com um gradiente hidráulico contínuo. Não foram detectados níveis de água empoleirados.

Dois ensaios de CPTu (B1-CPTu-02 e -03) foram realizados em 2018 na região do reservatório através das lamas e mostram que as lamas são um material semelhante a argila, relativamente homogêneo, muito mole e, essencialmente, normalmente adensado. Os ensaios de dissipação nas lamas indicam que elas estavam essencialmente totalmente adensadas, sem excesso de poro-pressão. Os valores de t_{50} medidos nas lamas foram consideravelmente mais longos ($t_{50} > 1.000$ s) do que os registrados nos rejeitos de finos sob a barragem. Um ensaio de CPTu foi realizado aproximadamente a meio caminho entre o lago de decantação e a crista (B1-CPTU-01) e mostrou rejeitos grossos e finos intercalados sobre lamas. Os tempos de dissipação (t_{50}) nos rejeitos finos foram semelhantes aos registrados nos rejeitos finos na barragem.

Os resultados dos ensaios de CPTu indicam que os rejeitos são predominantemente fofos e sofrem contrações em grandes deformações específicas, consistentes com outros rejeitos depositados hidráulicamente. A Figura 23 mostra um exemplo de CPTu (PZE-29-35) no gráfico de tipos de comportamento do solo modificado¹² para ilustrar que os rejeitos abaixo do nível da água (neste caso, aqueles coletados entre elevação de 910 m msl a 878 m msl) sofrem contração sob grandes deformações específicas. Os dados de CPTu mostrados na Figura 23 foram normalizados usando um peso unitário alto adequado para os rejeitos e o gradiente piezométrico descendente medido.

¹² Robertson, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT) based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910-1927.

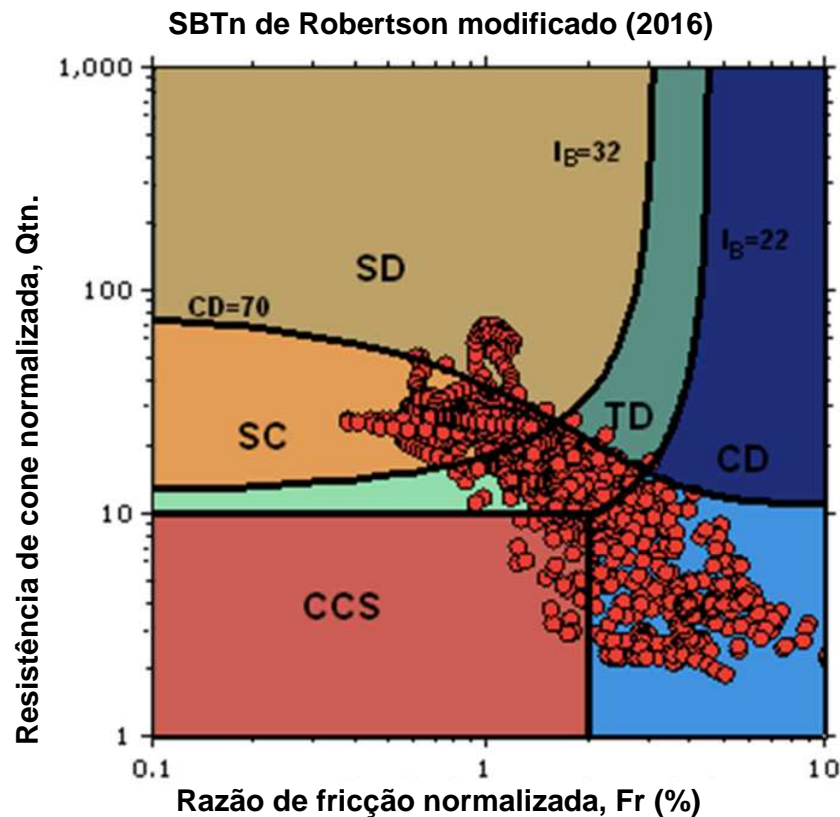


Figura 23: Exemplo de ensaio de CPTu (PZE-29-35, a partir da elevação 910 m msl para 878 m msl)

Foram realizados ensaios de FVTs em 2005 e 2016, predominantemente em camadas de rejeitos finos. Devido à permeabilidade relativamente alta dos rejeitos finos, os resultados dos ensaios de FVT provavelmente foram influenciados em algum grau pela drenagem parcial e são menos prováveis de fornecer estimativas confiáveis de resistência não drenada. Embora os valores de resistência individuais obtidos a partir dos ensaios de FVTs possam não ser confiáveis, os resultados mostraram consistentemente tendências de perda de resistência significativa e rápida nos rejeitos testados.

As investigações anteriores também incluíram um pequeno número de medidas V_s com profundidade. Quando as medições de V_s são combinadas com os dados dos ensaios de CPTu adjacentes, há uma indicação de microestrutura leve (com base na abordagem de Robertson, 2016). Considerando a idade geológica jovem dos rejeitos (<37 anos), a microestrutura provavelmente se deve a uma pequena quantidade de cimentação. Essa cimentação parece ser mais prevalente nos rejeitos finos. Normalmente, as medidas de ensaios de CPTu refletem o comportamento do solo em grandes deformações específicas após a destruição de qualquer cimentação, enquanto as medidas em V_s refletem a rigidez do solo em deformações específicas muito pequenas, que tendem a ser dominadas pela resistência devido à cimentação.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

6.1.2 Laboratório

As investigações geotécnicas anteriores fornecem um resumo detalhado dos resultados de ensaios rotineiros de índices físicos, conforme resumido no Apêndice B. Os rejeitos grossos têm um conteúdo de finos (com base no tamanho da peneira de 0,075 mm) entre 20% e 50% e são não plásticos. Os rejeitos finos sob a barragem têm um teor de finos entre 50% e 90% com baixa plasticidade (Índice de Plasticidade (IP) médio de 10%). Os dados históricos também mostram que o peso específico total dos rejeitos é de modo geral alto, com um valor médio em torno de 26kN/m³. A gravidade específica associada também é alta, com um valor médio de cerca de 4,5. Os registros históricos têm alguns dados mineralógicos, e os ensaios realizados em 2006 indicam um conteúdo de ferro (total de ferrosos) alto (> 50%) e baixo teor de quartzo (sílica) (<10%).

Durante a investigação de 2005, foi obtida uma série de amostras intactas em profundidade rasa na praia, usando uma amostragem cuidadosa em blocos e tubos. As amostras em bloco apresentaram um índice de vazios *in situ* médio de 1,0. Esse alto valor médio dos índices de vazios medidos a partir da amostragem em bloco suporta a interpretação de que os rejeitos eram fofos, de modo geral. Um índice de vazios de 1,0 mostra que aproximadamente 50% do volume total de rejeitos era composto de espaço vazio. Como grande parte do espaço vazio é preenchido com água, o alto índice de vazios mostra que uma parte significativa dos rejeitos era água. Como o volume total de rejeitos era de cerca de 12 Mm³, é razoável supor que o volume total de água armazenada nos rejeitos fosse de até 5 Mm³ (tendo em vista que alguns rejeitos estavam não-saturados acima do nível da água). Esse volume de água é equivalente a cerca de 2.000 piscinas olímpicas. Como a região tem um alto índice de precipitação, a retirada de água dos rejeitos armazenados seria desafiadora e lenta.

Ensaio triaxiais históricos mostram variabilidade significativa no comportamento do material. Alguns ensaios realizados em amostras intactas indicam uma resposta muito frágil.

6.2 Distribuição do Material

Com base nos dados anteriores de investigação de campo, combinados com análises de imagens aéreas e de satélite prévias, é possível recriar seções detalhadas da estratigrafia sob a barragem. Os detalhes estão contidos no Apêndice F.

A Figura 24 mostra um exemplo de seção transversal recriada para a seção mais íngreme e mais alta da barragem (seção transversal 3-3). A Figura 24 mostra que o material predominante sob a barragem era composto por rejeitos grossos (mostrados em amarelo) com finas camadas de rejeitos finos (mostrados em laranja). Em geral, os rejeitos apresentam uma gradação mais fina com a profundidade, refletindo a distância crescente das elevações das cristas anteriores durante a construção a montante. As lamelas (mostradas em vermelho) estão mais afastadas da Barragem de modo geral.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

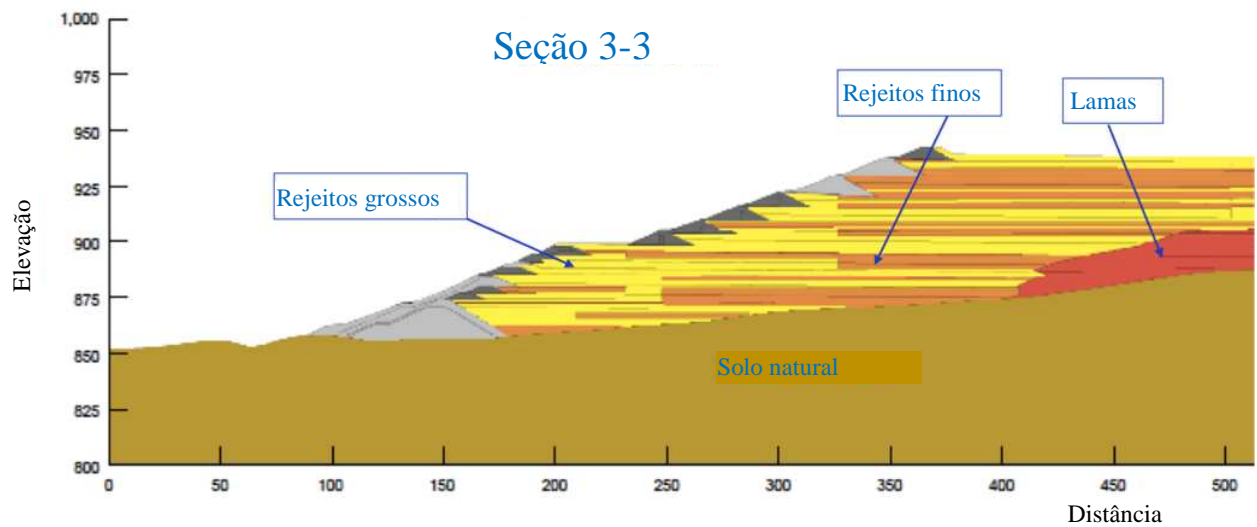


Figura 24: Seção transversal 3-3 recriada com base em dados históricos, expandida para mostrar detalhes sob a barragem

6.3 Estudos de Campo Realizados Pelo Painel

Dois membros do Painel visitaram o local em 28 de março de 2019, para fazer observações iniciais. A visita ao local incluiu um sobrevôo de helicóptero das áreas do rompimento e circunvizinhas à mina, além de uma visita a pé à ombreira direita (a ombreira esquerda não podia ser acessada) para avaliar o acesso a futuras investigações de campo. As vistas de helicóptero da área do rompimento são mostradas nas Figuras 25 e 26.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 25: Vista aérea do rompimento da Barragem 1, aproximadamente na direção sudeste, fotografada em 28 de março de 2019



Figura 26: Vista aérea do rompimento da Barragem 1, em direção ao norte, fotografada no dia 28 de março de 2019

Todos os quatro membros do Painel visitaram o local em 4 de junho de 2019, para fazer observações adicionais e coletar amostras deformadas representativas. Embora as amostras tenham sido coletadas após o rompimento, elas foram coletadas em diversos pontos da barragem para representar os diferentes materiais que estavam presentes dentro da barragem. Os locais selecionados foram baseados em acessibilidade, observações visuais e conhecimento do histórico da construção. Além disso, os ensaios laboratoriais do Painel, discutidos abaixo,

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

confirmaram a natureza representativa das amostras porque os resultados dos ensaios eram consistentes com os ensaios geotécnicos e mineralógicos disponíveis antes do rompimento. Informações adicionais sobre o método de amostragem empregado pelo Painel podem ser encontradas no Apêndice E, e detalhes das investigações pré-rompimento são discutidos na Seção 6.1 e mais detalhadamente no Apêndice B.

As amostras a granel de rejeitos grossos foram coletadas de superfícies expostas de rejeitos intactos que representam rejeitos de praia de alteamentos anteriores abaixo da barragem final, conforme mostrado na Figura 27. As amostras foram obtidas de uma face exposta que foi estimada ser abaixo do que o Sétimo Alteamento na ombreira direita. A Figura 28 mostra camadas finas distintas nos locais das amostras de rejeitos grossos.



Figura 27: Exemplo de locais de junho de 2019 na imagem pós-rompimento

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 28: Locais de Amostra de Rejeitos Grossos S6a (Esquerda) e S6b (Direita)

Um programa de campo mais detalhado para preencher lacunas nos dados foi realizado de 1 a 23 de julho de 2019, que incluiu os seguintes itens:

- Ensaios de permeâmetro de Guelph para medir características de infiltração;
- Leituras do tensiômetro de sucção matricial próximo à superfície;
- Testes de densidade de cone de areia adjacentes aos ensaios de permeâmetro;
- Medições de vazão superficial para estimar taxas de vazão de fontes d'água pós-rompimento; e
- Furos de sondagem (com amostragem) de solos de fundação.

Os locais dos ensaios são mostrados na Figura 29.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



Figura 29: Imagem do Google Earth mostrando locais de ensaio para o programa de campo de julho de 2019

GP	Ensaios do Permeâmetro de Guelph
DT	Ensaios de densidade de cone de areia
FL	Medições de fluxo de superfície
BH	Furos de sondagem em solo natural

Detalhes de ambas as investigações de campo estão contidos no Apêndice E.

Quatro furos de sondagem foram realizados em julho de 2019 para obter informações sobre o terreno natural na fundação da barragem. Os furos de sondagem mostraram que o solo natural é composto de solos residuais. Não foi possível diferenciar entre o colúvio e o solo residual. O solo residual detectado nos furos de sondagem foi descrito como rígido a muito rígido, com evidências de cimentação residual da rocha mãe principal, que é principalmente gnaisse. Os furos de sondagem não mostram evidências de camadas fracas contínuas nos solos naturais encontrados.

6.4 Ensaios Laboratoriais Realizados Pelo Painel

Detalhes e resultados dos ensaios laboratoriais realizados pelo Painel estão dispostos no Apêndice E.

Foi realizada uma série de ensaios padrão nas amostras obtidas dos programas de campo de 2019 pelo Painel com os objetivos de: (i) caracterizar os materiais; (ii) comparar os dados com dados históricos pré-rompimento; e (iii) confirmar a representatividade das amostras.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Os ensaios confirmaram que os rejeitos grossos eram mal graduados e apresentam um percentual de finos (com base no tamanho da peneira de 0,075 mm) entre 20% e 50% são não plásticos. Os rejeitos finos sob a barragem têm um conteúdo de finos entre 50% e 90%. As lamas são mais bem graduadas, com essencialmente 100% de finos e IP de cerca de 18%. A Figura 30 mostra uma comparação entre as curvas granulométricas de rejeitos grossos coletadas em 2019 e algumas curvas históricas, e mostra que as amostras de 2019 são semelhantes às amostras históricas coletadas na barragem pré-rompimento.

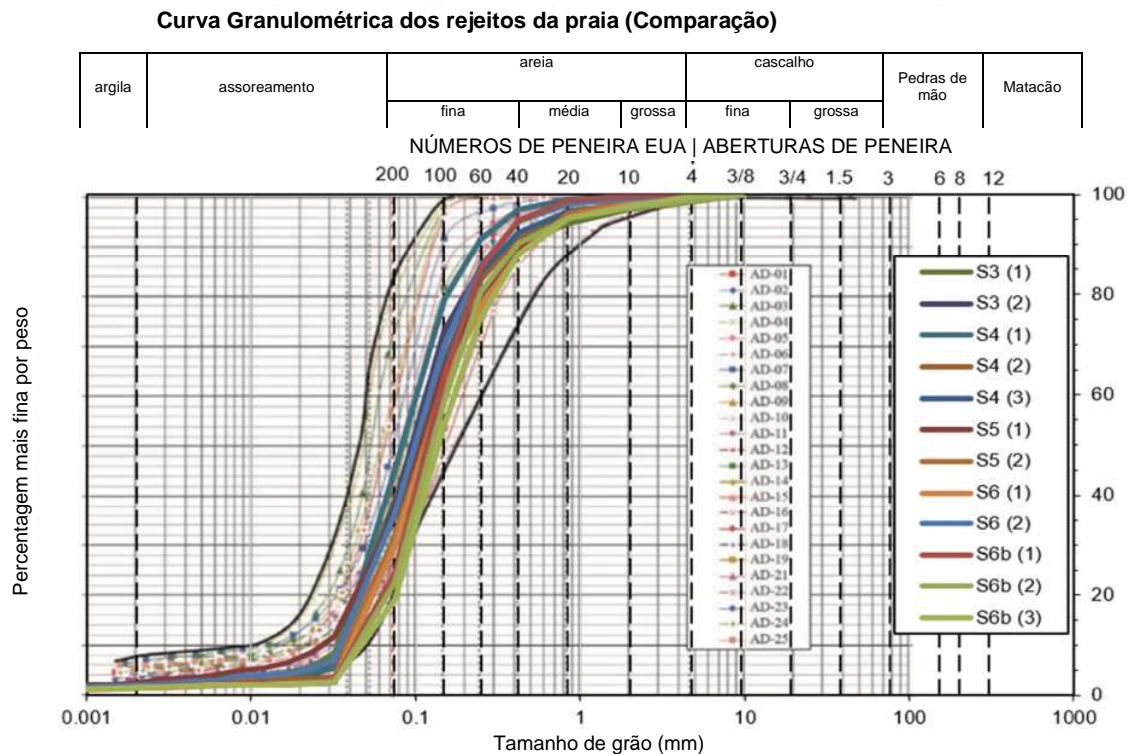


Figura 30: Comparação das curvas granulométricas das amostras de 2019 com dados históricos pré-rompimento

Ensaio realizado nas amostras de 2019 mostraram que a gravidade específica é de cerca de 4,9 para rejeitos grossos e mais próxima de 4,0 para as lamas. O solo residual natural tem uma gravidade específica mais tradicional, de cerca de 2,75. A alta gravidade específica nos rejeitos produz um alto peso específico do solo para os rejeitos em torno de 26kN/m³.

O ensaio de difração por raios-X (DRX [*X-ray diffraction*]) foi realizado em diversas amostras de rejeitos de 2019 e mostrou altos teores de ferro (hematita, goethita e magnetita). As amostras de rejeitos grossos obtidas em junho de 2019 foram obtidas de uma área sob o Sétimo Alçamento, enquanto as amostras obtidas em julho de 2019 foram obtidas de rejeitos de superfície muito próximos às ombreiras. A maior concentração de goethita foi medida nas amostras de superfície, o que indicou aumento do intemperismo e oxidação do ferro. Em resumo, o teor total de ferro (hematita, goethita e magnetita) nos rejeitos da barragem era alto (superior a 50%), com um pequeno teor de quartzo, de modo geral inferior a 10%. Esses

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

valores são consistentes com os dados históricos sobre rejeitos obtidos em 2006, conforme detalhado no Apêndice B.

Essa mineralogia é significativamente diferente da maioria dos solos naturais que são predominantemente compostos de quartzo (ou seja, minerais à base de sílica). A mineralogia também é significativamente diferente dos solos usados para desenvolver as correlações empíricas tradicionais usadas para interpretar ensaios *in situ*, como o ensaio de CPTu, o que indicaria que essas correlações empíricas podem não fornecer resultados confiáveis nesses rejeitos.

Tabela 2: Resultados XRD – amostra de junho de 2019

Mineral	Fórmula Ideal	N.º 1 Amostra 1 Sacola 2 R Raios-X (Lamas)	N.º 2 Amostra 1 Sacola 4 Raios-X (Lamas)	N.º 3 Amostra 3 Sacola 2 Raios-X (Rejeitos grossos)	N.º 4 Amostra 5 Sacola 1 Raios-X (Rejeitos grossos)
Hematita	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	50,1	44,4	87,7	86,8
Goethita	$\text{A-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$	32,0	34,0	3,4	3,0
Magnetita	Fe_3O_4	0,4	0,4	6,5	7,6
Quartzo	SiO_2	5,4	6,6	1,6	1,5
Kaolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	6,2	8,9	0,6	0,6
Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	2,7	2,3	-	-
Gibbsita	Al(OH)_3	0,9	1,0	0,3	0,4
Bayerita	Al(OH)_3	2,2	2,4	-	-
Total		100,0	100,0	100,0	100,0

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Tabela 3: Resultados XRD – julho de 2019

Mineral	Fórmula Ideal	DT-01 (Lamas)	DT-02 (Lamas)	DT-06 (Rejeitos finos)	DT10 (Rejeitos finos)
Hematita	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	43,1	54,1	50,3	44,3
Goethita	$\text{A-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$	20,7	15,3	10,2	13,7
Magnetita	Fe_3O_4	1,9	1,5	1,3	1,3
Quartzo	SiO_2	14,9	12	28,5	21,8
Kaolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	11,6	10,9	6,4	13,5
Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	3,1	2	1,4	1,1
Gibbsita	Al(OH)_3	3	2,2	1,4	3
Bayerita	Al(OH)_3	1,7	2	0,5	1,4
Total		100,0	100,0	100,0	100,0

Foram obtidas imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) de amostras de rejeitos grossos e lamas do programa de campo de junho de 2019 para avaliar qualitativamente a estrutura, a angularidade e outros parâmetros das partículas no nível microscópico. Exemplos de imagens são mostrados nas Figuras 31 (rejeitos grossos) e 32 (lamas). As imagens de MEV confirmam o alto teor de ferro e mostram que a forma das partículas é semelhante para ambos os materiais e que os grãos são normalmente de sub-angulares a angulares, com superfícies ásperas e muitas vezes com furos. Foram executadas imagens de MEV adicionais para estudar a interação entre as partículas e mostraram evidências de cimentação entre as partículas, mostrada nas Figuras 33 e 34. Os nódulos mostrados na Figura 33 e destacados na Figura 34 são compostos de óxido de ferro. A cimentação parece ser derivada de óxido de ferro de tamanho de argila. Aparentemente, a oxidação do ferro produz cimentação entre as partículas.

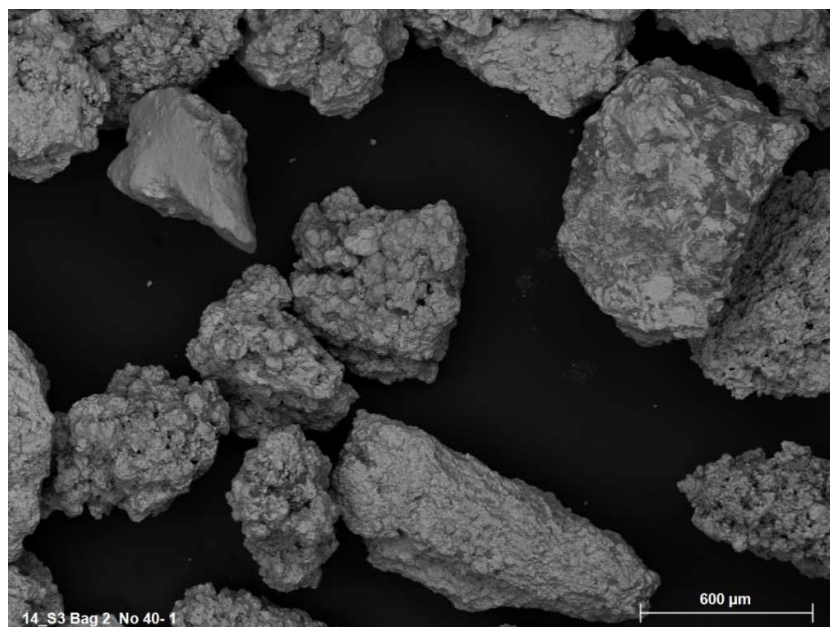


Figura 31: Imagem de MEV da amostra 3 sacola 2 – rejeitos grossos

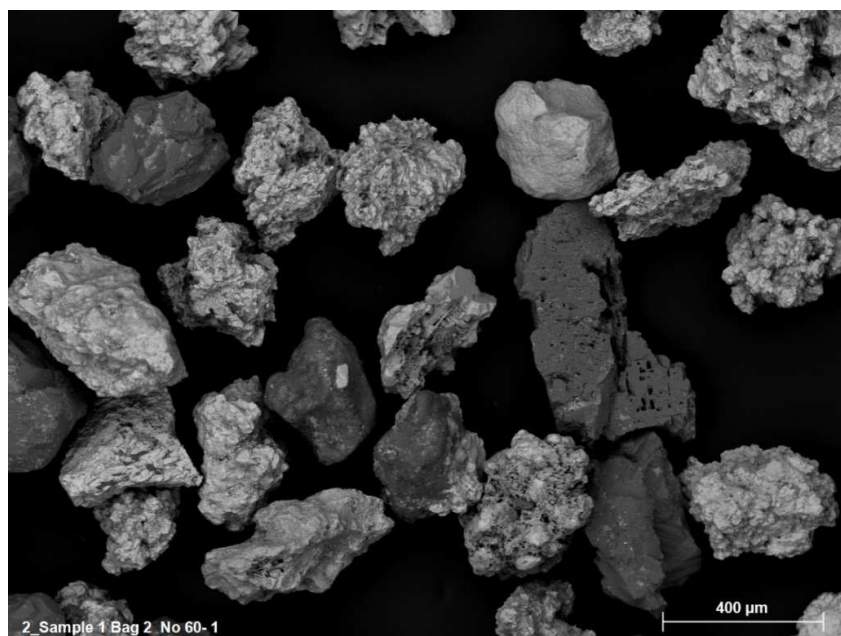


Figura 32: Imagem de MEV da amostra 1 sacola 2 - lamas

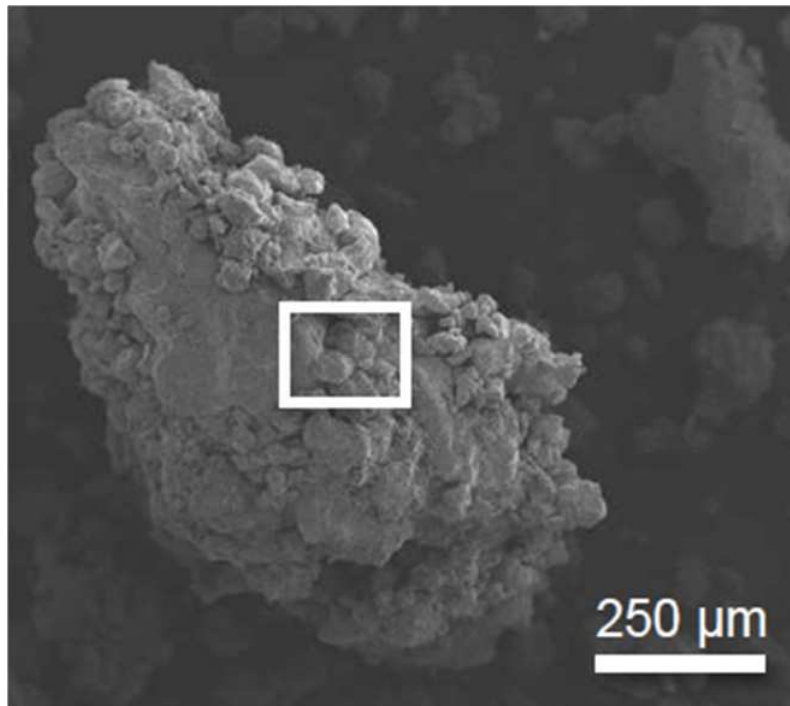


Figura 33: Imagem de MEV de rejeitos grossos

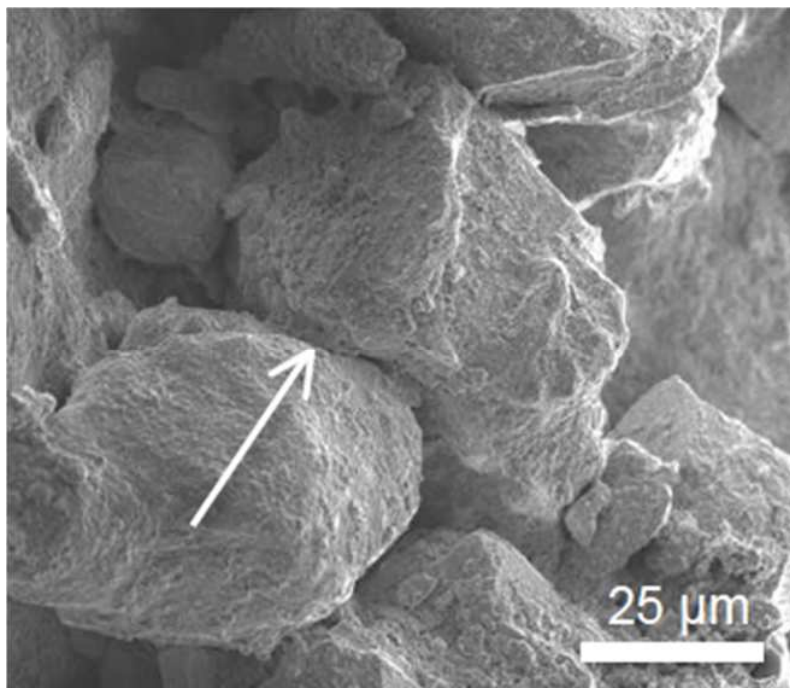


Figura 34: Imagem de MEV de rejeitos grossos (detalhe da caixa mostrada na Figura 33).
A região destacada com seta mostra a cimentação entre partículas

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

6.5 Ensaio Laboratoriais Avançados Realizados Pelo Painel

Esta seção descreve as principais observações feitas a partir de ensaios laboratoriais avançados realizados em amostras representativas de rejeitos que foram peneiradas para formar amostras de referência consistentes de rejeitos grossos e finos para ensaios laboratoriais. Os detalhes dos ensaios estão contidos no Apêndice E. As amostras de referência foram reconstituídas no laboratório para densidades (índice de vazios) semelhantes às da barragem, pois não havia amostras intactas e indeformadas disponíveis.

O Painel optou por executar a modelagem avançada de computador usando uma abordagem de Estado Crítico (CS [*Critical State*]). Portanto, um dos objetivos dos ensaios laboratoriais avançados era determinar os parâmetros de CS. Como não havia amostras intactas indeformadas dos rejeitos pré-rompimento disponíveis, os ensaios foram realizados em amostras reconstituídas. Devido ao impacto potencial das frações finas nos parâmetros de CS, foram criadas amostras em massa usando as amostras coletadas de junho de 2019 para gerar gradações representativas. Foram usadas a média e a faixa de gradação dos rejeitos a partir de dados históricos de ensaios laboratoriais para estabelecer gradações representativas. Foram estabelecidas amostras representativas para coincidir com as gradações médias, grossas e finas de rejeitos de ensaios de laboratório históricos. A Figura 35 resume as gradações representativas.

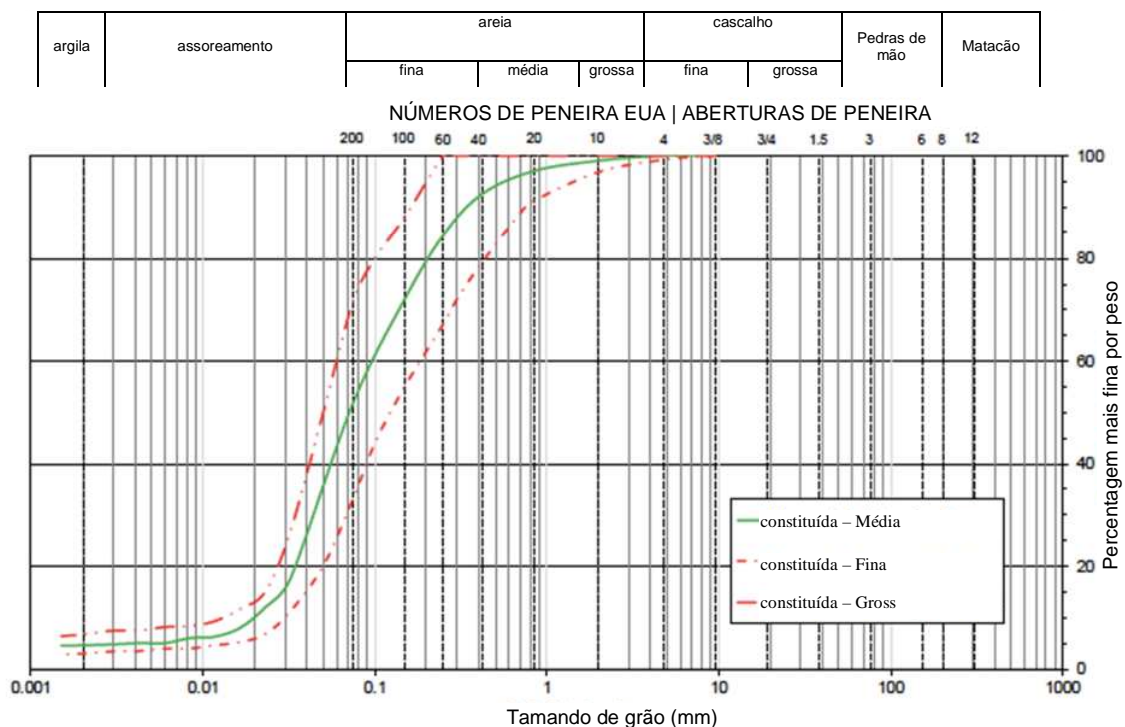


Figura 35: Gradações criadas para representar gradações médias, grossas e finas para os ensaios

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

As amostras foram preparadas por compactação úmida de acordo com os procedimentos descritos por Jefferies e Benn (2016). Como os rejeitos intactos observados após o rompimento mostraram sinais claros de camadas muito finas, o Painel levou em conta que a compactação úmida poderia replicar as finas camadas horizontais, além de fornecer um controle excelente sobre as densidades e índice de vazios desejados.

Os ensaios laboratoriais avançados incluíram ensaios triaxiais com deformação controlada, assim como ensaios triaxiais de carga controlada usando pesos mortos. Os ensaios foram realizados drenados e não drenados, assim como adensados isotropicamente e anisotropicamente.

As principais observações dos ensaios laboratoriais avançados estão resumidas abaixo.

- As linhas de estado crítico (CSLs [Critical State Lines]) para as gradações médias, grossas e finas são muito semelhantes em forma e inclinação, mas os rejeitos finos têm um índice de vazios levemente mais alto.
- Os dados dos ensaios triaxiais mostram uma resposta incomum durante o cisalhamento:
 - Amostras fofas desenvolvem um ângulo de atrito de pico maior que o ângulo de atrito CS (ϕ'_{cs}); e
 - Amostras densas desenvolveram uma maior dilatação do que a típica para outros rejeitos e solos naturais.
- A alta dilatação produz uma curva de tensão-deformação muito íngreme, com um pico de resistência maior do que o estimado a partir de relações empíricas e uma resistência residual (ou liquefeita) que é menor do que o estimado por relações empíricas.
- A deformação axial requerida para atingir a resistência de pico é muito pequena (<1%).
- Foi observada uma rápida perda de resistência (isto é, uma resposta “frágil”) nos ensaios drenados (amostras densas) e não drenados (amostras fofas).
- A alta resistência de pico e a resposta frágil parecem ser resultado da leve cimentação entre as partículas.

Foi realizada uma série de ensaios triaxiais não drenados para determinar as relações entre o estado pré-ensaio e a razão de resistência não drenada de pico e liquefeita, assim como as deformações específicas para atingir essas resistências. Esses ensaios mostraram uma relação clara com o estado pré-ensaio e mostraram que as deformações específicas necessárias para atingir o pico de resistência eram muito pequenas para amostras fofas e aumentavam com o aumento da densidade. Os resultados também mostraram que as amostras mais densas apresentaram picos de resistência não drenada muito altos, devido à cimentação entre as partículas. Essas observações principais são ilustradas nas figuras seguintes.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

A forma e a localização das CSLs, mostradas na Figura 36, são consistentes com as características semelhantes dos grãos (forma, angularidade) e a mineralogia dos rejeitos testados, mesmo que o tamanho médio das partículas varie. Os ϕ'_{cs} para cada graduação também foram muito semelhantes, com um valor médio de 34 graus.

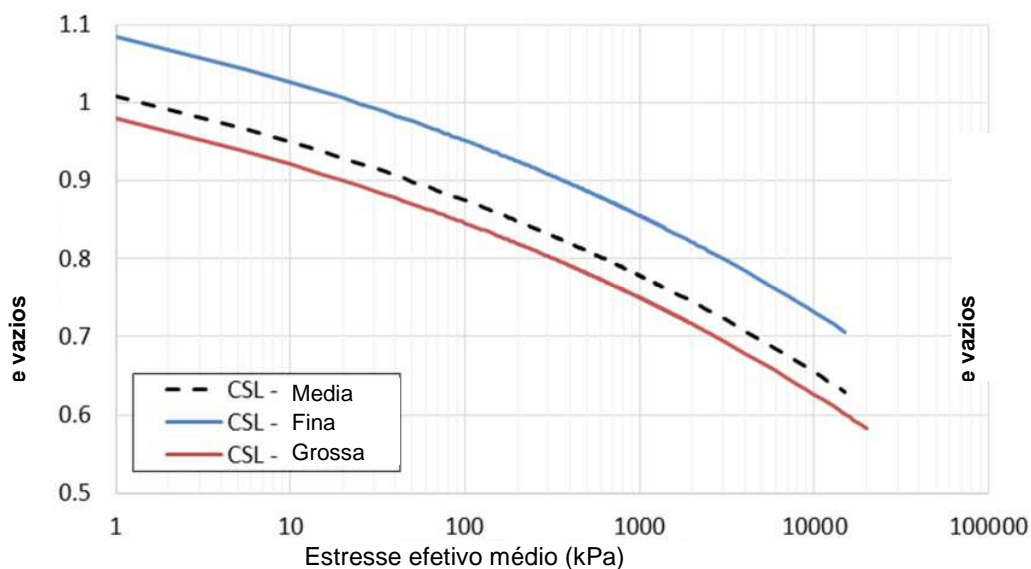


Figura 36: Comparação de CSLs para os rejeitos representativos testados

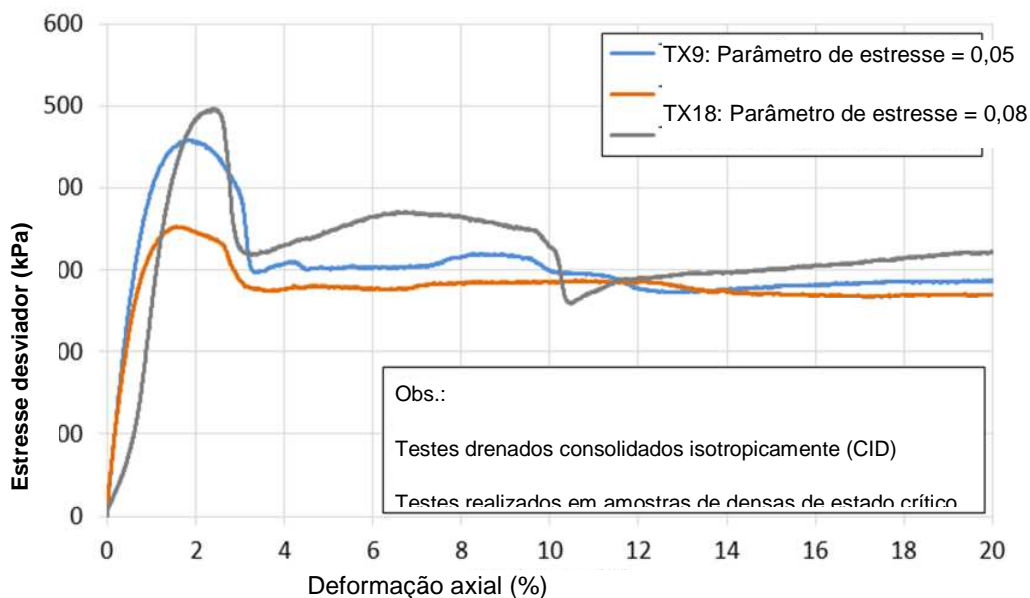


Figura 37: Comparação de ensaios triaxiais isotropicamente adensado drenados em amostras de graduação média em diferentes parâmetros de estado densos de CS

A Figura 37 compara os resultados dos ensaios triaxiais isotropicamente adensados drenados (CID) em amostras de graduação média adensadas com a mesma tensão efetiva (100 kPa), mas

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

preparadas para valores de parâmetros de estado diferentes (índice de vazios) mais densos que CS. A perda rápida de resistência e a resistência de pico são inconsistentes com o estado (índice de vazio) das amostras (por exemplo, o estado mais fofo ($\psi = -0,05$) tem uma resistência de pico semelhante ao estado mais denso ($\psi = -0,12$)).

A Figura 38 mostra o resultado do ensaio triaxial CID em uma amostra de gradação média adensada a 50 kPa e preparada para um estado mais fofo que CS ($\psi = +0,09$). Para uma amostra que é mais fofo que CS, o comportamento esperado seria que a amostra mostrasse um aumento gradual na tensão de desvio (q) combinado com uma diminuição gradual no volume para CS. No entanto, este ensaio mostrou uma resposta muito rígida para o pico q em uma deformação axial de cerca de 1%, seguida por uma redução abrupta (colapso) no volume sob uma tensão efetiva média constante (p') e q .

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

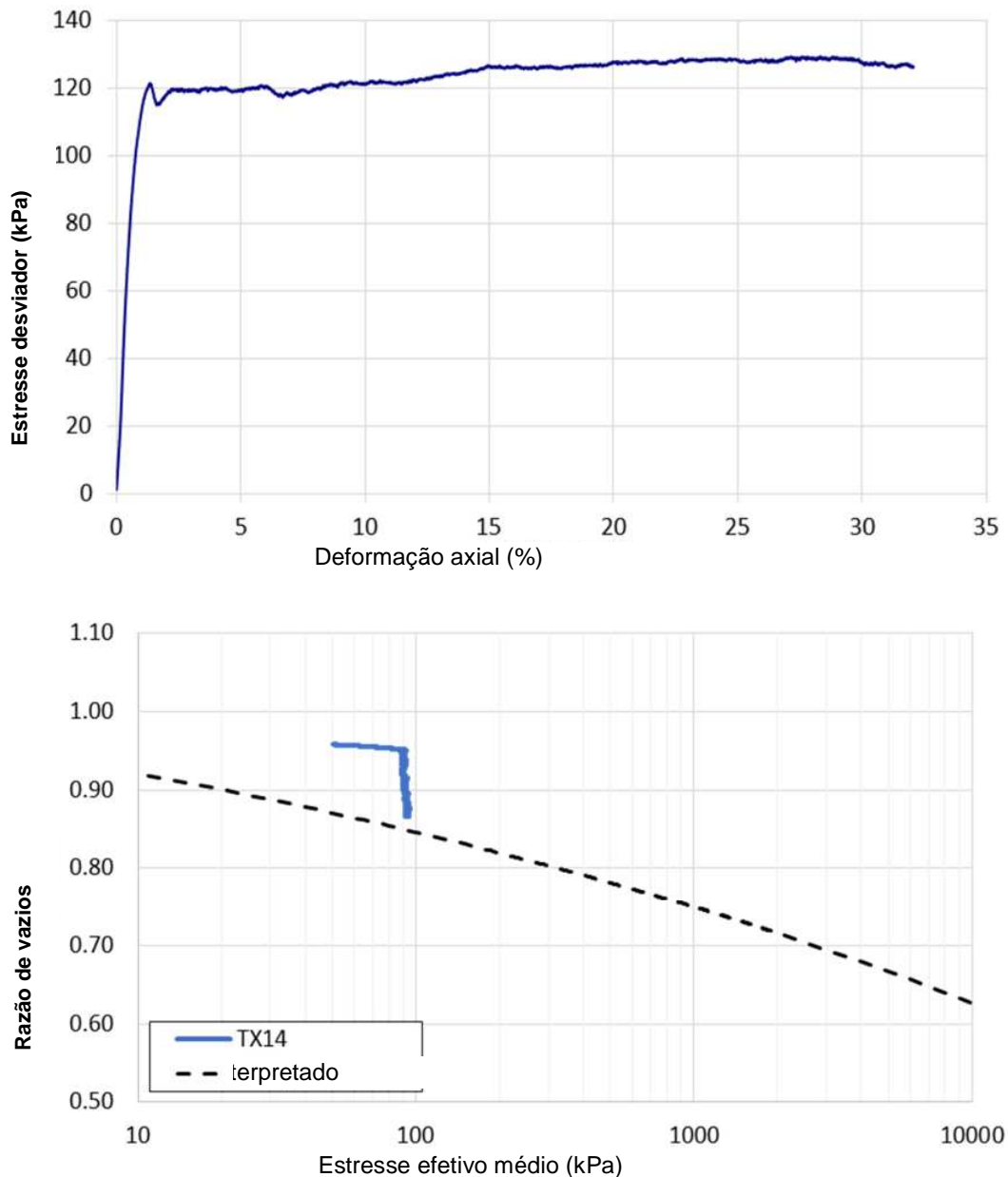


Figura 38: Resultado do ensaio triaxial cid em uma amostra de gradação média adensada para 50 kPa preparada para um estado livre de CS ($\psi = +0,09$)

Foi realizado um ensaio triaxial anisotropicamente adensados não drenados (CAU) (*Anisotropically Consolidated Undrained*) em gradações finas e grossas para avaliar a resposta não drenada de uma amostra fofa dessas gradações para identificar se são semelhantes. Ambas as amostras foram adensadas anisotropicamente com uma tensão efetiva média de 200 kPa e uma razão de tensão efetiva horizontal/vertical, K_0 , de 0,5 antes de iniciar o carregamento não drenado. As amostras finas e grossas foram preparadas para o mesmo parâmetro de estado de $\psi = +0,07$. Os resultados desses ensaios aparecem na Figura 39, que mostra que ambas as

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

amostras geraram uma resposta extremamente frágil durante o carregamento não drenado. As amostras romperam nas deformações axiais de 0,3% e 0,8% para as gradações finas e grossas, respectivamente. As razões de resistência de pico ($Su_{(pico)}/p'$) para as amostras de graduação fina e grossa foram de 0,42 até 0,51, respectivamente (equivalente a $Su_{(pico)}/\sigma'_v = 0,26$ e $0,34$). As razões de resistência residual ($Su_{(residual)}/p'$) para as amostras de graduação fina e grossa foram de 0,005 a 0,01, respectivamente. Essas razões de resistência de pico são significativamente maiores que as estimativas empíricas baseadas em dados do ensaio de CPTu, como as de Olson e Stark (2002), e as razões de resistência residual (ou liquefeita) são significativamente menores que as estimativas empíricas, como as de Robertson (2010). Os resultados do ensaio também confirmaram que as gradações finas e grossas se comportam de maneira semelhante durante o cisalhamento não drenado.

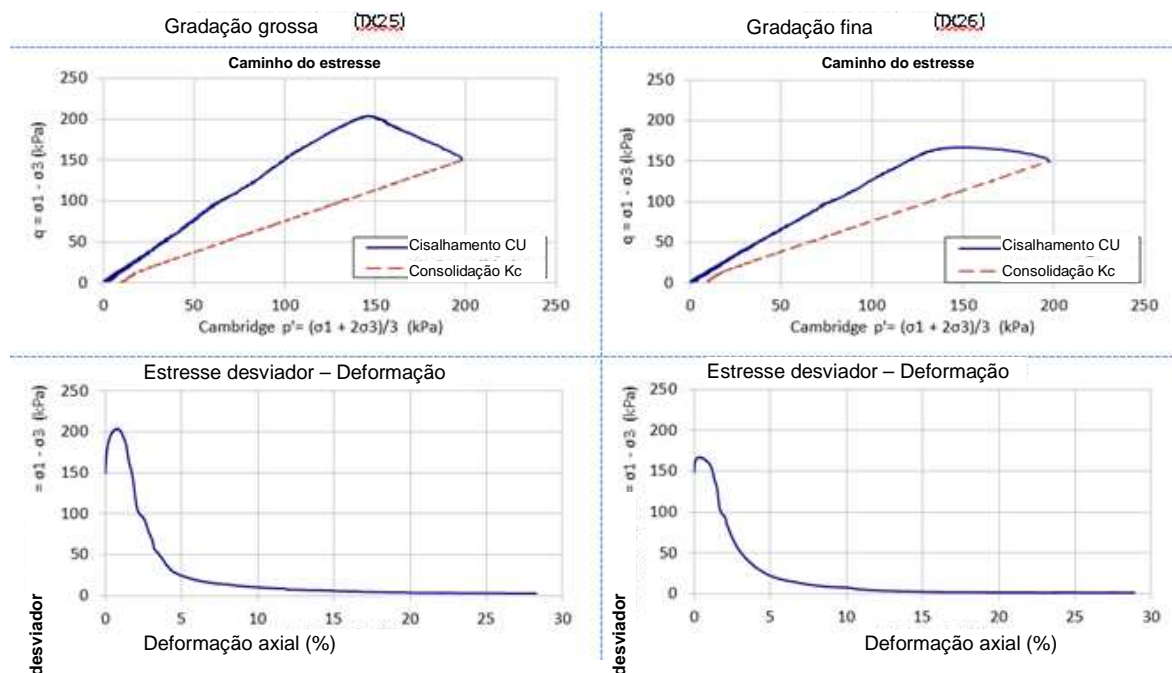


Figura 39: Resultados dos CAU ($K_0 = 0,5$) ensaios triaxiais controlados por deformação (gradações grossas e finas)

Dois ensaios triaxiais de carga controlada usando pesos mortos (TXDW) foram concluídos para comparação com os ensaios de deformação controlada. Ambos os ensaios foram concluídos na amostra de graduação grossa. O primeiro ensaio (TXDW01) foi realizado como um ensaio drenado e pretendia replicar o ensaio TX14, que era um ensaio CID controlado por deformação realizado em um p' inicial de 50 kPa e um parâmetro de estado de +0,09 (Figura 40). O ensaio CID (TX14) mostrou uma redução abrupta no volume em torno de 1% de deformação, sob p' e q constantes. O objetivo do ensaio equivalente de carga controlada (TXDW01) era verificar se essa redução volumétrica levaria à geração de poro-pressão e perda de resistência sob carregamento constante. O ensaio de carga controlada equivalente foi adensado anisotropicamente para tensões próximas àquelas em que o TX14 rompeu; no entanto, a amostra rompeu de maneira rápida sob tensões menores. A natureza rápida da ruptura

Relatório do Pannel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

indica que ela ocorreu de forma não drenada. O ensaio de carga controlada também mostrou *creep* significativo sob q constante.

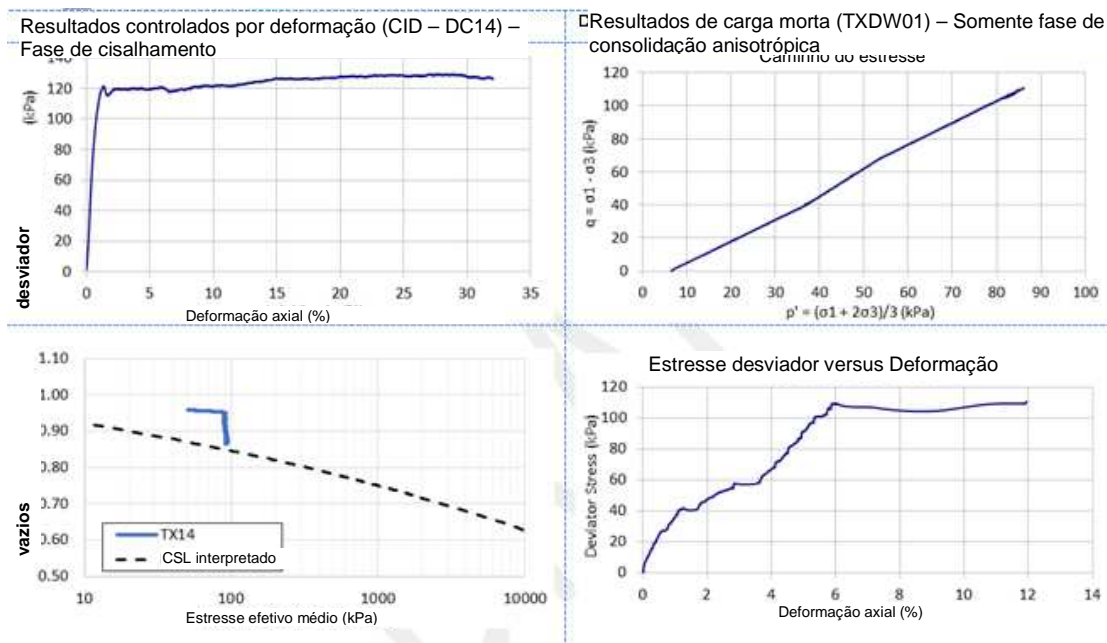


Figura 40: Comparação entre um ensaio de deformação controlada adensado isotropicamente (CID-TX14) e um ensaio de carga controlada adensado anisotropicamente (TXDW01) com o mesmo estado ($\psi = +0,09$) e gradação Grossa

O segundo ensaio de carga constante (TXDW02) foi realizado para a comparação com o ensaio (TX25) não drenado adensado anisotropicamente e controlado por deformação (CAU) realizado com um p' inicial de 200 kPa e um K_0 de 0,5, como mostra a Figura 41. Salvo pela aplicação de carga de peso morto, o TXDW02 foi concluído exatamente da mesma maneira que o TX25. O ensaio de carga controlada (TXDW02) rompeu com uma deformação axial de 0,7% e com uma resistência ao cisalhamento não drenada de pico de 0,55. A razão de resistência residual (liquefeita) desta amostra não pôde ser medida porque a ruptura ocorreu de maneira rápida e produziu ruptura completa da amostra. A resposta frágil, a razão de resistência de cisalhamento não drenada de pico e a pequena deformação específica até o pico foram semelhantes nos dois ensaios, ilustrando a consistência geral entre os métodos de ensaio.

O ensaio de *bender elements* também foi realizado em diversas amostras triaxiais isotropicamente adensadas para avaliar a relação entre a velocidade normalizada da onda de cisalhamento (V_{s1}) e o índice de vazios (e); os detalhes desse ensaio estão contidos no Apêndice E. Esse ensaio mostrou uma relação entre V_{s1} e e , mas houve muito pouca alteração em V_{s1} para uma alteração significativa em e . Esta observação também suporta a premissa de cimentação leve entre as partículas.

Foram realizados ensaios de cisalhamento diretos simples em amostras selecionadas dos solos residuais da fundação natural obtidos na campanha de sondagem de 2019. Os detalhes são apresentados no Apêndice E. Os resultados indicam que os solos residuais não mostram sinais de perda de resistência durante o cisalhamento e têm uma resistência ao cisalhamento não

Relatório do Pannel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

drenada de pico de cerca de 0,3 sob cisalhamento simples. Embora a razão de resistência ao cisalhamento não drenada de pico para os solos da fundação seja menor do que a resistência ao cisalhamento não drenada de pico dos rejeitos, os solos da fundação não mostram sinais de perda de resistência e foram mais dúcteis em sua resposta.

Resultados dos testes controlados por deformação CAU (TX25)

Resultados dos testes de carga morta CAU (TXDW02)

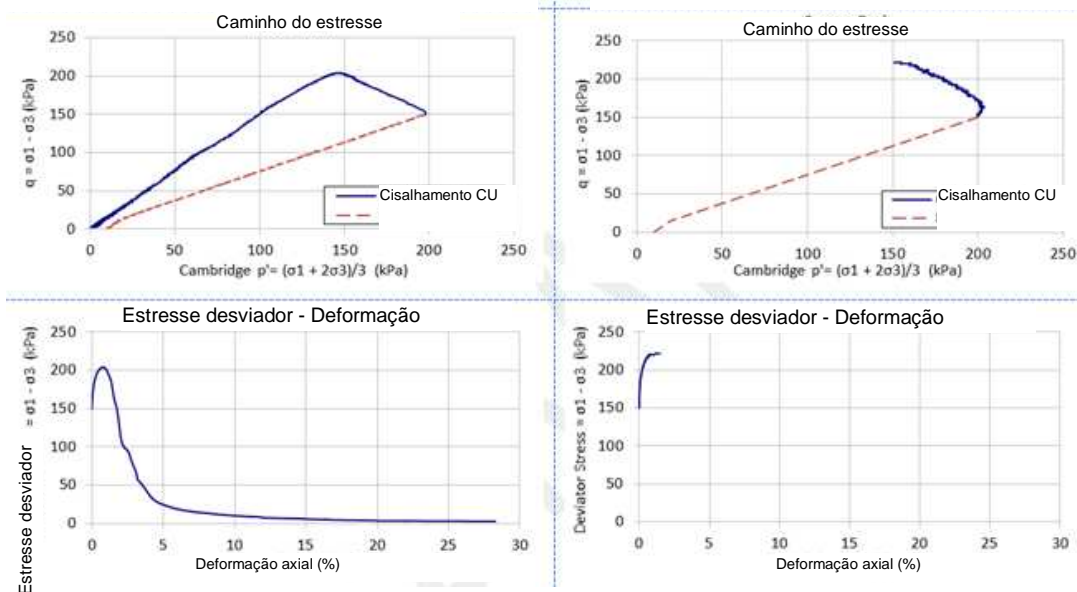


Figura 41: Comparação entre um ensaio adensado anisotropicamente e controlado por deformação (CAU-TX25) e um ensaio controlado por deformação controlada por carga (CAU-TXDW02) com o mesmo estado ($\psi = +0,09$) e gradação grossa

Uma observação principal dos ensaios avançados é a existência de cimentação em algumas das amostras testadas. A cimentação pode ocorrer devido a fenômenos mecânicos, químicos ou biológicos. O fato de as amostras terem sido reconstituídas e terem menos de 24 horas entre a preparação e o cisalhamento sugere que a cimentação pode ser devida a meios mecânicos, porque a cimentação química e biológica normalmente leva um tempo significativo para se formar. No entanto, as imagens de MEV mostram que a cimentação é mais provavelmente devida à ligação química do óxido de ferro e parece se formar rapidamente.

6.6 Parâmetros do Material

Os parâmetros foram calculados a partir dos dados de campo e dados laboratoriais com os objetivos principais de realizar análises de deformação e estabilidade para simular as condições anteriores do rompimento da barragem e para testar possíveis gatilhos. Os detalhes estão contidos no Apêndice E.

Os parâmetros requeridos para as diversas análises são:

- *Módulos de elasticidade e resistência de cisalhamento drenada de pico.* Esses parâmetros foram derivados de dados de ensaio triaxiais. Os valores dos módulos atribuídos foram informados pelo parâmetro de estado estimado dos rejeitos derivados do ensaio de CPTu.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- *Análises de deformação CS.* Os parâmetros CS e dilatação foram derivados a partir dos dados triaxiais. A densidade *in situ* (ou parâmetro de estado) foi estimada a partir dos dados do ensaio de CPTu, e os módulos elásticos foram estimados a partir do *bender elements* e dos dados Vs.
- *Análises de estabilidade.* As resistências de cisalhamento não drenadas de pico e liquefeita e suas deformações específicas associadas foram derivadas de dados de ensaios triaxiais e comparados com dados do ensaio de CPTu.

Um componente importante da avaliação acima é a estimativa do estado *in situ* dos rejeitos antes do rompimento. Como parte dessa avaliação, foi realizada uma análise dos dados disponíveis do ensaio de CPTu. Isso incluiu a delimitação do material dos rejeitos contidos na barragem em tipos de rejeitos semelhantes (ou seja, rejeitos finos e grossos, conforme discutido na Seção 6.1.1). Uma descrição de como o delineamento foi desenvolvido em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D) é apresentada no Apêndice F. Detalhes sobre a seleção de parâmetros são dispostos no Apêndice E.

A estimativa do estado *in situ* seguiu quatro abordagens diferentes. As estimativas iniciais foram realizadas usando o método empírico sugerido por Robertson (2010), mas foi reconhecido que a mineralogia incomum dos rejeitos provavelmente tornaria essas estimativas não confiáveis. Foi aplicada uma segunda abordagem, usando os resultados laboratoriais de ensaios de *bender elements* (Vs) combinados com os valores de Vs medidos em campo. No entanto, essa metodologia era questionável devido à falta de sensibilidade a variações nas medidas de Vs *in situ*. Foi aplicada uma terceira abordagem usando o método sugerido por Plewes et al. (1992), uma vez que esse método permite a entrada dos parâmetros específicos de CSL, disponíveis em ensaios laboratoriais avançados. No entanto, isso também apresenta problemas de confiabilidade, uma vez que a mineralogia e outras propriedades dos rejeitos são diferentes dos dados históricos usados para desenvolver as relações. A abordagem final foi a inversão total dos resultados do ensaio de CPTu usando parâmetros de CS obtidos a partir de ensaios laboratoriais avançados e aplicando a abordagem sugerida por Jefferies e Been (2016). Isso envolve o uso de expansão de cavidade para obter parâmetros estimados de estado do ensaio de CPTu. Isso viabiliza que se considere o comportamento único do material, captado nos ensaios laboratoriais avançados. Essa abordagem final foi considerada a mais confiável. Um resumo dos parâmetros de estado estimados para as gradações grossas e finas é mostrado na Figura 42, juntamente com histogramas usados nesta análise. Os parâmetros de estado médios resultantes são -0,02 para as gradações grossas e +0,16 para as gradações finas. Todos os métodos mostram que os rejeitos finos têm um estado mais fofo do que os rejeitos grossos

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

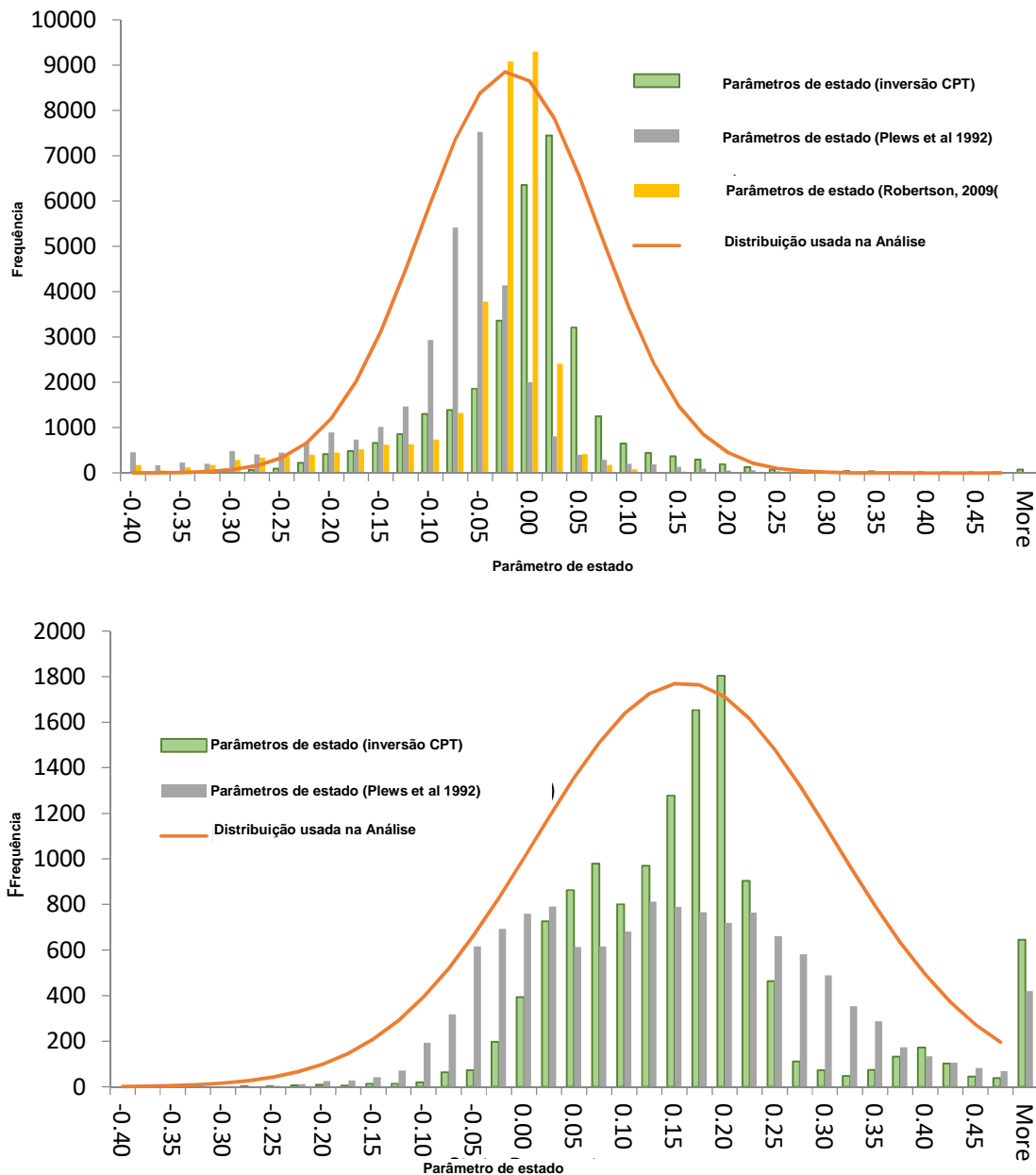


Figura 42: Distribuição cumulativa de parâmetros de estado para gradações grossas e finas

Os resultados dos ensaios triaxiais não drenados adensados anisotropicamente foram utilizados para desenvolver relações entre razões de resistência não drenada de pico liquefeita, assim como a deformação específica necessária para atingir a tanto a resistência de pico quanto a liquefeita e o parâmetro de estado das amostras, porque isso foi necessário para a subsequente modelagem computacional de deformação, conforme descrito na Seção 8.

7 MOVIMENTO DE ÁGUA DENTRO DA BARRAGEM I ANTES DO ROMPIMENTO

7.1 Introdução

A água desempenha um papel importante na estabilidade e no comportamento da barragem. Os dados históricos mostram que os níveis de água dentro da barragem eram geralmente altos, especialmente na área próxima ao pé da barragem, com percolação observada na face da barragem. Portanto, análises detalhadas foram realizadas para entender melhor o movimento da água na barragem, considerando todos os registros de medição dos piezômetros, indicadores de nível de água e dados do ensaio de CPTu.¹³

Um objetivo primário do desenho e construção de qualquer aterro de rejeitos a montante é manter a superfície freática (nível da água) a mais baixa possível.¹⁴ Esse princípio é ilustrado na Figura 43.

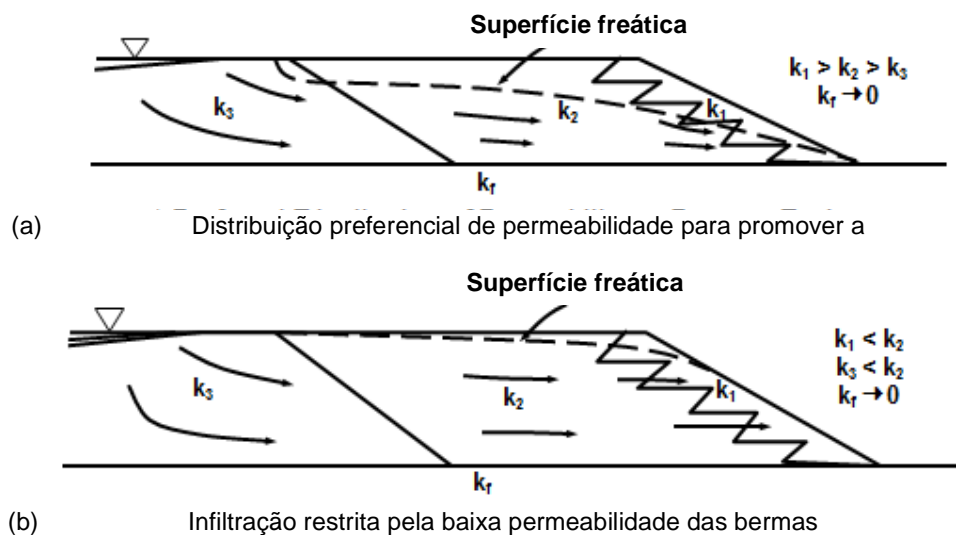


Figura 43: Influência do zoneamento interno na superfície freática (modificado por Vick, 1990)

O Painel desenvolveu modelos de computador abrangentes para avaliar o regime de percolação saturada/não-saturada na Barragem I com base nas medições de campo e dados laboratoriais disponíveis, conforme descrito mais detalhadamente no Apêndice G.

¹³ Certos relatórios históricos sugerem a existência de um sistema complexo de níveis de água empoleirados dentro da barragem antes da falha. O Painel considerou que é improvável que existisse tal condição.

¹⁴ Vick, S. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. Richmond, BC: BiTech Publishers

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

7.2 Abordagem

O movimento de água dentro da Barragem 1 foi modelado e avaliado usando programas de computador para modelar a percolação e infiltração de chuva. A abordagem consistiu em uma modelagem preliminar para estabelecer a influência da geometria, propriedades do material, condições de contorno, sensibilidade do modelo e desempenho geral, seguidas de análises de percolação em 2D e 3D.

Após o término da deposição de rejeitos em meados de 2016, a infiltração das chuvas e a percolação da barragem controlaram os níveis de água na barragem. Detalhes adicionais para a avaliação das condições de contorno de superfície e modelos de percolação podem ser localizados no Apêndice G.

7.3 Precipitação e Infiltração

A precipitação nos três anos anteriores ao rompimento foi baseada nos dados dos pluviômetros automatizados F11 e F18. Com base nesses registros de precipitação, a precipitação média na Barragem I foi de cerca de 1.400 mm por ano. Em 2018, a estação chuvosa foi mais intensa do que nos três anos anteriores. Os detalhes são dispostos no Apêndice G.

Foi realizada uma simulação solo-atmosfera unidimensional (1D) usando dados climáticos obtidos de estações meteorológicas próximas, conforme detalhado no Apêndice C, juntamente com as propriedades hidráulicas da superfície derivadas de ensaios de campo e dados laboratoriais, conforme descrito nos Apêndices E e G. Os resultados da simulação indicam uma infiltração resultante de aproximadamente 50% da precipitação, que foi usada como uma condição de contorno de superfície para os modelos de percolação saturada/não-saturada descritos nas seções seguintes.

7.4 Análises Bidimensionais

Um componente essencial para o desenvolvimento de um modelo abrangente de percolação é a calibração com níveis históricos piezométricos e resultados de dissipação de CPTu medidos na barragem antes do rompimento. A Figura 44 mostra a localização dos piezômetros e indicadores de nível de água na barragem selecionados para calibração, assim como os CPTus que tiveram ensaios de dissipação. Os piezômetros e indicadores de nível de água foram selecionados com base na confiabilidade dos dados, utilizando critérios de localização e instalação conhecidas e continuidade das medições.

Relatório do Pannel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

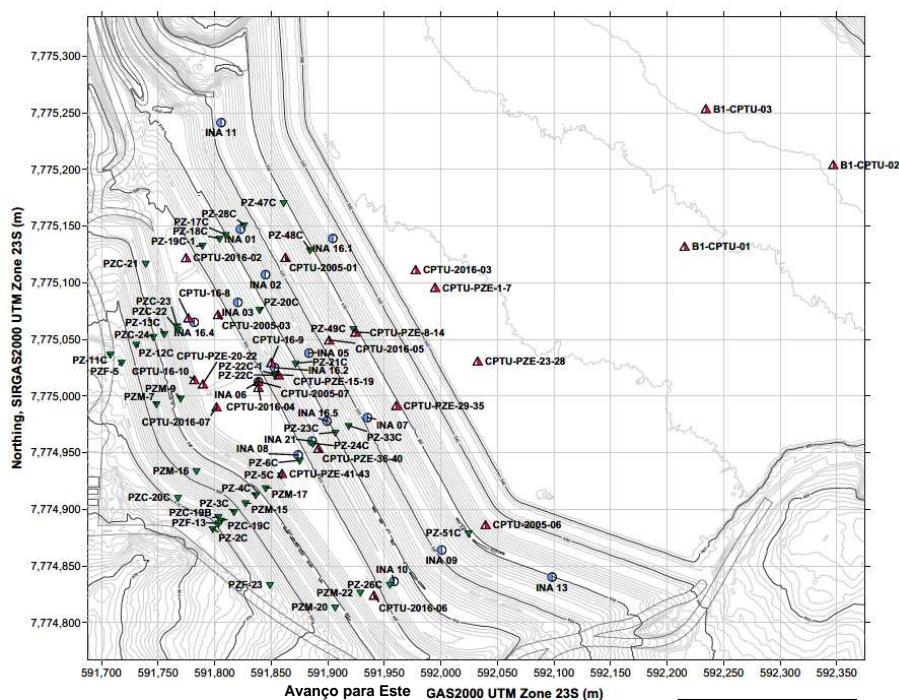
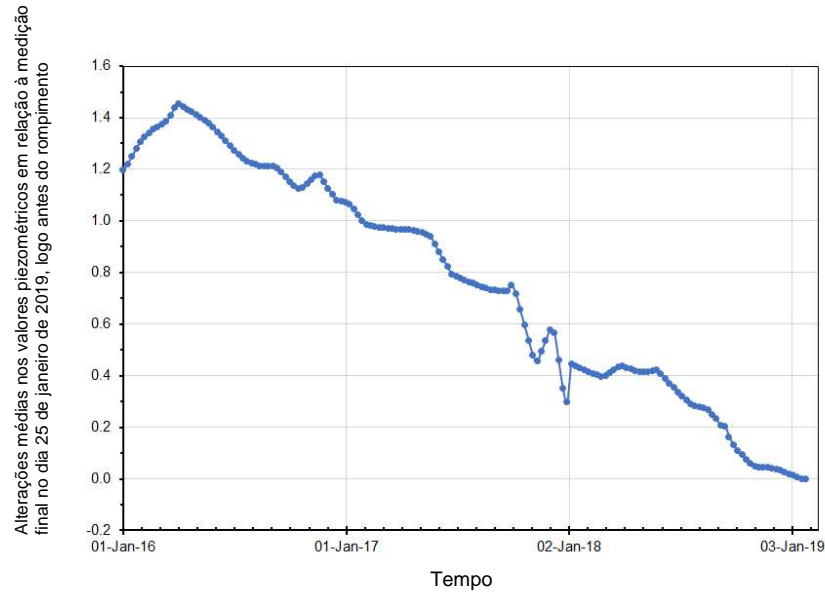


Figura 44: Localização dos piezômetros selecionados, indicadores de nível de água e CPTUs usados para calibração de infiltração

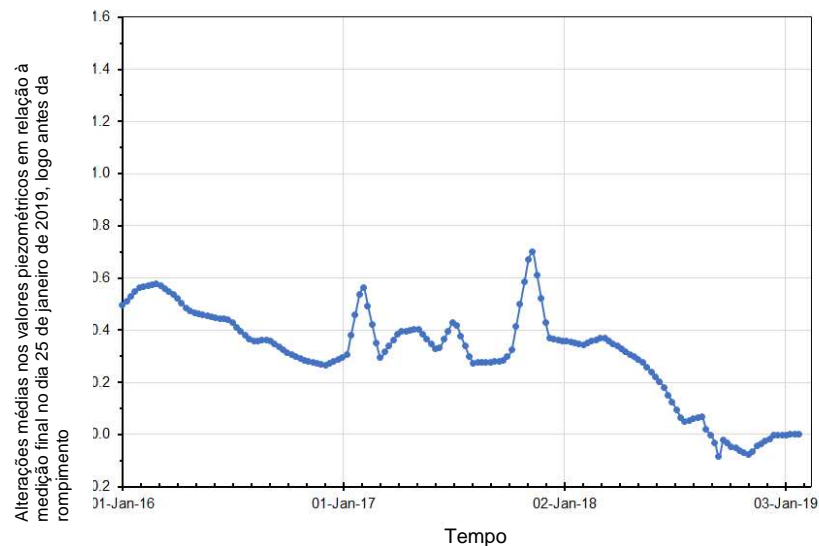
Para avaliar as alterações nos níveis de água na barragem, as leituras de piezômetros e indicadores de nível de água foram agrupadas por local. O agrupamento compreendeu todos os piezômetros e indicadores de nível de água localizados na barragem acima ou abaixo da elevação 900 m msl. Isso combina essencialmente piezômetros e indicadores de nível de água que foram instalados acima do recuo ou no recuo, e abaixo dele. Os níveis médios de água resultantes medidos durante os três anos anteriores ao rompimento estão representados na Figura 45. Os dados foram referenciados em relação à leitura final em janeiro de 2019.

A Figura 45 mostra que houve um declínio gradual no nível médio da água desde 2016. O declínio foi de cerca de 1,4 m para as instalações acima do recuo (900 m msl) e de cerca de 0,5 m para as instalações no recuo ou abaixo dele. Essa observação é atribuída a um lento rebaixamento de água após o término da deposição de rejeitos em 2016. A água parece estar drenando das porções superiores da barragem em direção às porções inferiores. O rebaixamento também cria uma zona não saturada crescente nas partes superiores da barragem. A Figura 45 também mostra pequenos aumentos de curto prazo no nível da água que parecem estar ligados a respostas durante as estações chuvosas.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão



a) Alterações nos piezômetros e indicadores de nível de água acima de 900 m nmm



b) Alterações nos Piezômetros e Indicadores de Nível de Água Abaixo de 900 m nmm

Figura 45: Níveis médios piezométricos e de água em relação às medições finais no dia 25 de Janeiro de 2019

Os modelos de infiltração 2D foram estabelecidos com base na seção transversal mostrada na Figura 23.

Um exemplo de seção transversal recriada (3-3) é mostrado na Figura 24, que ilustra um complexo sistema de camadas de rejeitos grossos e finos subjacentes à barragem, estendendo-se aproximadamente 200 m a montante. Os parâmetros do solo foram baseados nos dados de campo e dados laboratoriais disponíveis e foram modificados para calibrar o modelo de

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

percolação até que as pressões calculadas da água correspondessem aos valores medidos nos piezômetros e ensaios de dissipação de CPTu. A infiltração foi determinada como sendo 50% da precipitação média anual de 1.400 mm/ano, com base nas propriedades climáticas e de rejeitos descritas anteriormente. Um exemplo da calibração resultante (para a Seção transversal 3-3) é mostrado na Figura 46.

Com base em dados de campo e dados laboratoriais, os rejeitos grossos foram designados uma permeabilidade horizontal saturada (k_h) de 5×10^{-6} m/s enquanto os rejeitos finos foram designados um k_h de 1×10^{-7} m/s. Para refletir as diferenças de permeabilidade nas direções vertical e horizontal, foi designada aos rejeitos uma razão de $k_h = 5k_v$, em que k_v é a permeabilidade saturada na direção vertical. A estrutura intercalada dos rejeitos restringe a drenagem descendente e promove a drenagem horizontal em direção à face a jusante da barragem. A drenagem é ainda mais restrita pela permeabilidade relativamente baixa atribuída ao material compactado nas bermas, que varia de 5×10^{-7} m/s a 1×10^{-9} m/s.

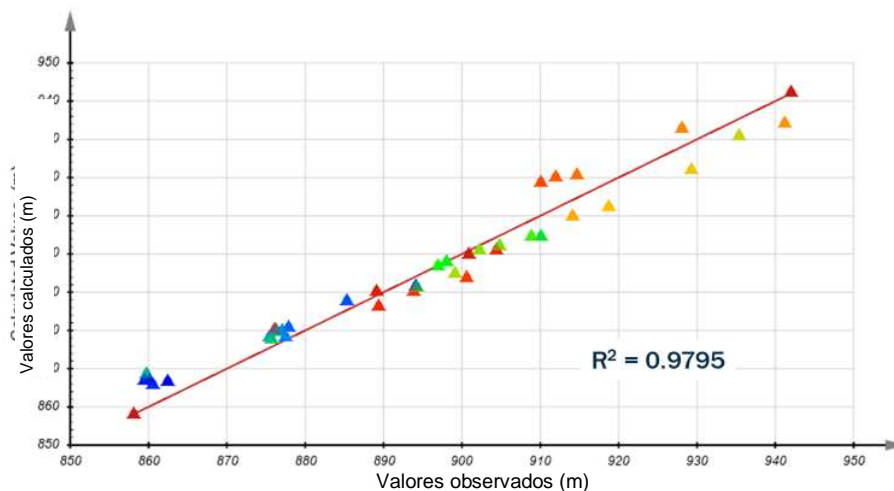


Figura 46: Valores de piezômetro calculados versus observados para um modelo de infiltração 2D na seção transversal 3-3

Foi encontrada uma forte correlação entre os níveis de água medidos e calculados, o que fornece confiança na exatidão do modelo 2D de percolação saturada/não-saturada.

A Figura 47 apresenta um resumo dos resultados da simulação numérica 2D para a seção transversal 3-3.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

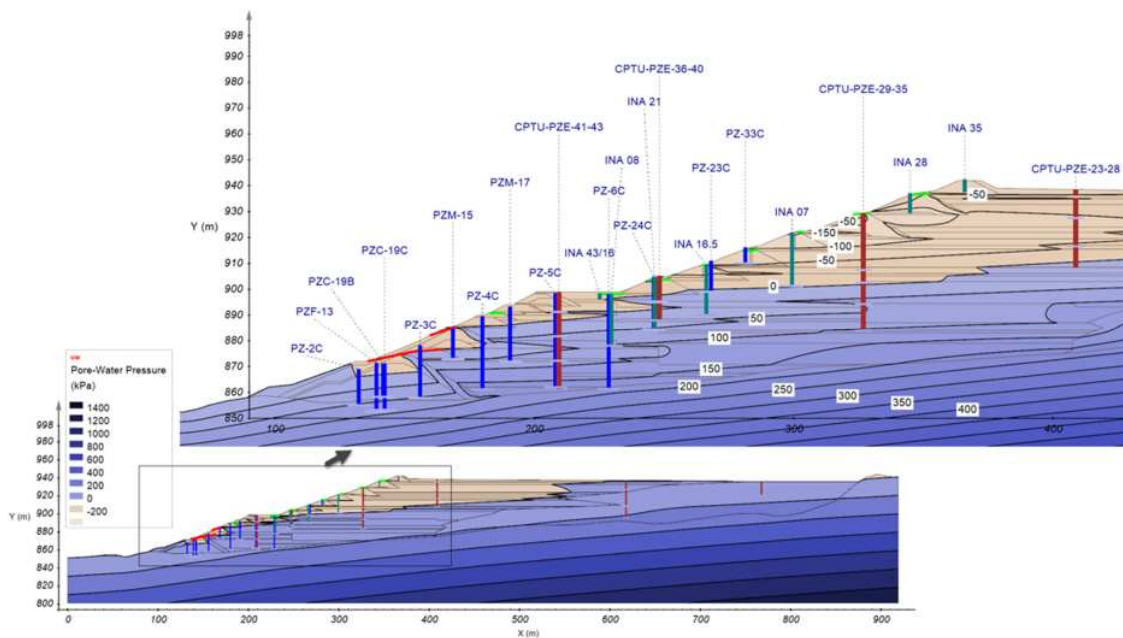


Figura 47: Pressões de água computadas do modelo de infiltração 2D para a seção transversal 3-3

O efeito de baixa drenagem descendente e fluxo restrito nas bermas é claramente aparente nos resultados da simulação apresentada na Figura 47. O nível de água mostrado na Figura 47, que corresponde às leituras do piezômetro e às medidas de dissipação do ensaio de CPTu, é alto na região do pé da barragem e abaixo do recuo. A análise de percolação mostra que uma porção significativa da barragem estava saturada com um alto nível de água, especialmente na região do pé.

Embora a posição do nível da água e a percolação associada na face a jusante da barragem não variem significativamente, a alta precipitação produz uma perda de sucção (matricial) na zona não saturada acima do nível da água. O regime climático próximo à barragem apresenta períodos úmidos e secos distintos com chuvas sazonais que fazem com que o perfil de sucção na zona não saturada diminua e aumente. Além disso, flutuações de longo prazo na precipitação anual são sobrepostas a essas variações sazonais, e o perfil de sucção na zona não saturada é considerado transitório e variável.

Análises computacionais 2D, utilizando dados de chuva de janeiro de 2016 a janeiro de 2019, foram realizadas para avaliar alterações nas sucções do solo acima do nível da água. A Figura 48 mostra um exemplo de perfil em um local próximo à crista da barragem na seção transversal 3-3 e mostra que os valores calculados de sucções na zona não-saturada diminuíram significativamente à medida que a chuva se infiltrou nos materiais não-saturados. A perda de sucção associada à infiltração é da ordem de 50 kPa, o que reduz a resistência ao cisalhamento não-saturada nessa zona em cerca de 10 kPa a 15 kPa. O impacto dessa perda de resistência na zona não saturada é discutido mais adiante na Seção 8. A Figura 48 também ilustra que a

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

pressão média da água abaixo do nível da água pode ser aproximada por um perfil de pressão hidrostática de 50%.

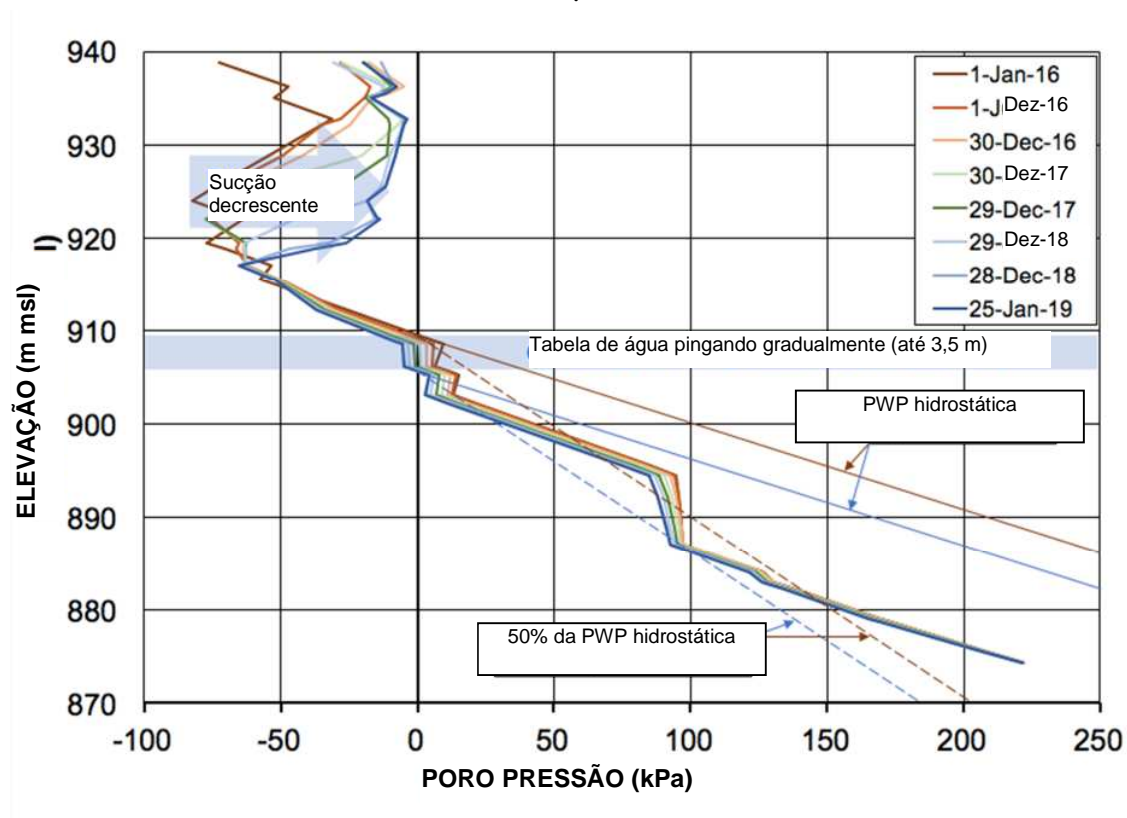


Figura 48: Perfil de pressão da água nos poros ao lado da berma superior na seção transversal 3-3

7.5 Análises Tridimensionais

Também foi criado um modelo tridimensional (3D) para avaliar o regime de fluxo tridimensional, que permite uma melhor representação da estrutura curva da barragem, a topografia natural do solo subjacente e a localização dos drenos no modelo.

As propriedades do material, a taxa de infiltração e as camadas utilizadas no modelo de infiltração tridimensional (3D) foram as mesmas que as utilizadas no modelo bidimensional (2D). Os resultados das simulações tridimensionais (3D) indicaram um nível de água um pouco menor em alguns locais, em comparação com as simulações bidimensionais (2D). Isso foi atribuído à diferença na localização do lago de decantação entre os modelos bidimensionais (2D) e tridimensional (3D). A localização e o tamanho do lago de decantação no modelo tridimensional (3D) representam uma área menor do que o reservatório usada nas simulações bidimensionais (2D). A calibração do modelo tridimensional (3D) teve correlação semelhante com os dados medidos que os modelos bidimensionais (2D).

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

7.6 Observações das Análises

As principais observações da modelagem de percolação da movimentação de água na barragem são resumidas a seguir.

- As camadas de rejeitos grossos e finos intercalados, juntamente com a baixa permeabilidade das bermas, impediram a drenagem da barragem.
- Foi verificado que a infiltração de 50% da precipitação média anual fornece uma boa calibração com os níveis de água medidos dentro da Barragem 1 e, portanto, foi considerada uma premissa razoável.
- A combinação de altas precipitações e infiltrações e a ausência de drenagem produziram altos níveis de água, especialmente na região do pé da barragem.
- Foi detectada uma zona de rejeitos não-saturados próximo à crista da barragem.
- Embora a posição do nível da água e a percolação associada na face a jusante da barragem não mudem significativamente ao longo do tempo, altas precipitações e infiltrações diminuem as sucções na zona não saturada. A perda de sucção associada à infiltração de chuvas é da ordem de 50 kPa, o que reduz a resistência ao cisalhamento nessa zona de 10 kPa a 15 kPa.

Os resultados das análises de percolação foram utilizados para informar e orientar as análises detalhadas de deformação descritas na Seção 8.

8 ANÁLISES DE ESTABILIDADE E DEFORMAÇÃO – INVESTIGANDO DIVERSOS GATILHOS

8.1 Abordagem

O Painel investigou gatilhos potenciais criando modelos computacionais da barragem em 2D e 3D. Com base em dados históricos, seções transversais detalhadas foram recriadas para captar a distribuição de materiais dentro da barragem, conforme descrito na Seção 6.2. Os modelos de deformação 2D e 3D foram criados a partir dessas seções transversais. O objetivo desses modelos foi avaliar possíveis gatilhos de liquefação. As análises de estabilidade e deformação são discutidas de maneira detalhada no Apêndice H.

8.2 Estabilidade da Barragem 1

A abordagem tradicional para avaliar a estabilidade de uma barragem é utilizar pelo método de equilíbrio limite (LEM) (*limit equilibrium methods*). Os LEM assumem que os materiais têm um valor bem definido para a resistência ao cisalhamento, e o método não leva em conta nenhuma deformação para gerar essa resistência (ou seja, os LEM assumem que os materiais são rígidos e perfeitamente plásticos). Para materiais que têm uma relação tensão-deformação que aumenta para um valor único de resistência sem perda de resistência, essa suposição é razoável. É prática comum usar softwares comerciais para executar os LEM, e esses programas

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

permitem a entrada de uma variedade de camadas de solo e condições da água subterrânea e buscam a superfície de ruptura que tenha o menor FS. O FS calculado nesses modelos é o valor médio ao longo da superfície de ruptura avaliada. Dependendo da geometria, das condições da água subterrânea e da disposição das camadas, regiões na superfície de ruptura podem apresentar valores de FS locais mais altos ou mais baixos. Esses programas podem ser executados em 2D e 3D.

Os cálculos históricos de estabilidade usando LEM realizados antes do rompimento e que usaram uma razão de resistência não drenada de $s_u/\sigma'_{vo} = 0,26$ calcularam um FS próximo a 1,0.¹⁵ No entanto, se o FS fosse muito próximo a 1,0, esperava-se que a barragem mostrasse diversos sinais de instabilidade, como rachaduras e deformações, porque os materiais devem se deformar para atingir sua resistência de pico. O fato de a barragem não mostrar sinais de instabilidade antes do rompimento sugere que os resultados de LEM tradicionais foram enganosos.

Os dados laboratoriais apresentados na Seção 6.4 mostram que os materiais retirados na barragem exibiam cimentação e eram suscetíveis à perda de resistência significativa. Portanto, os materiais têm uma alta resistência de pico em deformações específicas pequenas, mas resistência ao cisalhamento muito baixa em deformações específicas extensas (resistência liquefeita). A quantidade de deformação específica (deformação) necessária para exceder a resistência de pico é muito pequena. Em condições em que uma parte significativa dos materiais na barragem tem potencial para perda significativa de resistência, os resultados do LEM podem ser enganosos.

Nesses casos, pode haver regiões ao longo da superfície de ruptura que excederam a resistência de pico e têm um FS local menor que 1,0. Se os LEMs forem realizados usando a resistência de pico, pode ser calculado um FS alto que não reflete a probabilidade de instabilidade. A reanálise da estabilidade da Barragem I usando os valores máximos de resistência não drenada determinados a partir de ensaios laboratoriais realizados pelo Painel, que refletem a resistência adicional devido à cimentação, resultou em um FS próximo a 1,5. No entanto, isso ignora possíveis regiões de alta tensão de cisalhamento, onde o FS local pode ser menor que 1,0. A resistência adicional devido à cimentação essencialmente permite que um talude mais íngreme seja construído sem sinais de instabilidades, mesmo que possa ser potencialmente instável. A instabilidade pode resultar quando um evento desencadeia a perda de resistência não drenada em partes do talude. Quanto maior a perda de resistência e maiores as tensões na barragem, mais repentina e rápida será o potencial rompimento.

A Figura 49 mostra esquematicamente as diferentes respostas aproximadas de tensão-deformação e caminho de tensão para solos que não têm perda de resistência, perda de resistência sem cimentação e perda significativa de resistência devido à cimentação. Materiais que não apresentam perda de resistência tipicamente apresentam deformação significativa antes do rompimento. Os materiais que têm perda de resistência sem cimentação mostram menos deformação antes do rompimento em comparação com os materiais sem perda de

¹⁵ Veja, e.g., Revisão periódica de Segurança 2018 da TÜV SÜD.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

resistência. Os materiais com perda de resistência significativa devido à cimentação tendem a mostrar muito pouca deformação antes do rompimento e requerem muito pouca deformação específica para desencadear a perda de resistência.

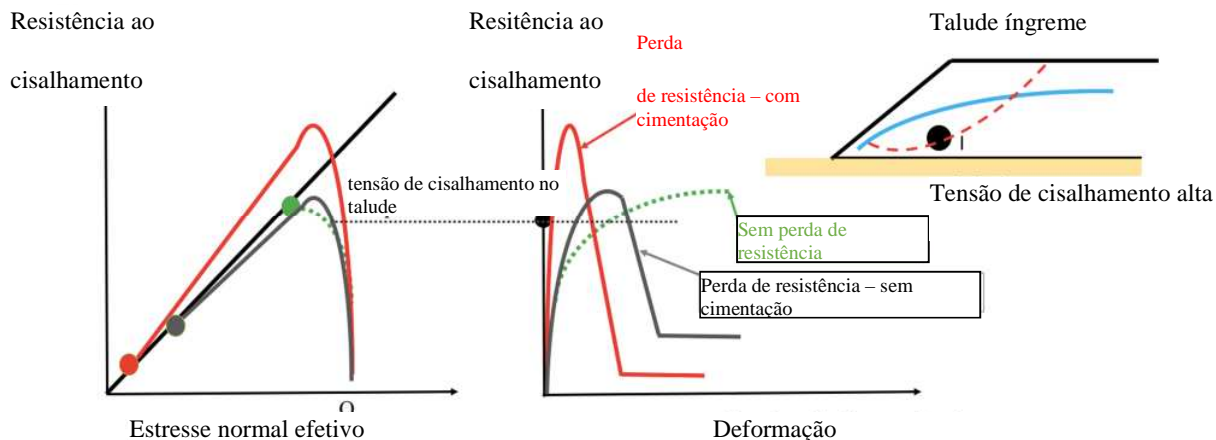


Figura 49: Comparação esquemática no comportamento entre solo que não apresenta perda de resistência, solo com perda de resistência e ausência de cimentação ou com presença de cimentação

8.3 Análise de Deformação da Barragem 1

8.3.1 Abordagem Geral

Para evitar as limitações dos LEM, podem ser realizadas análises de deformação para captar a possível perda de resistência nos materiais. Isso requer uma modelagem numérica mais complexa, inclusive relações de tensão-deformação representativas de cada tipo de material na barragem. Essas análises podem ser realizadas em 2D e 3D; o Painel concentrou-se na modelagem 3D.

8.3.2 Avaliação dos Mecanismos de Desencadeamento (Gatilhos)

8.3.2.1 Avaliação Inicial

Antes de iniciar as análises, os mecanismos de gatilhos descritos na Seção 3.3 foram analisados, a fim de eliminar mecanismos que não eram viáveis. Os seguintes mecanismos puderam ser avaliados sem a necessidade de análises detalhadas por computador.

Carregamento rápido, como construção de barragem ou lançamento de rejeitos

Nenhuma construção de barragem ocorreu após 2013 e o lançamento de rejeitos cessou em julho de 2016. Portanto, o carregamento rápido não foi um gatilho viável.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Carregamento cíclico rápido, como sismos ou detonações

A avaliação dos registros sismográficos do dia do rompimento mostrou que nenhum sismo ou detonação foram registrados antes da primeira observação do rompimento. Os detalhes são fornecidos no Apêndice I. Portanto, sismos e detonações não foram considerados gatilhos viáveis. Há pequena atividade sísmica registrada menos de 30 s antes das primeiras deformações observadas, que é considerada o resultado da perda de resistência interna que ocorreu na barragem antes da manifestação visível do rompimento.

Carga por fadiga, como detonações repetidas

Embora no dia do rompimento nenhuma detonação tenha sido registrada antes da primeira deformação observada, sabe-se que ocorreram detonações regulares em várias cavas na área. Existe o potencial de que detonações repetidas possam induzir deformações específicas cumulativas na barragem. No entanto, a análise dos registros sismográficos próximos de detonações anteriores, conforme detalhado no Apêndice I, mostra que as deformações específicas induzidas nos rejeitos não teriam excedido o nível limite de deformação específica dos rejeitos e o comportamento destes materiais teria permanecido elástico e não teria acumulado deformações específicas. Portanto, a carga de fadiga resultante de detonações repetidas na área não foi considerada um gatilho viável.

Alívios de carga, como: (i) aumento dos níveis de água dentro da barragem; (ii) deformações na fundação; ou (iii) a presença de camadas fracas

Os indicadores de piezômetro e nível de água mostram que os níveis de água estavam caindo lentamente nos três anos anteriores ao rompimento. Os detalhes são fornecidos no Apêndice G. Os ensaios realizados pelo Painel não mostraram indicação de camadas fracas contínuas nos solos naturais sob a barragem, e os ensaios de laboratório não mostraram indicação de perda de resistência nestes solos. Conforme descrito na Seção 5, a análise dos dados do InSAR mostra que as deformações no período de um ano antes do rompimento eram pequenas, lentas e predominantemente na direção vertical. As deformações horizontais perto do pé da barragem foram em sua maioria de menos de 10 mm/ano durante esse período, mas incluíram algumas pequenas áreas em que a deformação foi até a 30 mm/ano. Isso indica que não houve deformações horizontais significativas que podiam estar ligadas a deformações na fundação ou devido a camadas mais fracas. Embora os materiais na barragem sejam compostos por rejeitos grossos e finos intercalados, os dados dos ensaios de laboratório e da velocidade da onda de cisalhamento *in situ* mostram que os rejeitos finos têm rigidez e compressibilidade semelhantes às dos rejeitos grossos. Portanto, esta intercalação não induziria deformações diferenciais e alívios de carga significativos entre as camadas. Assim, os mecanismos de alívio de carga não foram gatilhos viáveis.

Erosão interna e *piping*

Não houve evidência de erosão interna ou *piping* associada ao rompimento. Embora a percolação da face da barragem tenha de fato ocorrido, a taxa de percolação geralmente era lenta e os volumes medidos nos drenos de fluxo instalados na barragem não aumentaram com

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

o tempo, e nem o aumento nem a descarga significativa de finos de minério foram observados perto do momento do rompimento. O mecanismo de rompimento observado nas imagens de vídeo era incompatível com erosão interna e *piping*. Portanto, erosão interna e *piping* não foram gatilhos viáveis.

8.3.2.2 Avaliação Detalhada Usando Modelagem Computacional

Os seguintes mecanismos foram levados em conta para uma avaliação detalhada na modelagem de deformação:

- Interação humana, como perfuração de furos de sondagem verticais e instalação de DHPs;
- Perda localizada de resistência devido à afluição de água de fontes subterrâneas;
- Perda de sucção e resistência na zona não saturada acima da linha freática; e
- *Creep* devido a deformações específicas cumulativas que se desenvolvem sob uma carga constante.

O objetivo das análises de deformação foi avaliar o gatilho mais provável da instabilidade, compatível com todos os dados e observações disponíveis. Como a barragem não mostrava sinais de instabilidade antes do rompimento, e mesmo assim se rompeu repentinamente, foi reconhecido que o evento de gatilho poderia ser relativamente pequeno. O modelo computacional foi criado para corresponder às condições de pré-rompimento da barragem, levando em consideração todos os dados disponíveis sobre camadas, variabilidade do solo, pressões de água e parâmetros do material, assim como eventos conhecidos de antes do rompimento da Barragem I que não desencadearam a instabilidade. Isso permitiu ao Painel avaliar e identificar o gatilho mais provável.

A abordagem incluiu as três etapas seguintes:

Etapas 1 – Estabelecer Condições de Pré-rompimento

- Desenvolver a geometria do modelo, a fim de corresponder às camadas de rejeitos descritas anteriormente;
- Desenvolver parâmetros de material para essas camadas, que correspondam ao comportamento de perda de resistência frágil observado em ensaios de laboratório, e usá-los para atribuir parâmetros no modelo;
- Aplicar os parâmetros de resistência drenada;
- Atribuir variações espaciais e estatísticas dos principais parâmetros de material, de acordo com as variações calculadas a partir dos dados de ensaios de CPTu; e

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

- Determinar os estados de tensão pré- rompimento em toda a barragem, construindo a barragem no modelo de maneira compatível com o histórico da construção.

Etapa 2 – Triagem Inicial de Vários Gatilhos de Liquefação

- Estabelecer uma condição extrema, atribuindo parâmetros de resistência não drenada abaixo do nível da água;
- Com base nos resultados dos ensaios de laboratório, atribuir uma distribuição dos picos de resistência não drenada e liquefeita às camadas de rejeitos, bem como definir a distribuição das deformações específicas necessárias para causar uma perda de resistência;
- Calibrar o modelo com base nas atividades pré-rompimento; e
- Avaliar, usando simulações computacionais, o potencial de cada um dos possíveis gatilhos capazes de causar uma perda de resistência não drenada de maneira compatível com os eventos anteriores ao rompimento e de corresponder às condições observadas durante o rompimento.

A etapa 2 da análise foi baseada em uma suposição simplificada de que as resistências não drenadas estavam mobilizadas por toda a barragem e que a barragem tinha uma pequena margem de estabilidade antes que o possível gatilho ocorresse. O objetivo desta etapa foi testar o efeito dos possíveis gatilhos na barragem nessa condição. Esta abordagem permitiu ao Painel avaliar quais dos possíveis gatilhos não teriam um impacto significativo na estabilidade da barragem, mesmo nesta condição um tanto extrema, reduzindo assim o número de potenciais gatilhos para avaliação posterior.

Etapa 3 – Avaliação Detalhada dos Gatilhos Mais Prováveis

- Avaliar, usando simulações computacionais, os demais gatilhos possíveis que tiveram um impacto significativo na estabilidade da barragem, nas análises simplificadas da etapa 2; e
- Incluir deformações por *creep*, sob altas tensões de cisalhamento, observadas nos ensaios laboratoriais avançados.

8.3.3 Análises de Deformação da Etapa 2

As análises de deformação incluíram distribuições estatísticas e espaciais de resistência que são compatíveis com as distribuições vistas nos dados dos ensaios de CPTu. Múltiplas simulações foram necessárias para obter modelos representativos que correspondessem às observações pré-rompimento e usassem a resposta não drenada determinada a partir dos ensaios laboratoriais avançados.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Atividades Pré-rompimento

Para auxiliar na calibração do modelo, o Painel identificou duas atividades nos meses anteriores ao rompimento que sabidamente não o desencadearam:

- DHP 15 instalado em junho de 2018; e
- A perfuração do furo de sondagem SM-09 no início de 2019.

Nas análises, conforme detalhado no Apêndice H, a instalação dos DHPs foi simulada através de uma pressão de água aplicada de 600 kPa e 1000 kPa na extremidade do DHP 15. A perfuração do furo de sondagem SM-09 foi simulada tendo como premissa uma condição que resultaria na perda de resistência não drenada em um raio de 1 m em torno do SM-09. Como as evidências mostram que a barragem estava muito próxima do rompimento, um modelo computacional foi considerado representativo da condição de pré-rompimento quando nenhuma destas atividades causou rompimento, mas uma pequena redução na resistência de cisalhamento em toda a barragem poderia ter causado.

Os modelos computacionais representativos resultantes foram então utilizados para testar os gatilhos restantes.

Interação humana

Em junho de 2018, durante a instalação do DHP 15, ocorreu uma perda de resistência localizada na Barragem I, conforme descrito na Seção 4.4.2. Devido à natureza dos rejeitos presentes na barragem e, portanto, em torno do DHP 15, é provável que o material tenha recuperado sua resistência em um curto período após o incidente. Os relatórios indicam que a percolação foi controlada em alguns dias, e nenhuma indicação de qualquer impacto continuado do DHP 15 é vista nas imagens de drone gravadas apenas uma semana antes do rompimento. Apesar disso, as análises consideraram um cenário hipotético extremo, em que a perda de resistência ocorreu ao redor do DHP 15 no final de janeiro de 2019, potencialmente desencadeando o rompimento. Isto foi avaliado atribuindo-se uma condição de perda de resistência não drenada em um raio de 1 m em torno do DHP 15. Isto é um cenário improvável, e não levou ao rompimento da barragem nos modelos representativos. Portanto, o Painel concluiu que a liquefação em torno do DHP 15 não é um gatilho viável.

O furo de sondagem que estava sendo perfurado à época do rompimento era o SM-13. O potencial para essa atividade desencadear a liquefação foi avaliado pela imposição de uma condição de perda de resistência não drenada em um raio de 1 m do furo de sondagem, até uma profundidade de 80 m. Essa condição foi considerada como representativa de um cenário extremo. Essa condição não causou deformações significativas ou rompimento da barragem nos modelos representativos. Portanto, a perfuração do SM-13 não é considerada um gatilho viável.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

Nascentes subterrâneas

O Painel considerou que um cenário em que um influxo de água subterrânea entra na barragem no local de nascentes subterrâneas conhecidas e pré-existentes ao longo da borda norte da bacia de rejeitos, que por sua vez gera uma zona potencial de perda de resistência nestas regiões. Isto foi tratado como um evento localizado ao redor das nascentes, porque os piezômetros não detectaram uma mudança significativa na pressão de água sob a barragem antes do rompimento.

Essas condições foram simuladas nos modelos representativos, atribuindo uma condição de perda de resistência não drenada aos rejeitos em um raio de 50 m ao redor das nascentes. Este cenário causou deformações locais significativas ao redor das nascentes; no entanto, não resultou em rompimento da barragem. O padrão de deslocamentos resultante dessa simulação não refletia as observações do rompimento obtidas das evidências em vídeo e, portanto, a afluência de água das nascentes subterrâneas não foi considerada um gatilho viável.

Perda de sucção na zona não saturada

A análise de percolação descrita na Seção 7 identificou que uma perda de sucção decorrente da precipitação cumulativa nos anos depois da cessação de lançamento de rejeitos, culminando em precipitação intensa registrada no final do ano 2018, levaria a uma pequena redução de resistência na zona anteriormente não-saturada (ou seja, na zona acima do nível da água). Isso foi avaliado na análise, aplicando-se uma redução de resistência na zona acima da linha freática. Foram avaliados três valores de redução de resistência: 5 kPa, 10 kPa e 15 kPa. A redução de resistência foi avaliada como sendo não maior que 15 kPa. Verificou-se que uma redução de resistência na ordem de 5 kPa gerou apenas pequenas deformações da barragem; no entanto, uma redução de até 15 kPa na resistência desta zona causou maiores deformações na região onde ocorreu o rompimento. Essa análise mostrou que uma perda significativa de sucção poderia potencialmente ter contribuído para o mecanismo de rompimento observado e exigiu análises adicionais na etapa 3.

A etapa 2 da análise mostrou que os eventos que causaram a perda localizada de resistência na condição marginalmente estável da barragem, no geral, não levaram à instabilidade global. O mais generalizado, possível gatilho de perda de sucção foi analisado mais adiante na etapa 3 pois leva a deformações generalizadas. Uma vez que o *creep*, como um possível mecanismo de rompimento, é de natureza mais global, ele não foi testado na etapa 2, mas foi avaliado em detalhes na etapa 3.

8.3.4 Etapa 3 das Análises de Deformação

A etapa 3 envolveu a avaliação de uma condição observada em laboratório, na qual amostras fofas de rejeitos continuaram acumulando deformação sob uma tensão de cisalhamento alta e constante. Esse acúmulo de deformação específica sob carga constante é chamado de *creep*. A taxa de *creep* depende do estado (densidade) do material e do nível de tensão de cisalhamento. Os materiais que estão fofos podem acumular tensões significativas de *creep* sob altas tensões de cisalhamento. Para um material que pode ter uma perda significativa de

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

resistência, o acúmulo de deformações específicas internas sob carga constante pode pôr fim levar ao rompimento por *creep*. As taxas de *creep*, com base nos ensaios laboratoriais avançados, foram incorporadas às simulações computacionais, usando os modelos de referência identificados na etapa 2.

O impacto de *creep* foi avaliado em três casos: i) separadamente; ii) associado a uma redução de resistência nos materiais não-saturados acima do nível da água devido à infiltração das chuvas; e iii) combinado com a perfuração do furo de sondagem SM-13.

Simulações computacionais mostraram que só o *creep* era capaz de ser o gatilho do rompimento, mas as deformações resultantes não correspondem bem às deformações observadas. A adição da perfuração do furo de sondagem SM-13 não teve um impacto significativo na estabilidade da barragem nas simulações. Simulações computacionais que juntavam deformações específicas acumuladas devido ao *creep* com redução de resistência nos materiais não saturados acima do nível d'água devido a infiltração da chuva mostrou que, embora *creep* foi o fator contribuinte mais dominante que resultou no rompimento da barragem marginalmente estável, a redução de resistência nos materiais não-saturados foi uma contribuição importante.

A Figura 50 mostra as deformações por *creep* pré-rompimento calculadas, combinadas à redução de resistência de 15 kPa devido à perda de sucção na secção transversal 3-3, com base nas simulações computacionais em 3D. As deformações calculadas antes do rompimento são pequenas em magnitude e mostram uma tendência semelhante à avaliada nas análises InSAR (mostradas na Figura 20). As simulações computacionais mostram que as deformações devido ao *creep* antes do rompimento podem ser pequenas. A Figura 51 mostra as deformações calculadas no rompimento devido ao *creep* combinadas à redução de resistência de 15 kPa devido à perda de sucção na seção transversal 3-3, com base em simulações computacionais em 3D. A Figura 51 mostra um mecanismo de rompimento calculado que corresponde aproximadamente às deformações observadas a partir da evidência em vídeo no momento do rompimento, confirmando que a combinação de *creep* e redução de resistência devida à precipitação intensa no final do ano 2018 é a melhor explicação para o rompimento desta barragem marginalmente estável.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

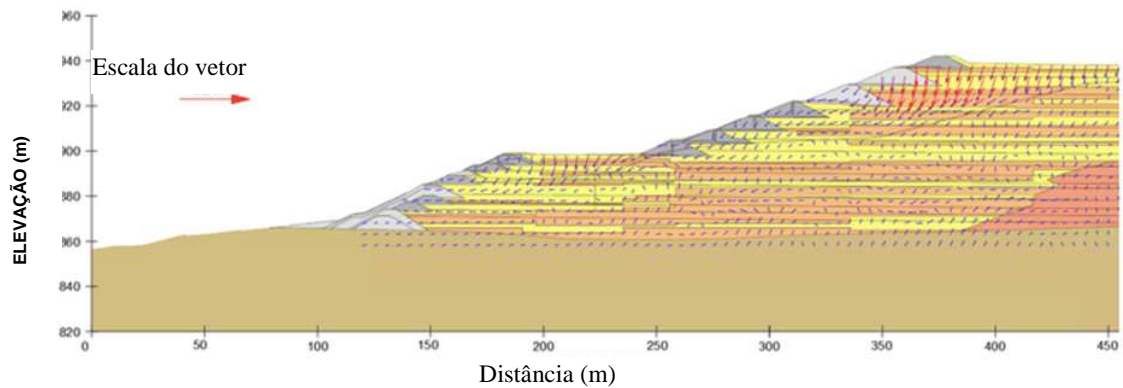


Figura 50: Seção 3-3, mostrando as deformações calculadas antes do rompimento devido ao *creep* junto com uma redução de resistência devido a uma perda de sucção a partir das simulações computacionais tridimensionais (3D)

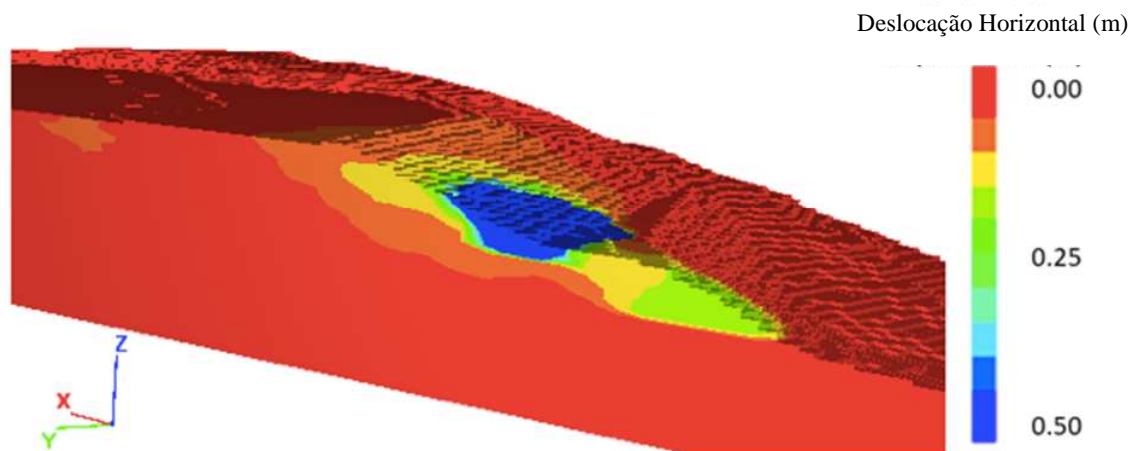


Figura 51: Seção 3-3, Mostrando as Deformações Calculadas no Rompimento Devido ao *Creep*, Junto Com Uma Redução de Resistência Devido a Uma Perda de Sucção A Partir das Simulações Computacionais Tridimensionais (3D)

As evidências mostram que o rompimento em 25 de janeiro de 2019 foi devido a uma combinação de *creep* e uma redução pequena de resistência na zona não-saturada causada pela precipitação cumulativa desde a cessação do lançamento de depósitos, incluindo a precipitação intensa no final do ano 2018.

O Painel também conduziu uma análise para avaliar a deformação após o rompimento, usando *Material Point Method* (MPM). Esta análise usou uma relação similar de *strain weakening* utilizados nas análises de deformação. O MPM replicou a progressão do rompimento aproximadamente nos primeiros 5 s de deformação.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

9 CONCLUSÕES

A experiência com rompimentos anteriores de barragens de rejeitos mostra que eles raramente se devem a uma só causa. O histórico a seguir criou as condições de instabilidade na Barragem I:

- Um projeto que resultou em um talude íngreme construído a montante;
- O gerenciamento da água dentro da bacia de rejeitos que às vezes permitia que a água chegasse perto da crista barragem, resultando no lançamento de rejeitos fracos perto da crista;
- Um recuo no projeto que empurrou as partes superiores do talude para cima dos rejeitos finos e mais fracos;
- A falta de drenagem interna significativa que resultou em um nível de água alto na barragem, principalmente na região do pé da barragem;
- Alto teor de ferro, resultando em rejeitos pesados com cimentação entre partículas. Esta cimentação gerou rejeitos rígidos que apresentavam comportamento potencialmente muito frágil se sujeitos a um gatilho que os levasse à condição não drenada; e
- Precipitação regional alta e intensa na estação chuvosa, o que pôde resultar em perda de sucção, produzindo uma pequena perda de resistência nos materiais não-saturados acima do nível da água.

O Painel abordou as três perguntas a seguir:

- Por que ocorreu o rompimento?
- Quais foram os gatilhos do rompimento?
- Por que o rompimento ocorreu quando ocorreu?

O Painel constatou que o rompimento e o deslizamento de lamas dele resultante decorreram da liquefação estática dos rejeitos da barragem. O histórico descrito acima gerou uma barragem composta principalmente por rejeitos fofos, saturados, pesados e de comportamento frágil, com altas tensões de cisalhamento no talude a jusante, resultando numa barragem marginalmente estável (i.e., perto do rompimento em condições não drenadas). Ensaios de laboratório mostraram que a quantidade de deformação específica necessária para desencadear a perda de resistência pode ser muito pequena, principalmente nos rejeitos mais fracos. Estes foram os principais componentes que tornaram possível a liquefação estática. O componente restante era um evento ou uma combinação de eventos que desencadearia a perda de resistência não drenada nos rejeitos.

O Painel concluiu que a súbita perda de resistência e o rompimento resultante da barragem marginalmente estável foi devido a uma combinação crítica de deformações específicas

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

contínuas devidas ao *creep*, e uma redução de resistência devida à perda de sucção na zona não-saturada causada pela precipitação cumulativa desde que cessou o lançamento de rejeitos, incluindo a precipitação intensa no final do ano 2018. Isso seguiu vários anos de precipitação crescente depois de que o lançamento de rejeitos cessou em julho de 2016. As deformações específicas e a redução de resistência na zona não-saturada alcançaram um nível crítico que resultou no rompimento observado no dia 25 de janeiro de 2019. As deformações e as deformações específicas calculadas pré-rompimento por *creep* correspondem às pequenas deformações observadas na barragem no ano anterior ao rompimento.

10 PERGUNTAS

Solicitou-se especificamente ao Painel que respondesse a uma série de perguntas.

1. Que papel (se é que houve) a construção, o alteamento e/ou o projeto da Barragem I tiveram nas causas técnicas do rompimento da Barragem I?

O projeto e a construção da Barragem I são fatores que contribuíram para seu rompimento. Especificamente, o projeto resultou em uma barragem íngreme, com falta de drenagem suficiente, gerando altos níveis de água, os quais causaram altas tensões de cisalhamento dentro da barragem.

2. Que papel (se é que houve) a drenagem e/ou a falta de drenagem tiveram nas causas técnicas do rompimento da Barragem I?

A Barragem I não continha drenagem interna suficiente e, portanto, tinha um alto nível de água no talude a jusante. Isso fez com que uma parte significativa dos rejeitos permanecesse saturada, o que é um pré-requisito para a liquefação estática não drenada.

3. O que os dados de vários dispositivos de monitoramento da Barragem I (incluindo piezômetros) durante os 12 meses anteriores ao rompimento indicaram (se é que indicaram) sobre as causas técnicas do rompimento da Barragem I?

Nenhum dos dispositivos de monitoramento detectou precursores de rompimento. Em vez disso, o rompimento da barragem foi súbito e abrupto, decorrente de altas tensões de cisalhamento no talude a jusante da barragem e da resposta frágil e não drenada dos rejeitos.

4. Ocorreram deformações ou movimentos no local da Barragem I nos 12 meses anteriores ao rompimento? Se sim, o que essas deformações ou movimentos indicam sobre as causas técnicas do rompimento da Barragem I?

A Barragem I não mostrou sinais de instabilidade, como grandes deformações que gerassem rachaduras e abaulamentos, antes do rompimento. A análise dos dados do InSAR mostrou que ocorreram pequenas deformações nos 12 meses anteriores ao rompimento e que estas deformações foram principalmente na direção vertical. Essas deformações eram pequenas e lentas demais para serem detectadas pelo radar de solo e pelos outros dispositivos de monitoramento habitualmente usados em barragens de rejeitos. As pequenas deformações permitiram que o Painel desconsiderasse os movimentos nos solos naturais em baixo da

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

barragem e as camadas mais fracas dentro da barragem como gatilhos para o rompimento. Estas pequenas deformações não eram precursoras de rompimento, mas eram compatíveis com o *creep* em curso.

5. Que papel (se é que houve) as atividades que ocorreram em cima, perto ou ao redor da Barragem I, nos 12 meses anteriores ao rompimento, tiveram para as causas técnicas do rompimento? Se as atividades no local da Barragem I tiveram algum papel, quais foram estas atividades?

a. Que papel (se é que houve) a instalação de drenos horizontais profundos (DHPs) teve nas causas técnicas do rompimento da Barragem I?

As análises do Painel sobre o DHP 15 mostraram que não era provável que a instalação dos DHPs tivesse tido um papel no rompimento da barragem.

b. Que papel (se é que houve) o incidente ocorrido em 11 de junho de 2018, durante a instalação do DHP 15, teve nas causas técnicas do rompimento da Barragem I?

A análise do Painel revelou que o incidente ocorrido durante a instalação do DHP 15 não teve impacto no rompimento da barragem. A perda de resistência que ocorreu como resultado do incidente era localizada e não houve nenhuma indicação de um impacto contínuo do DHP 15 depois da remediação que foi realizada nos dias após o incidente.

c. Que papel (se é que houve) a sondagem realizada no dia 25 de janeiro de 2019 na Barragem I teve nas causas técnicas do rompimento da Barragem I?

A análise do Painel, sobre o furo de sondagem vertical perfurado no dia do rompimento, mostrou que a atividade de perfuração não era suficiente para desencadear o rompimento observado da barragem. O efeito da perfuração foi localizado e não resultou em instabilidade global.

6. Eventos sísmicos tiveram algum papel nas causas técnicas do rompimento da Barragem I? Se sim, a atividade sísmica foi atribuível a detonações que ocorreram perto da Barragem I?

Não. Uma análise dos dados sismográficos do dia do rompimento indicou que nenhuma atividade de sismos ou detonação foi registrada antes do rompimento.

Relatório do Painel de Especialistas sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Feijão

AGRADECIMENTOS

O Painel gostaria de expressar o seu reconhecimento aos consultores (Geosyntec Consultants; Klohn Crippen Berger Ltd. (KCB); Bentley Systems (anteriormente conhecidos por SoilVision); e Geoapp s.r.l.) que prestaram assistência de engenharia, modelagem, e organizacional. Nós gostaríamos de reconhecer especialmente a contribuição do Dr. Joe Quinn da KCB pela sua excepcional modelagem analítica e o seu papel em relação aos ensaios de campo e de laboratório.

O Painel também gostaria de reconhecer os sacrifícios das vítimas, os seus entes queridos e as pessoas afetadas por esta tragédia. Espera-se que o nosso trabalho possa contribuir para o conhecimento das causas técnicas deste rompimento e ajudar a prevenir a recorrência de eventos similares.