# **Apêndice G Análise de Percolação**

# Dezembro de 2019

A versão oficial deste Apêndice 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 Apêndice, prevalecerá a versão em língua inglesa.

# ÍNDICE

1.	INTF	RODUÇÂ	ÃO	1
2.	PRO	CEDIMI	ENTO	1
3.	CLIN	/IA, PRE	CIPITAÇÃO E INFILTRAÇÃO	1
	3.1	Anális	se dos Dados de Precipitação	1
	3.2	Mode	lagem Preliminar para Calcular a Infiltração Líquida de Chuva	5
	3.3	Mode	lagem Detalhada para Calcular a Infiltração Líquida de Chuvas	6
4.	MOD	DELAGE	EM E CALIBRAÇÃO DE PERCOLAÇÃO	8
	4.1	Mode	lo Conceitual	8
	4.2	Revis	ão dos Dados Disponíveis	9
	4.3	Geometria 2D		
	4.4	Propri	edades do Material	12
		4.4.1	Porosidade e Gravidade Específica	12
		4.4.2	Coeficiente de Permeabilidade Saturado	13
		4.4.3	Permeabilidade Não Saturada	14
	4.5	Condi	ções de Contorno	27
		4.5.1	Clima e Infiltração	27
		4.5.2	Hidrologia da Superfície e Contornos a Montante	27
			4.5.2.1 Escoamento Superficial	28
			4.5.2.2 Contribuições do Fluxo de Águas Subterrâneas	28
		4.5.3	Lago de decantação	28
		4.5.4	Nascentes	29
		4.5.5	Drenos	30
		4.5.6	Drenos Horizontais Profundos	33
		4.5.7	Faces de Percolação a Jusante	33
	4.6	Mediç	ções do Campo de Pressão de Água	33
		4.6.1	Piezômetros e Indicadores de Nível de Água	33
			4.6.1.1 Tendências do Nível de Água	34
		4.6.2	Dados dos CPTus	37
	4.7	Calibr	ação em Estado Estacionário Antes do Rompimento em Janeiro de	
		2019	-	37
		4.7.1	Calibração 2D	44
			4.7.1.1 Seção Transversal 1-1	44
			4.7.1.2 Seção Transversal 2-2	42
			4.7.1.3 Seção Transversal 3-3	47
			4.7.1.4 Balanço hídrico – 2D	52
		4.7.2	Calibração 3D	55

			4.7.2.1 Balanço Hídrico – 3D	
		4.7.3	Resumo da Calibração	
5.	MOE	DELAGE	EM DE PERCOLAÇÃO PARA PREVISÃO DE ESTÁGIOS DE	
	CON	STRUÇ	ÃO	
	5.1	Anális	se 2D não saturada transitória para 2016-2019	59
		5.1.1	Simulação Transitória 1D	62
	5.2	Estági	ios Construídos em 3D	63
6.	RESU	JMO/C	CONCLUSÕES	65

# FIGURAS

Figura 1:	Precipitação anual para o período de 10 anos de 2008-2009 a 2018-2019 na Estação Meteorológica Ibirité do INMET	2
Figura 2:	Precipitação na estação chuvosa de 1º de agosto a 25 de janeiro referente a cada ano do período de 10 anos de 2008-2009 a 2018-2019 na Estação Meteorológica Ibirité do INMET	3
Figura 3:	Precipitação na estação chuvosa de 1º de agosto de 2018 a 25 de janeiro de 2019 para a Estação Meteorológica do INMET Ibirité com períodos intensos destacados	ł
Figura 4:	Comparação da precipitação da estação chuvosa de 1º de agosto de 2018 a 25 de janeiro de 2019 para a Estação Meteorológica do INMET Ibirité e para os pluviômetros automatizados F11 e F18	5
Figura 5:	Localização do modelo 1D de perfil de infiltração na seção transversal 2D 2-27	1
Figura 6:	Modelo conceitual da área9	)
Figura 7:	Alteamentos e etapas da Barragem I12	2
Figura 8:	Distribuições de granulometria de rejeitos grossos e granulometria selecionada (A/D-25) para estimar a SWCC16	5
Figura 9:	SWCC calculada e medida usada para rejeitos grossos	1
Figura 10:	Curvas de permeabilidade não saturadas para rejeitos grossos	3
Figura 11:	Distribuições de granulometria de rejeitos finos e granulometria selecionada (A/D-4) para estimar a SWCC	)
Figura 12:	SWCC calculada e medida usada para rejeitos finos20	)
Figura 13:	Curvas de permeabilidade não saturadas para rejeitos finos21	L

Figura 14:	Distribuições de granulometria de lamas e a granulometria selecionada (S1 (3)) para calcular a SWCC
Figura 15:	SWCC calculada usada para lamas23
Figura 16:	Curvas de permeabilidade não saturadas para lamas24
Figura 17:	Distribuições de granulometria do solo de fundação natural (residual) e a granulometria selecionada (GP07) para calcular a SWCC25
Figura 18:	SWCC calculada e medida usada para solo residual26
Figura 19:	Curvas de permeabilidade não saturada para solo residual
Figura 20:	Comprimentos de praia simulados em diferentes estágios de construção29
Figura 21:	Localização das nascentes exsurgentes após o rompimento
Figura 22:	Localização presumida dos drenos e detalhes32
Figura 23:	Localização de piezômetros, INAs e CPTus selecionados usados para calibração de percolação
Figura 24:	Alterações nas leituras dos piezômetros e INAs acima da elevação 900 m msl35
Figura 25:	Alterações nas leituras médias dos piezômetros e INAs abaixo da elevação 900 m msl
Figura 26:	Alterações médias nas leituras dos piezômetros e INAs para todos os piezômetros e INAs
Figura 27:	Geometria da seção transversal 1-1, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus
Figura 28:	Calibração do fluxo de água subterrânea para a seção transversal 1-1
Figura 29:	Localizações dos CPTus usados para calibrar a seção transversal 1-140
Figura 30:	Exemplo de calibração para dados do CPTu na seção transversal 1-141
Figura 31:	Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 1-142
Figura 32:	Geometria da seção transversal 2-2, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus
Figura 33:	Calibração do fluxo de águas subterrâneas para a seção transversal 2-244
Figura 34:	Localizações dos CPTus utilizados para calibração do modelo 2D ao longo da seção transversal 2-245
Figura 35:	Exemplo de perfil do CPTu e comparação com os resultados da poro-pressão de percolação

Figura 36:	Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 2-2
Figura 37:	Geometria da seção transversal 3-3, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus
Figura 38:	Calibração do fluxo de águas subterrâneas para a seção transversal 3-349
Figura 39:	Instrumentos CPTus usados para calibrar a seção transversal 3-350
Figura 40:	Exemplo de calibração com dados do CPTu na seção transversal 3-351
Figura 41:	Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 3-3
Figura 42:	Resumo do balanço hídrico climático (com 50% de precipitação): (a) Seção transversal 1-1; (b) Seção transversal 2-2; e (c) Seção transversal 3-354
Figura 43:	Resumo do balanço hídrico: (a) Seção transversal 1-1; (b) Seção transversal 2-2; e (c) Seção transversal 3-3
Figura 44:	Exibição do lençol freático no modelo 3D ao longo da seção transversal 3-3
Figura 45:	Valor R <sup>2</sup> calculado para o modelo heterogêneo 3D57
Figura 46:	Perfil de poro-pressão ao lado da berma superior na seção transversal 3-361
Figura 47:	Contribuição aproximada da redução de sucção na resistência ao cisalhamento61
Figura 48:	Resultados do modelo 1D perto da crista da barragem para a seção transversal 3-3
Figura 49:	Uma vista de perfil 2D ao longo da seção transversal 3-3 do Estágio 5 da construção de um modelo 3D de rejeitos não saturados e heterogêneos
Figura 50:	Perfil da poro-pressão no Estágio 5 da construção com propriedades saturadas do material em uma análise 2D64
Figura 51:	Uma vista de perfil 2D ao longo da seção transversal 3-3 do Estágio 10 de construção de um modelo 3D de rejeitos não saturados e heterogêneos
Figura 52:	Uma vista de perfil 2D ao longo da seção transversal 3-3 do Estágio 15 de construção de um modelo 3D de rejeitos heterogêneos

## TABELAS

Tabela 1:	Fontes dos parâmetros	do modelo1	10
-----------	-----------------------	------------	----

Tabela 2:	Porosidade e gravidade específica do material usado nas simulações de		
	percolação	13	
Tabela 3:	Permeabilidades saturadas utilizadas para o estudo de calibração	14	
Tabela 4:	Permeabilidades saturadas calibradas finais para todas as seções transversais 2D	52	
Tabela 5:	Resumo do balanço hídrico abrangente para o modelo de calibração 3D	58	

# 1. INTRODUÇÃO

Este Apêndice apresenta a análise de percolação da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão ("Barragem I") da Vale S.A. ("Vale"). A modelagem numérica de percolação foi realizada para estabelecer o regime de vazão saturada e não saturada dentro da barragem antes do rompimento e permitiu uma compreensão das condições do fluxo da água e da poro-pressão na barragem durante a construção e no momento do rompimento. A modelagem numérica foi focada no reservatório de rejeitos e na barragem construída a montante.

## 2. PROCEDIMENTO

A modelagem unidimensional (1D) foi usada para avaliar o efeito das mudanças climáticas nas sucções próximas à superfície, bem como para calcular as taxas líquidas de infiltração das chuvas. A modelagem bidimensional (2D) foi usada para calibração detalhada do modelo de percolação e para calcular as poro-pressões durante a construção e na data do rompimento em 25 de janeiro de 2019. Um modelo tridimensional (3D) foi criado para avaliar se os resultados do modelo 2D foram consistentes com a calibração 2D e para fornecer uma calibração 3D, assim como a poro-pressão durante a construção 1D, 2D e 3D e a calibração associada utilizaram os softwares SVFLUX<sup>TM</sup>, SVDESIGNER<sup>TM</sup> e SVSOILS<sup>TM</sup>.

## 3. CLIMA, PRECIPITAÇÃO E INFILTRAÇÃO

O regime climático da Barragem I é classificado como tropical úmido, com distintas estações chuvosa e seca. A caracterização e análise da precipitação foram necessárias para avaliar o nível da água, a infiltração líquida e a percolação na Barragem I.

## 3.1 <u>Análise dos Dados de Precipitação</u>

Depois que a deposição de rejeitos cessou em julho de 2016, o nível da água teria sido influenciado principalmente pela infiltração líquida de chuvas nos rejeitos. Os dados de precipitação estavam disponíveis no local da barragem ou em locais próximos, como descrito no Apêndice C, incluindo:

- Pluviômetro automatizado F18 ("F18"), localizado a aproximadamente 1,4 quilômetros (km) a noroeste da Barragem I. Embora o mais próximo da Barragem I em termos de localização, esse pluviômetro só teve dados de chuva a partir de março de 2017 (ou seja, cobrindo aproximadamente os dois últimos anos anteriores ao rompimento);
- Pluviômetro automatizado F11 ("F11"), localizado a aproximadamente 18,6 km a noroeste da Barragem I, que possuía dados de chuva desde janeiro de 2016 (ou seja, aproximadamente nos últimos três anos anteriores ao rompimento); e

• Estação meteorológica Ibirité do INMET, localizada a aproximadamente 15 km a noroeste da Barragem I; os dados utilizados cobriram o período de 2008 a 2019.

A Figura 1 mostra a precipitação anual para o período de 10 anos de 2008-2009 a 2018-2019 na estação meteorológica Ibirité do INMET, plotada de julho a junho do ano seguinte, para não dividira estação chuvosa. Os anos de 2008-2009 a 2011-2012 foram os mais chuvosos, com 2018-2019 sendo o próximo mais chuvoso, um aumento de 53% em relação ao ano mais seco de 2013-2014.



Figura 1: Precipitação anual para o período de 10 anos de 2008-2009 a 2018-2019 na Estação Meteorológica Ibirité do INMET

A Figura 2 mostra as chuvas diárias acumuladas de 1º de agosto a 25 de janeiro (ou seja, incluindo a estação chuvosa) de cada um dos últimos 10 anos na estação meteorológica Ibirité do INMET. No início da estação chuvosa de 2018 e 2019, esta estação mostrou que a área apresentava as chuvas acumuladas que se aproximam ao período mais úmido dentro dos 10 anos.



**Figura 2:** Precipitação na estação chuvosa de 1º de agosto a 25 de janeiro referente a cada ano do período de 10 anos de 2008-2009 a 2018-2019 na Estação Meteorológica Ibirité do INMET

A Figura 3 destaca os períodos de precipitação intensa durante a estação chuvosa 2018-2019, que antecederam o rompimento.



Figura 3: Precipitação na estação chuvosa de 1º de agosto de 2018 a 25 de janeiro de 2019 para a Estação Meteorológica do INMET Ibirité com períodos intensos destacados

Além de uma revisão da estação meteorológica do INMET Ibirité, foram considerados os dados de F11 e F18. A Figura 4 compara as chuvas diárias acumuladas para o período de 1º de agosto de 2018 a 25 de janeiro de 2019, para a estação meteorológica do INMET Ibirité e para os pluviômetros automáticos F11 e F18, e mostra que são amplamente comparáveis e são todos adequados para uso nas análises de percolação.



Figura 4: Comparação da precipitação da estação chuvosa de 1º de agosto de 2018 a 25 de janeiro de 2019 para a Estação Meteorológica do INMET Ibirité e para os pluviômetros automatizados F11 e F18

#### 3.2 <u>Modelagem Preliminar para Calcular a Infiltração Líquida de Chuva</u>

Utilizando o modelo de computador solo-atmosférico acoplado 1D SoilCover, <sup>1</sup> uma simulação preliminar foi realizada para estabelecer uma estimativa da porcentagem de chuva que se infiltraria na Barragem I. Uma simulação de um ano foi realizada usando dados da estação meteorológica do INMET Ibirité para o período de 12 meses de janeiro a dezembro de 2018 para incluir as estações chuvosa e seca. Um coeficiente de permeabilidade saturado (ou condutividade hidráulica,  $k_{sat}$ ) igual a  $5 \times 10^{-6}$  metros por segundo (m/s) foi selecionado para a superfície dos rejeitos com base nas medições do permeâmetro Guelph realizadas no local (Apêndice E) e nas curvas características de água no solo (SWCC) obtidas a partir de ensaios de laboratório (Apêndice E, Anexo 7).

A taxa líquida de infiltração calculada na barragem foi de aproximadamente 50% da precipitação anual. Estima-se que a taxa líquida de infiltração calculada sobre as lamas na área do lago de decantação tenha sido menor, em cerca de 20%, com base em um  $k_{sat}$  vertical saturado igual a

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> GeoAnalysis. (2000). *SoilCover software user's manual*. Saskatoon, SK: University of Saskatchewan.

 $1 \times 10^{-8}$  m/s para as lamas. Além disso, a maioria das chuvas e a infiltração líquida associada estão concentradas dentro da estação chuvosa relativamente curta de quatro a cinco meses.

## 3.3 <u>Modelagem Detalhada para Calcular a Infiltração Líquida de Chuvas</u>

Modelagem mais abrangente das condições de contorno do fluxo climático foi realizada com o SVFLUX<sup>TM</sup>. Os resultados dessa modelagem foram utilizados para especificar a taxa líquida de infiltração de chuva para os modelos de percolação. Os cálculos foram realizados para determinar a evaporação potencial (PE) e a evaporação real (AE) em uma superfície do solo parcialmente saturada. Empregou-se o método de cálculo de Fredlund-Wilson-Penman (2000)<sup>22</sup> de AE, que requer a entrada de: (i) precipitação; (ii) temperatura; (iii) umidade relativa; (iv) velocidade do vento; e (v) radiação líquida.

Para a precipitação, foram utilizados dados do F18, com dados suplementares do F11. Os dados relevantes do F18 incluíam o período de março de 2017 a janeiro de 2019. Os dados do F11 cobriam o período de janeiro de 2016 a janeiro de 2019. Para estender os dados do F18 até o início de 2016, foi utilizado um método de duas etapas. Para começar, tirou-se a média dos primeiros dois meses de dados (1° de janeiro a 1° de março) de 2018 e 2019 para estimar os dados de precipitação para o início de 2017. Em seguida, os dados do F11 de 2016 foram utilizados para complementar os dados do F18. A precipitação média anual determinada a partir dos anos completos de chuva dos dados do F18, complementada pelos dados do F11, foi de 1400 milímetros por ano (mm/ano).

Informações climáticas detalhadas, como umidade relativa e radiação líquida, não estavam disponíveis do F18 ou F11. Portanto, a estação meteorológica do INMET foi utilizada para suplementar informações indisponíveis do F18 e F11, para fornecer um conjunto completo de dados climáticos necessários para o modelo de percolação.

Um modelo 1D de percolação em meio saturado/não saturado foi estabelecido para calcular a infiltração líquida devido à precipitação nos rejeitos. A localização do modelo 1D extraído é mostrada na Figura 5.

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Wilson, G.W., Fredlund, D.G., & Barbour, S.L. (1997). The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces, *The Canadian Geotechnical Journal*, *34*(4), 145-155; Fredlund, M.D., Tran, D., & Fredlund, D.G. (2016). Methodologies for the calculation of actual evaporation in geotechnical engineering, *ASCE International Journal of Geomechanics*, *16*(6).



Figura 5: Localização do modelo 1D de perfil de infiltração na seção transversal 2D 2-2

O modelo 1D incorporou uma condição de contorno detalhada de Fredlund-Wilson-Penman (2000), como discutido acima. O método Thornthwaite<sup>3</sup> foi utilizado para determinar o PE, e foi calculado um PE anual de 945 mm no local.

A base do modelo 1D foi ajustada próxima à fundação no modelo 2D. A condição do contorno inferior foi definida como a pressão calculada no modelo 2D. Detalhes sobre o modelo 2D são fornecidos posteriormente. O modelo 1D foi executado por cinco anos com dados climáticos de 2017 para fornecer uma condição inicial razoável. O modelo foi posteriormente executado com dados de estações climáticas de 2018 até o rompimento em janeiro de 2019, usando as condições iniciais obtidas a partir da simulação de cinco anos dos dados climáticos de 2017. A permeabilidade vertical foi estabelecida em um quinto da permeabilidade horizontal e o método de Fredlund, Xing e Huang<sup>4</sup> foi usado para calcular curvas de permeabilidade não saturadas.

Os efeitos cumulativos de precipitação, evaporação e recarga mostram que a infiltração no sistema é de aproximadamente 50%. A infiltração líquida da taxa de precipitação de 50% foi usada como condições de contorno do fluxo de superfície nos modelos de percolação saturada / não saturada descritos nas seções a seguir.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, *38*, 55-94.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Fredlund, D. G., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *31*(4), 533-546.

# 4. MODELAGEM E CALIBRAÇÃO DE PERCOLAÇÃO

A modelagem de percolação foi realizada inicialmente em simulação em 2D, seguida de simulação em 3D. As seções a seguir descrevem o modelo conceitual usado, a revisão dos dados disponíveis e a calibração do modelo.

A construção da barragem começou em 1976 e o alteamento final foi concluído em 2013. A deposição de rejeitos acabou em 2016. Os dados piezométricos estão disponíveis desde 1996 até o rompimento em janeiro de 2019. O foco da modelagem de percolação foi no período de três anos antes do rompimento, começando em janeiro de 2016, durante o período em que não foi realizada mais deposição de rejeitos.

Esse modelo de percolação e processo de calibração fornecem condições representativas de vazão nos rejeitos, o que permitirá:

- A previsão de condições de fluxo em estado estacionário em cada estágio da construção;
   e
- A previsão de condições de fluxo transitório que antecederam o rompimento de janeiro de 2019.

## 4.1 <u>Modelo Conceitual</u>

O modelo conceitual para o local é ilustrado esquematicamente na Figura 6. As várias vazões afluentes e efluentes potenciais da barragem de rejeitos são mostradas. O escoamento da praia e da bacia de drenagem é tratado através da manutenção dos níveis de água no lago de decantação. A evaporação foi determinada através de cálculos usando o método de Thornthwaite. A drenagem dos drenos de superfície é relatada nas medições de campo (discutidas no Apêndice C). Presumese que esses drenos estejam conectados aos tapetes drenantes, conforme discutido na Seção 4.5.5. O exercício de modelagem subsequente quantificou o efeito dos vários contribuintes ao balanço geral do sistema.



Figura 6: Modelo conceitual da área

## 4.2 <u>Revisão dos Dados Disponíveis</u>

Um componente crítico na modelagem de percolação e calibração foi combinar o modelo com todas as medições de campo conhecidas, incluindo: (i) piezômetros; (ii) indicadores de nível de água (INAs); (iii) medições da poro-pressão no teste de penetração do cone (CPTu); e (iv) taxas de vazão de drenos localizados na face a jusante da barragem.

Na construção do modelo de percolação, alguns parâmetros são conhecidos com base nos dados disponíveis e outros são determinados através do processo de calibração. A Tabela 1 resume os parâmetros de percolação e a metodologia usada para determinar os parâmetros.

Área	Parâmetro	Fonte
Geometria	Localizações das bermas	Apêndice A
	Camadas de rejeitos	Apêndice F
	Localizações e medições dos	Apândica C
	piezômetros/INAs	Apendice C
	Localizações e medições dos CPTus	Apêndice B
	Localizações dos tapetes	Apândice A e calibração
	drenantes/drenos verticais	Apendice A e canoração
	Expressão superficial suposta de tapetes	Apêndice C
	drenantes	
	Drenos horizontais profundos (DHPs)	Apêndice C
Propriedades do material	Coeficiente de permeabilidade saturado	Teste CPTu (Apêndice B)
	Coeficiente de permeabilidade da	Fstimado
	fundação	Listillado
	Coeficiente de permeabilidade de rejeitos	Estimado
	compactados	
	Coeficiente de permeabilidade não	Estimado
	saturado	
	Curva característica de água no solo	Apêndice E, Anexo 7
	(SWCC)	
	Anisotropia	Estimada e calibrada
Condições de contorno	A montante	Análise de sensibilidade
	A jusante abaixo da barragem	Superfície do solo
	Bermas a jusante	% combinada de
	Dermus a Jusunte	precipitação e drenagem
	Rejeitos – lago de decantação	Área e carga do lago de
	100000000000000000000000000000000000000	decantação
	Rejeitos – praia	% de precipitação
	Clima – precipitação	Apêndice C
	Clima - evaporação	Apêndice C, com cálculos
	Cinna evaporação	adicionais
	Infiltração / recarga	Calculado e calibrado

#### **Tabela 1:** Fontes dos parâmetros do modelo

A calibração do modelo de percolação exigiu uma revisão dos dados históricos existentes, bem como a inclusão de dados a partir de testes de campo e laboratório após o rompimento (consulte os Apêndices B, C e E). O foco do processo de calibração está nos três anos anteriores ao rompimento durante a qual a deposição de rejeitos havia cessado.

A metodologia de calibração do modelo de percolação foi uma análise de sensibilidade manual envolvendo mais de 150 modelos e foi composta pelas seguintes etapas:

- 1. **Infiltração e calibração:** Os dados de precipitação climática eram conhecidos para o período 2016-2019 do F18 e F11. O que é desconhecido é o volume de infiltração líquida de precipitação ou recarga resultante do efeito líquido de precipitação, escoamento e evaporação. Os modelos foram executados com estimativas líquidas de infiltração de 30%, 50% e 70% de precipitação, e as pressões de água resultantes foram comparadas às medições de piezômetros e INAs. A calibração foi realizada primeiro com rejeitos homogêneos e, posteriormente, com rejeitos heterogêneos em camadas (grosso/fino/lama).
- 2. Calibração CPTu: Os modelos de rejeitos homogêneos e heterogêneos foram calibrados com os dados do CPTu. As leituras de poro-pressão do CPTu foram observadas como sendo aproximadamente 50% da hidrostática. O coeficiente de permeabilidade da fundação bem como a anisotropia dos materiais de rejeitos, foram ajustados para corresponder às leituras de CPTu.
- 3. **Drenos:** Tapetes drenantes e drenos verticais (ou seja, drenos em forma de L) bem como drenos horizontais profundos (DHPs) foram implementados no modelo, e a calibração para fluxos de drenagem, dados de piezômetros, INAs, e CPTus foram atualizados.
- 4. **2D/3D:** Os modelos 2D foram utilizados primeiro no processo de calibração para reduzir os tempos do modelo. Após a calibração 2D ter sido alcançada, os modelos 3D foram examinados.

O processo acima permitiu a determinação dos poucos parâmetros restantes do modelo, combinando os dados de campo registrados no local. Componentes-chave e resultados específicos do programa de modelagem e calibração de percolação são fornecidos nas seções e subseções a seguir.

## 4.3 <u>Geometria 2D</u>

A geometria foi construída como um modelo 3D a partir do qual seções transversais 2D foram então extraídas. A modelagem de percolação foi realizada inicialmente nas seções transversais 2D. Detalhes sobre o desenvolvimento do modelo são fornecidos no Apêndice F.

O modelo de percolação da Barragem I foi construído como uma série de 10 alteamentos (15 estágios) mostrados na Figura 7. A localização presumida dos drenos verticais e/ou dos tapetes drenantes detalhados nos documentos de projeto, pode ser vista na Figura 7 nos alteamentos 4-10. Os resultados da calibração do modelo de percolação corroboraram o entendimento de que os drenos recomendados nos documentos de projeto para o segundo alteamento, provavelmente foram instalados (Apêndice A). Esses drenos são discutidos na Seção 4.5.5.



**Figura 7:** Alteamentos e etapas da Barragem I<sup>5</sup>

## 4.4 <u>Propriedades do Material</u>

As propriedades do material para a modelagem de percolação foram montadas usando os parâmetros fornecidos no Apêndice E, bem como a partir de relatórios históricos descritos no Apêndice A.

Relatórios históricos forneceram uma base para porosidades, distribuições de granulometria e coeficiente de permeabilidade saturado. Também foram necessários SWCCs<sup>6</sup> e curvas de permeabilidade não saturadas para o processo de modelagem de percolação. Uma metodologia foi adotada inicialmente para calcular as permeabilidades não saturadas dos materiais de rejeitos grossos/finos/lamas com base em curvas de distribuições de granulometria.

## 4.4.1 Porosidade e Gravidade Específica

A porosidade e a gravidade específica de todos os materiais apresentados na Tabela 2 foram baseadas em relatórios históricos e testes laboratoriais de materiais coletados após o rompimento (Apêndices B e E, respectivamente).

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Veja geralmente Apêndices A e F.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Apêndice E, Anexo 5.

Material	Porosidade	Gravidade específica
Solo de fundação	0,31	2,75
Tapete de drenagem	0,40	4,53
Minério de ferro ultrafino	0,30	4,53
Rejeitos grossos	0,50	4,53
Rejeitos finos	0,59	4,63
Lamas	0,49	4,00
Solo residual	0,31	2,75

**Tabela 2:** Porosidade e gravidade específica do material usado nas simulações de percolação

#### 4.4.2 Coeficiente de Permeabilidade Saturado

Coeficientes de permeabilidade saturados,  $(k_{sat})$  foram selecionados com base nos dados históricos e testes. O coeficiente saturado de permeabilidades adotado é mostrado na Tabela 3. Os rejeitos foram divididos em camadas para delinear os rejeitos grossos e finos e as zonas de lamas. Os delineamentos geométricos grosso, fino e de lamas foram fornecidos juntamente com as geometrias 2D e 3D para a modelagem de percolação, detalhadas no Apêndice F.

O valor de  $k_{sat}$  para os rejeitos compactados nas bermas foi listado em relatórios históricos como o mesmo que rejeitos finos e foi presumido como sendo de magnitude inferior do que os rejeitos grossos, devido ao fato de que o processo de compactação aumentará a densidade e reduzirá o coeficiente de permeabilidade.

Material	$k_{\rm sat}$ (m/s)	Comentários
Rejeitos finos	1.0E-7	Selecionado pelo Painel com base em testes de campo (Apêndice B)
Rejeitos grossos	5.0E-6	Selecionado pelo Painel com base em um intervalo de testes de campo entre 1.0E-5 e 1.0E-6 (Anexo B)
Rejeitos compactados	5.0E-7	Selecionado pelo Painel com base em testes de campo e assumiu uma ordem de magnitude menor do que rejeitos grossos
Lamas	1.0E-8	Selecionado pelo Painel com base em testes de campo (Apêndice B)
Minério de ferro ultrafino	1.2E-6	Selecionado com base em relatórios históricos <sup>7</sup>
Solo compactado (Laterita)	1.2E-9	Selecionado com base em relatórios históricos <sup>8</sup>
Solo de fundação	9.2E-8	Valor médio usando CPTu (Apêndice B)
Solo de drenagem	1.0E-4	Selecionado com base em relatórios históricos <sup>9</sup>

Tabela 3: Permeabilidades saturadas utilizadas para o estudo de calibra	ação
---	------

Embora possa ter havido compactação dos rejeitos grossos/finos/lamas devido aos efeitos de carga dos rejeitos depositados nas camadas subsequentes, considerou-se que a variação no coeficiente de permeabilidade com profundidade nos rejeitos é razoavelmente pequena e não foi mais avaliada.

#### 4.4.3 Permeabilidade Não Saturada

A metodologia a seguir foi adotada para o cálculo de parâmetros hidráulicos não saturados para rejeitos grossos/finos/lamas.

Análise periódica de segurança da barragem Mina Córrego do Feijão – Relatório técnico da Barragem I (TÜV SÜD 2018) ("2018 TÜV SÜD Periodic Safety Review").

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> 2018 TÜV SÜD Periodic Safety Review.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> 2018 TÜV SÜD Periodic Safety Review.

- 1. Curva ajustando as distribuições de granulometria usando o método de Fredlund e Xing (1994).<sup>10</sup>
- 2. Calcule as SWCCs para cada curva de granulometria usando o método de Fredlund e Wilson (1997).<sup>11</sup>
- 3. Calcule uma curva de permeabilidade não saturada usando o método de Fredlund, Xing e Huang (1994).
- 4. Determine a SWCC média e a curva de permeabilidade não-saturada média para cada tipo de rejeito.
- 5. Compare as SWCCs e as curvas de permeabilidade não saturada calculadas com as SWCCs e as curvas de permeabilidade não saturada medidas com base em testes de laboratório.

Distribuições de granulometria foram usadas para calcular a SWCC e curvas de permeabilidade não saturada para rejeitos grossos/finos/lamas, bem como para os solos naturais da fundação. As Figuras 8, 11, 14 e 17 mostram as curvas das distribuições de granulometria usadas. As Figuras 9, 10, 12, 13, 15, 16, 18 e 19 mostram as curvas SWCC e de permeabilidade não saturada calculadas e medidas.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *31*(4), 521-532.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., & Wilson, G.W. (1997). Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties. Proceedings from NONSAT '97: *The 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils*, (S.W. Hong, T. de Campos, & E.A. Vargas, Eds.), Rio de Janeiro: Freitas Editora.



**Figura 8:** Distribuições de granulometria de rejeitos grossos e granulometria selecionada (A/D-25) para estimar a SWCC



Figura 9: SWCC calculada e medida usada para rejeitos grossos





Figura 10: Curvas de permeabilidade não saturadas para rejeitos grossos



**Figura 11:** Distribuições de granulometria de rejeitos finos e granulometria selecionada (A/D-4) para estimar a SWCC



Figura 12: SWCC calculada e medida usada para rejeitos finos



Figura 13: Curvas de permeabilidade não saturadas para rejeitos finos



**Figura 14:** Distribuições de granulometria de lamas e a granulometria selecionada (S1 (3)) para calcular a SWCC



Figura 15: SWCC calculada usada para lamas



Figura 16: Curvas de permeabilidade não saturadas para lamas



**Figura 17:** Distribuições de granulometria do solo de fundação natural (residual) e a granulometria selecionada (GP07) para calcular a SWCC



Figura 18: SWCC calculada e medida usada para solo residual



Figura 19: Curvas de permeabilidade não saturada para solo residual

## 4.5 <u>Condições de Contorno</u>

Um componente-chave da modelagem de percolação é determinar a influência das condições de contorno no modelo de fluxo de percolação de água subterrânea. As condições primárias que influenciam o modelo de percolação são: (i) clima na praia e bermas, incluindo os efeitos da transpiração; (ii) o lago de decantação localizado na superfície dos rejeitos; (iii) nascentes que existem sob a barragem e observadas após o rompimento; (iv) fluxos de drenos presumidamente conectados a tapetes drenantes; (v) fluxos de DHPs; (vi) quaisquer faces de percolação a jusante; e (vii) fluxo da fundação.

## 4.5.1 Clima e Infiltração

Detalhes sobre a influência do clima e da infiltração foram abordados na Seção 3.

## 4.5.2 Hidrologia da Superfície e Contornos a Montante

A Barragem I está localizada na área de captação do Córrego do Feijão, com uma área de 844 hectares (ha) (Apêndice A). A área do represamento de rejeitos atrás da barragem é composta por 250 ha, o que representa aproximadamente 30% de toda a área de captação. O terreno atrás da

área de represamento de rejeitos é fortemente vegetado e tem declives acentuados em direção aos rejeitos.

O modelo de percolação de água subterrânea foi necessário para interagir com a área de captação a montante e o regime de fluxo de água subterrânea. A interface foi considerada como se segue.

## 4.5.2.1 Escoamento Superficial

É possível que o escoamento superficial da área de captação tenha fluido ladeira abaixo (se não tiver sido infiltrado ou obstruído pela vegetação) para o reservatório de rejeitos. Se atingisse os rejeitos, seria incorporado ao lago de decantação. A elevação do lago de decantação foi controlada e medida ao longo do tempo. Os efeitos líquidos do escoamento da área de captação a montante são considerados representados pela condição de contorno do lago de decantação no modelo de percolação.

## 4.5.2.2 Contribuições do Fluxo de Águas Subterrâneas

As informações de subsuperfície para a área de captação a montante não estavam disponíveis para inclusão no modelo de percolação de águas subterrâneas. Uma zona de proteção que se estende aproximadamente 5% além das dimensões do reservatório de rejeitos foi criada em torno do modelo, onde as elevações da superfície eram conhecidas. Foram assumidas poro-pressões elevadas de água na região ao redor. Dada a alta pluviosidade na área, considerou-se razoável supor que as pressões nas áreas a montante eram mais elevadas que os rejeitos. Simulações por computador foram realizadas com condições de contorno de pressão a montante entre 2-5 m acima da pressão do lago de decantação. A diferença de 5 m de pressão forçou a água em direção à área de rejeitos, mas os eventos de chuva aplicados por vezes causaram a saturação da área de captação a montante. Essas pressões a montante foram consideradas razoáveis por:

- O fluxo de água da área de captação até os rejeitos é controlado pela permeabilidade do material de fundação; e
- A contribuição da chuva para o balanço hídrico dos rejeitos tem um efeito maior que o fluxo da área de captação.

## 4.5.3 Lago de decantação

A localização e o tamanho do lago de decantação variaram ao longo do tempo, conforme detalhado no Apêndice F. O lago de decantação é considerado uma condição de contorno razoável para o modelo de percolação, porque a elevação aproximada do lago de decantação era conhecida. Reconhece-se que o lago de decantação é formado por uma combinação de: (i) chuvas; (ii) escoamento de praia; (iii) escoamento da bacia de drenagem; e (iv) água de consolidação de rejeitos. A condição de pressão da elevação do lago de decantação foi aplicada no modelo de

percolação como uma condição de contorno, que representa o efeito líquido de todos esses processos. Portanto, não é necessário um conhecimento do escoamento exato da bacia de drenagem, pois o efeito final de qualquer escoamento no lago de decantação será, ao fim, controlado através da entrada do nível da água do lago de decantação no modelo. A influência da chuva e do escoamento é, portanto, capturada no efeito líquido da condição de contorno do lago de decantação.

Fotografias aéreas do lago de decantação em vários momentos são apresentadas no Apêndice F. Os comprimentos de praia utilizados na modelagem de percolação de vários estágios da construção são mostrados na Figura 20.



Figura 20: Comprimentos de praia simulados em diferentes estágios de construção

#### 4.5.4 Nascentes

Foi observada a exsurgência de nascentes nos locais identificados na Figura 21 e as taxas de vazão foram medidas (Apêndice E).

Uma pressão de cerca de 2-5 m acima da superfície média dos rejeitos foi aplicada aos contornos do modelo que foram definidos a uma distância média de 5% de distância adicional além das dimensões do reservatório de rejeitos. Esse limite permitirá um gradiente hidráulico líquido em

direção aos rejeitos no material de fundação ao redor. O coeficiente de permeabilidade do material de fundação é menor do que o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos ou lamas. Espera-se que o fluxo de água para os rejeitos, da fundação, seja pequeno em relação à contribuição do lago de decantação e das chuvas no balanço hídrico dos rejeitos.



Figura 21: Localização das nascentes exsurgentes após o rompimento

## 4.5.5 Drenos

Os tapetes drenantes e os drenos verticais compostos por maior coeficiente de permeabilidade do material mais grosso foram instalados em alguns dos estágios, conforme descrito na Seção 4.3 e no Apêndice A. Vale ressaltar que os drenos foram projetados para serem instalados na base das bermas e, portanto, podem ser considerados como uma drenagem da água que atinge os drenos onde existe uma poro-pressão positiva da água. Os tapetes drenantes foram concebidos como
drenando a água perto da berma no lado a jusante dos rejeitos. Por outro lado, os tapetes drenantes não reduzem a poro-pressão na massa geral de rejeitos, mas apenas nas bermas e nos rejeitos imediatamente adjacentes às bermas. Portanto, é possível que um lençol freático exista relativamente perto das estruturas da berma.

Com base nos documentos de projeto descritos no Apêndice A e nos resultados de calibração discutidos na Seção 4.3, presume-se que os tapetes drenantes tenham sido instalados na base das bermas, dos alteamentos 2 a 10, conforme descrito no Apêndice A. Os drenos "chimney" correspondentes foram instalados nos estágios 8 a 11. Os tapetes drenantes foram modelados como sendo conectados ao sistema de drenagem de superfície através de tubos de drenagem de superfície inseridos no material do tapete drenante. Supõe-se que os drenos estejam conectados a camadas internas de filtros de tapetes drenantes. Os drenos demonstraram fluxo intermitente (Apêndice C). Os drenos foram instalados entre 1990 e 2000 e a medição mensal do fluxo está disponível a partir de 1º de abril de 1996. A última medição do fluxo foi em 13 de dezembro de 2018. Os locais dos drenos e os dados de 2014 até o rompimento são mostrados no Apêndice C. A maioria dos fluxos varia entre 0,5 e 4 m<sup>3</sup>/h.

A localização dos tapetes drenantes e dos drenos "chimney", conforme assumido no modelo, pode ser vista na Figura 22.



Figura 22: Localização presumida dos drenos e detalhes

## 4.5.6 Drenos Horizontais Profundos

DHPs foram instalados em 2018 e medições foram realizadas entre maio e dezembro de 2018. Detalhes sobre medição e instalação estão descritos no Apêndice C.

### 4.5.7 Faces de Percolação a Jusante

Referências esporádicas a áreas úmidas/molhadas nas faces a jusante da barragem são encontradas nos documentos históricos (Apêndice A) e foram observadas na análise de imagens (Apêndice D). É difícil quantificar se a umidade é causada por exsurgência do lençol freático ou pela saturação dos eventos de precipitação. Ambos os tipos de umidade superficial a jusante foram observados no modelo numérico.

# 4.6 <u>Medições do Campo de Pressão de Água</u>

## 4.6.1 Piezômetros e Indicadores de Nível de Água

Dados estavam disponíveis em 163 piezômetros e INAs (Apêndice C). A localização dos piezômetros e INAs e seus dados associados podem ser encontrados no Apêndice C. As leituras começaram em 1996, mas nem todas foram contínuas. A maioria das leituras era manual até 2019, quando 49 dos piezômetros foram automatizados. Alguns dos piezômetros e INAs não puderam ser utilizados na calibração devido a vários problemas com os dados. Em alguns casos, os dados de instalação ou localização não eram confiáveis, conforme descrito em mais detalhes no Apêndice C e, portanto, o instrumento como um todo não foi utilizado. Em outros casos, determinados pontos de dados individuais não foram utilizados na calibração porque indicavam picos consideráveis ou etapas de variação da pressão de água que foram consideradas, após exame, como o resultado de um erro temporário de medição.

A revisão dos piezômetros e INAs resultou em 57 pontos de dados (ou seja, 41 piezômetros e 16 INAs) sendo considerados para calibração. A Figura 23 mostra a localização dos piezômetros, INAs e CPTu selecionados usados na calibração.



Figura 23: Localização de piezômetros, INAs e CPTus selecionados usados para calibração de percolação

#### 4.6.1.1 Tendências do Nível de Água

Os dados dos piezômetros e dos INAs foram revisados para determinar: (i) quaisquer tendências anuais nos dados; e (ii) a tendência em 2018 e a que se seguiu até o momento do rompimento.

Para determinar se havia uma tendência anual perceptível em todas as leituras do piezômetro, as leituras foram zeradas no início de cada ano civil. Em seguida, a diferença em cada leitura foi plotada. Isso não mostrou uma tendência anual discernível. Além disso, não parecia haver uma correlação clara com os dados de precipitação. Isso era esperado devido à influência de proteção da zona não saturada e à profundidade em que os piezômetros foram instalados.

Para avaliar as mudanças nos níveis de água na barragem, as leituras dos piezômetros e INAs foram agrupadas por local. O agrupamento compreendeu todos os instrumentos localizados na barragem acima ou abaixo da altitude 900 metros acima do nível médio do mar (m msl). Isso combina essencialmente piezômetros e INAs que foram instalados acima do recuo, ou no recuo e abaixo do recuo. Os níveis médios de água resultantes medidos durante os três anos anteriores ao rompimento estão representados nas Figuras 24 e 25. A Figura 26 mostra os resultados de todos os piezômetros e INAs. Os dados foram referenciados até a leitura final em janeiro de 2019.

Os resultados mostram 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 uma lenta redução líquida de água após a deposição de rejeitos cessar, em 2016. A água parece estar sendo drenada das partes superiores da barragem em direção às partes inferiores. A redução também cria uma crescente zona não saturada nas partes superiores da barragem. Os resultados também mostram pequenos aumentos de curto prazo no nível da água que parecem estar associados a respostas durante as estações chuvosas.



Figura 24: Alterações nas leituras dos piezômetros e INAs acima da elevação 900 m msl



Figura 25: Alterações nas leituras médias dos piezômetros e INAs abaixo da elevação 900 m msl



Figura 26: Alterações médias nas leituras dos piezômetros e INAs para todos os piezômetros e INAs

# 4.6.2 Dados dos CPTus

Os dados dos CPTus foram utilizados juntamente com as leituras dos piezômetros e INAs para calibração. O teste de dissipação foi realizado em várias profundidades para os dados de CPTu coletados no local e, portanto, foi integrado ao estudo de calibração. Os dados de CPTus coletados durante 2016 e 2018 foram utilizados, embora possa haver uma diferença associada ao lapso entre o tempo de coleta e janeiro de 2019. Dada ao pequeno (<1,2 m) declínio de três anos nos níveis de água nos piezômetros, foi considerado que os dados de CPTus coletados durante os anos civis de 2016 e 2018 representaram uma boa fonte de dados que poderia ser utilizada para calibrar o modelo de percolação de janeiro de 2019.

Os dados de CPTus existiam principalmente ao longo da região central da barragem, como mostra a Figura 23. Os dados de CPTus que não caíram exatamente nas seções transversais foram projetados na seção transversal mais próxima.

Um gradiente descendente geral de aproximadamente 50% de hidrostática foi observado como uma média global para os dados de CPTu.

## 4.7 Calibração em Estado Estacionário Antes do Rompimento em Janeiro de 2019

A calibração foi realizada para alinhar a modelagem numérica com as condições de campo observadas e as propriedades medidas no laboratório. A abordagem foi calibrar um modelo de estado estacionário para as leituras de poro-pressão próximas a janeiro de 2019. A calibração incluiu as seções transversais 2D 1-1, 2-2 e 3-3. Uma geometria detalhada foi utilizada para a calibração, que incluiu uma separação dos rejeitos em zonas grossas, finas e lamas.

A análise posterior manual envolveu principalmente a modificação dos seguintes elementos para corresponder às medições de campo:

- Taxa de infiltração de 50% da precipitação anual de 1400 mm;
- Locais de drenagem;
- Permeabilidades anisotrópicas;
- Permeabilidade da fundação; e
- Localização razoável do lago de decantação .

Os resultados desse processo são descritos nas seções a seguir.

# 4.7.1 Calibração 2D

A calibração manual para as seções transversais 1-1, 2-2 e 3-3 é apresentada nas seções a seguir. A calibração para todas as seções transversais foi realizada como uma calibração em estado estacionário para dados de piezômetros e INAs em janeiro de 2019 e dados de CPTus de 2016 a 2018. As leituras finais de piezômetros antes do rompimento foram utilizadas na calibração. A calibração foi realizada para dados de piezômetros/INAs/CPTus simultaneamente. Uma condição de controlo superior de 50% de 1400 mm/ano de precipitação foi aplicada ao limite superior do modelo para representar o efeito líquido de precipitação e evaporação.

# 4.7.1.1 Seção Transversal 1-1

A geometria final da seção transversal da seção 1-1 pode ser vista na Figura 27. A Figura também projeta a localização dos piezômetros, INAs e instrumentos CPTus que foram utilizados para a calibração no perfil.

Os resultados da calibração para a seção transversal 1-1 podem ser vistos na Figura 28. A condição de contorno do lago de decantação foi ajustada para 300 m de recuo da crista da berma superior como uma aproximação da localização do lago de decantação 3D. Modelos numéricos com  $k_h/k_v$  = 5 e 10 foram analisados e a melhor calibração foi obtida com  $k_h/k_v$  = 5. Uma permeabilidade da fundação de 9,3 x 10<sup>-7</sup> m/s proporcionou a melhor calibração. As pressões das INA medidas são sobrepostas ao modelo com uma linha azul clara. As pressões medidas nos piezômetros e nos instrumentos CPTus são representadas com uma linha horizontal colorida do mesmo esquema de cores do esquema de cores do contorno da poro-pressão. Essa ilustração permite a identificação visual da consistência entre os resultados do campo e do modelo, todos exibidos em termos de unidades de pressão em kPa.

A localização dos instrumentos CPTus utilizados na calibração com a seção transversal 1-1 pode ser vista na Figura 29. A comparação dos resultados do modelo plotados contra o CPTu forneceu uma colaboração razoável com os dados medidos, conforme mostrado na Figura 30.

A correlação geral entre os resultados de campo e modelo para os dados de INAs, piezômetros e CPTus, pode ser vista na Figura 31, que produz um valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,95.



Figura 27: Geometria da seção transversal 1-1, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus



Figura 28: Calibração do fluxo de água subterrânea para a seção transversal 1-1



Figura 29: Localizações dos CPTus usados para calibrar a seção transversal 1-1



Figura 30: Exemplo de calibração para dados do CPTu na seção transversal 1-1



Figura 31: Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 1-1

#### 4.7.1.2 Seção Transversal 2-2

A geometria e a localização dos locais dos piezômetros, INAs e CPTus próximos, para a seção transversal 2-2, podem ser vistas na Figura 32. A seção transversal tinha mais instrumentação instalada do que a seção transversal 1-1 e, portanto, permitiu a comparação da instrumentação em mais detalhe. O teste de dissipação da poro-pressão do CPTu é plotado como triângulos com a parte inferior do triângulo indicando a localização da leitura e a parte superior do triângulo representando uma condição projetada de pressão de água zero

A distribuição resultante da poro-pressão pode ser vista na Figura 33. Os resultados mostram a possível percolação lateral em torno da elevação 930 m msl devido à camada de rejeitos finos. O lençol freático mostra-se próximo da superfície do solo a cerca de 900 m msl. A localização das camadas de rejeitos finos no modelo mostra a possibilidade de desenvolvimento de zonas de saturação suspensas no modelo (elevação ~ 930 m msl). As leituras de pressão nos piezômetros também mostram concordância razoável com os contornos das pressões do modelo. Pressões mais elevadas de água são observadas na Barragem Inicial, onde não há drenagem. O lençol freático exsurge no talude a jusante da Barragem Inicial.

Os pontos de medição do CPTu são mostrados na Figura 34. Nesta seção transversal, existem 12 pontos de medição de CPTu que estão próximos à seção transversal e foram utilizados para a calibração. Um exemplo de calibração pode ser visto na Figura 35. Observou-se alguma discrepância com os dados, principalmente devido às variações entre o lençol freático de campo e do modelo. No geral, o alinhamento dos dados dos CPTus com os resultados do modelo foi melhor quando foi utilizado  $k_h/k_v = 5$  para o coeficiente de permeabilidade.

O valor do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre os resultados do modelo e todos os dados de CPTus, piezômetros e INAs foi de 0,965 e pode ser visto na Figura 36.



Figura 32: Geometria da seção transversal 2-2, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus



Figura 33: Calibração do fluxo de águas subterrâneas para a seção transversal 2-2



Figura 34: Localizações dos CPTus utilizados para calibração do modelo 2D ao longo da seção transversal 2-2



Figura 35: Exemplo de perfil do CPTu e comparação com os resultados da poro-pressão de percolação



**Figura 36:** Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 2-2

## 4.7.1.3 Seção Transversal 3-3

A seção 3-3 contém vários piezômetros e perfis de CPTus que proporcionaram uma oportunidade de calibrar com os valores medidos. O perfil, incluindo finos/grossos/lamas, pode ser visto na Figura 37, bem como as localizações dos piezômetros, INAs e CPTus. Os instrumentos próximos ao perfil foram projetados no perfil para fins de calibração.

O modelo calibrado é mostrado na Figura 38. O lençol freático é alto na Elevação 900 m msl e os drenos que se supõe terem sido instalados no segundo alteamento, permitem uma calibração razoável para dados de campo abaixo de 900 m msl. Um lençol freático mais alto que o calculado, se adequaria um pouco melhor aos dados por trás da berma da crista da barragem, mas as camadas de materiais grossos e finos e o correspondente coeficiente de permeabilidade ditam a localização do lençol freático.

Seis perfis de CPTu foram usados para calibrar o modelo, e suas localizações são mostradas na Figura 39. Os dados dos CPTus calibraram bem com os valores medidos (veja o exemplo na Figura 40) e confirmaram a estimativa inicial de que as poro-pressões a estariam em cerca de 50% dos valores hidrostáticos. O efeito das camadas fina/grossa pode ser visto nos resultados do perfil de poro-pressão .

O resultado geral da calibração  $R^2$  é mostrado na Figura 41 e pode ser considerado excelente. O coeficiente final relacionado de permeabilidades e os valores de anisotropia com base nas calibrações são mostrados na Tabela 4.



Figura 37: Geometria da seção transversal 3-3, incluindo dados de piezômetros, INAs e CPTus



Figura 38: Calibração do fluxo de águas subterrâneas para a seção transversal 3-3



Figura 39: Instrumentos CPTus usados para calibrar a seção transversal 3-3



Figura 40: Exemplo de calibração com dados do CPTu na seção transversal 3-3



**Figura 41:** Diferença entre as pressões observadas e as calculadas pelo modelo para a seção transversal 3-3

Material	Permeabilidade Horizontal (kh, m/s)	Permeabilidade Vertical (kv, m/s)	Anisotropia (k <sub>v</sub> /k <sub>h</sub> )
Solo de fundação	9,3 x 10 <sup>-7</sup>	9,3 x 10 <sup>-7</sup>	1
Drenagem	1 x 10 <sup>-4</sup>	1 x 10 <sup>-4</sup>	1
Rejeitos compactados	5 x 10 <sup>-7</sup>	1 x 10 <sup>-7</sup>	0,2
Solo compactado	1,2 x 10 <sup>-9</sup>	1,2 x 10 <sup>-9</sup>	1
Minério de ferro ultrafino	1,2 x 10 <sup>-6</sup>	1,2 x 10 <sup>-6</sup>	1
Rejeitos finos	1 x 10 <sup>-7</sup>	2 x 10 <sup>-8</sup>	0,2
Rejeitos grossos	5 x 10 <sup>-6</sup>	1 x 10 <sup>-6</sup>	0,2
Lamas	1 x 10 <sup>-8</sup>	2 x 10 <sup>-9</sup>	0,2

**Tabela 4:** Permeabilidades saturadas calibradas finais para todas as seções transversais 2D

#### 4.7.1.4 Balanço hídrico – 2D

Um cálculo do balanço hídrico foi realizado para todos os modelos calibrados. O balanço hídrico esclareceu os volumes de vazão que entram pela chuva e penetram no modelo através da bacia. A água poderia então sair do modelo através da fundação a jusante ou através dos drenos instalados na estrutura da barragem.

O volume de infiltração que entra no modelo na praia de rejeitos depende do material próximo à superfície. Na seção transversal 1-1, a superfície superior é composta inteiramente por rejeitos grossos e, portanto, 100% do fluxo aplicado entra no modelo, como mostra a Figura 42. Na seção transversal 2-2, o escoamento é de 8,2% e em seção transversal 3-3, o escoamento é de 22%.

A maior parte do fluxo que deixa o sistema é através dos drenos instalados na estrutura da barragem ou através da fundação a jusante, conforme mostrado no balanço hídrico na Figura 43. A quantidade de água que entra nas lamas pelo lago de decantação é significativamente menor do que a infiltração decorrente de chuvas na área da praia. O escoamento é maior nas bermas devido à menor permeabilidade dos materiais da barragem.

Os fluxos de drenagem de todos os drenos são  $4,53 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $3,49 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$  e  $3,13 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$ , nos modelos das seções transversais 1-1, 2-2 e 3-3, respectivamente. No geral, o modelo foi solucionado com um erro líquido de balanço hídrico de cerca de 0%.

## Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I de Feijão Apêndice G – Análise de Percolação



**Figura 42:** Resumo do balanço hídrico climático (com 50% de precipitação): (a) Seção transversal 1-1; (b) Seção transversal 2-2; e (c) Seção transversal 3-3



**Figura 43:** Resumo do balanço hídrico: (a) Seção transversal 1-1; (b) Seção transversal 2-2; e (c) Seção transversal 3-3

#### 4.7.2 Calibração 3D

Também foi criado um modelo 3D para avaliar o regime de fluxo 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 para o modelo de percolação 3D foram as mesmas que as utilizadas no modelo de computador 2D.

O modelo 3D representou os aspectos 3D detalhados da área, incluindo os DHPs e os tapetes drenantes e drenos verticais. Um modelo 3D foi criado refletindo a natureza heterogênea dos rejeitos. A maior parte da anisotropia de  $k^h/k^v = 5$  da calibração do modelo 2D, foi usada para os três materiais de rejeitos no modelo 3D. As propriedades do material utilizadas no modelo podem ser vistas na Tabela 4.

O modelo foi configurado com as seguintes condições:

- 50% de precipitação com o método de correção de escoamento aplicado;
- Propriedades do material saturado;
- 12 DHPs incluídos (ou seja, condições de contorno interno aplicadas).

A calibração foi concluída com os seguintes dados:

- 41 piezômetros (setembro de 2018 a janeiro de 2019);
- 16 INAs (setembro de 2018 a janeiro de 2019); e
- 84 leituras de teste de dissipação de CPTu (2016 e 2018).

Os resultados do modelo são demonstrados nas Figuras 44 e 45. Uma grande extensão de praia foi formada na superfície dos rejeitos, e o lençol freático exsurge apenas no Segundo e Terceiro Alteamentos. O lençol freático é um pouco mais baixo (Figura 38) do que a contrapartida 2D. Isso era de se esperar, dada a diferença na localização do lago de decantação entre os modelos 2D e 3D. A calibração do modelo existente foi boa, como mostra a Figura 45.



Figura 44: Exibição do lençol freático no modelo 3D ao longo da seção transversal 3-3



Figura 45: Valor R<sup>2</sup> calculado para o modelo heterogêneo 3D

# 4.7.2.1 Balanço Hídrico – 3D

O balanço hídrico também foi calculado para o modelo 3D. O balanço hídrico da condição de contorno climático com 50% da precipitação média anual aplicada na superfície superior do modelo é apresentado na Tabela 5. Os números apresentados na Tabela 5 incluem o efeito climático em toda a superfície superior do modelo 3D, que inclui as superfícies de rejeitos, bermas e área de fundação circundante de 10% a 15% incluída no modelo 3D. O modelo 3D contém rejeitos grossos como o material da superfície superior para a maioria da área de rejeitos.

A Tabela 5 mostra que a maioria da água fluiu através da fundação a jusante em comparação com a vazão de drenos e DHPs. O fluxo total de drenagem, incluindo drenos e DHPs, é de cerca de 8 m<sup>3</sup>/h do modelo de rejeitos 3D (Tabela 5), que é comparável ao fluxo total médio de cerca de 10 m<sup>3</sup>/h em 2018 (Veja Apêndice C para taxas de vazão individuais em cada dreno). Semelhante ao modelo 2D (Seção 4.7.1.4), a vazão afluente do lago de decantação é insignificante nos modelos 3D. Isso era esperado porque o lago de decantação está sob lamas com baixa permeabilidade (Tabela 3).

Limite de Superfície	Vazão afluente (m <sup>3</sup> /h)	Vazão efluente (m <sup>3</sup> /h)
Fundação a montante	38,81	
Lago de decantação	1,90E-03	
Superfície superior inteira (incluindo rejeitos, bermas e área circundante)	21,29	
Tubos horizontais profundos		3,04
Drenos		4,95
Fundação a jusante		52,11
Total	60,10	60,10

 Tabela 5:
 Resumo do balanço hídrico abrangente para o modelo de calibração 3D

# 4.7.3 Resumo da Calibração

Em resumo, o processo de calibração manual produziu uma calibração razoável para todas as medições de campo conhecidas de poro-pressão dos INAs, piezômetros, e ensaios de CPTu, e

ofereceu uma calibração razoável com a vazão da drenagem. A calibração para três seções transversais 2D, bem como um modelo 3D completo, ofereceu a garantia de que o modelo de percolação corresponde aos resultados do campo de forma razoável.

# 5. MODELAGEM DE PERCOLAÇÃO PARA PREVISÃO DE ESTÁGIOS DE CONSTRUÇÃO

Esta seção apresenta os resultados de cenários preditivos para análise 2D não saturada transitória e vários estágios de construção 3D utilizando propriedades do material e condições de contorno dos modelos calibrados.

## 5.1 <u>Análise 2D não saturada transitória para 2016-2019</u>

Execuções transitórias do modelo 2D foram realizadas para determinar a distribuição da poropressão nos três anos que antecederam o rompimento. A modelagem foi configurada da seguinte maneira:

- Fluxo não saturado baseado em SWCCs;
- Anisotropia do solo de rejeitos  $k_v/k_h = 0,2$  (com base nos resultados da calibração em estado estacionário apresentados na Seção 4.7.1);
- Dados de precipitação por hora foram aplicados com 50% de infiltração;
- As seções transversais 1-1, 2-2 e 3-3 foram modeladas;
- O período de modelagem foi de janeiro de 2016 a janeiro de 2019;
- As condições iniciais foram estabelecidas a partir de um modelo saturado no estado estacionário, utilizando uma precipitação média anual de 50% (1400 mm/ano);
- Dados reais de precipitação por hora dos pluviômetros automatizados combinados, F11 (2016) e F18 (2017-2019), foram aplicados na parte superior de todo o modelo;
- Carga de Pressão = 941 m sobre a fundação a montante;
- Carga de Pressão = 856,21 m sobre a fundação a jusante; e
- Carga de Pressão = 936 m para lago de decantação sobre rejeitos.

As condições de poro-pressão demonstram uma divisão entre as zonas saturadas e não saturadas. Verificou-se que o lençol freático diminuiu lentamente em aproximadamente 2 m a 4 m ao longo

dos três anos, o que é consistente com uma diminuição média de 1,6 m nos valores piezométricos registrados pelos piezômetros de campo e INAs situados acima de 900 m msl. No entanto, as sucções acima do lençol freático diminuíram devido às chuvas que ocorreram em 2016. A precipitação média de 2017 e as precipitação acima da média de 2018 promoveram o avanço do fluxo de água no sistema, que diminuiu as sucções de maneira descendente, como mostra a Figura 46. As sucções diminuíram de uma média entre 35 kPa e 75 kPa para entre 5 kPa e 20 kPa ao longo do período de três anos. O movimento vertical descendente da água é regulado pelos efeitos combinados da permeabilidade vertical do material fino e grosso. O fundo da zona de sucção reduzida atinge aproximadamente 25 m de profundidade após os três anos modelados. A Figura 47 mostra a redução calculada na resistência ao cisalhamento associada ao avanço da frente de saturação. A diminuição da resistência ao cisalhamento na zona não saturada foi calculada usando o método descrito por Fredlund, Xing, Fredlund e Barbour (1996)<sup>12</sup> ao longo de três anos que antecederam o rompimento em 25 de janeiro de 2019.

Em resumo, a análise mostra:

- O modelo concorda com a diminuição observada nos níveis de água no período de três anos de 2016 a 2019.
- O perfil de poro-pressão hidrostática de 50%, com profundidade, é uma aproximação razoável (particularmente na elevação crítica do recuo).
- Existe uma diferença de comportamento entre a zona não saturada e a zona saturada.
- A zona não saturada estava se saturando progressivamente.
- Uma redução média líquida na resistência ao cisalhamento da zona não saturada de até 15 kPa foi realizada progredindo até uma profundidade de 25 m após três anos.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Fredlund, D.G., Xing, A., Fredlund, M.D., & Barbour, S.L. (1996). The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, *33*(3), 440-448.



Figura 46: Perfil de poro-pressão ao lado da berma superior na seção transversal 3-3



Figura 47: Contribuição aproximada da redução de sucção na resistência ao cisalhamento

# 5.1.1 Simulação Transitória 1D

Um modelo não saturado 1D foi configurado para confirmar os resultados da simulação transitória 2D. Um perfil foi pego na crista da barragem, no mesmo local relatado na seção transversal 3-3. A principal diferença no modelo 1D é que 100% da precipitação é aplicada e a evaporação é considerada usando o método de Thornthwaite (1948) para calcular o PE e o método de Fredlund-Wilson-Penman (2000) para calcular o AE. O mesmo período de janeiro de 2016 até o rompimento em janeiro de 2019 foi avaliado.

Os resultados (Figura 48) mostram uma forte semelhança com os resultados do modelo 2D, o que confirma que os anos chuvosos fizeram com que as sucções fossem reduzidas em uma zona que desceu pela zona não saturada e atingiu uma profundidade de cerca de 25 m após três anos. Os resultados também confirmam que a aplicação de uma taxa líquida de infiltração igual a 50% da precipitação proporcionou uma mudança semelhante nas sucções em comparação com o modelo 2D.



Figura 48: Resultados do modelo 1D perto da crista da barragem para a seção transversal 3-3

# 5.2 Estágios Construídos em 3D

Esta seção apresenta os resultados de diferentes estágios de construção com base em simulações em 3D com 50% de precipitação aplicada no contorno da superfície. A construção da barragem consistiu em 10 alteamentos e 15 estágios de construção, conforme ilustrado na Figura 7. Esta seção inclui os resultados apenas para os estágios selecionados, particularmente para o Estágio 5 (final da construção do Segundo Alteamento), Estágio 10 (final da construção do Quinto Alteamento) e Estágio 15 (final da construção do Décimo Alteamento).

Os resultados 3D no Estágio 5 são mostrados na Figura 49 para uma fatia tirada na seção 3-3. A geometria e o comprimento da praia variam lateralmente ao longo da barragem. É esperada variação nos perfis de poro-pressão em diferentes seções. Para comparação, os resultados do modelo 2D são mostrados na Figura 50 para a mesma seção transversal. A diferença entre a água exsurgente que aparece na vista 3D e na vista da seção transversal 2D se deve pelos materiais usados nas bermas. O Primeiro e Segundo Alteamentos foram principalmente cobertos pelo solo compactado (Laterita). O coeficiente de permeabilidade do solo compactado era muito baixo (1,2 x  $10^{-9}$  m/s, Tabela 3), o que inibe a infiltração devido à chuva. Portanto, uma zona muito fina no topo estava molhada devido às chuvas, enquanto o solo por baixo permanece não saturado.

O nível da água na Figura 49 é um pouco mais baixa quando comparado ao nível da água de uma análise 2D para a seção transversal 3-3 (Figura 50). A diferença nos resultados pode ser atribuída às propriedades do material não saturado usadas na análise 2D.



Figura 49: Uma vista de perfil 2D ao longo da seção transversal 3-3 do Estágio 5 da construção de um modelo 3D de rejeitos não saturados e heterogêneos



Figura 50: Perfil da poro-pressão no Estágio 5 da construção com propriedades saturadas do material em uma análise 2D

A Figura 51 mostra os resultados 3D no Estágio 10. No Estágio 10, o comprimento da praia é maior para a seção transversal 3-3, em oposição à seção transversal 1-1 e à seção transversal 2-2.





O Estágio 15 representa o alteamento final (Décimo Alteamento) da barragem concluída em janeiro de 2016. A condição de contorno do lago de decantação foi aplicada como foi observado perto do início de 2016. A Figura 52 mostra uma fatia na seção transversal 3-3 e mostra que o lençol freático é mais baixo sob as partes superiores da barragem. Isto se deve principalmente ao uso de material de solo compactado para o Oitavo e Nono Alteamentos. O solo compactado inibe a taxa de infiltração e apenas a zona da superfície superior pode ser saturada devido à chuva.



Figura 52: Uma vista de perfil 2D ao longo da seção transversal 3-3 do Estágio 15 de construção de um modelo 3D de rejeitos heterogêneos

# 6. RESUMO / CONCLUSÕES

A análise de percolação proporcionou as seguintes conclusões:

- 1. Verificou-se que a infiltração líquida de chuvas é igual a aproximadamente 50% do total anual de precipitação.
- 2. Os piezômetros não registraram eventos climáticos de curto prazo, por que a zona não saturada atuou como uma barreira.

- 3. Houve uma lenta diminuição nos piezômetros e INAs nos três anos anteriores ao rompimento.
- 4. Não houve tendência significativa nas leituras durante a semana que antecedeu o rompimento.
- 5. As medições de dissipação do CPTu demonstraram um gradiente descendente de cerca de 50% da hidrostática. Isso foi confirmado nos modelos transitórios de percolação 1D e 2D.
- 6. Eventos climáticos podem alterar as sucções que podem resultar em uma redução média líquida na resistência ao cisalhamento na zona não saturada de até 15 kPa.

Os resultados das análises de percolação foram utilizados para informar e orientar as análises detalhadas de deformação, conforme discutido no Apêndice H.