

Análise de uma Barragem Tipo *Pond* na Região de Poconé/MT – Estudo de Caso

Annika Ferreira Lopes

Geóloga, Faculdade Arnaldo, Poconé, Brasil, annikalopes25@gmail.com

Marcio Fernandes Leão

Geólogo-Geotécnico, Tractebel/UFV, Belo Horizonte, Brasil, marciotriton@hotmail.com

RESUMO: A atividade mineral na região de Mato Grosso está em conformidade com as exigências dos órgãos estaduais e da Agência Nacional de Mineração (ANM). A extração é realizada em minas a céu aberto e o beneficiamento do minério de ouro ocorre em um circuito fechado, com os resíduos armazenados em barragens. O ouro é então concentrado em uma central de amalgamação, onde a água e o mercúrio são reutilizados. As barragens em Poconé, conhecidas como barragens do tipo *pond*, estando acima da topografia original do terreno, diferindo de barragens convencionais de fechamento de vales. Esse trabalho discute os estudos que levaram à análise de estabilidade dos taludes de uma dessas barragens, denominada Ouro Fino, e à elaboração de um mapa de inundação em caso de ruptura hipotética. Este estudo de caso é parte de um projeto associado à Cooperativa de Desenvolvimento Mineral de Poconé/MT. Assim, considera-se que a capacidade destrutiva da onda é significativa para os cenários dado o perigo hidrodinâmico, embora a onda não tenha alcançado nenhum povoado, habitações esparsas, construções de comércio ou aparelhos de infraestrutura cuja permanência de pessoas seria considerada eventual. Espera-se que o resultado das manchas de inundação e as variáveis hidrodinâmicas associadas às seções de interesse devam ser empregados para a avaliação do Dano Potencial Associado (DPA) desta estrutura e, caso necessário, na elaboração do PAEBM.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem tipo *pond*, Mancha de inundação, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT: Mineral activity in the Mato Grosso region complies with the criteria of state bodies and the National Mining Agency (ANM). Extraction is carried out in open-pit mines and the processing of gold ore takes place in a closed circuit, with waste stored in dams. The gold is then concentrated in an amalgamation plant, where the water and mercury are reused. The dams in Poconé, known as "lagoon" type dams, are located above the original topography of the land, of conventional valley closure dams. This work discusses the studies that led to the analysis of the stability of the slopes of one of these dams, called Ouro Fino, and the creation of a flood map in the event of a hypothetical rupture. This case study is part of a project associated with the Poconé/MT Mineral Development Cooperative. Therefore, consider that the destructive capacity of the wave is significant for the scenarios given the hydrodynamic danger, although the wave did not destroy any settlements, scattered dwellings, commercial buildings or infrastructure devices whose presence of people would be considered occasional. It is expected that the results of the flood spots and the hydrodynamic variables associated with the particles of interest should be used to evaluate the Associated Potential Damage (DPA) of this structure and, if necessary, in the preparation of the PAEBM.

KEYWORDS: "Pond" dams, Dam-break, Slope Stability.

1 INTRODUÇÃO

Os empreendimentos minerários da região de Poconé desenvolveram padrões para extração, beneficiamento e concentração final do ouro. A extração mineral é realizada em mina a céu aberto. O beneficiamento de minério de ouro (Au) é realizado em um circuito fechado, em que os resíduos são armazenados em uma estrutura de barragem. Nessa barragem os rejeitos que saem da planta de beneficiamento são lançados em um ponto (espigoto), enquanto a porção líquida segue em trajetória acompanhando a declividade do terreno, de modo a promover a decantação dos sólidos, até o ponto de

captação da água de recirculação, que é novamente conduzida até a planta de beneficiamento. Já a concentração final do ouro é realizada em uma central de amalgamação, instalada no empreendimento como estrutura de controle ambiental, cuja água é reutilizada em circuito fechado, da mesma forma que o mercúrio (Hg) usado na amalgamação do ouro, que é reutilizado após a queima em capela hermética, todo licenciado pela Secretaria de Estado e Meio Ambiente (SEMA).

As barragens da região de Poconé são do tipo *pond* (Figura 1), ou seja, são estruturas geotécnicas cuja cota superior está acima da topografia original do terreno. Essas estruturas, de controle ambiental, são instaladas fora de linhas de talvegue e fundos de vale, de modo que não têm finalidade de represar corpos hídricos para a contenção de rejeitos de mineração.

Nas bacias de contenção de rejeitos do tipo *pond* tem que levar em consideração o modelo construtivo destas e, conseqüentemente, o adensamento dos rejeitos dentro do reservatório da estrutura. Isto ocorre devido a necessidade de reaproveitamento da água que acumula na bacia para a planta de beneficiamento, e para fins econômicos tal retorno seja feito pela ação da gravidade. Isso as diferencia das várias barragens existentes em outras regiões mineradoras brasileiras. Desta forma, os estudos recomendados pela ANM (NBR 13028, 2017) para essas estruturas necessitam de algumas adaptações para que os produtos sejam satisfatórios, visto que estas estruturas (*pond*) são diferentes da maioria daquelas para as quais as recomendações foram inicialmente criadas.

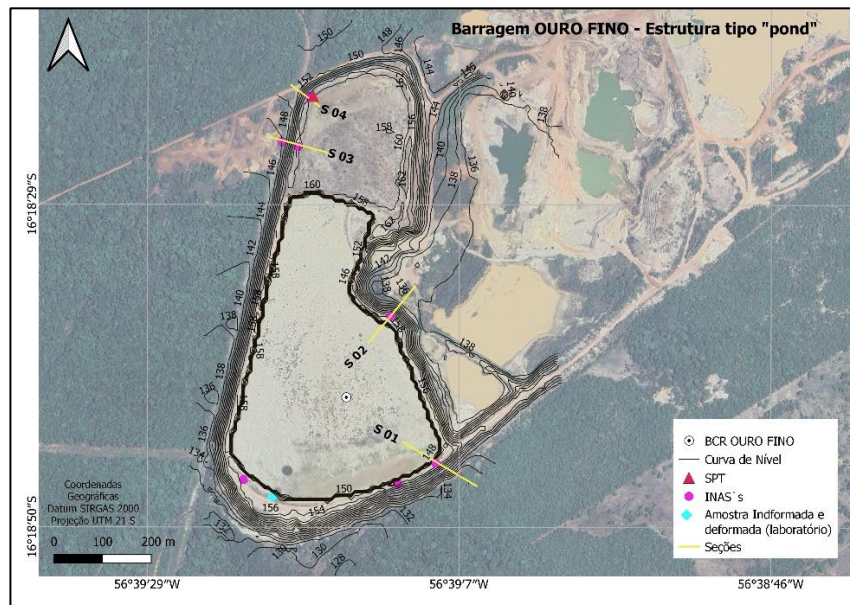


Figura 1. Barragem Ouro Fino, estrutura tipo *pond*, mostrando a disposição dos instrumentos de medição de nível d'água (INAS's), ensaio de SPT, ensaios de laboratório, e as seções estudadas para a análise de laboratório.

Considerando essas especificidades, esse trabalho tem como objetivo a discussão dos resultados dos estudos que levaram à análise de estabilidade dos taludes de uma barragem e à confecção de seu mapa de inundação, em caso de hipotética ruptura.

2 METODOLOGIA

Os documentos de referência para o desenvolvimento deste estudo de caso se basearam nos trabalhos geotécnicos realizados pela CooperPoconé, entre os anos de 2019 e 2023. O Quadro 1 apresenta os relatórios que foram consultados para a análise de estabilidade da barragem Ouro fino e para o mapa de inundação em caso hipotético de ruptura.

Quadro 1. Documentos referentes ao estudo de estabilidade da barragem Ouro Fino.

Tipo	Nome/Descrição	Ano de Elaboração
Relatório	As Is	2020
Relatório	Mapa de Inundação	2022
Relatório	Batimetria	2020
Desenho	Ortomosaico e MDT	2022
Relatório	Plano de Instrumentação	2019
Relatório	Estudo de Chuva	2023
Relatório	RAG	2019
Relatório	Ensaio de Laboratório	2022

2.1 Análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade do *pond* Ouro Fino consideraram-se os resultados obtidos pelas sondagens à percussão com ensaio SPT (Standart Penetration Test) realizadas no corpo da estrutura, bem como os resultados dos monitoramentos realizados em indicadores de níveis d'água (INA's). Consideraram-se ainda, os resultados das amostras deformadas e indeformadas, tanto daquelas coletadas no corpo da estrutura, como as coletadas na fundação em rocha alterada. As amostras foram analisadas por laboratórios credenciados e a análise de estabilidade da estrutura, por se tratar de uma estrutura tipo *pond*, foi realizada para cada setor do barramento, definidos em três setores, sul, leste e oeste.

2.2 Mapa de Inundação

Para o mapa de inundação foram utilizados os dados dos ensaios de laboratório e a carta planialtimétrica com topografia atualizada, que permitiram gerar as áreas de inundação e o perímetro da Zona de Autossalvamento (ZAS). A área de inundação foi projetada para todos os lados do maciço, levando em consideração todos os possíveis cenários, tendo sido utilizada a forma de galgamento como o pior cenário possível, a qual considera sempre o setor de topografia mais baixa, que também é considerada a de jusante. Os demais setores foram analisados considerando a ruptura de tipo *piping*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise de estabilidade

As seções (S 01 a S 04) estudadas quanto à estabilidade seguiram o posicionamento conforme Projeto As-Is (Figura 1), sendo aqui apresentada a S 01, por ser a mais crítica. Com base nos ensaios e critérios de análise, para o material do aterro, adotaram-se valores de: peso específico (γ) igual a 25,76 kN/m³, coesão (c') de 40,8 kPa, ângulo de atrito (Φ') de 31° e $k = 6,30 \times 10^{-9}$ m/s e $kv/kh = 1,0$. As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados para a S 01.

Com base nesses ensaios e nos critérios de análise, para o material da fundação, adotaram-se valores de: peso específico (γ) igual a 25,6 kN/m³, coesão (c') de 31,3 kPa, ângulo de atrito (Φ') de 30° e $k = 7,09 \times 10^{-9}$ m/s e $kv/kh = 1,0$.

Os resultados de análises do rejeito foram obtidos do Projeto As Is de 2020, em que se adotou valores de: peso específico (γ) igual a 25 kN/m³, coesão (c') de 20 kPa, ângulo de atrito (Φ') de 34° e $k = 6,30 \times 10^{-9}$ m/s e $kv/kh = 1,0$.

Para a análise física, o principal objetivo da análise de estabilidade geotécnica foi verificar se a resistência ao cisalhamento do maciço é superior às forças cisalhantes atuantes, de forma a garantir a sua estabilidade. Foram consideradas as possibilidades de ruptura local e global nos seguintes casos:

- I. Cenário I: Simulação da fase de operacional normal da estrutura na cota 152 m. Fator de segurança mínimo de 1,5 na avaliação do talude de jusante.
- II. Cenário II: Simulação da fase de operação com baixa probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, sendo combinada a ocorrência de uma ação excepcional (representada pela condição hidrológica excepcional com reservatório no nível máximo maximorum) com a

condição de carregamento normal, na cota 155 m. Neste caso, o fator de segurança mínimo deverá ser 1,5 na avaliação do talude de jusante e fundações.

- III. Cenário III: Simulação da condição de carregamento limite correspondente a uma probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura muito baixa, na qual há a combinação de mais de uma ação excepcional. Nesse caso, representada pela condição hidrológica excepcional (com reservatório no nível máximo maximum) e a ocorrência de sismo. Para esse caso, o fator de segurança mínimo deverá ser 1,1 na avaliação do talude de montante, jusante e fundações.

Como há compartimentação na barragem Ouro Fino, separada por um dique, depreende-se que há um compartimento norte denominado bacia acima e um compartimento ao sul, denominado bacia abaixo. Cada um foi tratado com níveis de máximo e operacional e máximo maximum diferentes. O nível operacional do reservatório encontra-se na cota 152 m e o nível máximo maximum se encontra na cota 155 m.

Já o volume de amortecimento de cheia é de 552.600 m³. Para o estudo de percolação, foi adotado o modelo de escoamento em regime permanente, analisado por meio de soluções numéricas através do método de elementos finitos. Neste contexto, a condutividade hidráulica é função da pressão do escoamento e então se determina iterativamente a posição da linha de saturação para escoamentos não confinados, como é o caso da barragem Ouro Fino.

Os fatores de segurança mínimos computados para os maciços da bacia de contenção de rejeitos Ouro Finos, considerando ruptura global e local, não apenas para a S 01 (Figura 2 e 3), mas também para as S 02 à S 04, em condições: normais, excepcionais e em situação de sismo, conforme cenários descritos, estão resumidos na Tabela 1.

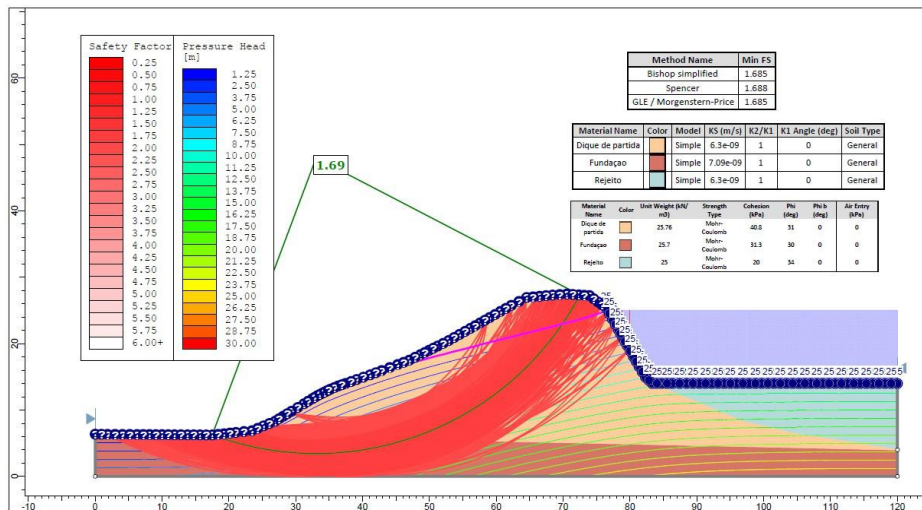


Figura 02. Análises de estabilidade para a seção 01, para os cenários (I e II).

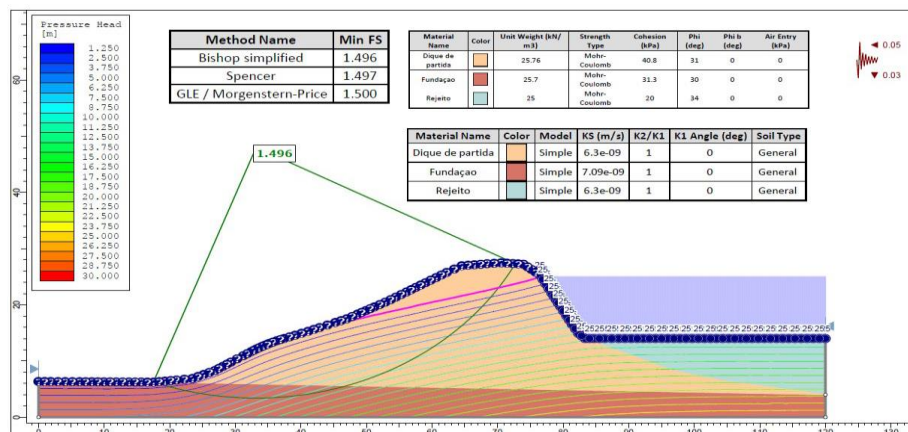


Figura 03. Análises de estabilidade para a seção 01, para o cenário (III).

Tabela 1. Resumo dos valores de fator de segurança estimados nas análises de estabilidade.

Seção de Ref.	FS de ref. 1.5	FS de ref. 1.5	FS de ref. 1.1
	Cenário I	Cenário II	Cenário III
Seção S01	1.79	1.69	1.49
Seção S02	1.67	1.59	1.42
Seção S03	1.86	1.82	1.64
Seção S04	2.25	2.24	1.98

3.2 Mancha de Inundação

A partir dos documentos da CooperPoconé foi possível definir as características geométricas da estrutura, bem como compreender as parcelas de sólidos e de líquidos que atualmente ocupam o reservatório. O Quadro 2 apresenta as principais características da bacia de rejeitos Ouro Fino.

Quadro 2. Principais Características da bacia de rejeito Ouro Fino.

Barragem Ouro Fino	
Elevação de fundo (m)	132
NA operacional (m)	152
Elevação da crista (m)	156/157
Borda livre operacional (m)	4
Volume armazenado no reservatório (m ³)	696.805,00
Volume de água até o NA da batimetria (m ³)	28.942,00
Volume livre acima do NA da batimetria até a crista (m ³)	187.208,00

A bacia de contenção de rejeitos Ouro Fino não possui sistema extravasor de superfície, sendo utilizada uma tubulação de retorno de água com canos de 4". Entretanto, a segurança frente às cheias ocorre por manutenção de uma borda livre suficiente para amortecer uma chuva decamilenar. Deste modo os modos de falhas avaliados para a estrutura foram:

- **Galgamento:** O galgamento considerou a análise supercrítica do estudo de “Dam Break”, uma vez que se trata de um modelo de barramento do tipo *Pond*, sendo esta modalidade de falha considerada de maior propensão a ocorrer no setor sul da barragem em função da cota altimétrica mais baixa.
- **Piping:** A segunda maior probabilidade de ruptura da barragem é do tipo *piping*, uma vez que em um cenário crítico poderia haver no corpo da barragem a formação de dutos por heterogeneidade na compactação de seus taludes. Neste caso, o modo de falha por *piping*, foi adotado para refletir as demais faces leste e oeste da bacia. O escoamento foi definido integralmente como Mud Flow, logo, o material propagado terá comportamento de fluido não-newtoniano. Os Quadros 3 a 5 apresentam os dados de entrada para a simulação e o Quadro 6 os resultados da simulação hidrológica para todas as bacias.

Quadro 3. Dados de entrada das equações de previsão da brecha – Dique Sul.

Dados de entrada	Dique Sul
Elevação da crista (m)	156,00
Elevação da fundação (m)	132,00
Altura da brecha - Hb (m)	24,00
Altura da lâmina de água no momento da ruptura – Hw (m)	4,00
Inclinação lateral (Z)	1,00
Elevação do N.A. para gatilho de desenvolvimento da brecha (m)	156,00
Total propagado (m ³)	696.805,00

Quadro 4. Dados de entrada das equações de previsão da brecha – Dique Leste.

Dados de entrada	Dique Leste
Elevação da crista (m)	157,00
Altura da brecha - Hb (m)	16,00
Altura da lâmina de água no momento da ruptura – Hw (m)	3,00
Inclinação lateral (Z)	0,9
Elevação do N.A. para gatilho de desenvolvimento da brecha (m)	153,00
Total propagado (m ³)	850.181,00

Quadro 5. Dados de entrada das equações de previsão da brecha – Dique Oeste

Dados de entrada	Dique Oeste
Elevação da crista (m)	156,00
Altura da brecha - Hb (m)	11,00
Altura da lâmina de água no momento da ruptura – Hw (m)	3,00
Inclinação lateral (Z)	0,5
Elevação do N.A. para gatilho de desenvolvimento da brecha (m)	155,00
Total propagado (m ³)	849.590,00

Quadro 6. Resultados da simulação hidrológica do hidrograma de ruptura

Volume mobilizado (x10 ³ m ³)	Vazão de pico defluente (m ³ /s)
Cenário Sul - 696,80	632,1
Cenário Leste - 846,00	1245,7
Cenário Oeste - 554,00	525,0

Como resultado dos estudos de Dam Break da Bacia de Contenção de Rejeitos Ouro Fino, foi gerado o mapa para mancha de inundação apresentado na Figura 4. A ZAS do presente estudo compreende toda a mancha de inundação para o cenário Sul. Foi considerado como ZAS para o setor leste a área em malha quadriculada e para o cenário oeste foi considerada toda a mancha de inundação.

De acordo com os resultados obtidos, podem ser elencadas as seguintes constatações: a mobilização da onda determinou, nos primeiros metros da propagação, uma vazão de 599,72 m³/s, com altura da onda de 1,69 m e velocidades de até 4,52 m/s para o Cenário sul, uma vazão de 1245 m³/s, com altura da onda de 3,75 m e velocidades de até 8,2 m/s para o Cenário leste, e, 520 m³/s, altura da onda de 3,9 m e velocidades de até 17 m/s para o Cenário oeste. Assim, considera-se que a capacidade destrutiva da onda é significativa para os cenários dado o perigo hidrodinâmico, embora a onda não tenha alcançado nenhum povoado, habitações esparsas, construções de comércio ou aparelhos de infraestrutura cuja permanência de pessoas seria considerada eventual. Sendo assim, o risco considerado é somente ambiental. A onda atinge, para todos os cenários considerados, basicamente campos vegetados e cavas exauridas existentes ao longo do perímetro do empreendimento. Especialmente ao lado leste, a onda atinge bacias de recirculação de água e a cava do próprio empreendimento logo a jusante, ademais, a onda não se espalha no sentido da planta industrial, próxima e ao norte da brecha do dique leste.

Para o Cenário Sul, a inundação fica restrita a região ao sul do barramento com 2.385 m, atingindo apenas planícies de baixa declividade.

Para o Cenário Oeste, a inundação fica limitada as regiões entre a barragem a até no máximo 3400 m se acomodando ao longo da planície de baixas declividades. Para o Cenário Leste, a inundação limita-se entre a barragem e até 910 m sentido as calhas formadas pelas cavas próximas, onde as alturas de onda chegam a maiores valores (\cong 18 m na seção ST-02).

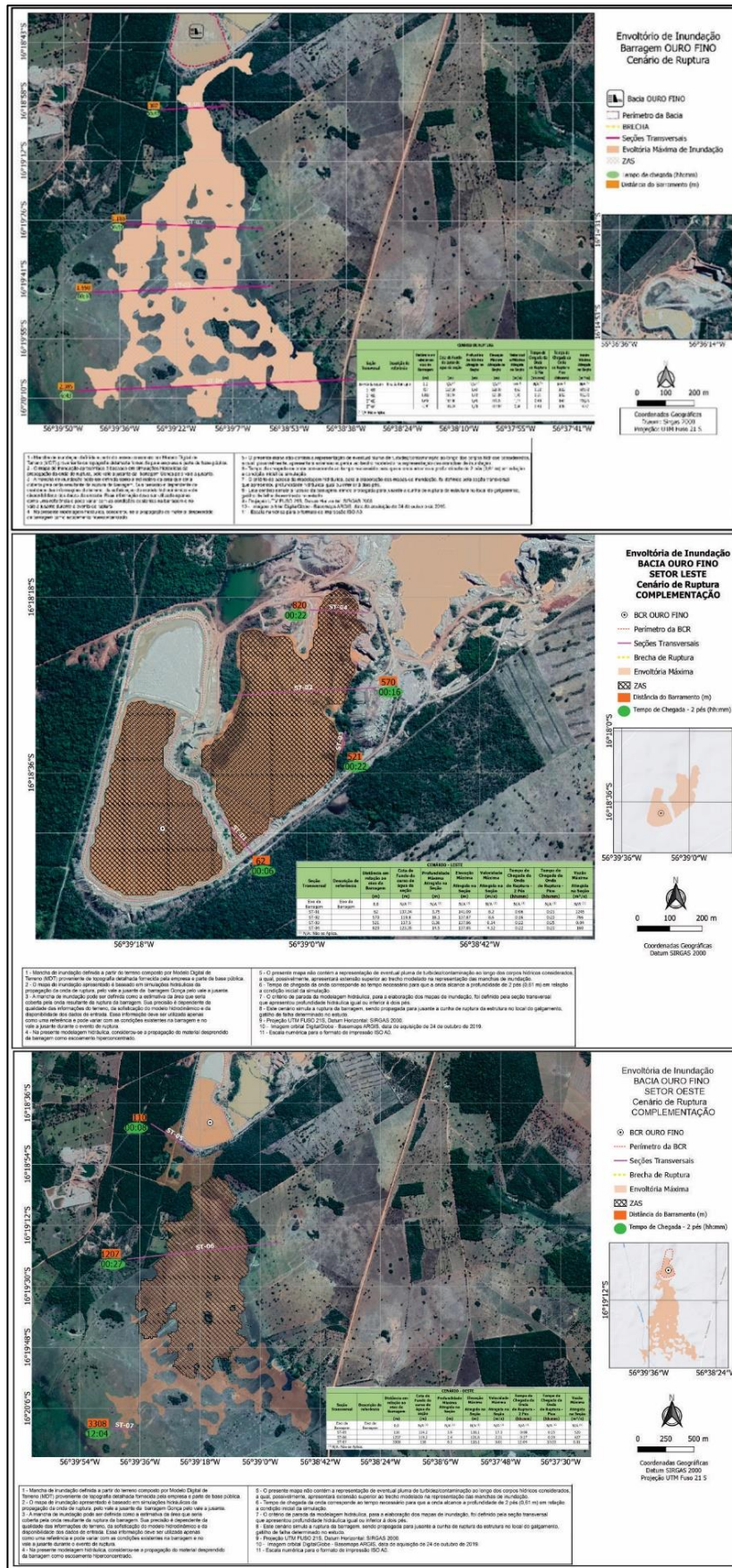


Figura 4. Mapas para a mancha de inundação de ruptura hipotética para os setores Sul, Leste e Oeste, respectivamente, para a barragem OURO FINO – Poconé – MT.

4 CONCLUSÕES

As análises de estabilidade da estrutura apresentaram fatores de segurança que estão acima dos mínimos preconizados pela NBR13.028:2017 em todos os cenários.

Espera-se que o resultado das manchas de inundação e as variáveis hidrodinâmicas associadas às seções de interesse devam ser empregados para a avaliação do Dano Potencial Associado (DPA) desta estrutura e, caso necessário, na elaboração do PAEBM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 13028 (2017) Mineração — Requisitos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, 16p.