

ANÁLISE DE CENÁRIOS DA HIPOTÉTICA RUPTURA DA BARRAGEM DE DECANTAÇÃO DE FINOS DA USINA DE BENEFICIAMENTO RIO FIORITA, SIDERÓPOLIS, SC

William de Oliveira SANT ANA¹; Jefferson de FARIA²; Fernando BONATO³; Roberto ROMANO NETO⁴; Clederson SALVARO BROLESSI⁵

¹Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina - SATC, william.santana@satc.edu.br; ² Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina – SATC, jefferson.faria@satc.edu.br; ³B&S Engenharia Ltda., fernandobonato@yahoo.com.br; ⁴Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina - SATC, roberto.romano@satc.edu.br; ⁵Carbonífera Belluno Ltda., clederson@cbelluno.com.br

RESUMO

O Núcleo de Meio Ambiente do Centro Tecnológico SATC (CTCL) realizou a análise de cenários hipotética ruptura de uma barragem utilizada para decantação de rejeitos finos de carvão mineral, localizada no município de Siderópolis, SC. O objetivo dos estudos foi demonstrar a velocidade de propagação da onda mecânica de fluxo do fluido, a profundidade e a extensão da inundação para diferentes intervalos de tempo após a ruptura e, assim, subsidiar a elaboração de um plano de ação de emergência. Como parâmetros de entrada do modelo considerou-se que a barragem possui 4 pontos críticos de rompimento e geração de rupturas, na qual, por análise sensível, foi verificada que a ruptura nordeste – NE, teria impactos mais significativos relacionados com danos materiais e de acidentes com pessoas. A análise de cenários mostra que com 40 segundos após o rompimento, as águas já transpõem a estrada situada na base do talude da barragem, com 2,5 metros de lâmina d'água. Os resultados da modelagem mostram que não ocorrerá o total esvaziamento da barragem, ficando o fluido contido no pátio operacional, atingindo em baixa quantidade e velocidade ao corpo hídrico receptor representado pelo rio Fiorita. Todos os locais não alagáveis do pátio operacional foram delimitados pelo modelo, constituindo pontos de salvamento a serem considerados no plano de ação de emergência.

Palavras-chave: Modelagem bidimensional de cenários. Ruptura de barragens. Rejeitos finos de beneficiamento de carvão.

ABSTRACT

The Environmental Department of the SATC Technological Center (CTCL) carried out the scenario analysis on hypothetical rupture of a dam used for decantation of fine tailings of coal, located in the municipality of Siderópolis, SC. The objective of the studies was to demonstrate the propagation velocity of the mechanical fluid flow wave, the depth and the extent of the flood for different time intervals after the rupture, and thus to add to an emergency plan. As input parameters of the model it was considered that the dam has four critical points of rupture, in which, through previous analysis, it was verified that the northeast-NE rupture would have more significant impacts related to material damages and accidents with people. The analysis of scenarios shows that with 40 seconds after the break, the waters already cross the road located at the base of the embankment of the dam, with 2.5 meters of water. The results of the modeling show that it will not occur the total emptying of the dam, being the fluid restricted in the operational yard of a coal preparation plant where the dam is placed, reaching in low quantity and speed to the receiving water body represented by the Fiorita river. All the non-flooding sites of the operational yard were delimited by the model, being rescue points to be considered in the emergency action plan.

Key-Words: Modeling of scenarios. Rupture of dams. Fine tailing of coal preparation plant.

1 INTRODUÇÃO

Em razão do elevado conteúdo de cinzas contido nos carvões produzidos em Santa Catarina há necessidade do seu beneficiamento, para obtenção de produtos com as especificações exigidas para seu uso no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda e como coque de fundição. O

beneficiamento consiste de um processo de separação gravimétrica que resulta, além dos carvões vendáveis, em efluente com elevada concentração de sedimentos finos e ultrafinos, os quais são lançados em bacias para decantação.

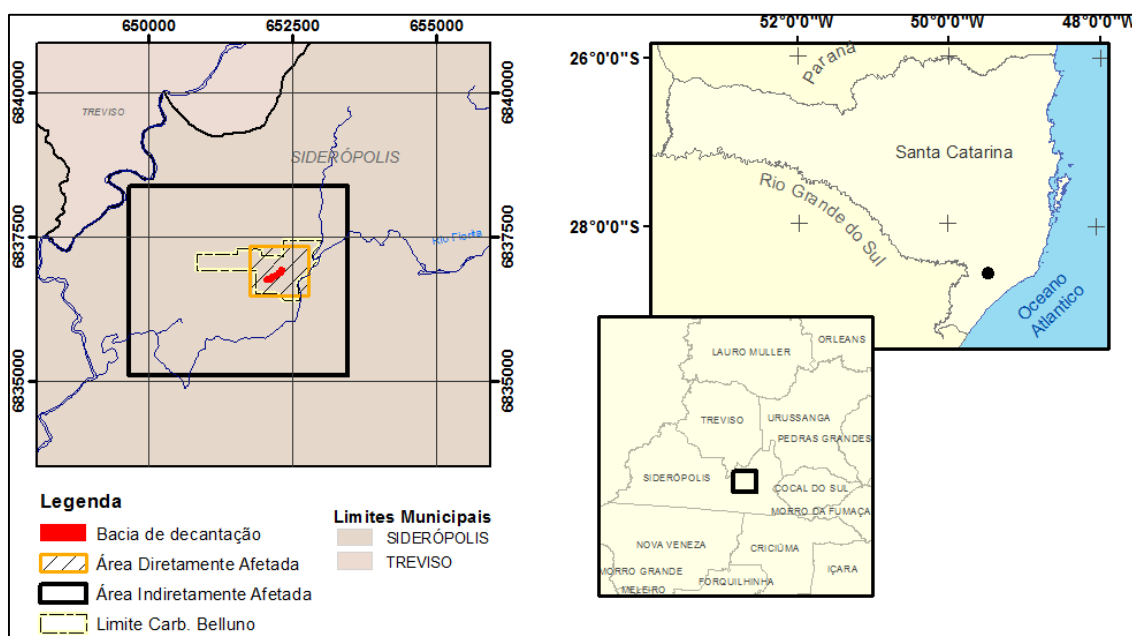
Diante do contexto de risco ambiental, patrimonial e de acidentes com pessoas, associado

com eventual ruptura da barragem que forma uma bacia de decantação, que se insere no ciclo produtivo da atividade de mineração de carvão, o Centro Tecnológico de Carvão Limpo (CTCL) da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) desenvolveu um estudo de análise de cenários para avaliar os impactos com o objetivo de instruir um plano de ação emergencial.

O estudo de caso apresentado é uma barragem de uma bacia de decantação situada na localidade de rio Fiorita, município de Siderópolis, sul de Santa Catarina (Figura 1).

Como resultados dos estudos obtiveram-se cenários com a análise de ruptura em 4 pontos críticos no que se refere aos impactos ambientais, patrimoniais e pessoais mais significativos, concluindo-se sobre a extensão da pluma de contaminação aos recursos hídricos, da zona de inundação nas edificações situadas no pátio operacional e a localização das áreas de salvamento, contribuindo, assim, para a elaboração do plano de ação emergencial da barragem.

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: CTCL (2017).

2 CONTEXTO LEGAL

Sob o aspecto legal, as barragens no Brasil têm sua operação vinculada à Lei nº. 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), às Resoluções nº. 143 e 144, de 10 de julho de 2012, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012a; 2012b) e às Portarias do DNPM nº. 416 (DNPM, 2012) e nº. 526 (DNPM, 2013).

De acordo com a Portaria do DNPM nº. 416 (DNPM, 2012a), consideram-se barragens de mineração, barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base no direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de

mineração, ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.

A análise de cenários de ruptura da barragem é fundamental para analisar o dano potencial associado (DPA), no qual enunciam-se quatro características relacionadas ao volume total do reservatório, à existência de população à jusante, ao impacto ambiental e ao impacto socioeconômico. Na avaliação, o dano potencial poderá aumentar à medida que exista maior volume do reservatório e maior densidade demográfica de uma população, maior impacto ambiental e presença de infraestruturas de natureza produtiva e patrimônios

culturais que possam ser afetados, à jusante da barragem.

3 METODOLOGIA

Na modelagem de cenários de ruptura de barragens podem ser utilizados três métodos para se calcular a onda de propagação, sua velocidade e a área afetada resultante:

- Cálculos manuais: com simples fórmulas matemáticas e diagramas pode-se calcular o escoamento até a primeira aglomeração humana. A precisão do cálculo é bastante limitada.
- Cálculo unidimensional: este método é mais adaptado a vales em que o escoamento tem direção bem definida.
- Cálculo bidimensional: baseado no modelo digital do terreno, este método de cálculo numérico leva em conta todas deformações e acidentes topográficos locais, influências de reservatórios de retenção, rios, aglomerações urbanas etc. Cálculos de velocidade, profundidade e intensidade do escoamento, entre outros, podem ser apresentados.

Devido à condição topográfica da área de estudo, relativamente plana, satisfatória base de dados existente, necessidade de um método e resultados precisos e, principalmente, utilizando-se das melhores práticas empregadas atualmente, foi decidido pelo método cálculo numérico bidimensional, o qual foi precedido dos cálculos manuais. Feita a escolha do método de abordagem da problemática seguiu-se, a reunião da base, ou seja, dados geométricos, a escolha do *software* e modelo para gerar os cenários, por fim, os dados de entrada para o modelo matemático.

Para modelagem numérica numérico bidimensional foi utilizado o pacote de programas SMS® (2008), JANET® (2012) e Basement® (2010). O cálculo é baseado nas equações de Saint-Venant (LAURIANO, 2009) e o método de volumes finitos em combinação com um solucionador de Riemann. O pós-processamento (análise e visualização de resultados do cálculo) foi realizado utilizando-se o programa SMS 10.0® (2008) e ArcGIS®.

3.1 DADOS DE ENTRADA

Para entrada do modelo matemático, a barragem foi considerada de terra compactada. Além dessa informação, foram utilizados os dados obtidos através do levantamento topográfico, bem como por reconhecimento de campo e voo com “*drone*” realizado no dia 01 de março de 2016.

Outras informações que foram adotadas como entrada, seguem descritas abaixo:

- Volume máximo do reservatório no momento do rompimento: 280.000 m³;
- Considerou-se todo o volume como sendo de meio fluido água, com o objetivo de processar as simulações com o pior cenário, caso ocorra este rompimento;
- Área do reservatório: 50.998 m²;
- Considerando procedimento orientativo para uma barragem de terra do U.S ARMY CORPS OF ENGINEERING (2016), adotou-se como pior cenário a possibilidade de rompimento da barragem o transbordamento (*overtopping*);
- Para entrada nos dados no modelo, considerou-se rupturas para cada um dos possíveis pontos frágeis para rompimento, conforme Moody (2015);
- Altura barragem: 5,5 metros, cota da crista 112 metros acima do nível do mar;
- Formato da ruptura: Para o cálculo da ruptura foi adotado forma de trapézio, sendo a base igual ao dobro da altura d'água no reservatório e inclinação de 45° (SAFETY OF DAMS, 2012);
- No cálculo manual da abertura superior da ruptura e do tempo de formação da ruptura utilizou-se a equação de Fread-Harborough (ANA, 2012):

$$T = 0.00714 * V^{0.47} * H^{-0.9} \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$B = 2.15764 * K_0 * (V * H)^{0.25} \quad [\text{Eq. 02}]$$

- Com este ângulo lateral da ruptura e com a abertura inferior obteve-se a área da ruptura para os 4 pontos sugestivos de rompimento (NE, SE, W e NW), sendo o ponto crítico o NE;
- Tempo de ruptura para modelo matemático: ruptura imediata da barragem;
- No modelo hidrodinâmico foi adotado um coeficiente de atrito de acordo com Strickler: 30 m^{1/3}/s;

- Tempo de cálculo. Até 2 horas após rompimento;
- Não existem drenagens superficiais associadas à barragem e assim, considerou-se como ideal um modelo hidráulico não permanente (*Unsteady Flow*);
- No cálculo foi considerado apenas o processo hidrodinâmico sem os efeitos de infiltração e do transporte de sedimentos;
- Extensão do trecho fluvial à jusante, a ser considerado como área indireta, com base no volume do reservatório, conforme orientações do manual ELETROBRAS (2003 apud ANA, 2012): 5 km;
- Considerou-se coeficiente de Courant (*Courant Number*) para obter os intervalos de tempo (*time steps*) em segundos, já que foi calculada a distância entre as seções conforme equação de Samuel (ANA, 2012):

$$\Delta x \leq \frac{0.15 \cdot D}{S_0} \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$V_w = \frac{dQ}{dA} \quad [\text{Eq. 04}]$$

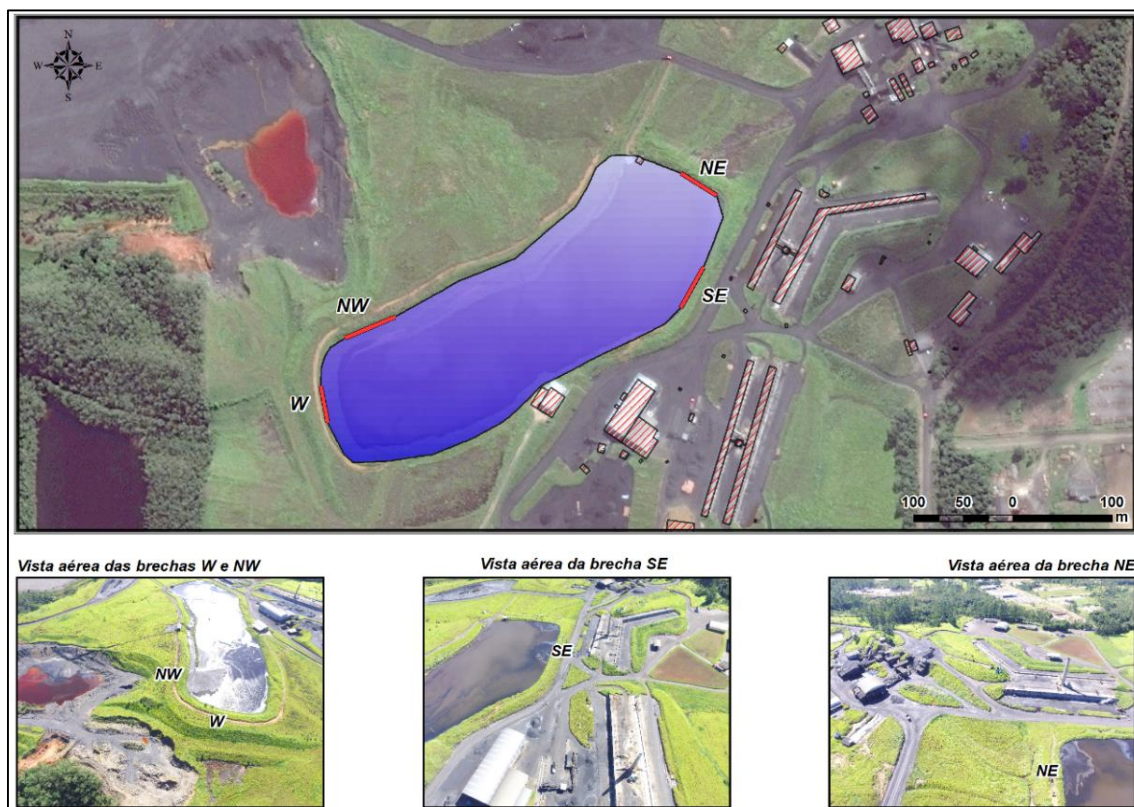
- Vazão de pico para validar o modelo bidimensional: Determinou-se a vazão de pico com base na equação de Saint-Venant, considerando o pior cenário, ou seja, formação imediata das rupturas (LAURIANO, 2009):

$$Q_p = \left(\frac{8}{27} * B d \sqrt{g * Y_m} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [\text{Eq. 05}]$$

4 RESULTADOS DO CENÁRIO, EXTENSÃO E ALTURA DO ALAGAMENTO

Dados geotécnicos e visita ao local evidenciaram 4 pontos suscetíveis de possível rupturas, contudo, o ponto mais crítico na barragem (bacia de finos) está situado num alinhamento que possui cota de 112 metros e extensão de 182,99 metros, próximo de edificações industriais do pátio operacional e de trânsito de veículos e de funcionários, voltado para nordeste (NE) desta bacia. Sua localização em relação ao contexto da barragem pode ser vista na figura 2.

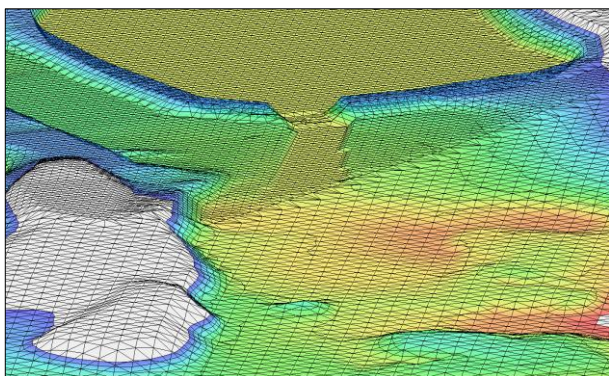
Figura 2 - Localização de possíveis rupturas idealizadas no contexto espacial da barragem, sendo dada ênfase neste trabalho à NE.



Fonte: Imagem vertical GoogleEarth®. Fotos Oblíquas de voo de drone realizado no dia 01 mar. 2016.

A ruptura NE foi assim nomeada por estar localizada no quadrante nordeste da barragem, de frente para terrenos de topografias mais baixas, em que foi instalado o lavador desta unidade de beneficiamento mineral. A título de exemplificação do modelo gerado, a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), na figura 3 é detalhado o rompimento do talude denominado ruptura NE.

Figura 3 - Visualização da ruptura nordeste (NE) no Modelo Digital do Terreno.



Fonte: CTCL (2017).

De acordo com as condições de contorno iniciais, onde a altura é igual a 5,5 metros e o volume máximo do reservatório igual a 280.000 m³, foi gerado o cenário de propagação da onda de alagamento,

com suas profundidades em diferentes “time steps” ou intervalos de tempo (Tabela 1).

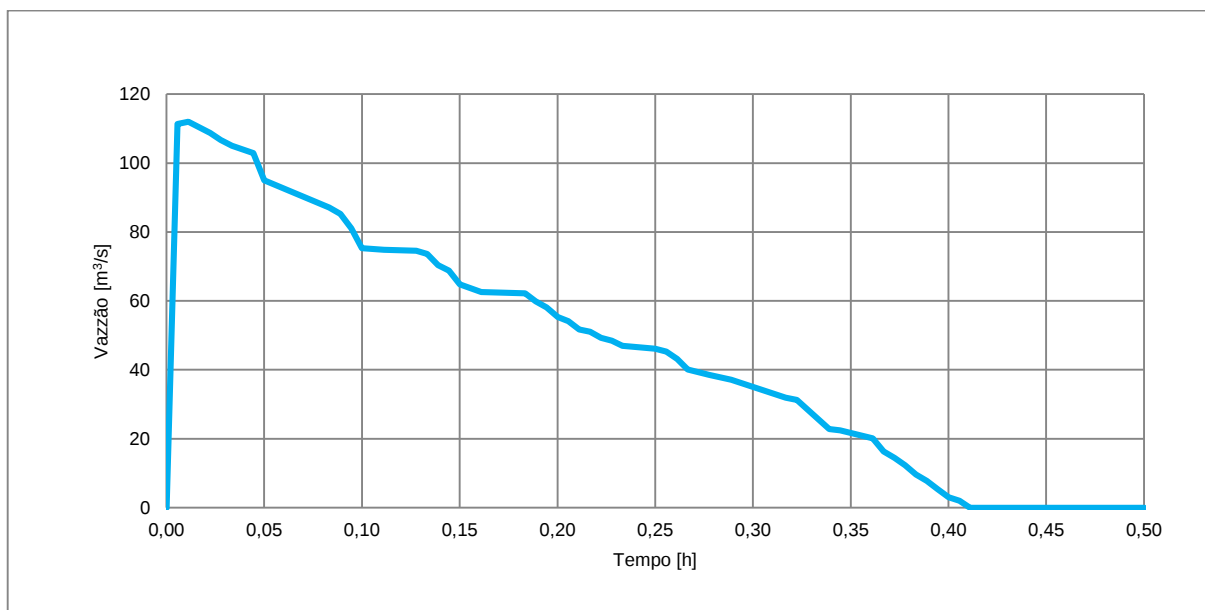
Tabela 1 – Parâmetros de análise do cenário (tempo, velocidade e altura) de propagação da onda para diferentes intervalos de tempo.

Observações	1 (Ruptura)	2	3	4 (Rio)
Tempo "chegada" [s]	0	20"	40"	16'40"
Velocidade [m/s]	0	4.0	2.0	0.5
Altura cabeça onda [m]	-	0.9	0.8	0.4
Altura máxima [m]	5.5	3.3	3.8	2
Cota máx. [m acima mar]	112	110.4	109.3	99.3

Fonte: CTCL (2017)

Sabe-se que é no início de um episódio de rompimento da barragem que rapidamente o fluido se propaga e ocorrem os principais danos, portanto, foi dado maior detalhe aos momentos iniciais do modelo, uma vez que é na deflagração do episódio que deve ser aplicado o plano de emergência contemplando evacuação de pessoal para as áreas de salvamento. Pelo hidrograma de rompimento, figura 4, vê-se a concentração do evento e pico de vazão nos primeiros minutos após ruptura.

Figura 4 - Hidrograma de rompimento da barragem – Rompimento NE - (Nível de operação do reservatório).



Fonte: CTCL (2017).

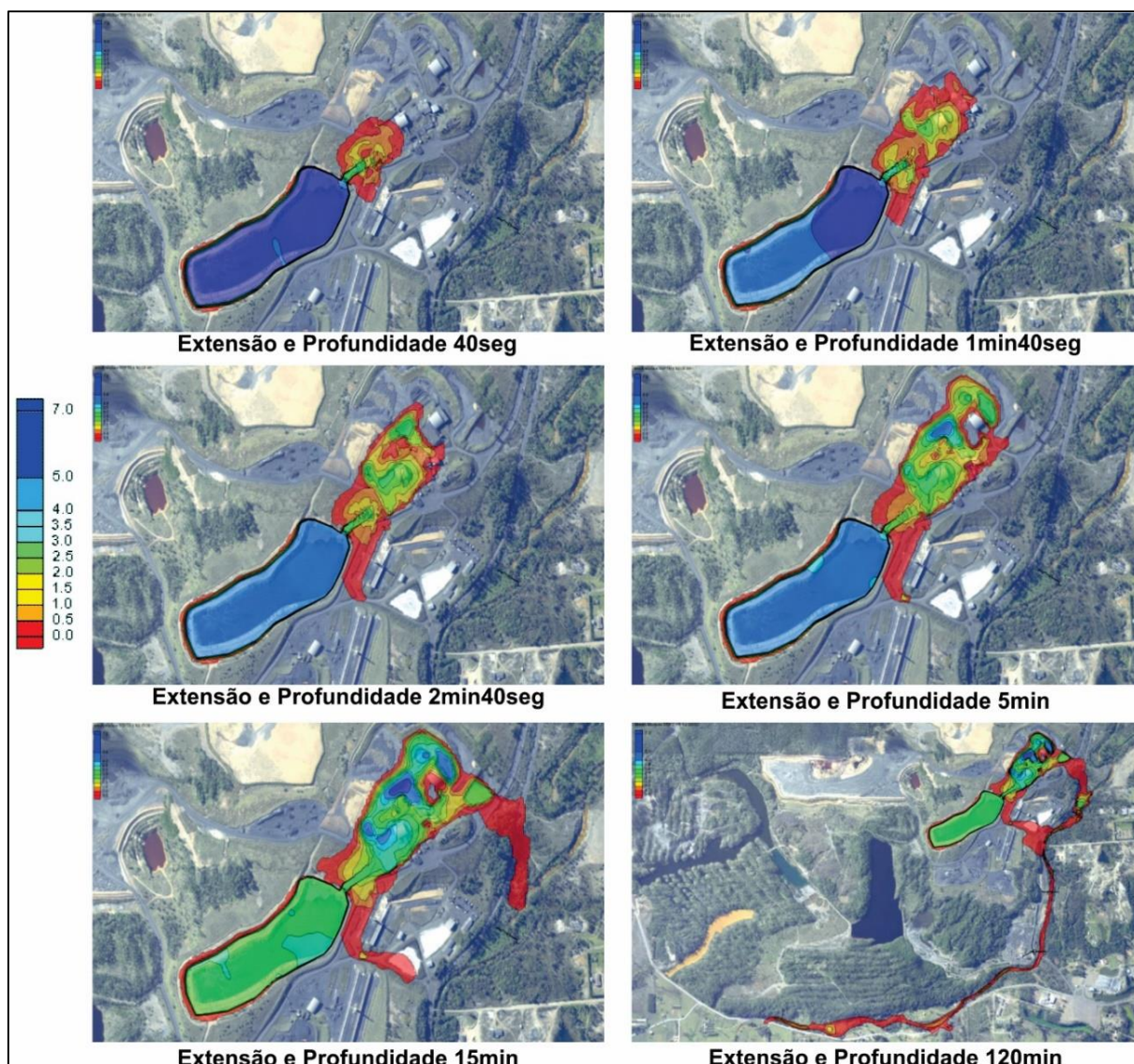
A representação espacial do desenvolvimento do evento após rompimento pode ser vista na figura 5, pela extensão/profundidade do alagamento em diferentes intervalos de tempo. Já pela figura 6 é visualizada a velocidade de propagação do fluido, ou seja, a interpretação destas figuras é complementar para os mesmos intervalos temporais definidos para o estudo.

Como pode ser visto na figura 5, com 40 segundos após o rompimento no ponto denominado ruptura NE, as águas já transpõem a estrada interna situada na base do talude, com 2,5 metros de lâmina de fluido, e estas já atingem o lavador, com cerca de

0,5 metro. A figura 6 mostra que aos 40 segundos o fluxo atinge o lavador com velocidade média de 6 m/s.

A 1 min e 40 segundos, no lavador, o fluido está com altura de cerca de 3 metros, e a velocidade já atinge de 3 a 4 m/s, com vazão de pico de 300 m³/s, ou seja, ocorreu uma rápida evolução do quadro. Com 2 min e 40 segundos e com 5 minutos a bacia de finos reduz à metade sua quantidade de armazenamento, sendo que o material que vazou fica contido, quase em sua totalidade, na depressão topográfica existente nas proximidades do lavador.

Figura 5 - Propagação da onda de alagamento de acordo com a profundidade em diferentes intervalos de tempo.



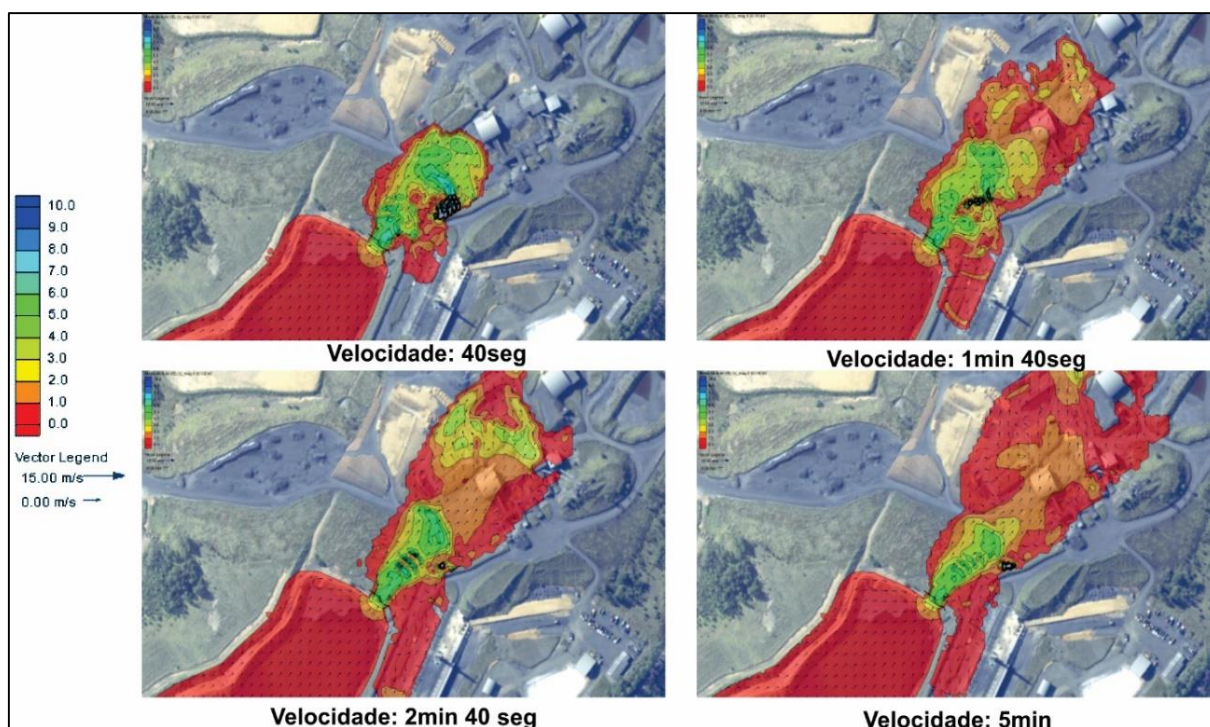
Fonte: CTCL (2017).

Com 5 min já existem pontos com 4 metros de altura de fluido e o fluxo torna-se menos turbulento. Este resultado ratifica a interpretação dos 15 min, em que a bacia estabiliza o nível (2,5 metros) com a superfície inundada ao redor do lavador, ou seja, se romper a bacia na ruptura NE, esta não esvaziará totalmente.

Em visita de campo verificou-se que neste caminho da torrente de fluido existe rede de

eletrificação, bem como transformadores de energia, o que poderia agravar a situação em caso de rompimento. A partir dos 15 min a até 120 min (Figura 5) começa a escoar pequena lâmina de fluido com baixa velocidade, por dois caminhos, até atingir o rio Fiorita, onde será gradualmente dissipada.

Figura 6 - Velocidade do escoamento após o rompimento na ruptura NE.



Fonte: CTCL (2017).

5 CONCLUSÕES

A simulação de cenários é ferramenta essencial para orientar o plano de ação de emergência no caso da ruptura de uma barragem.

No estudo de caso apresentado demonstrou-se que haverá impacto ambiental limitado aos recursos hídricos, porém risco elevado de perdas patrimoniais e de acidentes com pessoas, no caso do rompimento da porção NE da barragem, o que representa alto dano associado nos termos da legislação vigente.

Pelo nível de detalhe empregado, quaisquer pontos não alagáveis que tenham sido identificados nos diferentes cenários apresentados podem servir para nortear medidas de segurança, como locais para instalação de sirenes, ponto de fuga de funcionários,

dentre outras medidas a serem detalhadas por engenheiro de segurança da empresa.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul: R 06 – Estudos de Ruptura de Barragens**. Brasília: ANA, 2012.

BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zürich, 2006-2010

BRASIL. **Lei 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para

quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm> Acesso em: 19 de julho de 2015.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução nº 143**, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF. Ministério de Meio Ambiente. DOU em 04/09/2012. 2012a. Disponível em: <<http://www.institutominere.com.br/arquivos-im/resolucao-cnrh-143.pdf>> Acesso em: 19 de julho de 2015.

_____. **Resolução nº 144**, de 10 de julho de 2012. Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, e dá outras providências. Ministério de Meio Ambiente. 2012b. Disponível em: <<http://www.institutominere.com.br/arquivos-im/resolucao-cnrh-144.pdf>> Acesso em: 19 de julho de 2015.

CTCL – CENTRO TECNOLÓGICO DE CARVÃO LIMPO. **Banco de Dados NMA –. Estudo Técnico – Conveniado Carbonífera Belluno –PS 4401012 Análise do estudo de cenários de impacto à jusante da hipotética ruptura de barragem para atendimento a Lei Nº 12.334 de 2010**. Mantido pela Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, 2016.

DNPM – DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 416**, de 03 de setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração, e dá outras providências. Ministério De Minas e Energia. DOU de 05/09/2012. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-416-em-03-09-2012-do-diretor-geral-do-dnpm>> Acesso em: 19 de julho de 2015.

DNPM – DEPARTAMENTO DE PRODUÇÃO MINERAL. **Portaria nº 526**, de 09 de dezembro de 2013. Estabelece a periodicidade de atualização e revisão, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), e dá outras providências. Ministério De Minas E Energia. DOU de 11/12/2013. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-526-em-09-12-2013-do-diretor-geral-do-dnpm>> Acesso em: 19 de julho de 2015.

IMAGENS DE SATÉLITE DIGITAL GLOBE - **GoogleEarth®**. 2014

JANET, Smile Consult GmbH, 2012.

LAURIANO, André Wilham. **Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e Hec-Ras**. 2006. 251 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MOODY, Vince. **Dam break modeling with HEC-RAS**. 2015. Disponível em: <http://www.damsafety.org/media/Documents/FEMA/TS22_DambreachModeling/19_PRESENTATION.pdf> Acesso em 16 mar. 2016.

SAFETY OF DAMS, **Policy from Swiss Federal Office of Energy**, Version 1.1, November 2002.

SMS (Surface Water Modelling Solution) 10.0.3, Aquaveo LLC, 2008, Utah (USA).

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERING. **Using HEC-RAS for Dam break studies**. 2014. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-39.pdf.pdf>> Acesso em 16 mar. 2016.