

**SIMULAÇÃO POR MODELO MATEMÁTICO DE ROMPIMENTO  
HIPOTÉTICO DE BARRAGEM DE REJEITOS**

Michel Moreira <sup>1</sup>; Arthur Sales <sup>2</sup>; Larissa Rodrigues<sup>3</sup>, Wenner Tavares<sup>4</sup>

**Resumo** – A ruptura de barragens de rejeitos de mineração é um fenômeno de grande potencial poluidor e de grande risco às vidas humanas, a exemplo do rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco Mineração S.A., ocorrido no município de Mariana, estado de Minas Gerais, em 5 de novembro de 2015. Partindo destas premissas, este estudo teve como objetivo realizar, por meio de *software* de modelagem matemática, uma simulação de um rompimento de uma barragem de rejeitos, a fim de identificar os impactos decorrentes a partir da mancha de inundação obtida no *software*. Para tanto, foi utilizado o *software* HEC-RAS, versão 5.0.3, para a simulação a partir de modelagem matemática. Com os resultados obtidos espera-se ter uma dimensão dos possíveis danos que tal situação causaria e assim elaborar medidas de prevenção e controle que atendam ao disposto na legislação vigente.

**Abstract** – The mining tailings dam break is a phenomenon of great potential of pollution and great risk to human lives, as the example of the Fundão dam break, of Samarco Mineração S.A., occurred in the city of Mariana, state of Minas Gerais, in November 5<sup>th</sup>, 2015. Starting from these premises, this study had as its objective to make, through a mathematical modeling software, a mining tailings dam break simulation, in order to identify the impacts due to the flood mapping obtained by the software. Therefore, it was used the HEC-RAS software, version 5.0.3, for the simulation from mathematical modeling. With the results obtained, it is expected to know a dimension of the possible damage the situation would cause and then elaborate prevention and control measures to comply with the current laws.

**Palavras-Chave** – *Dam break*; rompimento; rejeito; HEC-RAS.

---

<sup>1</sup> Professor Orientador, Doutor, Centro Universitário Newton Paiva, (31) 99990-8817, michel.moreira@newtonpaiva.br

<sup>2</sup> Graduando de Eng. Ambiental, Centro Universitário Newton Paiva, (31) 99488-9355, arthurrssales@gmail.com

<sup>3</sup> Graduanda de Eng. Ambiental, Centro Universitário Newton Paiva, (31) 99667-5931, larissarc43@yahoo.com.br

<sup>4</sup> Graduando de Eng. Ambiental, Centro Universitário Newton Paiva, (31) 98460-4609, wengershaday@hotmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Estruturas para contenção de rejeitos, barragens, são amplamente utilizadas na indústria e, principalmente, na mineração. As falhas devem ser consideradas em projeto, pois eventos de ruptura acabam por ocorrer em alguns casos. São várias as situações que podem ocasionar a ruptura de uma estrutura de barramento, podendo ser citadas as falhas por galgamento, percolação/*piping*, volume excessivo de precipitação, terremotos e colapso da estrutura por erro construtivo ou de manutenção (ICOLD, 2001 *apud* MELO, 2013).

Desta forma, é importante o desenvolvimento de estudos que visem à identificação dos riscos decorrentes deste evento. Uma metodologia utilizada para tais estudos é a modelagem matemática, que é uma ferramenta de grande importância no planejamento e suporte à segurança de barragens, pois permite a simulação do cenário de ruptura hipotética de uma estrutura de barramento, bem como a propagação da onda gerada a partir deste evento (VERÓL, 2010 *apud* WILLINGHOEFER, 2015).

Dentre os diversos modelos matemáticos disponíveis para este tipo de análise, destaca-se o modelo utilizado pelo *software* HEC-RAS (*River Analysis System*), desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica (*Hydrological Engineering Center*) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*United States Army Corp of Engineers*). Este *software* se destaca dentre os demais conforme pode ser verificado no estudo realizado por Melo (2013), onde o mesmo avaliou várias metodologias disponíveis e, segundo ele, o modelo matemático de Saint-Venant incorporado ao *software* HEC-RAS é a melhor ferramenta para a realização de prognósticos de inundação. Este programa se encontra disponível gratuitamente e foi escolhido para a realização dos estudos deste trabalho.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Modelagem matemática

O escoamento resultante da ruptura de uma barragem envolve fenômenos hidráulicos muito complexos e de difícil caracterização matemática, pois esse tipo de escoamento é tipicamente tridimensional, com grande variação das grandezas hidráulicas no tempo e no espaço (MONTE-MOR, 2004 *apud* LAURIANO, 2009).

Em vales de características topográficas e de ocupação pouco complexas, nos quais o escoamento na planície de inundação segue a mesma direção daquela imposta pelo leito principal do curso de água, a simulação unidimensional do escoamento resulta em uma aproximação adequada do fenômeno físico (VISEU & RAMOS, 1999 *apud* LAURIANO, 2009). Em casos distintos desses, em locais com amplas planícies de inundação e áreas urbanizadas, a simulação unidimensional deixa de ser válida, por ser impossível definir um eixo de escoamento, e torna-se necessário adotar a simulação bidimensional do escoamento (LAURIANO, 2009).

Fread (1981) *apud* Melo (2013) resgatou um breve histórico da teoria dos modelos de propagação de ondas. Segundo estes autores, as investigações receberam significativos impulsos nos séculos XVII e XVIII de grandes pesquisadores como Newton, Laplace e Lagrange, e foram aprofundados por diversos autores do século XIX, culminando com a formulação teórica unidimensional para escoamentos não-permanentes proposta por Barré de Saint-Venant em 1871.

As equações de Saint-Venant (1 e 2) descritas na sequência apoiam-se nos princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial(Au)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (S_0 - S_f) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$A$  = é a área ativa da seção transversal ao escoamento ( $m^2$ );

$u$  = é a velocidade média do escoamento (m/s);

$x$  = variável independente relativa à direção do escoamento (m);

$t$  = variável independente relativa ao tempo (s);

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$h$  = espessura da lâmina líquida (m);

$S_0$  = declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal (m/m); e

$S_f$  = declividade média da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária por atrito.

Segundo Willinghoefer (2015), ao aplicar as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, assumem-se hipóteses simplificadoras como, por exemplo, a distribuição hidrostática de pressões, que pressupõe a inexistência de componentes de aceleração no sentido longitudinal. Também é assumido que o escoamento é unidimensional, a velocidade é uniforme, a elevação do nível d'água é constante ao longo de uma mesma seção, os efeitos de turbulência e atrito são análogos àqueles considerados nas leis de resistência ao escoamento em regime permanente e a declividade média do fundo do canal é pequena a ponto de o cosseno do ângulo formado pelo canal e a horizontal ser próximo da unidade (CUNGE, *et al* 1980 *apud* MELO, 2013).

Para a realização do estudo de *dam break* deve-se iniciar o procedimento com a obtenção das curvas de nível que pode se dar por meio de uma ferramenta de um software de SIG (Sistema de Informação Geográfica) que permite que os níveis de altitude do terreno sejam extraídos de modelos digitais de terreno obtidos pela missão espacial SRTM (Missão Topográfica Radar Shuttle) e disponibilizados gratuitamente para *download* pela Embrapa Monitoramento por Satélite ou por trabalho de campo com o auxílio de equipamentos de topografia com um GPS geodésico e Estação Total.

Em seguida, as curvas de nível do terreno devem ser transferidas para um software de DAC (Desenho Assistido por Computador) para a composição de modelo tridimensional completo das seções topobatimétricas na qual pode vir a ocorrer o escoamento proveniente do rompimento de barragem, neste caso, indica-se o AutoCAD Civil 3D, devido à ferramenta de exportação de dados específica para o HEC-RAS, que será usada para exportação dos dados de sentido do curso d'água, superfície de escoamento e seções topobatimétricas para o *software* referido. O modelo tridimensional do terreno obtido está representado na Figura 1.

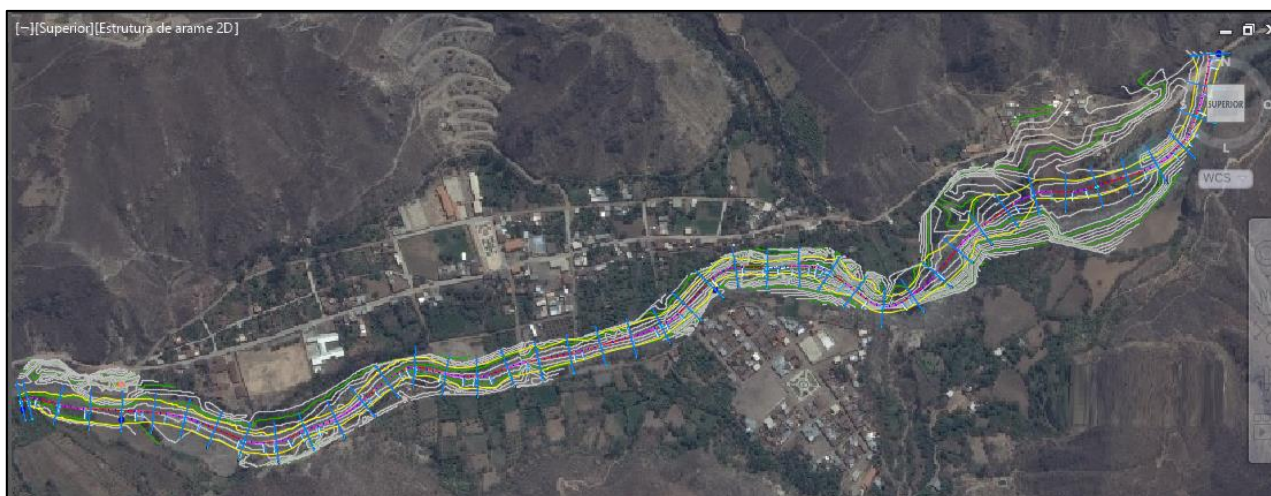


Figura 1. Modelo tridimensional da superfície de escoamento no AutoCAD Civil 3D.

## 2.2. Simulação no HEC-RAS

Informações acerca da barragem como localização, tipo de construção, tipo de terreno, tipo e características geomorfológicas do vale a jusante do barramento, características geotécnicas do rejeito e do barramento, dentre outras, são de grande relevância para estudos de *dam break* uma vez que têm influência direta nos resultados da simulação, porém, não foram levantadas já que se trata de uma simulação hipotética que, portanto, não pode ser considerada um estudo de caso. De posse da geometria referida na figura 1 devidamente compreendida pelo HEC-RAS, procedeu-se com o preparo da simulação inserindo as condições iniciais e condições de contorno, já que a simulação deste tipo de desastre só é viável, do ponto de vista da precisão, quando o mesmo é realizado em regime não-permanente. Como condições iniciais considerou-se uma chuva que elevou a vazão média do rio no trecho em análise a  $2\text{m}^3/\text{s}$  no período mais crítico e imediatamente antes da ruptura e não tendo influência na vazão proveniente de afluentes no curso em estudo. Como condições de contorno, obteve-se o hidrograma de ruptura representado na figura 2. Para estimar o volume de fluido a ser liberado é preciso analisar a profundidade alcançada pela brecha de ruptura, a respectiva perda de capacidade do reservatório assim como a condição de umidade da polpa de rejeitos em vários pontos da barragem. Conforme dados levantados por Rocha (2016), há uma grande variação no percentual de volume liberado nos casos de rompimento de barragens de rejeitos registrados, desde 8,6% até 81%. Para tanto, considerou-se o valor aproximado mais recorrente no qual que haveria a liberação de cerca de 65% do volume do reservatório que tem seu volume total estimado em 3 milhões de metros cúbicos, sendo que o hidrograma gerado resultou em um volume escoado total de 1,959 milhões de metros cúbicos. Vale ressaltar a presença de dois picos de vazão, que são resultado do escoamento da água que fica concentrada na superfície da barragem e, por consequência, é liberada primeiramente constituindo o primeiro pico gerado, neste caso, uma vazão de  $1800\text{m}^3/\text{s}$  no tempo de 12 minutos. Já o segundo pico, é resultado do escoamento da polpa de rejeitos que se encontra mais ao fundo da barragem, esta por ser mais densa e conter sedimentos acaba por escoar com velocidade menor do que a água e alcança o seu pico de vazão de  $1200\text{m}^3/\text{s}$  no tempo de 25 minutos. Outra condição de contorno inserida foi a declividade da linha de energia, como o trecho em análise apresenta uma declividade média com desvio padrão relativamente baixo, considerou-se este mesmo valor como sendo o da declividade da linha de energia, sendo estimado em  $0,0015\text{m}/\text{m}$ .

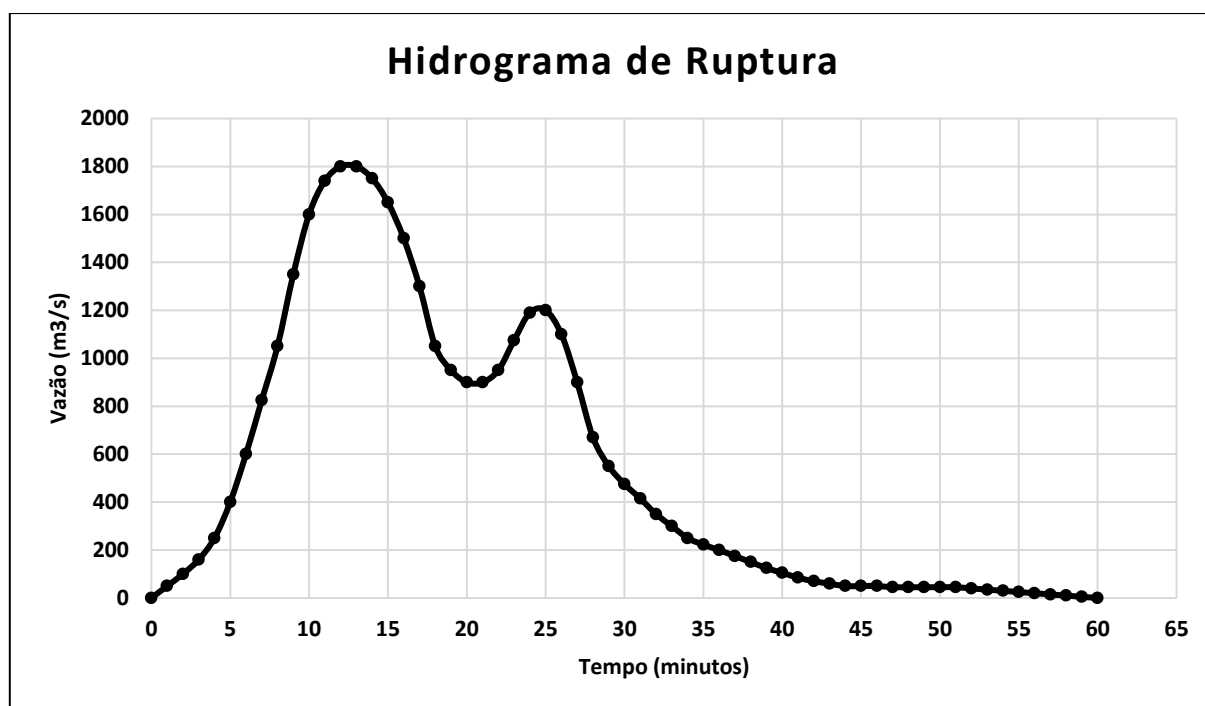


Figura 2. Hidrograma de ruptura decorrente da hipótese de rompimento.

Com base na tabela online disponibilizada pelos desenvolvedores do HEC-RAS foi considerado como coeficiente de *manning* nas margens do curso d'água o valor de 0,4, portanto supondo que há vegetação de grande porte nas mesmas e no canal foi considerado o valor de 0,15, pois o canal apresenta baixa sinuosidade o leito livre de obstruções. Depois disto, foi realizada a interpolação das seções topobatimétricas para melhorar a precisão dos resultados da simulação. Demais dados foram inseridos, porém com pouca representatividade para os resultados, podendo citar, intervalo de tempo para simulação, data hipotética do evento, dentre outros. Com isso, todos os dados necessários para a realização da simulação em regime não-permanente do escoamento proveniente da ruptura hipotética da barragem já estavam devidamente inseridos.

A partir da realização da simulação foi possível obter a visualização em modelo digital tridimensional das condições iniciais, ou seja, daquelas imediatamente antes da ruptura da barragem, conforme pode ser observado na figura 4. A figura 3 foi elaborada dando-se um zoom em um trecho da figura 4 para que a visualização dos componentes da geometria do terreno pudesse ser facilitada. Sendo assim a linha central em azul representa o curso hídrico, as seções transversais ao canal em preto e limitadas em verde as seções topobatimétricas e os pontos em vermelho o limite das margens do canal onde ocorre a mudança no valor do coeficiente de *manning*.

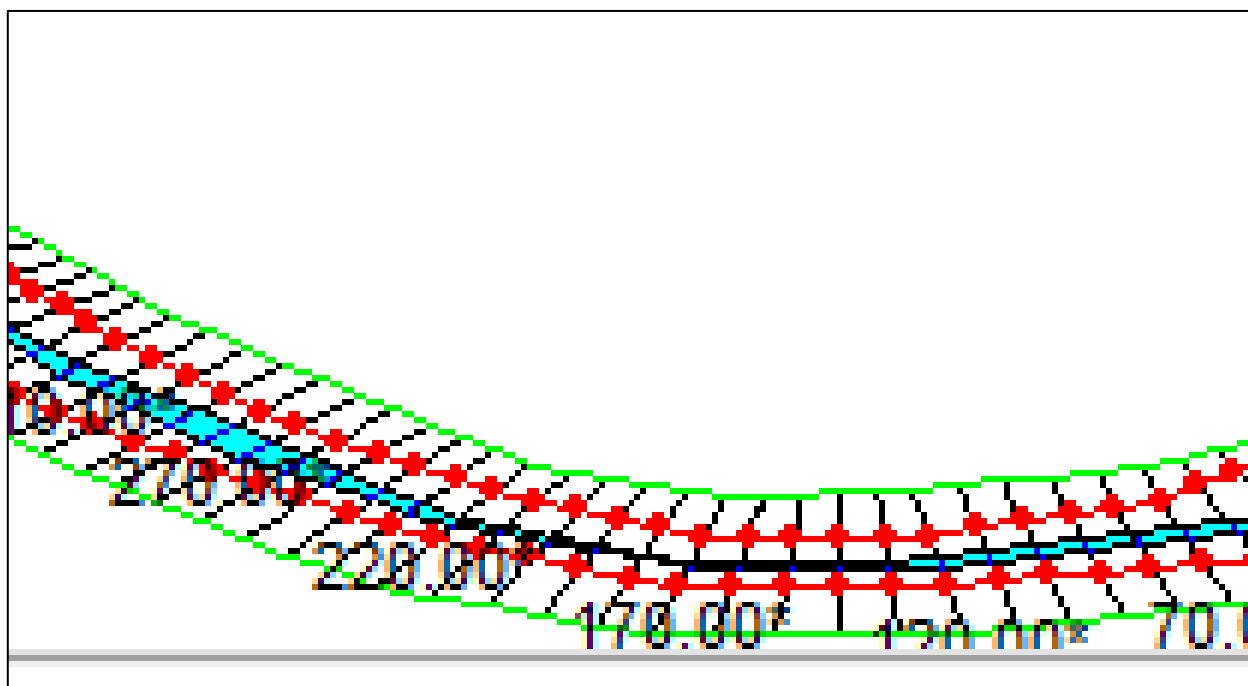


Figura 3. Zoom para facilitar a visualização da geometria do terreno.

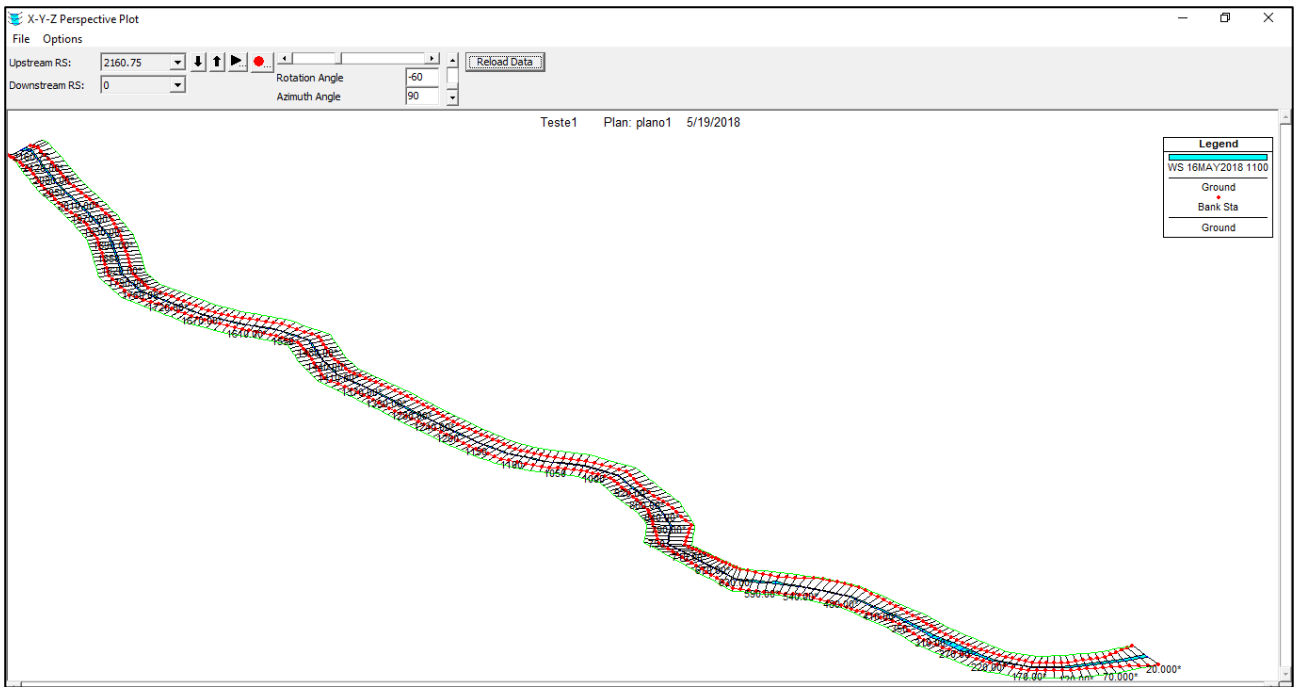


Figura 4. Vista 3D do rio antes do rompimento.

Desta forma, pode-se observar que o curso d'água estava, mesmo com a condição de uma chuva intensa, dentro do nível de segurança do rio, ou seja, esta condição chuvosa não foi suficiente para causar uma inundação. Além disso, e mais importante, foi possível prever o início de transbordamento resultante da onda de inundação proporcionado pelo rompimento da barragem conforme figura 5.

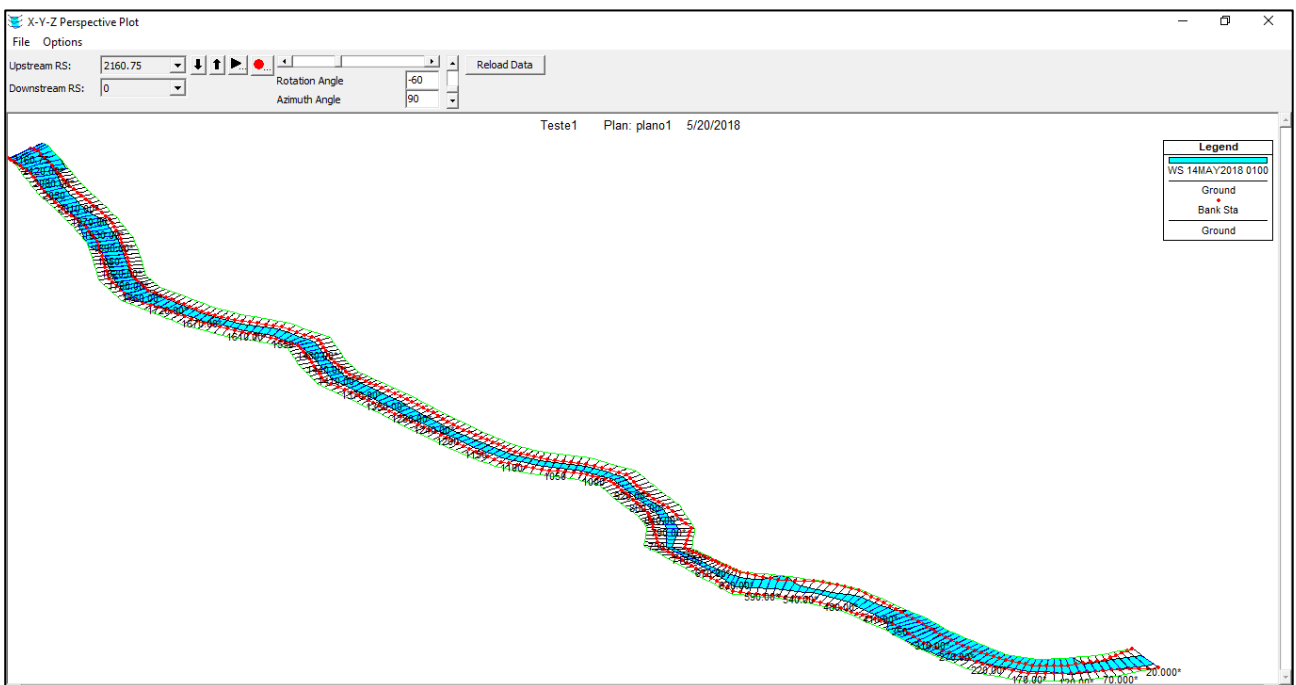


Figura 5. Vista 3D do rio no instante em que se inicia a inundação.

Neste caso, já pode ser observado uma extrapolação do nível considerado como de cheias do rio em algumas áreas, portanto, sendo verificado uma enchente nas partes baixas da geometria deste terreno e podendo assim atingir a população residente próximo a estes locais. Com base na

simulação foi possível obter vários dados de grande importância como a mancha de inundação, velocidades de escoamento, altura da cota de inundação alcançada e tempo de chegada da onda para a composição de um plano de ações emergências caso ocorra o rompimento da barragem em questão. Dentre estes dados, pode-se destacar o aumento da largura máxima atingida pela mancha de inundação que foi de 59,55m, elevação máxima do rio a partir do nível alcançado com as condições iniciais até o nível alcançado na condição mais crítica que foi de 7,38m. A figura 6 mostra o nível de maior intensidade do evento em complemento aos valores citados acima.

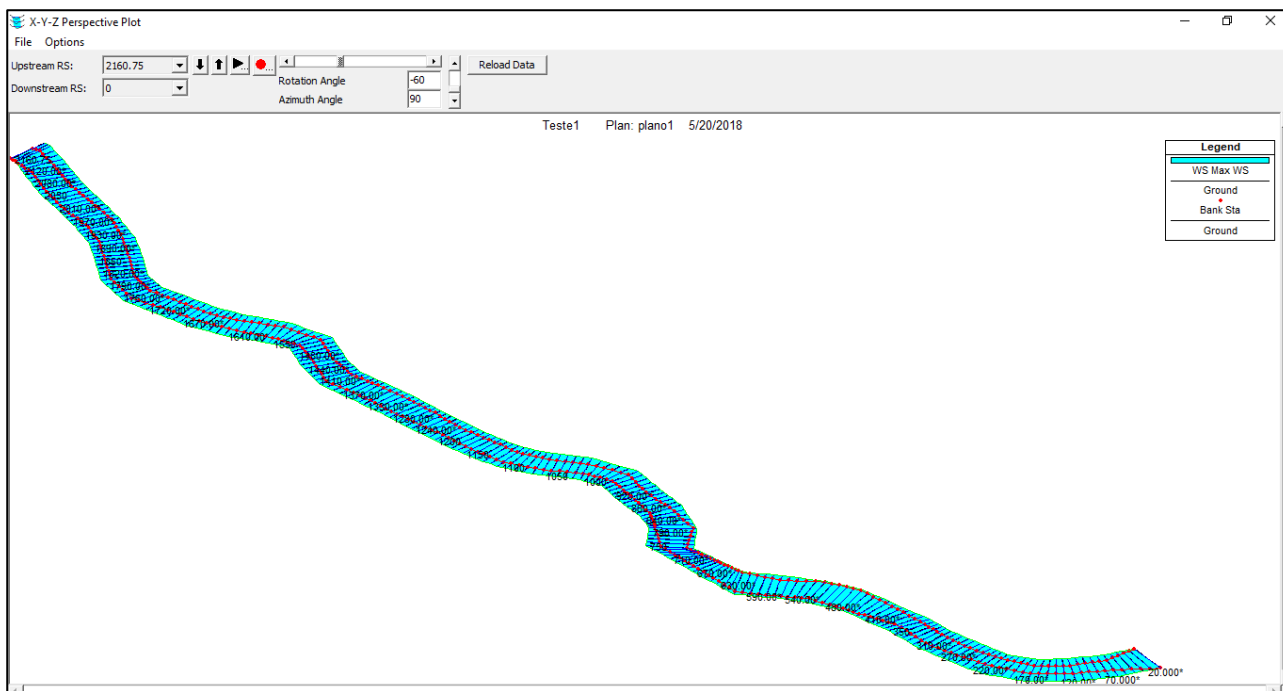


Figura 6. Vista 3D do rio no instante de maior inundação.

Um cálculo importante a ser realizado após a simulação é para a obtenção do tempo de chegada da onda de inundação no primeiro ponto que a mesma se inicia. Como velocidade média de escoamento foi de 10km/h no estágio inicial até o aparecimento do primeiro ponto de inundação e o ponto crítico de inundação citado fica a cerca de 1,7km da barragem, tem-se o tempo de chegada da onda inundação estimado em cerca de 10 minutos, sendo, portanto, o valor de referência para evacuação da área a partir do momento da ruptura caso haja população nesse ponto. A quantificação dos riscos depende da caracterização do vale a jusante do barramento para que as áreas de plantações, pastagens e as pessoas que estão em situação de risco possam ser mensuradas e assim definidos pontos de encontro seguros, rotas de evacuação, instalação de alarmes sonoros e calculado o tempo de chegada da onda de inundação para cada grupo populacional espalhado pelo vale a jusante. Como este trabalho se concentrou apenas na modelagem hipotética da simulação de rompimento de barragem de rejeitos a avaliação dos riscos não pôde ser feita já que se trata de um local hipotético.

### 3. CONCLUSÕES

Com realização do estudo de *dam break* é possível obter uma ótima previsão de como seria o comportamento de um rompimento de barragem, composto de informações de grande importância para que ações emergenciais possam ser tomadas quando da ocorrência deste evento. Dessa forma, é de suma importância que esta tecnologia seja implementada e ampliada dentre os empreendimentos que possuem em suas atividades a utilização de barragens para contenção de rejeitos, resíduos industriais ou mesmo de acumulação de água, uma vez que, estas estruturas possuem, apesar de pequeno, um risco de falha. Outro aspecto que ressalta esta importância é que eventos de ruptura ou iminência de rompimento são frequentemente noticiados.

Sendo assim, a população a jusante destas estruturas deve ser devidamente treinada para que, ao receber o sinal de alerta, seja iniciado o procedimento de evacuação imediatamente, uma vez que o tempo para a realização do mesmo em muitos dos casos pode ser bem curto como o obtido nesta simulação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Newton Paiva pelo incentivo e suporte oferecido.

## REFERÊNCIAS

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009. 251 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/656M.PDF>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

MELO, L. P. R. Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da Barragem Tico-Tico. 2013. 183 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós - Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1046M.PDF>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ROCHA, F. F. Cenários de formação e evolução de rupturas em barragens de rejeitos (Dam Break). Seminário de Emergência Ambiental – VALE, 2016. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4249196/mod\\_resource/content/2/01\\_-\\_Semin%C3%A1rio\\_Emerg%C3%A2ncia\\_Ambiental\\_-\\_Dam\\_Break\\_-\\_Felipe\\_Rocha.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4249196/mod_resource/content/2/01_-_Semin%C3%A1rio_Emerg%C3%A2ncia_Ambiental_-_Dam_Break_-_Felipe_Rocha.pdf)> Acesso em: 25 jun. 2018.

HEC-USACE, Hydrologic Engineering Center – United States Army Corp of Engineers. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual 4.1. 2010. Disponível em: <[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS\\_4.1\\_Reference\\_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2018.

WILLINGHOEFER, Matheus. Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma Pequena Central Hidrelétrica na bacia do Rio do Peixe. 2015. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160177/TCC%202015-1%20Matheus%20Willinghoefer.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 ago. 2017.