

## VI-139 - ANÁLISE DO USO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE FLUÍDOS HIPERCONCENTRADOS NA AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL E DELIMITAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO

**Lineker Max Goulart Coelho<sup>(1)</sup>**

Professor Assistente da Universidade Federal de Viçosa – Campus de Rio Paranaíba. Mestre em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Ecole des Ponts Paristech, Paris, França. Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais.

**Willian Ude**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa – Campus de Rio Paranaíba.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Universidade Federal de Viçosa, Campus de Rio Paranaíba, Rodovia MG-230, Km 7 - Rio Paranaíba - MG - CEP: 38810-000 - Brasil - e-mail: linekermx@yahoo.com.br

### RESUMO

Os impactos da ruptura de barragens naturais ou de rejeitos de mineração são severos tendo em vista que normalmente possuem longo alcance abrangendo uma vasta área e contaminando cursos de rios em longos trechos, trazendo risco a flora fauna e a saúde humana. A determinação das áreas de risco ou mapeamento da inundação pode ser feito por meio de simulações hidrodinâmicas de propagação da onda de rejeitos após ocorrência do incidente de ruptura o que permite prever as áreas afetadas. O objetivo do trabalho em questão é avaliar a influência de considerar as características reológicas das lamas em modelagens hidrodinâmicas de fluidos hiperconcentrados utilizadas na avaliação de impacto ambiental e delimitação de áreas de risco relacionados a rupturas de barragens. Sendo assim, de modo a avaliar o impacto da consideração do fluido hiperconcentrado na exatidão dos resultados de simulações numéricas foram analisados estudos de casos reais com modelagens hidrodinâmicas de fluidos hiperconcentrados disponíveis na literatura. Nota-se que as modelagens que utilizam só água não fornecem resultados precisos em barragens de rejeitos. Devido às propriedades reológicas destes fluidos, modelos de simulação de água tendem a resultar em áreas impactadas superiores às reais evidenciando que a concentração de sedimentos influencia significativamente nos resultados. Sendo assim, a análise da concentração do fluido em simulações contribui para aproximação de resultados reais, permitindo elaborar planos de emergências e avaliações de impactos mais precisos e realísticos e com melhor custo benefício.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluidos hiperconcentrados, Mapas de inundação, Fluidodinâmica.

### INTRODUÇÃO

Com diversas finalidades, as barragens são alternativas que contribuem para desenvolvimento das nações, desde armazenamento de água para captação ou geração de energia até contenção de sedimentos.

Os acidentes de barragens vêm sendo foco crescente no mundo todo, pela recorrência com que tem se manifestado o problema de rupturas e mau desempenho das mesmas (PIMENTA DE ÁVILA, 2014). Os impactos da ruptura de barragens naturais ou de rejeitos de mineração são severos tendo em vista que normalmente possuem longo alcance abrangendo uma vasta área e contaminando cursos de rios em longos trechos.

A inundação de áreas ribeirinhas, destruição de áreas destina a agropecuária, assoreamento de rios, mortandade de peixes e fauna aquática, comprometimento do abastecimento de água urbana e alagamento de áreas urbanizadas e danos à saúde ou mesmo a morte de operários são apenas alguns exemplos de impactos provocados por tais acidentes que possuem, portanto, repercussões de caráter econômico, ambiental e social. As Figuras 1 e 2 apresentam exemplos de impactos de ruptura de barragem.



**Figura 1:** Vista da área afetada pelos rejeitos próximo a região de ruptura da barragem de rejeitos em Cataguases em 2007 (DNPM, 2008).



**Figura 2:** Vista da cidade de Muriaé inundada pelos rejeitos da barragem de Cataguases em 2007 (CETEM, 2012).

No Brasil nos últimos anos podemos citar vários exemplos de ruptura de barragens, dentre os quais podemos destacar alguns ocorridos em Minas Gerais:

- Ruptura da barragem rejeitos de minério de Fernandinho em Itabirito em 1986 com sete mortos;
- Ruptura de barragem de minério em 1999 no município de Gente Grande;
- Ruptura de barragem de rejeitos de minério em Macacos distrito de Nova Lima em 2001 acarretando a morte de 5 operários contaminação de uma área de cerca de 40 hectares e assoreamento de córregos;
- Ruptura de reservatório de lixívia de celulose em Cataguases em 2003;
- Ruptura barragem de rejeitos de bauxita em Cataguases em 2007, resultando em alagamentos de bairros com desalojamento de casas e problemas com abastecimento de água e assoreamento de recursos hídricos;
- Ruptura da barragem de rejeitos de minério de ferro em Itabirito em 2014 com perda de vidas humanas, assoreamento de rios e contaminação de áreas.

Sendo assim, os estudos se tornaram mais constantes, de modo a evitar e minimizar os impactos de acidentes com este tipo de estrutura, possibilitando o desenvolvimento sustentável.

## OBJETIVOS

Avaliar a influência de considerar as características reológicas das lamas em modelagens hidrodinâmicas de fluidos hiperconcentrados utilizadas na avaliação de impacto ambiental e delimitação de áreas de risco relacionadas a ruptura de barragens.

## CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS

A concentração dos sedimentos ajuda a definir a natureza de escoamentos de fluídos hiperconcentrados, seja pela relação com volume, massa, densidade do sedimento ou do fluído. A viscosidade da mistura, definida como a inclinação do gráfico de tensão versus deformação, aumenta com a concentração de sedimentos. (THOMAS, 1963 apud FLO 2D, 2014)

O escoamento do fluído hiperconcentrado envolve a interação do fluído com os sedimentos. As partículas presentes podem se colidir e quebrar ou girar e o fluxo pode ser turbulento ou viscoso. Em baixas concentrações de sedimentos, um fluxo em regime turbulento tende a predominar. Em propagações em inclinações elevadas, altas tensões de cisalhamento, grandes tensões dispersivas e fluxo turbulento podem ser gerados, sendo consequência da colisão das partículas de sedimentos (FLO-2D, 2009).

A tensão de cisalhamento nos fluídos hiperconcentrados pode ser obtida do somatório de cinco componentes de tensão apresentadas na equação 1 (O'BRIEN, 1986.).

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

equação (1)

Onde:

- $\tau$ : tensão de cisalhamento total do escoamento;
- $\tau_c$ : tensão de cisalhamento devido à coesão do sedimento;
- $\tau_{mc}$ : tensão de cisalhamento Mohr-Coulomb;
- $\tau_v$ : tensão de cisalhamento devido à viscosidade;
- $\tau_t$ : tensão de cisalhamento devido à turbulência do fluído;
- $\tau_d$ : tensão de cisalhamento devido à dispersão.

Ressalta-se que tendo em vista que as partículas presentes em rejeitos ou lamas acabam interferindo na reologia do fluido o qual esta relacionado a sua viscosidade e esta, por sua vez, influência no comportamento hidrodinâmico de um escoamento, negligenciar diferenças entre escoamento de lamas e de água pode resultar em erros consideráveis quanto a determinação de áreas afetadas em catástrofes tais como barragens de rejeito ou deslizamentos de terra.

Salienta-se ainda que um importante parâmetro geotécnico normalmente requerido nos estudos relacionados a este tema é a concentração volumétrica de sedimentos ( $C_v$ ) do rejeito ou lama, pois a partir deste é possível se determinar a viscosidade e a tensão de escoamento por equações que correlacionam estes parâmetros.

## MAPEAMENTO DE ÁREAS DE RISCO

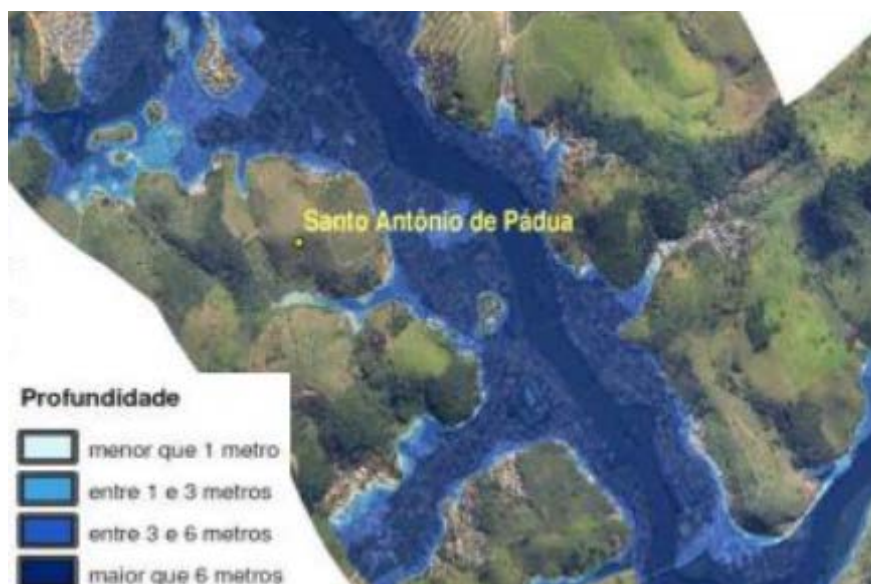
O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e nível de detalhamento do Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração (PAEBM). O conteúdo mínimo exigido pelo PAEBM inclui a análise do estudo de cenários, compreendendo os possíveis impactos à jusante em uma ruptura hipotética da barragem, com seu associado mapa de cenários georreferenciado (DNPM, 2013).

Sendo assim, mapeamentos de áreas potencialmente atingidas são utilizados em estudos de previsão de impactos de rupturas de barragens, sendo exigido em Planos de Ações Emergenciais (PAE). Os mapas das áreas potencialmente inundáveis contidos no PAE, possuem execução baseada na previsão e cálculo de cotas máximas inundadas, velocidades e descargas máximas (LAURIANO, 2009).

Segundo Balbi (2008), o mapeamento da inundação visa mostrar a extensão e o tempo esperado de uma cheia provocada pela ruptura de barragens, fornecendo informações que auxiliam no planejamento das ações emergenciais, elaboração de sistemas de alerta, e definição do uso e ocupação ao longo do vale.

Com mapas de inundação é possível identificar ações de redução de vulnerabilidade e realocação de infraestrutura crítica e instalações fora da zona de inundação (FEMA, 2013).

A determinação das áreas de risco ou mapeamento da inundação pode ser feito por meio de simulações hidrodinâmicas de propagação da onda de rejeitos após ocorrência do incidente de ruptura o que permite prever as áreas afetadas. Sendo assim, uma simulação visa obter dados de consequências em caso de ruptura de uma barragem, que podem contribuir em uma possível situação real. (PIMENTA DE ÁVILA, 2014). A Figura 3 mostra um exemplo de mapa de risco elaborado por meio de estudos hidrodinâmicos por Daru et al (2013).



**Figura 3: Mapa de risco de inundação em caso de ruptura de barragem (DARU et al , 2013).**

Características como altura da barragem, volume armazenado, desenvolvimento da brecha e topografia da área a jusante são tradicionalmente considerados para o mapeamento. Há diversos modelos matemáticos para esses estudos, porém a maioria é direcionada a barragens de retenção de água, o que acaba não considerando parâmetros específicos das barragens de rejeitos e deslizamentos de terra, consequentemente não gerando resultados eficazes. Isso porque rejeitos de mineração ou indústria e lamas formadas em deslizamentos de terra possuem concentrações de sedimentos que devem ser consideradas durante as simulações de eventos que os envolvam. (SILVA, 2010)

Segundo O'Brien (1986) a concentração de sedimentos altera as características e comportamentos dos fluídos contidos, sendo necessário estudar sua reologia para análises de propagações de onda.

O aperfeiçoamento de simulações e melhoramento de resultados beneficia a seleção de medidas mitigadoras, estruturais e não estruturais, reduzindo perdas econômicas e perdas potenciais de vidas (FEMA, 2013). A mesma referência indica ainda que para barragens em áreas rurais modelos simplificados podem ser suficientes.

Contrariamente, em áreas potenciais de perda de vidas ou para mapeamento de áreas urbanas inundáveis um modelo mais avançado é necessário. Sendo assim existem modelos que compreendem apenas análise em uma dimensão (1D) considerando apenas a altura do nível d'água até modelos em duas dimensões (2D) que consideram respectivamente efeitos no plano fornecendo resultados mais precisos sobre os limites das áreas inundadas.

Sendo assim, o desenvolvimento de modelos hidrodinâmicos que representam melhor os fenômenos físicos de escoamento de lamas e rejeitos pode contribuir para uma melhor acurácia dos mapas de risco.

No Brasil o trabalho de Melo (2013) buscou avaliar por meio de modelagem fluidodinâmica em duas dimensões os mapas de inundação para o rompimento da barragem de Tico Tico em MG utilizando um modelo de escoamento sem consideração de efeito de fluidos hiperconcentrados. Entretanto, a dificuldade em avaliar a adequação deste modelo reside no fato de não haver dados reais, pois tal barragem nunca sofreu nenhum incidente de rompimento.



## MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a avaliar o impacto da consideração do fluido hiperconcentrado na exatidão dos resultados de simulações numéricas foi feita uma revisão da literatura para se determinar os principais softwares utilizados para modelagem de eventos de escorregamento de lamas naturais ou de rejeito de modo a levantar suas principais características, vantagens e desvantagens.

Além disso, foram investigados e analisados 7 estudos de casos reais com modelagens hidrodinâmicas de fluídos hiperconcentrados disponíveis na literatura:

- Caso 1: Ruptura de parede do reservatório Ajka – Hungria (VIEIRA, 2013);
- Caso 2: Ruptura da estrutura de depósito de gipsita WCF – EUA (MENNINGER *et al.*, 2013);
- Caso 3: Ruptura da barragem natural provisória – Taiwan (CHEN *et al.*, 2004);
- Caso 4: Ruptura de dique de rejeitos – Sérvia (DORDEVIC *et al.* 2005)
- Caso 5: Ruptura de barragem natural na Patagônia – Argentina (VOLZ, 2013)
- Caso 6: Escorregamento de terra em Minamata – Japão (WANG *et al.* 2008)
- Caso 7: Escorregamento de terra em Stoze – Eslovênia (Cetina *et al.* 2006)

O nível de detalhamento e precisão requeridos foram analisados de acordo com recomendações da Agência Federal de Gestão de Emergências (FEMA, 2013) e características das estruturas e áreas impactadas nos estudos. Foram levantados fatores que contribuam para resultados superestimados ou subestimados, assim como os benefícios de uma simulação bem sucedida.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais softwares atualmente utilizados nestes tipos de estudos bem como algumas características deles são apresentados na Tabela 1. Nota-se que existem alguns modelos ainda utilizados que consideram apenas escoamentos sem sedimentos, isso porque os softwares disponíveis para fluxo de fluídos hiperconcentrados ainda são escassos. Há ainda outros modelos não comerciais utilizados em trabalhos específicos tais como Cetina *et al.* 2006 e Dordevic *et al.* (2005).

**Tabela 1: Comparação dos softwares utilizados para análises de escorregamentos de lamas.**

Software	Tipo de análise	Tipo de material	Informação fornecida	Vantagens	Desvantagem	Desenvolvedor
HEC-RAS	1D	Água	Velocidades e profundidades	Simples de fácil utilização	Não considera efeito de sedimentos	US <input type="checkbox"/> Corp of Engineers
HEC-RAS 2D	2D	Água	Velocidades e profundidades e áreas inundadas	Permite análise detalhada do terreno e estruturas	Não considera efeito de sedimentos	US <input type="checkbox"/> Corp of Engineers
FLO-2D	2D	Água+ sedimentos	Velocidades e profundidades e áreas inundadas	Considera o escoamento em oito direções	Tempo de calculo pode ser elevado	Flo Engineering
FLDWAV	1D	Água+ sedimentos	Velocidades e profundidades	Modela a abertura de brecha de barragem	Dificuldade de modelar obstáculos ao escoamento	Serviço Meteorológico Americano
DAN-W	2D	Água+ sedimentos	Velocidades e profundidades	Simples e de fácil utilização	Instável para grandes variações de declividade	Hungr Geotechnical Research Inc
MIKE 21	2D	Água	Velocidades e profundidades e áreas inundadas	Permite análise detalhada do terreno	Não considera efeito de sedimentos	DHI

A Tabela 2, por sua vez, apresenta um resumo das informações relacionadas de cada estudo de caso analisado bem como dos resultados obtidos.

**Tabela 2: Comparação das características e resultados das simulações.**

	Casos							
	1	2		3	4	5	6	7
<b>Modelo</b>	HEC-RAS	FLO-2D	HEC-RAS	FLO-2D	Dordevic	VOLZ	WANG	FLO-2D
<b>Tipo de Área</b>	urbana + rural	rural	rural	rural	rural	rural	rural	Urbana + rural
<b>Topografia da Área</b>	plana	plana	plana	plana	íngreme e plana	íngreme	íngreme e plana	Íngreme e plana
<b>Nível de Estudo<sup>1</sup></b>	3	2	2	2	2	2	2	3
<b>Material Simulado</b>	água	água + sedimento	água	água + sedimento	água + sedimento	água + sedimento	água + sedimento	água + sedimento
<b>Tipo de simulação</b>	1D	2D	1D	2D	1D	2D	2D	2D (Flo-2D) e 1D (Debrifid)
<b>Área Afetada conforme simulação</b>	Maior que a real	Menor que a real	Maior que a real	Similar ao real	Similar ao real	Similar ao real	Similar ao real	Similar ao real
<b>Nível de Segurança do Resultado<sup>2</sup></b>	alto	médio	médio	alto	alto	alto	alto	alto
<b>Concentração de sedimentos usada (Cv)</b>	0%	50%	0%	50%	30%	-	-	42%

<sup>1</sup>Análise subjetiva conforme recomendações da FEMA (2013), de acordo com tamanho da barragem, ocupação da área a jusante e potencial perda de vidas. Escala 1 - 3.

<sup>2</sup>Classificação conforme a localização da envoltória de inundação, analisando se há englobamento de toda área potencial de risco, prevendo potenciais áreas de ocupação humana.

Nota-se que os modelos que consideram o escoamento de água em vez de lama resultam em áreas afetadas superestimadas. Isto era esperado, pois modelos que não consideram as características reológicas das lammas tendem a superestimar as áreas de risco, por não considerar resistências do fluido relacionadas à tensão dispersiva e a viscosidade. O caso 1, por exemplo, apresentou resultados da simulação com uma área de inundação superestimada, sendo 200% maior do que a área real afetada.

Em contrapartida os modelos que levaram em conta os efeitos reológicos foram mais realísticos e mais próximos aos dados reais medidos em campo, com exceção do estudo da barragem do dique de Gipsita WCF (Caso 2) em que se teve uma área atingida subestimada. Os casos 3, 4, 5, 6, 7 em contrapartida apresentaram resultados com propagação de fluidos hiperconcentrados bem próximos aos valores reais constatados nos incidentes.

Entretanto, para o caso 1, Vieira (2013) utilizando um modelo unidimensional simplificado para escoamento de fluidos hiperconcentrados denominado Hungr obteve resultados de área de inundação 50% inferiores aos reais. Por este motivo o mesmo autor concluiu que por medidas de segurança ao se trabalhar com modelos simplificados unidimensionais de propagação é recomendável utilizar escoamento de apenas água que resultam em áreas de inundação superdimensionados do que modelos que incluem escoamento de lammas que no seu estudo resultou em um efeito subdimensionado da área afetada.

Este resultado serve de alerta indicando que, apesar de os modelos de escoamento de fluidos hiperconcentrados bidimensionais apresentarem resultados mais realísticos o mesmo pode não ser verdade para o caso de modelos unidimensionais.

A simulação considerando os efeitos reológicos, por sua vez, permite que a resistência do fluxo atribuída à viscosidade e à tensão dispersiva forneça valores de velocidades realísticos. Assim, possibilita propagações mais lentas e acúmulos de volumes que acabam se propagando para áreas adjacentes que não seriam atingidas caso o escoamento fosse apenas de água.

Ressalta-se que uma simulação bem sucedida ajudaria a preparar os órgãos oficiais para ações emergenciais mais adequadas. De acordo com FEMA (2013) o aperfeiçoamento de simulações e melhoramento de resultados beneficia a seleção de medidas mitigadoras, estruturais e não estruturais, reduzindo perdas econômicas e perdas potenciais de vidas.

Uma modelagem superestimada demandaria mais recursos humanos e materiais resultando em maiores investimentos e gastos desnecessários. No caso de material contaminante como no estudo de caso da barragem de Ajka, isso se torna ainda mais crítico já que exige-se uma preparação maior do serviço de saúde. Em uma modelagem subestimada, por sua vez, a despreparação e planos inadequados não seriam suficientes para evitar danos materiais e reduzir riscos a saúde e vida humana. No caso de áreas urbanas próximas à estrutura, é necessário prever um nível maior de detalhamento e precisão do estudo.

Além disso, o caso 2 realizou modelagens em uma e em duas dimensões e conforme esperado o modelo com duas dimensões apresentou resultados mais próximos dos observados durante o incidente do que o modelo simplificado de uma dimensão, ressaltando assim o ganho em precisão com a utilização de modelos que permitem análise no plano. Ressalta-se, entretanto que no caso 4 e 7 mesmo sendo utilizado um modelo de uma dimensão resultados coerentes aos dados de campo foram obtidos pela simulação. Isso provavelmente ocorreu porque neste evento o fluxo de lama se limitou a seção original do rio afetando apenas a profundidade do fluxo não havendo inundação de áreas adjacentes. Sendo assim, neste caso não haveria ganho significativo de informação caso se utilizasse uma análise no espaço, já que o escoamento seguiu o curso d'água.

## **CONCLUSÃO**

A partir do estudo realizado conclui-se que:

- As modelagens que utilizam só água não fornecem resultados precisos em barragens de rejeitos. Devido às propriedades reológicas destes fluidos, modelos de simulação de água tendem a resultar em áreas impactadas superiores às reais evidenciando que a concentração de sedimentos influencia significativamente nos resultados;
- Verificou-se grande carência de pesquisas e estudos comparativos de modelos em fluidos hiperconcentrados. Com base nos casos disponíveis na literatura, nota-se que a análise da concentração do fluido em simulações em duas dimensões contribui para aproximação de resultados reais, permitindo elaborar planos de emergências e avaliações de impactos mais precisos e realísticos e com melhor custo benefício;
- Modelos simplificados unidimensionais de escoamentos de fluidos hiperconcentrados devem ser usados com cautela pois podem apresentar resultados de áreas de inundação bem inferiores aos incidentes observados, não estando a favor da segurança;
- Sugere-se a realização deste tipo de simulação envolvendo delimitação de áreas de risco em algum estudo de caso no Brasil que contemplem, por exemplo, um caso real de ruptura de barragens de rejeitos de mineração.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado Minas Gerais - FAPEMIG por financiar a participação no Congresso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. Rompimento de barragem da Mineradora Rio Pomba Cataguases afeta qualidade da água em MG e no RJ, 2012. Disponível em: <http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=107>
2. CHEN, C. Y. CHEN, T. C. YU, F. C. HUNG, F. Y. A landslide dam breach induced debris flow - a case study on downstream hazard areas delineation. Environmental Geology. 2004.
3. Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM. DNPM vistoria e paralisa mineradora em Miraf. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=99&IDPagina=72&IDNoticiaNoticia=236http>. Acesso em: 10 out. 2008.
4. DORDEVIC, D. KOMATINA, D. JOVANOVIC, M. Numerical simulation of ash-spills induced by dike failure on ash tailings impoundments – a case study. In: Hydrodynamics VI – Theory and applications, 2005.
5. FEMA. Federal guidelines for inundation mapping of flood risks associated with dam incidents and failures. Federal Emergency Management Agency. First Edition p. 946. Julho, 2013.
6. FLO-2D. Simulating mudflows. Guidelines for simulating mudflows. Professional Version, 2009, 19 p.
7. FLO-2D. Two-Dimensional flood routing model that simulates river, alluvial fan, urban and coastal flooding. Disponível em: <http://www.flo-2d.com/products/flo-2d/>. Acesso em: 20 abri. 2014.
8. DARU, L. R. SILVEIRA, R. M. HAINOSZ, F. S. BURAS, M. Propagação de ondas de ruptura e plano de ações emergenciais – UHE Barra do Braúna. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17-22 de novembro de 2013, Bento Gonçalves, MG.
9. LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura de barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
10. MELO, L. P. R. Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrentes da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da barragem tico-tico. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
11. MENNINGER, J. R. NATHAN, B. D. HOFFMAN, D. E. TURNBOW, M. S. Improving risk assessments for coal combustion residual impoundment dikes and dams. 2013. Word of Coal Ash (WOCA) – 22-25 Abri. 2013 in Lexington, KY. Disponível em: <http://www.flyash.info/2013/059-Menninger-2013.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2014.
12. O'BRIEN, J. S. Physical processes, rheology and modeling of mudflows. 1986. Tese (Doutorado.n.) Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
13. PIMENTA DE ÁVILA. Acidentes de barragens. 2014. Disponível em: [www.pimentadeavila.com.br](http://www.pimentadeavila.com.br). Acesso em: 01 abril. 2014.
14. SILVA, W. P. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. 2010.
15. VIEIRA, D. R. Análise comparativa de manchas de inundação de um caso real de ruptura de barragem de contenção de rejeitos. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
16. VOLZ, C. Numerical Simulation of Embankment Breaching Due to Overtopping. ETH Zurich, Zurique, 2013.
17. WANG, C. LI, S. ESAKI, T. GIS-based two-dimensional numerical simulation of rainfall-induced debris flow. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 47–58, 2008.