

AVALIAÇÃO DAS LIMITAÇÕES DO ESTUDO DE RUPTURA DA BARRAGEM DE PEDRAS ALTAS (BA) LOCALIZADA NO SEMIÁRIDO BAIANO

Gabriel Gomes Queiroz de Souza⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental. E-mail: gabrielgqueiroz@gmail.com.

Andrea Sousa Fontes⁽²⁾

Professora Adjunto – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB. E-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

RESUMO

O estudo hipotético sobre ruptura de barragens é realizado em quatro etapas: a elaboração do hidrograma de ruptura, a análise da propagação da onda de ruptura, o mapeamento das áreas potencialmente inundáveis e por fim, a elaboração de um Plano de Ação Emergencial (PAE). Na tentativa de avaliar as limitações e consistência desse tipo de estudo para barragens localizadas em áreas com limitações de informações, o presente trabalho apresenta uma avaliação de ruptura hipotética da barragem de Pedras Altas, na bacia do Itapicuru, município de Capim Grosso, no semiárido nordestino. O modelo hidrodinâmico utilizado para simular a propagação da onda de ruptura foi o HEC-RAS. Como resultado, apesar de todas as limitações de dados para atender as exigências do modelo hidrodinâmico HEC-RAS, foi possível definir o cotograma de ruptura da barragem de Pedras Altas. A partir deles estabeleceu-se as cotas que serão alagadas, concluindo o tempo (aproximado) que o distrito de Pedras Altas sofrerá uma inundação mediante a um colapso do barramento.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança de barragens, Modelagem hidrodinâmica, HEC-RAS.

INTRODUÇÃO

As barragens são grandes obras que proporcionam o armazenamento de água em reservatórios, sendo construídas com o objetivo de gerar benefícios à sociedade. Esses reservatórios geralmente são de múltiplos usos, com funções de grande importância, tais como: abastecimento de água, geração de energia, controle de cheias, irrigação e navegação. Apesar de possuir diversos benefícios, as barragens são obras robustas e possuem diversos riscos associados à sua implantação e operação. No contexto de segurança de barragens, a análise de da ocorrência ruptura de uma barragem deve ser considerada, pois esse evento ocasiona diversos impactos ambientais, sociais e econômicos. Os principais impactos são: perda de reserva hídrica, bens materiais, imóveis, patrimônio público, a morte de fauna e da flora, desequilíbrios emocionais, econômicos, culturais e ecológicos, e principalmente, perda de vidas humanas.

Dessa forma, para a construção de uma barragem e operação do seu reservatório é importante que seja feito um planejamento para garantir a segurança e prevenir os acidentes. Segundo a Lei Nº 12.334 de setembro de 2010, barragens que apresentam risco e dano potencial alto precisam elaborar um Plano de Ações Emergenciais (PAE), que é um documento que auxilia o empreendedor na segurança da barragem e contém dados técnicos da construção, operação e manutenção do empreendimento. Além disso, o PAE também contém os procedimentos para o gerenciamento do risco e as respostas para as situações de emergência, como as formas de evacuação dos operadores e da população.

Para elaborar um PAE, é necessário realizar um estudo hipotético de ruptura da barragem. Esse estudo consiste basicamente em quatro etapas principais: a elaboração do hidrograma de ruptura, a propagação da onda de ruptura, o mapeamento das áreas potencialmente inundáveis e por fim, a elaboração do PAE. Entretanto muitas barragens não dispõem de dados no entorno adequados para um estudo criterioso dos efeitos dessa ruptura no seu vale a jusante. Agravando essa situação alguns desses vales apresentam ocupação urbana que necessitam de alerta no caso de acidentes. Nessa situação, encontram-se algumas barragens localizadas no rio Itapicuru – Ba que não dispõem do levantamento planialtimétrico do vale inundável que engloba presença da população, nem dados de vazão. Na tentativa de avaliar as limitações e consistência desse tipo de estudo nessa situação, o presente trabalho apresenta uma avaliação de ruptura hipotética da barragem de Pedras Altas, na bacia do Itapicuru, município de Capim Grosso, no semiárido nordestino. O modelo hidrodinâmico utilizado para simular a propagação da onda de ruptura é o HEC-RAS e vale ressaltar que esse estudo não realizou o mapeamento das áreas inundáveis (apenas uma identificação dessas áreas), nem a elaboração de um PAE.

OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do procedimento para estudos de cenário hipotético de ruptura total da Barragem de Pedras Altas (BA) diante da limitação de informações, desde a elaboração do hidrograma de ruptura até a identificação das cotas potencialmente inundáveis.

MATERIAIS E MÉTODOS

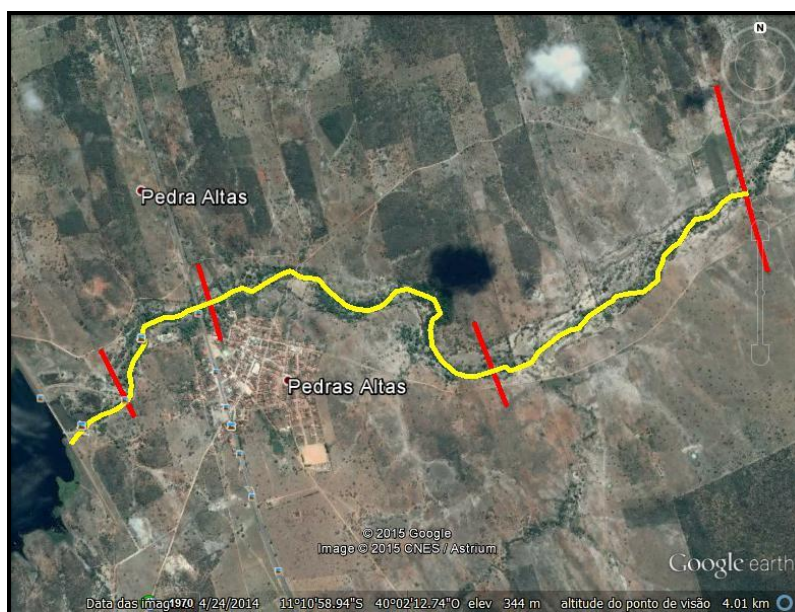
A metodologia consistiu em: caracterizar como acontece a ruptura de uma barragem de terra; elaborar o hidrograma de ruptura da barragem de Pedras Altas para cenário de colapso considerando dia seco, por estar localizada e região semiárida; simular a onda de cheia devido a ruptura total da barragem de Pedras Altas em dia seco no vale a jusante; identificar as cotas potencialmente inundáveis; e analisar a disponibilidade de dados para realização de estudos exigidos na PNSB para barragens do semiárido.

- **Caracterização da área a jusante**

A caracterização da área a jusante é de grande importância para definir a propagação da onda de cheia e posteriormente elaborar os mapas de inundação. Dessa forma, foi necessário identificar as características topográficas da região, assim como as características do canal do rio para definir a direção e o sentido do escoamento. A barragem de Pedras Altas se localiza na bacia do Itapicuru no município de Capim Grosso, BA. O distrito de Pedras Altas se localiza a aproximadamente 500 m do barramento, o que apresenta grande risco para a população caso haja uma ruptura.

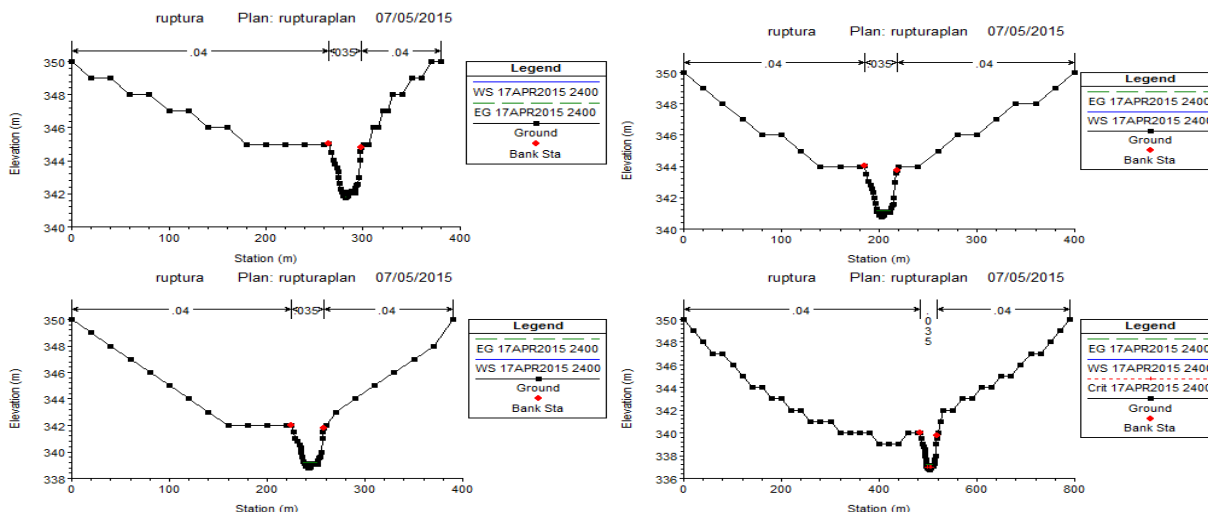
A partir disso é possível observar a importância do estudo de ruptura e elaboração de um PAE, para garantir a segurança da população que mora a jusante da barragem de Pedras Altas. As características do canal do rio foram definidas através da estação fluviométrica 50430000 da Agência Nacional de Água (ANA). A partir dos dados da estação, foi definida a calha principal do rio através de seu perfil vertical, assim como as elevações para identificar as margens de extravasamento da direita e da esquerda do mesmo. Sendo assim, foi estabelecido quatro seções transversais no curso do rio durante um percurso, de 4.602,41 m com auxílio do programa Google Earth. Cada seção teve o seu perfil topográfico definido, sendo possível identificar suas elevações específicas. Para isso, foi estabelecida uma elevação máxima de 350 m para as margens esquerda e direita de cada seção. A Figura 1 apresenta os perfis topográficos das seções 1, 2, 3, e 4 respectivamente.

Figura 1 - Seções transversais do rio a jusante.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2015)

Figura 1 - Perfis topográficos das seções transversais respectivamente.



Fonte: HEC-RAS (2015).

• Elaboração do hidrograma de ruptura

Para elaborar o hidrograma de ruptura de uma barragem foi necessário primeiramente identificar o mecanismo dessa ruptura, ou seja, o processo de formação da brecha. Diversos autores recomendam utilizar o tipo da estrutura para definir as características da brecha. Dessa forma, para as estruturas de terra, como é o caso da barragem de Pedras Altas, foi considerado que a brecha possui um formato trapezoidal.

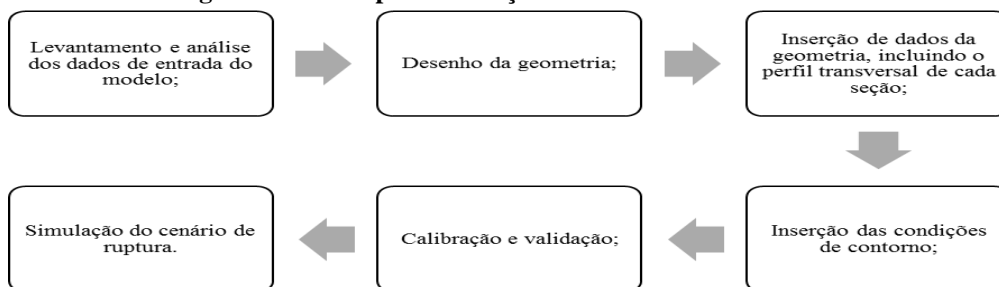
O rompimento desse tipo de estrutura ocorre em um período de tempo maior e de forma parcial, devido principalmente a erosão interna (piping). Sendo assim, segundo a recomendação de Fread (2006) para os possíveis valores característicos da brecha, foi estabelecido que a largura final da brecha (B_b) foi de 72,54 m; a altura final da brecha (H_b) foi considerada como a mesma da barragem, de 24,18 m; e o tempo de formação da brecha (t_p), foi de 1h, pelo fato de barragens de terra romperem de forma gradativa.

Em seguida foi calculada a vazão de pico defluente a partir de formulações matemáticas deduzidas de modo empírico. Essas equações levam em consideração os dados da barragem, os dados da brecha formada durante a ruptura e as características dessa ruptura. Sendo assim, foi escolhida a equação que melhor se adequa ao contexto da barragem de Pedras Altas e comparação dos resultados encontrados. Após encontrar os valores de vazão de pico foi necessário encontrar o tempo de esvaziamento, para finalmente, elaborar o hidrograma de ruptura. Para representar o esvaziamento do reservatório, foi utilizado os dois tipos de hidrograma, o triangular simplificado e o parabólico. Dentre os cenários propostos por Brasil (2005), o Cenário 3, que considera apenas a ruptura, foi o selecionado, já que a Barragem de Pedras Altas se localiza no semiárido nordestino e dessa forma foi considerada uma situação para dias secos.

• Simulação da propagação da onda de ruptura com o modelo HEC-RAS

A determinação da propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem de Pedras Altas foi feita através do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. O fluxograma apresentado na Figura 2, representa de forma didática os passos para utilizar o modelo.

Figura 2 - Passos para utilização do modelo hidrodinâmico.



Fonte: Próprio Autor.

- **Identificação das cotas potencialmente inundáveis**

O mapeamento das áreas potencialmente inundáveis requer a utilização de programas de geoprocessamento, como o ArcGIS, para a leitura do arquivo e sobreposição de dados da propagação no MDT. A partir desse mapeamento determina-se uma estimativa das consequências da ruptura e cria-se embasamento para a elaboração de um PAE, estabelecendo formas de evitar ou mitigar os impactos causados. Para este trabalho, foi realizada apenas a identificação das áreas inundadas através de uma ferramenta do próprio HEC-RAS que simula o tempo de chegada da onda de ruptura em cada seção, mostrando o extravasamento da calha do rio e consequentemente a cota que será inundada. Assim, foi possível identificar as cotas de inundação e o impacto da propagação da onda de cheia no distrito de Pedras Altas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1 estão apresentados os valores característicos da barragem e os valores calculados para altura e comprimento da brecha, utilizados para a elaboração do hidrograma de ruptura da barragem de Pedras Altas. Já a Tabela 2 apresenta os valores de vazão de pico obtidos a partir das fórmulas matemáticas empíricas.

Tabela 1 - Dados da barragem de Pedras Altas usados para o cálculo das vazões de pico.

Comprimento da Barragem (B_d)	1.090 m
Altura Máxima da Barragem (H_d)	24,18 m
Volume Útil do Reservatório (V)	$36,26 \times 10^6$ m ³
Área do Reservatório (A_r)	6.575,01 km ²
Largura Final da Brecha (B_p)	72,54 m
Altura Final da Brecha (H_p)	24,18 m
Tempo de Formação da Brecha (t_p)	1h
Profundidade Média do Reservatório ($Y_{Média}$)	8,06 m
Aceleração da Gravidade (g)	9,81 m/s ²

Fonte: Próprio Autor

Tabela 2 - Vazões de pico da barragem de Pedras Altas.

Lou (1981) <i>apud</i> Mascarenhas (1990)	3.361,6 m ³ /s
Hagen (1982)	23.635,8 m ³ /s
Saint-Venant (-) <i>apud</i> USACE (1997)	23.146,7 m ³ /s
Schoklistch (1917) <i>apud</i> ICOLD (1998)	5.971,2 m ³ /s
USBR (1982) <i>apud</i> USBR (1987)	6.888,8 m ³ /s
Singh (1996)	14.921,3 m ³ /s
Wetmore e Fread (1981) <i>apud</i> French (1985)	14.658,2 m ³ /s

Fonte: Próprio Autor.

Após o cálculo da vazão de pico, é possível perceber uma semelhança entre os valores obtidos pela equação de Hagen e Saint-Venant, assim como, Singh e Wetmore e Fread. Além disso, é possível perceber também uma proximidade entre os valores de Lou, USBR e Schoklistch. Mas apesar dessas semelhanças e proximidades as vazões variam bastante, sendo a mínima encontrada de 3.361,6 m³/s e a máxima de 23.635,8 m³/s.

Os critérios para definir qual a vazão ideal para o estudo são: os dados da barragem, os dados da brecha formada durante a ruptura e as características dessa ruptura. Dessa forma, por Pedras Altas ser uma barragem de terra e sua ruptura ocorrer de forma parcial, foi definido uma vazão de pico de 5.971,2 m³/s, baseada na equação empírica de Schoklistch, que considera situações em que a ruptura ocorre em parte da crista de uma barragem. A Tabela 3 apresenta todos os dados que são necessários para a elaboração do hidrograma de ruptura da Barragem de Pedras Altas.

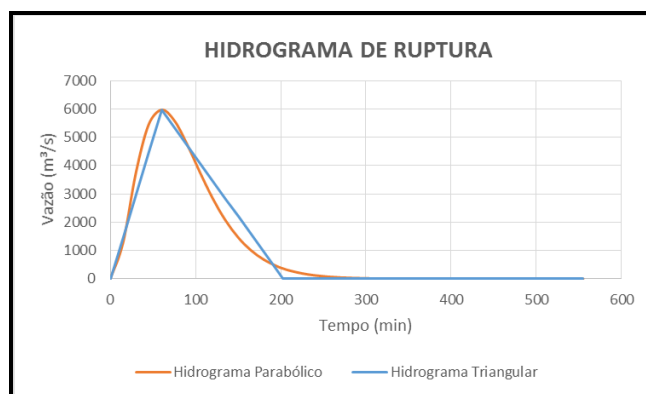
Tabela 3 - Tempo de pico e de base para a elaboração do hidrograma de ruptura.

Cenário	Vazão	Tempo de Pico (h)	Tempo de Base (h)
3	5.971,2 m ³ /s	1h	3,37h

Fonte: Próprio Autor.

A Figura 3 apresenta o hidrograma triangular simplificado e hidrograma parabólico, resultante dos dados que foram utilizados para cenário 3. Foi escolhido o hidrograma parabólico para a realização da simulação devido a maior proximidade de forma dos hidrogramas de uma onda de cheia, uma vez que obtenção deles exige os mesmos dados e ambas definições se dá de forma fácil.

Figura 3 - Hidrogramas de ruptura.



Fonte: Próprio Autor.

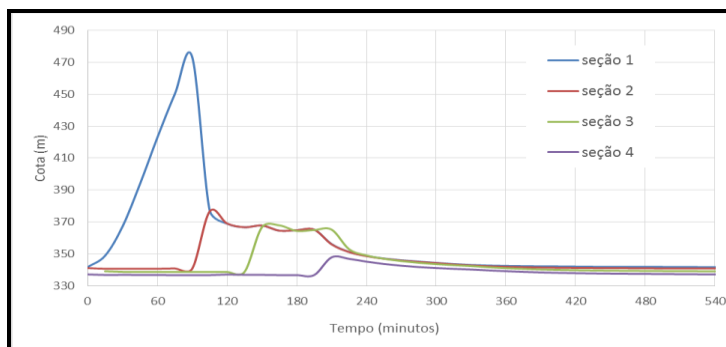
Para desenvolver a simulação com o modelo HEC-RAS, foram utilizados como dados de entrada, os valores de vazão e o tempo de base do hidrograma parabólico, a declividade do canal e a vazão inicial. Os dados de vazão e tempo de base foram obtidos através do hidrograma de ruptura parabólico; já a declividade foi de 0,0011 e por fim, a vazão inicial foi definida 0,85 m³/s, a máxima descarga de fundo da Barragem de Pedras Altas. A definição do coeficiente de Manning foi baseada nas características físicas do trecho de estudo, de acordo com a valores tabelados disponíveis representando o a ocupação das margens.

Apesar de realizar todos os procedimentos estabelecidos pelo modelo, os resultados obtidos não saíram como o esperado no que diz respeito à propagação da onda de ruptura no vale a jusante da Barragem de Pedras Altas. Esse resultado é justificado pelo fato de não existirem dados disponíveis da topografia a jusante e pela falta de consistência das informações colhidas no Google Earth, que apesar de satisfatórias para esse estudo, não são precisas o suficiente para atender as exigências do HEC-RAS.

Dessa forma, para ajustar o modelo e gerar resultados coerentes com os dados disponíveis foi feita a alteração do coeficiente de rugosidade, parâmetro que influencia diretamente na forma e na velocidade da propagação da onda de ruptura. Foram feitos diversos testes, com diversos valores de Manning - todos dentro da faixa recomendada por HEC-RAS (2010). Os valores definidos para o coeficiente de Manning ficaram de acordo com as características da área de estudo, estando na faixa recomendada na literatura para córregos e canais de terra com vegetação irregular por causa da erosão.

Como o objetivo é identificar a cota de inundação, a análise da propagação da onda foi feita com base no cotograma resultante, o qual está apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Cotograma das 4 seções principais durante a propagação da onda de ruptura.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 4 pode-se perceber que a altura da onda de ruptura nas seções 2,3 e 4 são de aproximadamente 40, 30 e 10 m, respectivamente. Considerando que a barragem de Pedras Altas possui uma altura de 24,18 m, esse resultado hipotético pode ser considerado aceitável. A incoerência ocorre na altura da onda de ruptura na seção 1 que apresenta

aproximadamente 130 metros. Porém, isso ocorreu porque durante a modelagem, a vazão do hidrograma parabólico foi inserida diretamente na seção 1, tendo então seu comportamento referente a esse hidrograma de forma localizada na calha do rio, que configura elevados valores de vazão e consequentemente de elevação.

A partir dos resultados obtidos com os perfis transversais das seções de estudo, a caracterização da ocupação do vale a jusante e os cotogramas das seções pode-se definir as cotas que serão inundadas caso ocorra a ruptura da barragem de Pedras Altas no cenário avaliado. A elevação que foi estabelecida para o estudo foi de 350 m, que já abrange uma parte do distrito. Entretanto durante a propagação da onda de ruptura, essa elevação foi extrapolada para 380 e 370 m nas seções 2 e 3 respectivamente, reduzindo apenas na seção 4 para 340 m. O distrito de Pedras Altas já era abrangido na elevação de 350 m da seção 2, dessa forma, é possível sinalizar que ele sofrerá uma inundação com um tempo de chegada da onda de ruptura de 2h, mediante a um colapso do barramento.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Houve grande dificuldade em encontrar dados sobre a topografia do vale a jusante da Barragem de Pedras Altas e por mais coerente que as informações fornecidas pelo Google Earth possam ser, não são suficientemente precisas para atender as exigências de modelos hidrodinâmicos como o HEC-RAS. Os dados fluviométricos se restringiram a uma única seção. Para uma melhor calibração do HEC-RAS, deve-se ter disponíveis dados de elevação, vazão e curva de descarga também da seção de controle mais a jusante do trecho estudado.

Pode-se perceber que os dados mais importantes para garantir uma modelagem adequada é a elaboração da geometria do terreno e para isso é necessário ter disponibilidade da topografia a jusante com a melhor resolução possível. No manual do modelo HEC-RAS recomenda que a resolução mínima seja de 10 m, mas para o caso de rios do tamanho do Itapicuru-Mirim, recomenda-se adotar uma resolução de até 5 m, possibilitando a identificação das áreas de armazenamento de água ao longo da planície de inundação. Dessa forma, é de grande importância que todas as barragens tenham seu vale a jusante mapeado, da mesma forma que todas elas possuem sua curva cota x área x volume.

A PNSB é uma política relativamente nova, logo as barragens ainda estão em processo de adequação as suas exigências. Pedras Altas é uma barragem de dano potencial associado alto, devido à proximidade do barramento com o distrito. De acordo com os resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho o distrito de Pedras Altas seria totalmente inundado caso a barragem entrasse em colapso, reforçando ainda mais a necessidade de possuir um PAE para garantir a segurança, prevenir os acidentes e remediar os impactos.

Por fim, pelo fato da vazão projetada na primeira seção ter originados resultados incoerentes durante a propagação, recomenda-se que o estudo seja ampliado considerando os módulos de ruptura a partir da formação da brecha por uma ferramenta que é disponível no próprio HEC-RAS.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Congresso Nacional. Lei nº 12.334/2010 - Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 21 de março de 2014.
- BRASIL, L. S. S. Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
- CESTARI JR, E. Estudo de Propagação de Ondas em Planície de Inundação para Elaboração de Plano de Ação Emergencial de Barragens – UHE Três Irmãos Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2013.
- FREAD, D. L.; LEWIS, J. M. NWS FLDWAV Model: Theoretical Description and User Documentation, National Weather Service – NWS – NOAA, Office of Hydrology, Hydrologic Research Laboratory, Silver Springs, Maryland, 1998.
- LAURIANO, A. W. Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os Modelos FLDWAV e HEC-RAS. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.