

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS HIDRÁULICOS CLIV+ E HEC-RAS EM ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS COM AFOGAMENTO DA BRECHA

*Tiago Barros da Silva*¹; *Rodrigo Martins Lucci*²; *José Rodolfo Scarati Martins*³; *Cristiane Araújo Amaro*⁴; *Elisa Patricio Macedo*⁵; *Ligia Monteiro da Silva*⁶

Resumo – O presente artigo visa comparar os modelos hidrodinâmicos unidimensionais CLiv+ e HEC-RAS no que diz respeito à consideração do fenômeno de afogamento de brecha por jusante quando da ocorrência de ruptura de uma barragem, e suas possíveis consequências nos impactos a jusante desta. Frente aos resultados obtidos, avaliou-se que ambos os modelos consideram este fenômeno no cálculo da vazão que flui pela brecha, inserindo um fator de redução da mesma à medida que o afogamento avança e, conseqüentemente, evita um superdimensionamento dos impactos a jusante. Desta forma, tem-se a importância da consideração deste fenômeno em estudos envolvendo a previsão de linha d'água.

Palavras-Chave – Ruptura de Barragem, Afogamento de Brecha, Modelos matemáticos.

COMPARISON BETWEEN HYDRAULIC MODELS CLIV+ AND HEC-RAS ON DAM BREAK STUDIES WITH BREACH SUBMERGENCE

Abstract – This article compares one-dimensional hydraulic models CLiv+ and HEC-RAS concerning to breach submergence by tailwater stage caused by a dam break, and its influence on downstream impacts. The results showed that both CLiv+ and HEC-RAS consider this particular event on flow through breaches calculation, inserting a reduction factor as breach submergence increases, avoiding an oversized downstream impacts. In this case, it is important to consider this phenomenon on studies involving water level prediction.

Keywords – Dam Failure, Breach Submergence, Hydraulic Models.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Atualmente, existe grande preocupação ambiental no que diz respeito à alteração das vazões nos rios, tanto em casos de depleção devido ao uso excessivo quanto nos casos de aumento de vazão devido à passagem de ondas de cheias. Nesse contexto, as barragens podem ser consideradas um dos principais fatores que alteram a disponibilidade hídrica e as condições de um rio, possuindo potencial de impacto ambiental adverso significativo. Essas estruturas possuem em geral grandes dimensões e têm como objetivo elevar o nível d'água a montante de seu eixo para a produção de energia elétrica, abastecimento público, irrigação, controle de cheias, navegação e lazer.

Com as crescentes exigências legais relacionadas à segurança de barragens no Brasil, tem havido um aumento significativo de estudos envolvendo a previsão dos impactos negativos inerentes à operação destas estruturas em situações extremas ou em ocorrência de rupturas, compondo, desta forma, um sistema de gestão para estes empreendimentos.

¹ Engenheiro da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3165. Email: tiagobs@usp.br

² Engenheiro da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3163. Email: rmlucci@gmail.com

³ Professor Doutor da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-5581. Email: scarati@usp.br

⁴ Engenheira da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3163. Email: cristiane.amaro@fcth.br

⁵ Engenheira da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3165. Email: elisa_patricio@yahoo.com.br

⁶ Estagiária da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3165. Email: ligia.monteiro@usp.br

Dessa forma, diversas ferramentas de modelagem foram desenvolvidas no sentido de prever e avaliar os potenciais impactos significativos causados pela operação de barragens, com a finalidade de desenvolver planos de ações preventivas e emergenciais. Desenvolvido na Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, o modelo hidrodinâmico unidimensional CLiv+ tem como finalidade avaliar os impactos gerados por ruptura de barragens, sendo uma ferramenta utilizada em diversos projetos de elaboração de Planos de Ação Emergencial (PAE) de usinas hidroelétricas localizadas no Estado de São Paulo. O modelo matemático implementado no CLiv+ baseia-se na simulação da formação de brechas em barragens e na propagação da onda resultante para jusante, contemplando os efeitos de amortecimento em trechos de reservatório e o escoamento hidrodinâmico unidimensional em trechos de canal.

Com comportamento semelhante, o modelo computacional HEC-RAS desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2010) permite que o usuário simule o escoamento permanente e transitório unidimensional em canais, transporte de sedimentos, variações de temperatura da água e etc.

Os resultados de níveis de água calculados por estes modelos, quando cruzados com informações de topografia, fornecem em planta a área de inundação decorrente da simulação de um determinado cenário, a partir do qual se pode, antecipadamente, tomar decisões a fim de mitigar os danos causados.

Estudos de casos reais de rupturas de barragens com a utilização destes modelos computacionais permitiram identificar uma peculiaridade: a ocorrência de afogamento da brecha por jusante. Este fenômeno acarreta na redução da velocidade de escoamento da água através da soleira formada pela brecha, reduzindo a vazão decorrente da ruptura da barragem e influenciando diretamente nas consequências a jusante causadas por este acidente.

O estudo desenvolvido neste trabalho tem como objetivo realizar simulações de ruptura em uma barragem hipotética, a fim de averiguar a ocorrência do afogamento de brecha por jusante, a interpretação deste fenômeno por conta dos modelos CLiv+ e HEC-RAS, e as consequências desta ocorrência nas condições de jusante.

Por fim, com a finalidade de mostrar os efeitos da consideração da ocorrência deste fenômeno em casos reais, foram realizadas simulações de ruptura por overtopping da barragem da PCH Mogi Guaçu, localizada no Estado de São Paulo, utilizando ambos os modelos hidráulicos unidimensionais, avaliando as consequências do afogamento por jusante no cálculo da área inundada.

METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, procedeu-se inicialmente com a implantação, no HEC-RAS e CLiv+, de uma rede hipotética, contendo uma barragem fictícia. A partir destas redes, estabeleceram-se condições de contorno para algumas simulações a fim de obter dois resultados distintos para cada um dos modelos: um resultado em que, após a ruptura da barragem, houvesse a ocorrência de afogamento da brecha por jusante, e outro que não apresentasse esta ocorrência. Desta forma, a partir dos resultados, elaborou-se uma comparação de parâmetros como vazão imediatamente a jusante da barragem, relação entre as alturas das linhas de energia de jusante e montante (H_j/H_m) sobre a soleira da brecha e coeficiente de afogamento (C_a), a fim de avaliar a interpretação de cada um dos modelos para este fenômeno, e qual o grau de influência a jusante da barragem ao considerá-lo nos cálculos.

Por fim, em ambos os modelos utilizados, construiu-se a rede do rio Mogi Guaçu compreendida entre o início do reservatório da PCH Mogi Guaçu até um posto fluviométrico localizado próximo à confluência com o rio Pardo, utilizando-o como condição de contorno de

jusante. As características do canal, como seções transversais, bem como a calibração da rede, foram extraídas do estudo que culminou com o Plano de Ação Emergencial da PCH Mogi Guaçu, elaborado pela FCTH no projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado “Gerenciamento de Ações Emergenciais da Geração AES Brasil (SGAE)”.

Foram realizadas, então, simulações de ruptura por overtopping da barragem em questão para ambos os modelos analisados neste estudo, considerando para a abertura de brecha os dados provenientes do estudo do SGAE.

A partir dos resultados, elaborou-se, de maneira análoga à realizada na rede hipotética, uma avaliação de parâmetros, além da comparação da mancha de inundação em planta, para o cenário calculado por ambos os modelos, focando a análise na influência da ocorrência de afogamento da brecha por jusante.

De acordo com o manual do software CLiv+ (FCTH, 2004), o cálculo da vazão que escoar através de uma brecha com seção trapezoidal pode ser modelado como um escoamento controlado por dispositivos de soleira espessa e é expressa através da equação apresentada a seguir.

$$Q = Cd \times Ca \times (b y c + z y^2 c) \times \sqrt{2g \times (H - y c)} \quad (1)$$

onde: b: largura da base da soleira; z: taludes da seção trapezoidal; Cd: coeficiente de descarga; Ca: coeficiente de submergência; yc: profundidade crítica sobre a soleira; H: carga hidráulica sobre a soleira; g: aceleração gravitacional.

O Coeficiente de Submergência (Ca) é um parâmetro que insere um fator de redução na vazão que passa pela brecha de acordo com o grau de afogamento da mesma, expressa pela relação entre as alturas das linhas de energia de jusante e montante em relação à base da soleira da brecha (Hj/Hm). O valor deste coeficiente pode ser estabelecido segundo os critérios apresentados abaixo (FCTH, 2004).

$$\text{Se } \frac{H_j}{H_m} \leq 0,65 \quad Ca = 1 \quad (2)$$

$$\text{Se } 0,65 < \frac{H_j}{H_m} < 1 \quad Ca = \frac{9}{2\sqrt{3}} \times \left(\sqrt{1 - \left(\frac{H_j}{H_m} \right)} \right) \times \left(\frac{H_j}{H_m} \right) \quad (3)$$

$$\text{Se } \frac{H_j}{H_m} \geq 1 \quad Ca = 0 \quad (4)$$

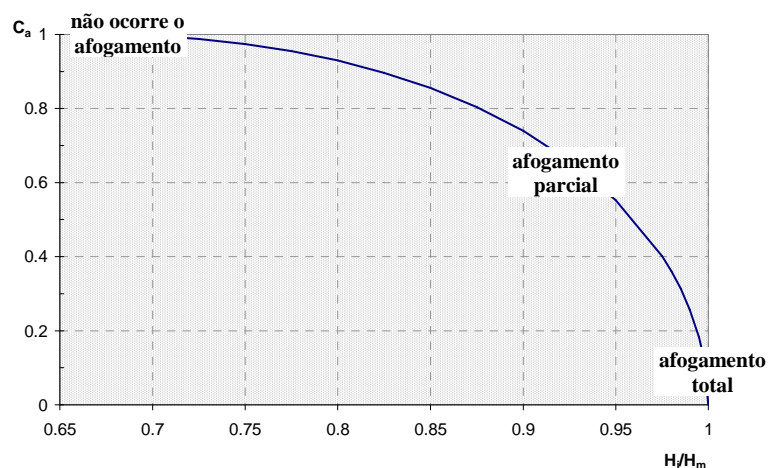


Figura 1. Coeficiente de Submergência em função da relação Hj/Hm (FCTH, 2004)

RESULTADOS

Caso Hipotético

Os resultados a seguir, apresentados na Figura 2, referem-se às simulações realizadas no aplicativo CLiv+ para a rede hipotética, comparando-se as situações em que ocorreu e não ocorreu afogamento da brecha por jusante após a ruptura da barragem.

Comparação CLiv+: Vazão a jusante da barragem

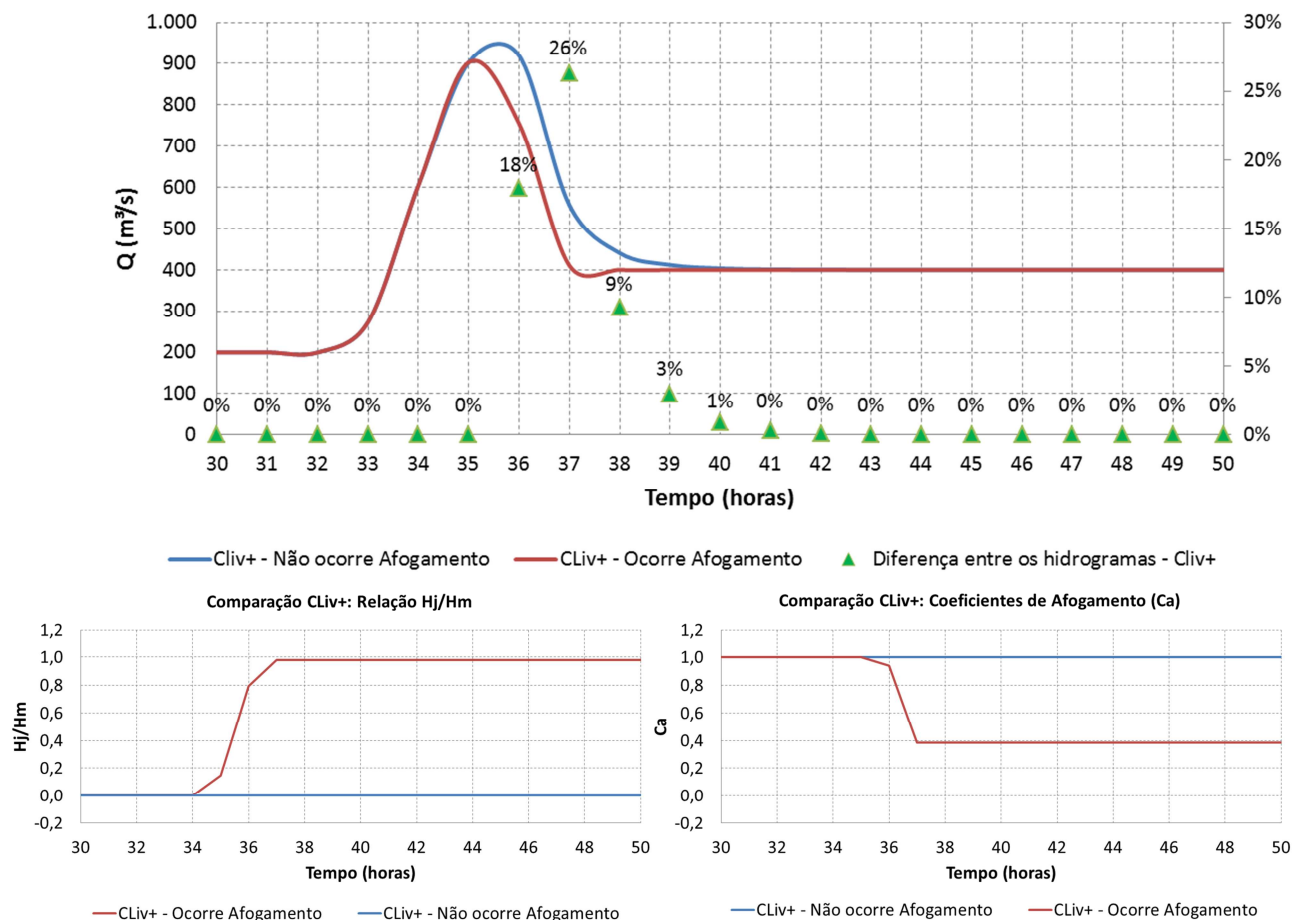


Figura 2. Comparação dos resultados das simulações da Rede Hipotética para situações de ocorrência e não ocorrência de afogamento de brecha por jusante – CLiv+

Na figura acima, no primeiro gráfico é apresentada a comparação dos hidrogramas das vazões imediatamente a jusante da barragem, nas situações de ocorrência e não ocorrência de afogamento por jusante da brecha, com o percentual de redução na vazão por conta do afogamento em relação à situação sem este fenômeno. Desta forma, neste caso hipotético, pode-se verificar que o afogamento da brecha representou uma redução máxima de cerca de 26% na vazão afluente ao canal de jusante. Isto pode ser bastante significativo em situações envolvendo vazões altas.

Nos demais gráficos, estão apresentados em função do tempo de simulação, o grau de afogamento, representado pela relação H_j/H_m , e o correspondente valor do Coeficiente de Submersão (C_a). Pode-se verificar que o valor da relação H_j/H_m não atinge 1, ou seja, não ocorreu o afogamento total da brecha. Entretanto, isto representou um fator de redução de cerca de 60% da vazão que escoava pela brecha, por conta da influência do afogamento parcial embutido no parâmetro C_a apresentado na equação (3).

Da mesma forma, a Figura 3 apresenta os resultados das simulações realizadas no software HEC-RAS.

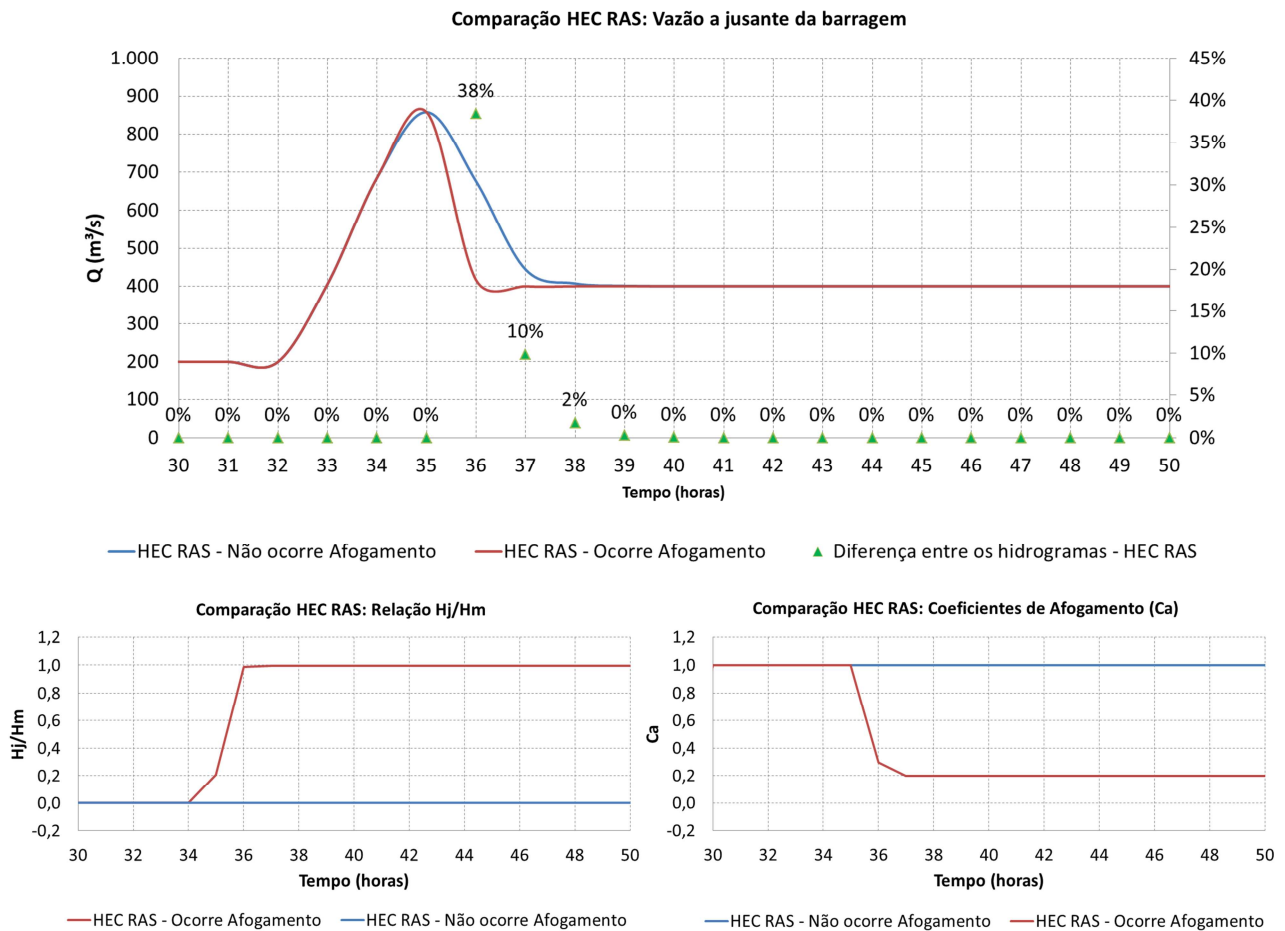


Figura 3. Comparação dos resultados das simulações da Rede Hipotética para situações de ocorrência e não ocorrência de afogamento de brecha por jusante – HEC-RAS

Assim como ocorreu nas simulações realizadas com o CLiv+, os resultados obtidos com o HEC-RAS indicaram uma redução significativa na vazão a jusante da barragem, neste caso sendo de cerca de 38%. Fica também evidente a redução de vazão que escoo pela brecha observando-se que o valor do Coeficiente de Submergência obtido chega a representar um valor 80% menor que o valor unitário, o que indica ausência de afogamento total por jusante.

Caso real – PCH Mogi Guaçu

Os resultados a seguir referem-se às simulações realizadas nos softwares CLiv+ e HEC-RAS para a rede do rio Mogi Guaçu que contempla a PCH Mogi Guaçu. Para as simulações nos dois modelos foram considerados os mesmos dados extraídos do projeto SGAE (FCTH, 2012): características do canal, seções transversais, altura máxima da brecha, largura da base da brecha, tempo e expoente de evolução, bem como a calibração da rede.

Na comparação das envoltórias máximas de NA dos modelos CLiv+ e HEC-RAS, pode-se observar que, para os pontos analisados, a máxima diferença tem aproximadamente 1,9 metros, sendo que a média destas diferenças é de 0,92 metros.

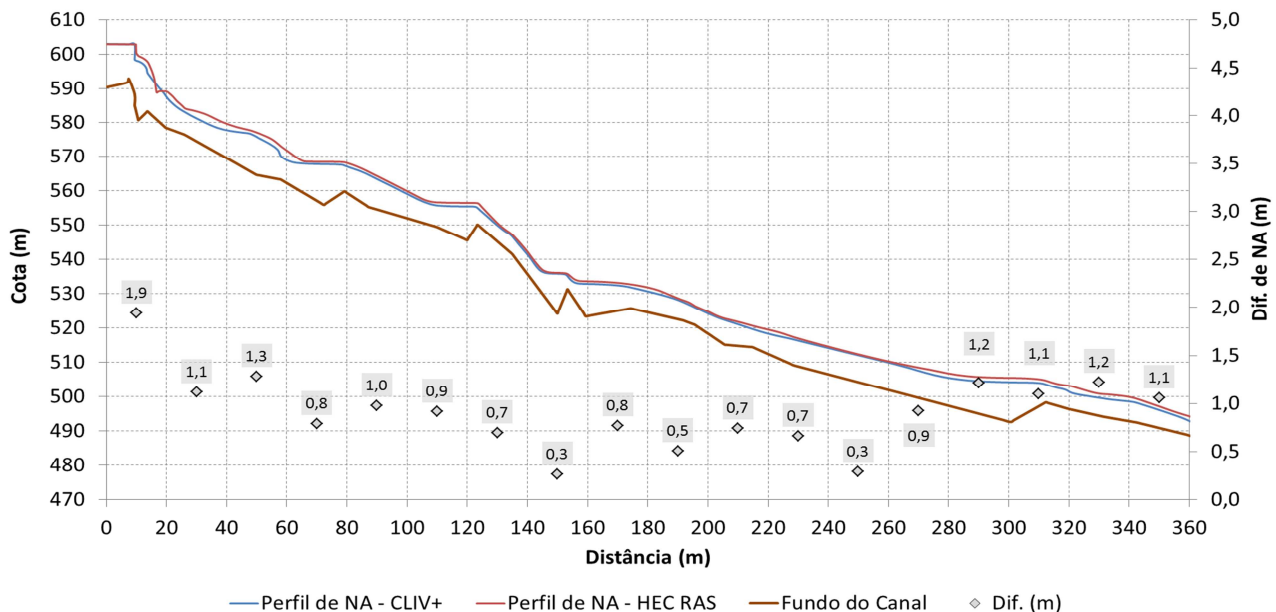


Figura 4. Comparação das envoltórias máximas de linha d'água dos modelos CLiv+ e HEC-RAS.

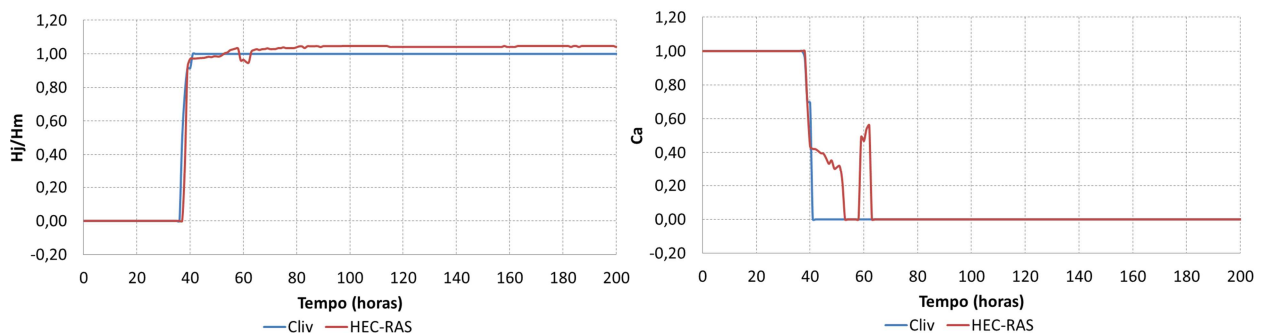


Figura 5. Comparação da relação H_j/H_m e do coeficiente de submergência C_a dos modelos CLiv+ e HEC-RAS.

Os gráficos acima apresentam a relação entre a profundidade de escoamento a jusante e a montante da base da brecha (H_j/H_m), e o Coeficiente de Submergência (C_a). Pode-se verificar que no modelo HEC-RAS ocorre uma oscilação no valor de H_j/H_m quando a relação fica próximo de 1, valor que representa o afogamento total da brecha. Esta “instabilidade” pode ser vista com mais ênfase no gráfico do C_a , ocorrendo entre os instantes 40 e 60. A partir do instante 63 o valor do C_a permanece constante em 0. No modelo CLiv+, esta “instabilidade” é mais discreta, ocorrendo apenas no pequeno intervalo entre os instantes 38 a 40.

A Figura 6 apresenta a comparação das manchas de inundação dos modelos CLiv+ e HEC-RAS, geradas nos respectivos modelos. Constata-se uma diferença na área inundada que provavelmente ocorreu por conta da particularidade do gerador de mancha de inundação de cada modelo, e não necessariamente da diferença entre as vazões de rupturas calculadas por ambos. Isso pode ser observado na comparação das duas manchas geradas no HEC-RAS com os hidrogramas de ruptura do CLiv+ e do HEC RAS (ilustração esquerda da Figura 7) e geradas no CLiv+ também com os hidrogramas de ruptura do CLiv+ e do HEC RAS (ilustração direita da Figura 7), representando apenas a diferença entre as vazões de ruptura calculadas pelos dois modelos.

A Figura 8 a seguir apresenta a comparação de duas manchas de inundação geradas a partir dos resultados do modelo CLiv+. Uma é o resultado da ruptura hipotética da PCH Mogi Guaçu com o afogamento da brecha, e a outra foi gerada com um resultado sem a ocorrência do afogamento. Fica evidente que o efeito do afogamento é significativo, uma vez que ocorre a diminuição da área

inundada ocasionada pela redução da vazão quando da ocorrência do afogamento da brecha da ruptura da barragem.



Figura 6. Comparação das manchas de inundação dos modelos CLiv+ e HEC-RAS (adaptado do Google Earth)

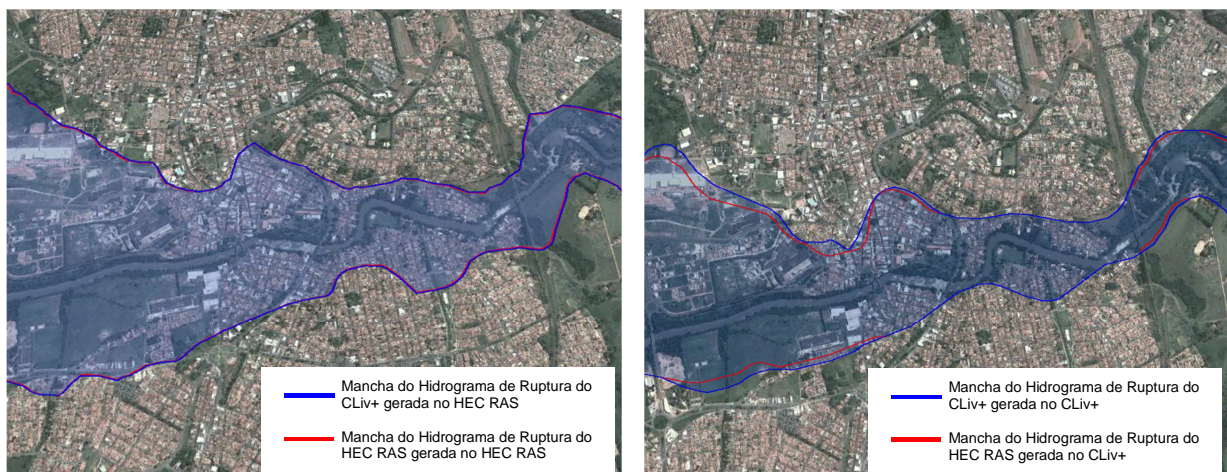


Figura 7. Comparação das manchas de inundação dos resultados dos modelos CLiv+ e HEC-RAS geradas no CLiv+ e no HEC-RAS (adaptado do Google Earth)



Figura 8. Comparação das manchas de inundação com e sem afogamento geradas a partir dos resultados do CLiv+ (adaptado do Google Earth)

CONCLUSÕES

Como pode ser visto nos resultados apresentados, ambos os modelos consideram o afogamento por jusante nos cálculos de vazão que escoam pela brecha, o que representa uma importante facilidade neste tipo de análise. Além disso, fica evidente a significativa influência deste fenômeno na vazão afluente ao canal de jusante de uma barragem com a brecha afogada, fato este que torna-se de grande importância quando envolve, por exemplo, a previsão de linha d'água, como ocorre em estudos para avaliações de impactos de uma região por conta de um determinado cenário envolvendo a ruptura de uma barragem.

Nos resultados apresentados verificam-se diferenças nas vazões máximas alcançadas pelos dois modelos empregados na simulação, inferiores a 5%, assim como foram detectadas diferenças nos níveis d'água máximos alcançados. A possível razão da ocorrência destas diferenças pode estar relacionada com o cálculo do escoamento que ocorre através da brecha formada durante a ruptura da barragem, que no CLiv+ é modelado como um escoamento controlado por dispositivos de soleira espessa de seção trapezoidal. Salienta-se que a diferença nas vazões de ruptura apresentada neste estudo não são significativas, uma vez que a diferença em distância das áreas inundadas é menor que 15 m para a área urbana de Mogi Guaçu.

Em estudos de rompimento de barragens, o cálculo da vazão efluente é de fundamental importância nas estimativas dos impactos causados a jusante, merecendo mais pesquisas na forma de evolução da brecha, tanto do tempo quanto da sua geometria, como também do cálculo do escoamento que ocorre através da brecha formada durante a ruptura.

REFERÊNCIAS

- FCTH (2012). Gerenciamento de Ações Emergenciais da Geração AES Brasil (SGAE). São Paulo.
- FCTH (2004) "CLiv + Software para Simulação de Escoamentos em Canais e Reservatórios – Manual do Usuário. São Paulo, p. 98.
- DINIZ, L. S. (1999). Calibragem de modelos hidrológicos. In *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. Org. por Galvão, C.O. e Valença, M.J.S., ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 151 – 164
- LEBEL, T.; TAUPIN, J.D.; D'AMATO, N. (1997). Rainfall monitoring during HAPEZ-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology* 188-189(1-4), pp. 74 – 95.
- PORTO, R.M. (1998). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 540 p.
- QUININO, U.C.; CAMPOS, L.F.; GADELHA, C.L. (2000). Avaliação da qualidade das águas subterrâneas na bacia do rio Gramame no Estado da Paraíba. In *Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Natal, Nov. 2000, 1, pp. 162-176.
- USACE. (2010). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Davis, CA.