

## ESTIMATIVAS DO PERÍODO DE RETORNO DO COLAPSO DE PONTES EM 2016 EM ITATIBA, SP

*Fernanda Pires Pinto<sup>1</sup> ; José Anderson do Nascimento Batista<sup>2</sup>*

**ABSTRACT** – Bridge collapses generally result from flood events, as they are subjected to localized erosion and additional loads on the structure. The debris accumulation in the bridge section can aggravate the structure instability scenario in flood events. This work aims to estimate the return periods related to the collapses of two bridges in Itatiba/SP, in 2016, in scenarios with and without debris accumulation, based on inundation and obstruction rates of bridges sections considered in the literature. The triggering flow methodology was used to estimate the collapse flows and the return periods were obtained by the nearest IDF formula from Campinas, with the rainfall intensities modeled inversely by the I-PAI-WU rainfall-runoff method. The results showed that the debris accumulation, on both bridges, are not essential to the collapses. The triggering flows with return periods closer to the required for standard minimum, were found for the scenarios without debris with 247% of inundation rate and return period of 104.74 years on Cruzeiro bridge, and 200% of inundation rate and 151.63 years of return period on Faculdade bridge. The scenarios without debris and with 200% of inundation rate for both bridges are considered as the most probable since they are the lowest triggering flow, and the return period is comparable with the bridges service lives. The calculated return periods for these scenarios are 28.50 years on Cruzeiro bridge, and 151.63 years on Faculdade bridge.

**Palavras-Chave** – desastre; detritos; outorga

1) FEC/UNICAMP, R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889, fernandapirespinto@outlook.com, (19) 3521-2308  
2) FEC/UNICAMP, R. Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-889, nbatista@unicamp.br, (19) 3521-2308

## 1 - INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, as mudanças de paisagem e do clima tem levado à ampliação das ondas de cheias e eventualmente, também à intensificação das chuvas. Por isso, pequenas pontes, assim como pequenas barragens e outras estruturas hidráulicas já disseminadas, têm sido submetidas de forma crescente a inundações que, quando atingem determinados períodos de retorno, levam a estrutura à ruína. Nos Estados Unidos, um levantamento de quedas de pontes apontou que 52% dos colapsos estudados ocorreram por fatores hidráulicos (COOK *et al.*, 2013).

Durante um evento de cheia, uma ponte sobre curso d'água ocasiona a contração lateral da seção transversal do canal e vertical, acelerando o escoamento. Da mesma forma, ocorrem novos carregamentos na estrutura, de arrasto e levantamento, e fenômenos erosivos, pois durante a cheia a ponte pode ser submetida a submersão parcial ou total (MALAVASI e GUADAGNINI, 2003). A ocorrência de aprisionamento de detritos pode, em eventos extremos de cheia, agravar a erosão local e o coeficiente de arrasto, devido a erosão das margens do canal ou corrida de detritos provenientes de determinados locais da bacia hidrográfica (ZEVENBERGEN *et al.*, 2012). Esses efeitos podem ser mensurados pelas taxas de inundação e de obstrução, que representam o quanto a ponte está submersa e o quão obstruído está o escoamento na seção de estudo, apresentando valores críticos para 20% de inundação da ponte e obstrução do escoamento menores que 30% (MALAVASI e GUADAGNINI, 2003; PAROLA *et al.*, 2000; OUDENBROEK *et al.*, 2018).

Quando uma inundação causa o colapso da ponte, a vazão relacionada é chamada de vazão deflagradora (HAMILL, 1999). A magnitude do evento extremo afeta diretamente a vazão deflagradora, de modo que quanto maior a submersão da ponte, maior a vazão deflagradora do colapso de sua estrutura. Além da cheia, parte da seção transversal do curso d'água é obstruída pela ponte, gerando a elevação do nível do escoamento em relação ao nível natural. Esse efeito é agravado para eventos com aprisionamento de detritos, aumentando a vazão deflagradora do colapso.

Em Itatiba duas pontes sobre o ribeirão Jacaré, na área urbana da cidade, colapsaram após fortes chuvas no dia 14 de março de 2016 (CHUVA, 2016; DIAS, 2016). Detritos foram arrastados durante a inundação, inclusive desprendidos do revestimento em gabião das margens do ribeirão (ITATIBA, 2016a; ITATIBA, 2016b). Este estudo objetiva a estimativa de períodos de retorno nas seções das duas pontes, considerando cenários com e sem acúmulo de detritos, baseando-se na vazão deflagradora de cenários de taxas de inundação e de obstrução indicadas pela literatura.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

As pontes objetos do estudo, localizadas em Itatiba-SP, na Região Metropolitana de Campinas (RMC), serão denominadas de pontes Cruzeiro (46°50'50,02"O; 22°59'55,32"S) e Faculdade

(46°50'57,84"O; 23°0'6,48"S). A área da bacia da ponte Cruzeiro é maior, pois se localiza a jusante no Ribeirão Jacaré, conforme a Figura 1 (84,07km<sup>2</sup> para a ponte Cruzeiro e 76,74km<sup>2</sup> para a ponte Faculdade).

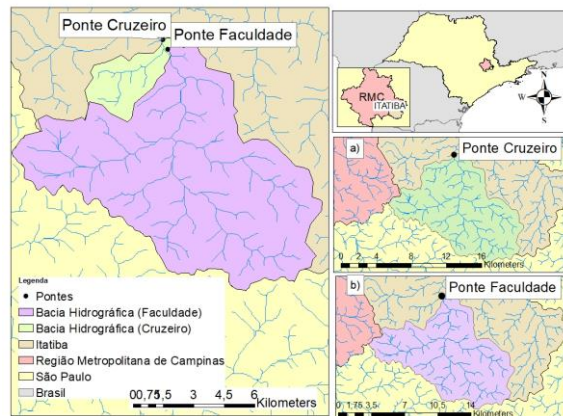


Figura 1 – Localização das bacias hidrográficas das pontes a) Cruzeiro e b) Faculdade (fonte: autoria própria)

Segundo Oudenbroek *et al.* (2018), a taxa de inundação da ponte ( $h^*$ ) influencia significativamente nos coeficientes de força e momento e, portanto o pior cenário relativo à estabilidade de uma ponte em relação às forças hidráulicas verifica-se quando há submersão total da ponte, para os valores de  $h^*=1,2$ ,  $h^*=2,0$  e  $h^*>2,13$ . O acúmulo de detritos influencia no coeficiente de arrasto ao qual a ponte é submetida, de modo que a maioria dos colapsos estudados pelos autores ocorreu a uma taxa de obstrução ( $B_r$ ) entre 22% e 28% (OUDENBROEK *et al.*, 2018). As faixas adotadas por Oudenbroek *et al.* (2018) vão de acordo com os trabalhos de Parola *et al.* (2000) e Malavasi e Guadagnini (2003). A taxa de inundação (Equação 1) e a taxa de obstrução (Equação 2) são definidas pela geometria do tabuleiro das pontes (Figura 2). O aumento da espessura da obstrução ( $s$ ) altera a distância entre a face inferior da obstrução e o leito do canal ( $h_b$ ), influenciando as taxas de inundação e obstrução do escoamento, pela variação da altura do escoamento a montante ( $h_u$ ).

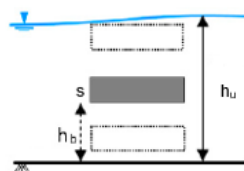


Figura 2 – Corte transversal esquemático da ponte apresentando as variáveis geométricas utilizadas na definição da taxa de inundação (Eq. 1) e da taxa de obstrução (Eq. 2) (fonte: Oudenbroek *et al.* (2018))

$$h^* = \frac{(h_u - h_b)}{s} \tag{1}$$

$$B_r = \frac{s}{h_u} \tag{2}$$

A vazão deflagradora foi calculada partindo da fixação das taxas de inundação indicadas por Oudenbroek *et al.* (2018), de 1,2, 2,0, 2,14 e 2,47. São somadas a vazão através do vão e a vazão

acima do tabuleiro da ponte, conforme a Equação 3 (NRCS, 2012). Foram utilizados os dados construtivos presentes na licitação de reconstrução das pontes (ITATIBA, 2016a).

$$Q = C_d A_1 \sqrt{2g\Delta h} + C A_2 h^{1/2} \quad (3)$$

sendo Q a vazão (m<sup>3</sup>/s); C<sub>d</sub> o coeficiente de descarga como orifício, igual a 0,8; C o coeficiente de vazão como vertedor, igual a 2,65; A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub> as áreas de escoamento no vão da ponte e acima do tabuleiro (m<sup>2</sup>); g a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>); Δh a diferença de altura h<sub>u</sub>-h<sub>b</sub> (m) e h= h<sub>u</sub>-h<sub>b</sub>-s.

Considerando a duração da precipitação igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica (d=tc), a precipitação causal foi obtida pela multiplicação da intensidade de precipitação (i) pelo tempo de concentração (tc). Os tempos de concentração foram calculados pelas equações de Corps of Engineers (COE), Ven Te Chow (VTC) e Kirpich (K). Como o Ribeirão Jacaré possui trechos revestidos, o tempo de percurso nesses trechos foi calculado pela equação de Manning, considerando n=0,02, com base na geometria do canal. A equação IDF de Campinas foi utilizada, por tratar-se do município mais próximo com IDF definida (DAEE, 2019). A bacia hidrográfica da ponte Cruzeiro possui tempos de concentração iguais a t<sub>COE</sub>=212,57min, t<sub>VTC</sub>=232,31min e t<sub>K</sub>=184,98min, já a bacia hidrográfica da ponte Faculdade possui t<sub>COE</sub>=209,63min, t<sub>VTC</sub>=229,36min e t<sub>K</sub>=182,03min.

Para o cálculo da precipitação causal, tendo a vazão deflagradora como dado, o primeiro passo foi a obtenção da intensidade de precipitação (i) responsável pelo pico de cheia igual à vazão deflagradora. Então a equação de vazão de pico do método de I-PAI-WU foi aplicada no sentido inverso, dado Q para resolver i, conforme a Equação 4 (SÃO PAULO, 1999b), sendo considerado grau médio de impermeabilização na bacia (C<sub>2</sub>=0,5).

$$Q = 0.278 * C * i * A^{0.9} * k \quad (4)$$

sendo C o coeficiente de escoamento superficial, (d=tc, C=C<sub>2</sub>); A área de drenagem da bacia (km<sup>2</sup>); k o coeficiente de distribuição espacial da chuva (0,93), em função das características da bacia.

Para o melhor entendimento do comportamento do escoamento, as velocidades do escoamento nas seções de montante (v) e os números de Froude do escoamento (Fr) e do tabuleiro (Fr<sub>s</sub>) foram calculados para ambas as pontes, pelas equações de Manning, da continuidade e pelas Equações 5 e 6, respectivamente, utilizando a vazão deflagradora e a geometria do canal como dados (OUDENBROEK *et al.*, 2018). Sendo g a aceleração da gravidade (9,81m/s<sup>2</sup>) e y<sub>m</sub> a lâmina média (m).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * y_m}} \quad (5)$$

$$Fr_s = \frac{v}{\sqrt{g * s}} \quad (6)$$

Considerou-se que os cenários de h\* e de Br adotados conforme a literatura resultam em maiores coeficientes de forças hidrodinâmicas solicitantes no tabuleiro de cada ponte, representando a situação mais desfavorável à estabilidade da estrutura. Além disso, os detritos acumulados



nas seções das pontes adotados foram considerados lenhosos, conforme os ensaios disponíveis na literatura, portanto, junto ao tabuleiro. Por fim, considerou-se que os dados construtivos das pontes reconstruídas são compatíveis com as estruturas anteriores.

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3 e 4 apresentam as imagens de satélite das pontes em 2015, 2016 e 2019. Nota-se na imagem de 2015 as pontes antes do colapso; 2016, as pontes em ruína e 2019 as pontes reconstruídas. É perceptível que as pontes reconstruídas (2019) possuem diferenças nos ângulos de encontro da estrutura com a avenida em que se localizam (destacados em vermelho), em relação às antigas (2015). Nas Figuras está sinalizado o sentido do escoamento com setas vermelhas.



Figura 3 - Imagens de satélite da ponte cruzeiro, com sentido do escoamento e ângulos de encontro em vermelho (fonte: adaptado de Google Earth)



Figura 4 - Imagens de satélite da ponte Faculdade, com sentido do escoamento e ângulos de encontro em vermelho (fonte: adaptado de Google Earth)

A Figura 5 apresenta detalhes das seções das pontes colapsadas, como o revestimento em blocos de concreto e em gabião no canal, com sentido do escoamento indicado por setas. Nota-se que partes das estruturas das pontes foram levadas pelo escoamento. Nas imagens ficam visíveis os danos a tubulações e o acúmulo de vegetação e destroços das estruturas.



Figura 5 –Pontes colapsadas, com setas indicando o sentido do escoamento a) Cruzeiro e b) Faculdade (fonte: Dias (2016); adaptado de Itatiba (2016a))

Com base no método de I-PAI-WU (SÃO PAULO, 1999b), as intensidades de precipitação foram calculadas utilizando a vazão deflagradora como dado. A precipitação causal da deflagração de cada ponte aumenta conforme a taxa de obstrução (Figura 6). A precipitação registrada no dia do evento no posto pluviométrico mais próximo (E3-154, a 12km de distância) é de 0mm, provável consequência de dano ao pluviômetro devido à chuva intensa ou, também provavelmente, que a tempestade não tenha alcançado o pluviômetro (DAEE, 2020).

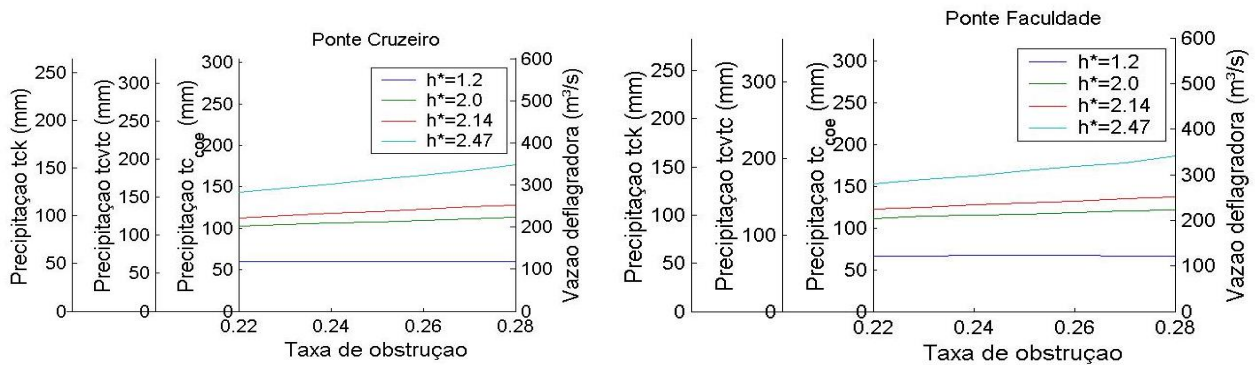


Figura 6 – Precipitação causal e vazão deflagradora para Br e  $h^*$  nas pontes Cruzeiro e Faculdade

O número de Froude de cada ponte caracterizou escoamento subcrítico em todos os cenários, sendo  $0,77 \leq Fr_{\text{Cruzeiro}} \leq 0,91$  e  $0,44 \leq Fr_{\text{Faculdade}} \leq 0,49$ . Esses resultados foram relativamente compatíveis com os de Parola *et al.* (2000), onde o coeficiente de arrasto possui valor máximo e tendência decrescente com o aumento de Fr, para  $Br < 30\%$  e  $0,44 < Fr < 0,8$ . Os valores de Froude do tabuleiro,  $Fr_s$ , foram calculados, para os cenários considerados de  $h^*$  e Br. Os resultados de  $Fr_s$  para todos os cenários (com e sem detritos) foram  $1,11 < Fr_{s(\text{Cruzeiro})} < 1,89$  e  $1,10 < Fr_{s(\text{Faculdade})} < 1,62$ . Os resultados para a obstrução sem detritos ( $Br \leq 21\%$ ) foram comparados com os cenários de acúmulo de detritos, entre 22% a 28% (Figura 7), com o tempo de concentração calculado pela equação de Corps of Engineers, que se mostrou mais adequada para as bacias estudadas.

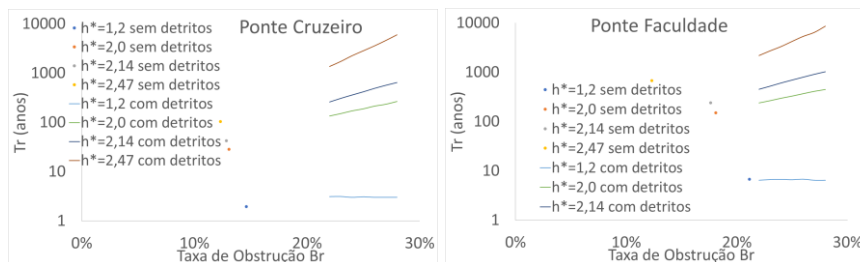


Figura 7 – Gráficos de taxa de obstrução (Br) contra períodos de retorno (Tr), com e sem acúmulo de detritos, eixo vertical em escala logarítmica

Os cenários que apresentaram períodos de retorno mais próximos a 100 anos foram: a) Ponte Cruzeiro, com  $h^*=2,47$ , sem detritos e  $Tr=104,74$  anos e b) Ponte Faculdade, com  $h^*=2,0$ , sem detritos e  $Tr=151,63$  anos. As vazões deflagradoras mínimas – com  $Tr$  comparável ao tempo de serviço das pontes – foram encontradas para  $h^*=2,0$  nas pontes Cruzeiro e Faculdade e são, respectivamente, iguais a  $162\text{m}^3/\text{s}$  e  $191,59\text{m}^3/\text{s}$ . Portanto, a menor vazão necessária para a queda da ponte Cruzeiro possui  $Tr$  inferior ao exigido pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) para outorgas do direito a intervenções em cursos d'água (DAEE, 2007). A vazão deflagradora do colapso das pontes com acúmulo de detritos demonstra que o  $Tr$  necessário para o colapso das pontes é por outro lado, superior ao mínimo para atendimento da norma de outorga (DAEE, 2007). Conclui-se que, nesse cenário, as estruturas das pontes e o evento de cheia atendem ao requisito de  $Tr$  mínimo.

#### 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O eventual acúmulo de detritos lenhosos na seção das pontes não seria decisivo para a inundação seguida do colapso da estrutura. Os cenários de taxa de inundação ( $h^*$ ) e de taxa de obstrução (Br) adotados a partir da literatura, foram considerados compatíveis com o evento e elucidativos para a estimativa do período de retorno da cheia. A vazão deflagradora mínima ocorreu para  $h^*=2,0$  sem detritos e  $Tr$  comparável ao tempo de serviço das estruturas, 28,5 anos para a ponte Cruzeiro e 151,63 anos para ponte Faculdade, portanto, mais prováveis para representação do evento. A ponte Cruzeiro apresentou  $Tr$  mais próximo a 100 anos no cenário sem detritos e  $h^*=2,47$  (104,74 anos).

#### AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) pela bolsa de Demanda Social de Mestrado do primeiro autor.

#### BIBLIOGRAFIA

COOK, Wesley; BARR, Paul J.; HALLING, Marvin W. Bridge failure rate. Journal of Performance of Constructed Facilities, v. 29, n. 3, p. 04014080, 2013.

- DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica. Banco de Dados Hidrológicos. Disponível em: <<http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- DAEE – Departamento de Água e Energia Elétrica. Instrução Técnica DPO Nº002, de 30 de julho de 2007. Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. (2019). Precipitações intensas no Estado de São Paulo. CTH-DAEE, São Paulo, 270p.
- DIAS, Construções de pontes sobre o Ribeirão Jacaré devem começar e menos de 15 dias. Diário I, Itatiba, 22 de julh. De 2016. Disponível em: <<http://www.diarioi.com.br/2016/07/22/construcoes-de-pontes-sobre-o-ribeirao-jacare-devem-comecar-em-menos-de-15-dias/>>. Acesso em: 13 de abr. de 2020.
- HAMILL, L. (1999). Bridge Hydraulics, London, New York: E&FN SPON, 366 p.
- ITATIBA, Prefeitura Municipal de Itatiba. AÇÕES PÓS CHUVAS: Prefeitura inicia limpeza no Ribeirão Jacaré e executa obras de recuperação. Prefeitura Municipal de Itatiba, Itatiba, 19 de mar. de 2016. Disponível em: <<http://www.itatiba.sp.gov.br/noticias/acoes-pos-chuvas-prefeitura-inicia-limpeza-no-ribeirao-jacare-e-executa-obras-de-recuperacao.html>>. Acesso em: 13 de abr. de 2020. 2016b.
- ITATIBA, Prefeitura Municipal de Itatiba. C.P. Nº02/2016 – Construção de Pontes sobre o Ribeirão Jacaré e Muro de Contenção. Prefeitura Municipal de Itatiba, 28 de julh. de 2016. Disponível em: <<http://www.itatiba.sp.gov.br/Concorrenca-Publica/2016-cp-no-022016-construcao-de-pontes-sobre-o-ribeirao-jacare.html>>. Acesso em: 13 de abr. de 2020. 2016a.
- MALAVASI, S.; GUADAGNINI, A. (2003). Hydrodynamic loading on river bridges. Journal of Hydraulic Engineering, v. 129, n. 11, p. 854-861.
- NRCS – Natural Resources Conservation Service. (2012). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook. Chapter 14 Stage Discharge Relations.
- OUDENBROEK, K. *et al.* (2018). *Hydrodynamic and debris-damming failure of bridge decks and piers in steady flow*. Geosciences, v. 8, n. 11, p. 409.
- PAROLA, A. C.; APELT, C. J.; JEMPSON, M. A. (2000). Debris forces on highway bridges. Rep. No. 445, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- SÃO PAULO, Prefeitura do Município de São Paulo. (1999b). Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-PAI-WU”. Documentação teórica. São Paulo, SP. Disponível em: <[https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/DRENAGEM%20URBANA/dh-h06\\_diretrizes\\_de\\_projeto\\_para\\_estudos\\_hidrologicos\\_metodo\\_de\\_i\\_pai\\_wu.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/DRENAGEM%20URBANA/dh-h06_diretrizes_de_projeto_para_estudos_hidrologicos_metodo_de_i_pai_wu.pdf)>. Acesso em: 1 de abr. de 2020.
- ZEVENBERGEN, L.W. *et al.* (2012). “Hydraulic design of Safe bridges. In: Hydraulic Design Series No. 7”. Federal Highway Administration, Washington, DC.