

FATOR DE SEGURANÇA PARA CHEIA DECAMILENAR

POR

Jerson Kelman<sup>1,2</sup>, Jorge M. Damazio<sup>2</sup>

**RESUMO** -- Este trabalho deriva um coeficiente de segurança, variável com o número de anos disponível para o estudo estatístico de cheias, a ser aplicado à estimativa da vazão decamilenar. Este fator de segurança destina-se a aumentar a segurança deste método de cálculo diminuindo-se as chances de sub-dimensionamento por efeito de erros de amostragem.

**INTRODUÇÃO**

Como cerca de 1/3 das rupturas de grandes barragens podem ser atribuídas a sub-dimensionamento de vertedoras (Thomas, 1976) é relevante discutir-se os critérios de definição da cheia de projeto dessas estruturas.

Idealmente deve-se adotar o critério econômico, que procura cotejar o custo de construção do vertedor com o valor esperado do prejuízo resultante da ruptura da barragem (Committee on The Reevaluation of the Adequacy of Spillway of Existing Dams, 1973). No caso de grandes barragens, tais como as que compõem o Setor Elétrico Brasileiro, em geral os prejuízos resultantes da ruptura são tão grandes que se justifica dimensionar os vertedores dessas barragens procurando-se alcançar uma "segurança máxima" da obra, no que diz respeito à ocorrência de cheias.

Um vertedor é dito de "segurança máxima" quando a probabilidade de transbordamento da barragem por efeito de cheias ao longo de um determinado período de tempo (usualmente considera-se um ano) é insignificante. A forma de alcançar tal objetivo pode variar. Uma alternativa é de procurar tornar nula a probabilidade de transbordamentos através do cálculo do limite superior fisicamente possível de precipitar e escoar na área de drenagem sob consideração. A PMP e sua resultante, a VMP, são tentativas neste sentido. Outra possibilidade é o uso do método estatístico, sendo que neste caso tradicionalmente tem-se adotado a cheia decamilenar o que corresponde, pelo menos teoricamente, a se admitir que 0,0001 é um valor suficientemente insignificante para se atribuir à probabilidade de transbordamento da barragem num ano qualquer. A tabela 1 mostra qual o significado do uso da cheia decamilenar em termos de probabilidade de transbordamento ao longo de uma centena de anos, bem como explora o que aconteceria se fossem adotados os tempos de retorno T=1.000, T=100.000 anos e a VMP.

As primeiras duas colunas expressam a probabilidade de que pelo menos uma barragem de um sistema de m aproveitamentos hidrológica e hidraulicamente independentes sofra uma afluência superior à projetada ao longo do horizonte de 100 anos. A equação utilizada para este cálculo é  $P(m) = 1 - (1 - T^{-1})^{100m}$

Tempos de retorno de projeto	m=1	m=10	q(T)/q(10.000)
T = 1.000	0,10	0,63	0,75
T = 10.000	0,01	0,10	1,00
T = 100.000	0,00	0,01	1,25
VMP	0,00	0,00	-

"Tabela 1. Probabilidade de transbordamento para um horizonte de 100 anos"

Nota-se que projetar para a cheia milenar seria temerário uma vez que isto implicaria num risco ao longo de 100 anos de 10% para uma barragem isolada e de 63% para um sistema de 10 barragens, valores que certamente não podem ser rotulados de insignificantes. Ao se adotar a cheia decamilenar estes riscos já caem para 1% e 10%, valores que nos parecem suficientemente pequenos e confirmam o critério tradicionalmente adotado. A terceira coluna da tabela 1 mostra relações típicas (distribuição exponencial, coeficiente de variação unitário) entre vazões de projeto para T=1000 e T=100000 com relação a T=10000. Nota-se que quando se faz variar o tempo de recorrência de uma ordem de magnitude, as correspondentes vazões diferem apenas da ordem de 25%.

**A VARIABILIDADE AMOSTRAL**

Se os métodos de cálculo de cheia de projeto fossem exatos, a tabela 1 expressaria com precisão os riscos de transbordamento das barragens. Ocorre no entanto que todos os métodos de cálculo estão sujeitos a vários tipos de erros destacando-se dentre eles o chamado erro de amostragem (Fill, 1984). Os projetistas de vertedores devem estar cientes que o potencial de cheias no local da obra será certamente sub-estimado caso o registro disponível coincida com um período sem a ocorrência de grandes cheias. Este evento será tão mais provável quanto mais curto for o período abrangido pelas medições.

Um exemplo deste perigo é o cálculo da vazão de projeto do vertedor de Salto Santiago através do método estatístico. A figura 1 mostra qual seria a vazão máxima anual com tempo de retorno de 10.000 anos estimada a partir de diferentes "datas de realização do projeto", na hipótese de que apenas o registro dos 10 anos imediatamente antecedentes à "data do projeto" estivesse disponível (curva A). Nota-se que a cheia decamilenar variaria de 13000 m<sup>3</sup>/s a 40000 m<sup>3</sup>/s dependendo da "janela" de 10 anos imediatamente antecedentes à "data do projeto" que estivesse disponível para o projetista. Como em 1983 foi observada uma cheia com pico afluentes próximo de 17.000 m<sup>3</sup>/s (curva B), uma catástrofe poderia ter ocorrido em diversas circunstâncias. Por exemplo, se o vertedor fosse projetado em 1971 com base no registro de 1961-2 a 1969-70. Na realidade, caso fossem utilizados os 42 anos de registro, inclusive a cheia de 1983, q(10000) seria estimado em pouco mais de 26.000 m<sup>3</sup>/s (curva C); valor praticamente idêntico ao adotado para projeto real do vertedor (curva E). O projeto real foi feito em 1973, adotando-se o método indireto, em que a chuva de projeto real foi determinada por método estatístico (chuva decamilenar) e a transformação chuva-vazão foi feita através de hidrógrafa unitária. É interessante observar que a exclusão da cheia de 1983 resultaria em q(10.000) = 19.000 m<sup>3</sup>/s (curva D).

<sup>1</sup> Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica-CEPEL, Rio de Janeiro

<sup>2</sup> Professor visitante da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

Em outras palavras, a cheia decamilenar é modificada em cerca de 27% pela simples inclusão da cheia de 1983 (curvas C e D). As curvas A, C e D foram calculadas através da distribuição exponencial que é uma abordagem de mínimo erro (Damazio, 1984).

O exemplo anterior é ilustrativo dos riscos que enfrenta o projetista, quando colocado diante de um registro curto, opta pelo cálculo da vazão decamilenar. Parece claro que nestes casos o projetista deve adotar alguma providência adicional para se proteger dos efeitos do erro amostral.

No item a seguir é apresentado um estudo da variabilidade da estimativa da vazão decamilenar obtida pelo método estatístico. O estudo tem o objetivo de derivar um coeficiente de segurança, variável com o número de anos disponível para o estudo estatístico, a ser aplicado à estimativa da vazão decamilenar de forma a aumentar a segurança deste método.

#### ESTUDO DE MONTE-CARLO

Seja um conjunto de 100.000 sorteios de uma variável aleatória Q de distribuição exponencial escolhida para representar a vazão máxima anual de um rio qualquer. Este conjunto é dividido em subconjuntos cada um contendo n observações. Para cada subconjunto  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  estima-se a vazão decamilenar  $q(10.000)$  através de:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum q_i \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (q_i - \bar{q})^2 \quad (2)$$

$$\bar{q}(10.000) = \bar{q} + 8,21 s_q \quad (3)$$

Para cada subconjunto a estimativa obtida com (1), (2) e (3) resultará num valor diferente, cuja distribuição de probabilidade está ilustrada na figura 2. No eixo horizontal têm-se n, número de valores no subconjunto, equivalente ao número de anos do registro de vazões. No eixo vertical a escala à esquerda fornece o tempo de recorrência correspondente ao valor obtido na estimativa e o lado direito a relação entre o valor da estimativa e a vazão decamilenar. As curvas são parametrizadas pela frequência com que se obteve estimativas inferiores. Assim, por exemplo, tem-se que para registros de apenas 5 anos (n=5) em cerca de 20% dos casos são obtidas vazões inferiores à vazão centenária (tempo de retorno de 100 anos). Deve-se observar que a vazão centenária tem a chance de 63% de ser suplantada num período de 100 anos e de 40% num período de 50 anos.

Para efeito de cálculo do coeficiente de segurança adotou-se como critério a necessidade de se garantir que a estimativa obtida tenha apenas 1% de chance de ser inferior à vazão centenária. Para isto basta então dividir os valores obtidos na escala à direita com a curva de 1% por 0,5. A figura 3 apresenta os valores obtidos e uma curva ajustada por mínimos quadrados para suavizar as variações amostrais. A equação da curva é:

$$J = -0,107 + 5,48 z - 63,26 z^2 + 169,63 z^3 \quad (4)$$

onde  $z = n^{-1/2}$  sendo (4) válida até n=23. Para n>23, J=1.

A aplicação do coeficiente de segurança J definida por (4) corresponde a alterar (3) para:

$$\bar{q}(10.000) = J \cdot [ \bar{q} + 8,21 s_q ] \quad (5)$$

A figura 4 ilustra os resultados obtidos ao se repetir a experiência anterior tendo-se alterado a equação (3) para (5).

Os resultados obtidos na figura 4 são válidos para o caso em que a população da vazão máxima anual seja a exponencial (não importando os parâmetros). Pode-se dizer que os resultados da figura 4 são válidos aproximadamente para populações cuja forma, expressa por exemplo pela assimetria, se aproxime da forma da distribuição exponencial cuja assimetria é 2,00. Conforme a população assuma formas mais ou menos "favoráveis" as estimativas obtidas pela aplicação do fator de segurança derivado para a distribuição exponencial serão mais ou menos confiáveis. A distribuição exponencial foi considerada para o cálculo do coeficiente de segurança por uma comparação entre as assimetrias de registros de vazões máximas anuais em rios no Brasil, que em geral estão abaixo de 2,00 (Damazio, 1984). A figura 5 ilustra os resultados obtidos com 100.000 sorteios de uma variável aleatória mais "favorável" (distribuição de extremos tipo I ou Gumbel, assimetria=1,14) onde pode-se notar o alto grau de segurança obtido ao se aplicar as fórmulas (1), (2), (4) e (5) em registros provenientes deste tipo de população.

A aplicação do fator de segurança ao exemplo da figura 1 corresponde a multiplicar os valores da curva A por 1,53. Neste caso dependendo da "janela" de 10 anos a cheia de projeto variaria de 20.000 m<sup>3</sup>/s a 61.200 m<sup>3</sup>/s, e portanto em nenhuma circunstância seria inferior à cheia efetivamente observada em 1983.

#### DISCUSSÃO

O fator de segurança J sugerido neste texto (figura 3) pode ser encarado como uma "multa" a ser cobrada sempre que um registro suficientemente longo (n>23) for inexistente. Naturalmente esta multa será tão mais severa quanto menor for o comprimento do registro.

Alguns hidrólogos acreditam poder evitar a insegurança associada a registros hidrológicos de curta duração adotando a VMP, vazão máxima provável. Existem diversos métodos para se chegar à PMP (primeira etapa na determinação da VMP), desde a abordagem clássica (WMO, 1973) de procurar maximizar a quantidade de vapor d'água numa coluna de ar até o método adotado para o projeto do vertedor de Itaipu, que consiste em combinar em ordem adversa fenômenos meteorológicos já observados no passado. Existem também diversos modelos matemáticos que podem ser empregados na transformação da PMP em VMP. Todas estas abordagens têm em comum a variabilidade do resultado final com a duração do registro hidrológico. Por exemplo, Moraes (1981) relata que a VMP de Tucuruí foi determinada no projeto básico como sendo de 88.400 m<sup>3</sup>/s. Chegou-se a este valor a partir de estudos meteorológicos que definiram a PMP e do emprego do modelo SSARR para a transformação da PMP em VMP. No projeto executivo a inclusão de mais três anos no registro (1978, 1979 e 1980), mantendo-se o mesmo método de cálculo, resultou numa nova VMP de 114.300 m<sup>3</sup>/s, o que corresponde a um acréscimo com relação ao valor anterior de quase 30%. É necessário portanto que fatores de segurança análogos ao apresentado neste artigo sejam também desenvolvidos para cheias de projeto calculadas por VMP.

#### AGRADECIMENTOS

Este artigo resulta das atividades do projeto de investigação DPST-7275 realizado no CEPEL com o apoio do DEEN/ELETRORÁS.

#### REFERÊNCIAS

Fill. H.D.O.A.; "A enchente do rio Iguaçu em julho de 1983 e suas consequências no projeto de obras hidráulicas", Revista Brasileira de Hidrologia, Caderno de Recursos Hídricos, vol.2, nº 1, 1984.

Damázio, J.M.; "Estimação Robusta de Vazões Milenares", Relatório Técnico CEPEL 650/84. CEPEL, Rio de Janeiro, 1984.

The Task Committee on the Reevaluation of the Adequacy of Spillways of Existing Dams, "Reevaluating Spillway of Existing Dams", Journal of the Hydraulics Division, vol.99, nº HY2, Feb., 1973.

World Meteorological Organization; "Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation", Operational Hydrology Report no.1. WMO nº 332, Geneva, 1973.

Moraes, H.M.; "Estudo de cheias e determinação das vazões de desvio e capacidade de vertedouro para as usinas hidrelétricas de Tucuruí e Balbina", IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, anais 4, Fortaleza, 1981.