

Estudo em Laboratório Hidráulico de um Vertedouro Tipo Tulipa

Guilherme Araujo de Vasconcelos e Almeida¹, José Antonio Mamani Gomez², Gabriela Roussin

Guedes Santos³, Jorge Luis Zegarra Tarqui⁴ & Edna Maria de Faria Viana⁵

Resumo: Tulipas são tipos de vertedouros comumente utilizados em regiões onde não há espaço para implantação de soleiras lineares. Estes dispositivos possuem controle hidráulico complexo e o equacionamento empregado para cálculo da sua capacidade de descarga considera um coeficiente de descarga cujo comportamento distinto do coeficiente de uma soleira linear, apresentando redução com o aumento da carga hidráulica sobre a soleira circular. O presente trabalho realizou o cálculo da curva de descarga e do coeficiente de descarga de uma tulipa implantada em um canal didático. Foram realizados 16 testes com diferentes vazões, nos quais se mediu o nível d'água na região da tulipa. A partir dos dados obtidos, foram determinadas a curva de descarga e os coeficientes de descarga correspondentes a cada ensaio. O comportamento observado mostrou-se coerente com o reportado na literatura, evidenciando o efeito da mudança do regime de controle hidráulico sobre a capacidade de descarga da tulipa, bem como a redução do coeficiente de descarga com o aumento da carga hidráulica.

Abstract: Morning glory spillways are commonly employed in situations where space constraints prevent the implementation of linear weirs. These structures exhibit complex hydraulic behavior, and their discharge capacity is typically described by formulations that incorporate a discharge coefficient differing from that of linear-crested weirs. This coefficient tends to decrease with increasing hydraulic head over the circular crest. This study aims to determine the rating curve and the discharge coefficient of a tulip spillway installed in a laboratory test flume. A total of 16 experimental runs were conducted under distinct flow conditions, during which the upstream water level in the vicinity of the spillway was measured. Based on the experimental data, the rating curve was established, and the discharge coefficient was computed for each test. The results are consistent with findings reported in the literature, demonstrating the influence of changes in hydraulic control on the discharge capacity of the spillway. Furthermore, a decreasing trend in the discharge coefficient was observed as the hydraulic head increased.

Palavras-Chave: vertedouro tulipa; curva de descarga; coeficiente de descarga; modelo físico.

Keywords: morning glory spillway; rating curve; discharge coefficient; physical model.

INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas hidráulicas destinadas ao controle e à descarga de vazões excedentes em barragens e reservatórios, desempenhando papel fundamental na segurança dessas obras. Entre os principais tipos destacam-se os vertedouros de soleira livre, perfil Creager, canal lateral e tulipa, cuja seleção depende da vazão de projeto, das condições topográficas, das restrições de implantação e dos critérios operacionais. Os vertedouros convencionais, como os de soleira livre e perfil Creager, são estruturas retilíneas e apresentam elevada eficiência hidráulica e simplicidade

1) Engenheiro Civil, GBM Engenharia e Geologia (gavalmeida.eng@gmail.com)

2) Docente Principal, Facultad de Ingeniería Agrícola da Universidad Nacional del Altiplano de Puno (jmamani@unap.edu.pe)

3) Engenheira Hidróloga, Head5 Engenharia (gabrielaroussin@gmail.com)

4) Professor Associado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG (jlztarqui@yahoo.com.br).

5) Professora Titular, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG (ednamfv@ufmg.br).

construtiva, porém demandam maiores extensões de crista e áreas disponíveis para sua implantação (Chow, 1959; King e Brater, 1963).

Como alternativa para locais com limitações topográficas ou espaciais, os vertedouros tipo tulipa permitem a descarga de grandes vazões em áreas reduzidas, considerando que o emboque em formato circular comporta maiores comprimentos de soleira em menores extensões longitudinais. Essas estruturas são particularmente adequadas para reservatórios profundos e vales estreitos, onde a implantação de vertedouros convencionais pode ser inviável ou economicamente desfavorável. Entretanto, seu comportamento hidráulico é mais complexo, podendo operar sob diferentes regimes de escoamento e estar sujeito a fenômenos como submergência, formação de vórtices e cavitação, os quais influenciam diretamente sua capacidade de descarga e desempenho operacional (USB, 1987).

Os vertedouros tulipa são compostos por uma tubulação vertical (*shaft*) seguida de um conduto aproximadamente horizontal até seu deságue (Baptista e Lara, 2016). Esse tipo de estrutura é usualmente adotado em barragens e onde não existe espaço suficiente para a implantação de um vertedouro convencional, sendo possível sua implantação no interior dos reservatórios, com a realização da transposição do maciço de forma submersa e maior comprimento da soleira quando comparado a vertedouros lineares. USB (1987) define a Equação (1) de descarga na crista de uma tulipa:

$$Q = C_o(2\pi R_s)H_o^{3/2} \quad (1)$$

Sendo Q a vazão em m^3/s , C_o o coeficiente de descarga em $m^{1/2}/s$, R_s o raio da tulipa em m , e H_o a carga hidráulica tomada a partir do topo da tulipa em m . Nota-se que a equação (1) deriva da aplicação da equação de Bernoulli entre a superfície da linha d'água em uma região de aproximação do emboque e a soleira do vertedouro, incorporando ao coeficiente de descarga o termo de aceleração da gravidade (Şentürk, 1994). Desta forma, explicitando na equação o termo da gravidade e rearranjando os demais termos, obtém-se (2) para o coeficiente de descarga adimensional.

$$C_d = \frac{Q}{2\pi R_s \cdot H_o^{3/2} \cdot \sqrt{2g}} \quad (2)$$

Sendo C_d o coeficiente de descarga adimensional e g a aceleração da gravidade em m/s^2 .

A Equação 2 é análoga à expressão para determinação do coeficiente de descarga de uma soleira livre, sendo $2\pi R_s$ o comprimento total da soleira circular. No entanto, o coeficiente de descarga para a tulipa é distinto do coeficiente calculado para uma soleira retilínea, uma vez que a soleira circular sofre efeitos de submergência e subpressões devido à convergência de fluxos no interior da tubulação vertical. Como resultado, observa-se a redução de C_d com o aumento da carga hidráulica sobre a soleira circular, comportamento verificado em resultados experimentais obtidos por Wagner (1956). O autor recomenda a expressão de C_d em função do adimensional (H_o/R_s).

A Figura 1 apresenta o ábaco proposto por USB (1987) relacionando C_d e (H_o/R_s). Para tal, são consideradas três curvas com relações P/R_s distintas, sendo P a altura do shaft do vertedouro tulipa.

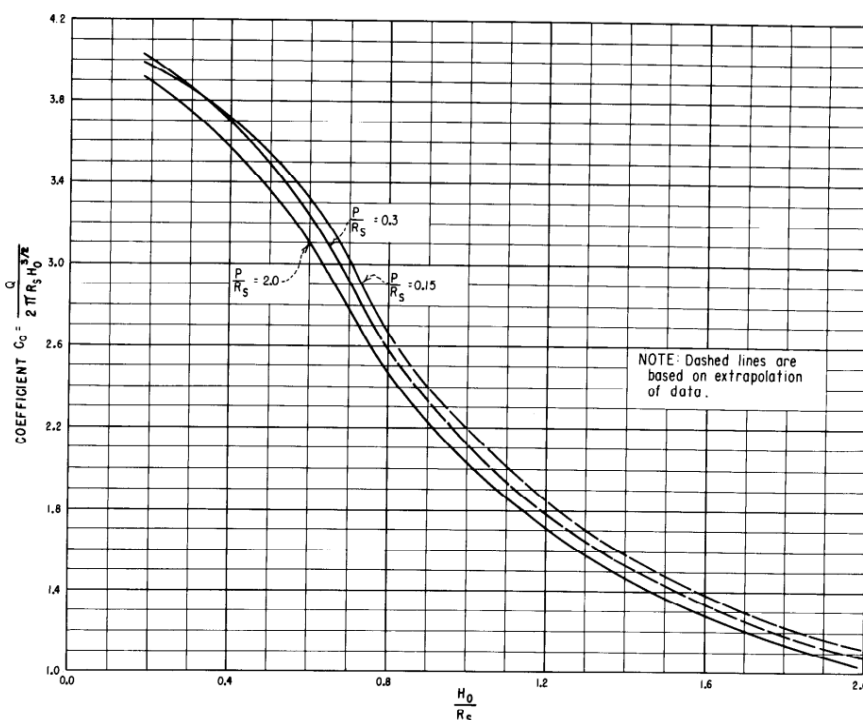


Figura 1 – Ábaco de determinação do coeficiente de descarga C_d em função de H_0/R_s (USBR, 1987).

O controle hidráulico destas estruturas é complexo, passando pelos controles de crista (soleira livre), garganta (afogamento do emboque), controle na parte inferior do poço e controle de túnel. USBR (1987) indica a prevalência do controle de soleira livre até relações de H_0/R_s próximas a 0,45. Para valores de H_0/R_s entre 0,45 e 1,0, a soleira é parcialmente submersa e, ao se atingir H_0/R_s igual a 1,0, a soleira é completamente submersa e é observado o controle de orifício.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho apresenta o cálculo da curva de descarga e do coeficiente de descarga de um vertedouro tulipa em um canal didático no CPH/UFGM. Trata-se de um canal retangular em acrílico, de seção transversal com base de 0,14 m e altura igual a 0,25 m e declividade nula. O canal é alimentado por uma bomba com registro na saída, conectada a um reservatório de água. O canal possui um anteparo capaz de obstruir parcialmente sua seção transversal, com uma tubulação em formato de tulipa, de diâmetro 44 mm e espessura de 5 mm ($R_s = 27$ mm) e 90° em relação à direção do fluxo. O sistema possui medidor de vazão eletrônico. A Figura 2 apresenta o aparato experimental.

O experimento consistiu em 16 testes com vazões distintas, onde foi realizada a medição da altura da lâmina d'água na entrada da tulipa com curva de 90° (Y_{emboque}). As vazões variaram de 0,12 a 1,65 L/s.



Figura 2 – Canal didático utilizado no estudo (à esquerda) e detalhe do anteparo com curva de 90° adotado (à direita).

A partir dos valores medidos de lâmina d'água, foi calculada a carga hidráulica no emboque do tubo, que está posicionado a 147 mm do fundo do canal ($H_o = Y_{\text{emboque}} - 147 \text{ mm}$). Com a carga hidráulica calculada, calculou-se a relação entre a carga e o raio do tubo (H_o/R_s) e o coeficiente de descarga adimensional a partir da equação (2).

Por fim, foram plotados os gráficos de dispersão correspondentes à curva de descarga ($Y_{\text{emboque}} \times Q$) e do coeficiente de descarga ($C_d \times H_o/R_s$). De forma comparativa, foram calculados e plotados nos mesmos gráficos os valores correspondentes à metodologia de USBR (1987). Uma vez que o ábaco para cálculo do coeficiente de descarga (C_o) pela metodologia USBR apresenta as curvas correspondentes a P/R_s entre 0,15 e 2,0, e a relação para o vertedouro tulipa utilizado no presente estudo ($P/R_s = 64/27 = 2,37$) é superior a 2,0, a curva superior foi adotada.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os valores medidos de vazão (Q) e altura da lâmina d'água no canal (Y_{emboque}) e os parâmetros calculados de carga hidráulica (H_o), razão H_o/R_s , coeficiente de descarga adimensional (C_d), bem como a vazão e coeficiente de descarga adimensional calculados a partir da metodologia do USBR. A Figura 3 apresenta a curva de descarga da tulipa e a Figura 4 apresenta a envoltória de coeficientes de descarga calculados e os limites estabelecidos para o comportamento de soleira livre e para o início do controle de orifício. Nota-se que os parâmetros dos testes 15 e 16 não foram calculados pela metodologia do USBR, uma vez que o ábaco considera relações de H_o/R_s inferiores a 2,0.

Tabela 1 – Dados experimentais medidos e calculados.

Teste	Q (L/s)	Y _{emboque} (mm)	H _o (mm)	H _o /R _c	C _d	Q – USBR, 1997 (L/s)	C _d – USBR, 1977
1	0,12	153,0	6,0	0,22	0,34	0,17	0,49
2	0,15	151,0	4,0	0,15	0,79	0,09	0,49
3	0,35	157,0	10,0	0,37	0,47	0,34	0,46
4	0,40	158,0	11,0	0,41	0,46	0,38	0,44
5	0,53	160,0	13,0	0,48	0,48	0,47	0,42
6	0,57	161,0	14,0	0,52	0,46	0,51	0,41
7	0,82	164,0	17,0	0,63	0,49	0,62	0,37
8	0,84	165,0	18,0	0,67	0,46	0,66	0,36
9	1,01	168,0	21,0	0,78	0,44	0,73	0,32
10	1,03	168,0	21,0	0,78	0,45	0,73	0,32
11	1,27	177,5	30,5	1,13	0,32	0,90	0,22
12	1,30	180,5	33,5	1,24	0,28	0,95	0,21
13	1,41	192,0	45,0	1,67	0,20	1,12	0,16
14	1,44	191,0	44,0	1,63	0,21	1,12	0,16
15	1,62	223,0	76,0	2,81	0,10	-	-
16	1,65	227,0	80,0	2,96	0,10	-	-

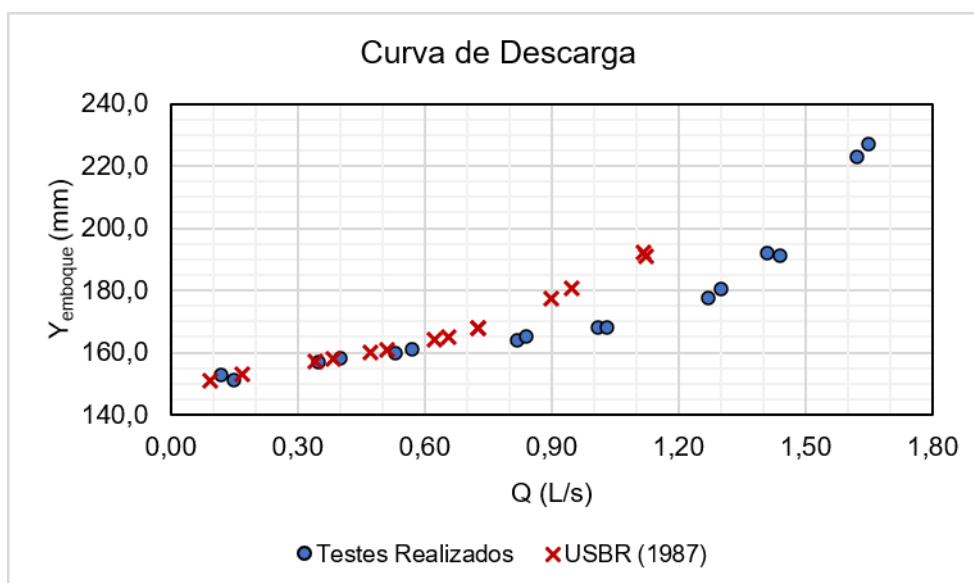


Figura 3 – Curva de descarga da tulipa.

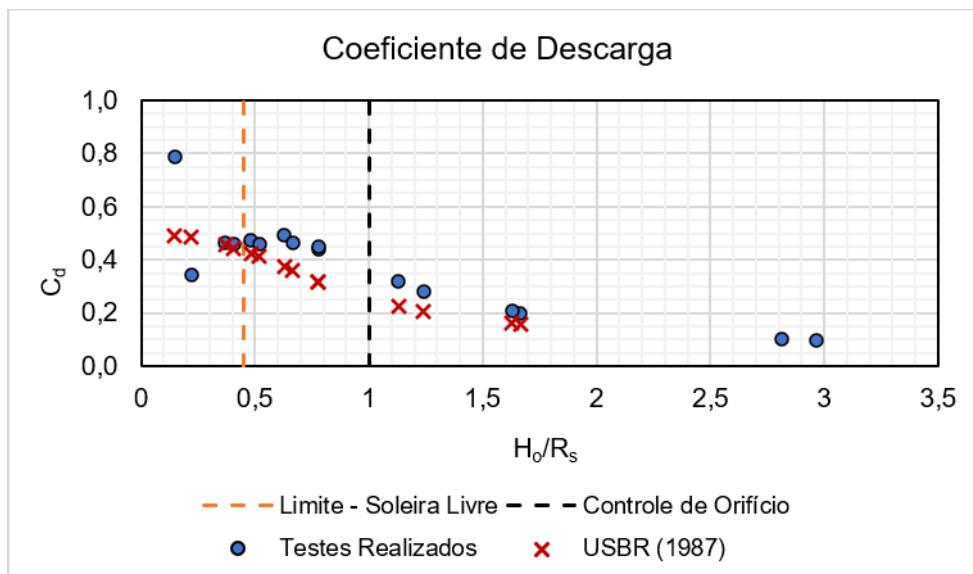


Figura 4 – Envoltória de coeficientes de descarga calculados.

A curva de descarga apresenta inflexão entre os testes 10 (1,03 L/s) e 11 (1,27 L/s), indicando a mudança de controle de escoamento de crista para o controle de garganta ou orifício. De fato, analisando os valores calculados de H_o/R_s para 10 ($H_o/R_s = 0,78$) e 11 ($H_o/R_s = 1,13$), nota-se que a soleira foi completamente submersa para o teste 11 considerando o critério de USBR (1987).

Verifica-se a tendência de redução de C_d com o aumento da carga hidráulica, conforme descrito por Wagner (1956). Os testes 1 (0,12 L/s) e 2 (0,15 L/s) apresentam comportamento discrepante dos demais, não sendo aderentes à tendência de redução do coeficiente de descarga com o aumento da carga hidráulica. Isto se dá devido a imprecisões nas medições, realizada com régua milimetrada, e às flutuações observadas no nível d'água do canal que são significativas para a medição de cargas hidráulicas baixas. Para relações de $H_o/R_s > 1$, o comportamento é mais bem definido. Descartando-se os testes 1 e 2, foi calculado um C_d médio de 0,35.

Nota-se que tanto a curva de descarga calculada pelo método USBR e o coeficiente de descarga adimensional associado a esta vazão seguem comportamentos semelhantes aos obtidos através dos testes, mas são subestimados em relação aos valores experimentais. Os valores experimentais são da ordem de até 60% superiores aos valores calculados pelo método USBR. Como possível fonte de erro, o método USBR indica que o valor de H_o deve ser calculado a partir do ponto mais alto da superfície inferior do jato (nappe), que é superior à cota do emboque da soleira circular, porém no estudo foi utilizada a cota da soleira. Ainda, o método adota ábacos de determinação do coeficiente de descarga que são fonte de imprecisão e podem interferir nos resultados e a curva adotada de C_o considera um valor de P/R_s inferior ao valor calculado no experimento.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o cálculo da curva de descarga e do coeficiente de descarga de uma tulipa implantada em modelo didático de canal. Os resultados obtidos são considerados aderentes aos comportamentos apresentados na literatura, sendo que o método apresentado pelo

USBR tende a subestimar a curva de descarga experimental em até 60%. Recomenda-se que para estudos futuros seja melhor investigada a relação entre os resultados teóricos e experimentais.

A curva de descarga apresentou inflexão quando a razão entre a carga hidráulica e o raio do tubo $H_0/R_s > 1$, indicando a alteração do controle hidráulico de soleira livre para orifício. Durante a realização do experimento, foram verificados três controles hidráulicos distintos descritos na literatura (soleira livre, controle de garganta e controle de orifício). O coeficiente de descarga da tulipa apresentou tendência de diminuição com aumento da carga hidráulica, sendo o comportamento mais bem verificado para vazões que atingem o controle de orifício.

A tendência de redução do coeficiente de descarga com o incremento da carga evidencia a complexidade hidráulica desse tipo de estrutura. A redução da eficiência da descarga para cargas hidráulicas mais altas está associada à convergência dos fluxos na entrada da tubulação vertical e da perda de carga localizada na curva de 90° implantada a jusante do emboque.

O dimensionamento e a verificação hidráulica de vertedouros do tipo tulipa devem ser realizados com cautela. Em primeiro lugar, porque os valores de coeficiente de descarga adotados para soleiras retilíneas não são aplicáveis neste tipo de estrutura. Em segundo lugar, porque comportamento da curva de descarga na região de controle de orifício (onde aumentos de carga hidráulica geram menores incrementos vazão) mostra que, uma vez submerso, o vertedouro tipo tulipa perde a capacidade de responder rapidamente a aumentos repentinos da vazão afluente. Desta forma, os dispositivos devem ser operados na faixa de escoamento livre até o controle de garganta para o amortecimento seguro de ondas de cheia em reservatórios.

Por fim, as discrepâncias identificadas para cargas hidráulicas inferiores a 10 mm (testes 1 e 2) evidenciam as limitações práticas de ensaios de laboratório. Para o canal utilizado no estudo, pequenas flutuações no nível d'água foram suficientes para causar imprecisões na medição da altura da lâmina d'água que impactaram nos resultados.

REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M.; LARA, M (2016). “*Fundamentos de Engenharia Hidráulica*”. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG;
- CHOW, V. T (1959). “*Open-Channel Hydraulics*”. New York: McGraw-Hill;
- KING, H. W.; BRATER, E. F (1963). “*Handbook of Hydraulics*”. 5th ed. New York: McGraw-Hill.
- ŞENTÜRK, F (1994). “Hydraulics of special types of spillways”. In: *Hydraulics of dams and reservoirs*. Colorado, EUA: Water Resources Publications. Cap. 5.
- U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation - USBR (1987) “*Design Of Small Dams. A Water Resources Technical Paper*”, Denver, CO, EUA, 1987;
- WAGNER, W.E (1956). “*Morning Glory Shaft Spillways: Determination of Pressure-Controlled Profiles*” ASCE, vol. 121, p. 345.