

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DA CURVA DE DESCARGA EM POÇOS VERTICAIS COM EMBIQUE TIPO TULIPA

Laura Maria Canno Ferreira Fais¹ & Ana Inés Borri Genovez²

RESUMO - Estruturas de queda com poços verticais podem ser utilizadas para drenagem urbana, dissipação de energia e como vertedores em barragens. No último caso, tem-se os vertedores com emboque tipo tulipa, formados por uma soleira circular em planta, que se liga a um túnel por meio de uma curva. A curva é um ponto crítico do dimensionamento do vertedor, pois, é onde o escoamento se deflete, causando elevadas pressões na sua parte convexa e subpressões na parte côncava. O objetivo deste trabalho é analisar as características de descarga num poço vertical com emboque tipo tulipa para verificar a influência da geometria da curva de ligação. Um estudo experimental foi feito, empregando-se o modelo do vertedor de Paraitinga, em escala 1:51,02, utilizando novas geometrias para a curva. Pôde constatar-se a influência da geometria da curva, sendo que as novas curvas resultaram em um escoamento mais regular, acompanhando o traçado da curva com uma maior vazão de afogamento. Além disso, comprovou-se que a vazão máxima de ar ocorre para, aproximadamente 1/5 da vazão líquida de afogamento, independente da geometria da curva de ligação.

Palavras chaves: **curva de ligação, poços verticais, curva de descarga**

ABSTRACT - Vertical dropshafts can be used in drainage systems, energy dissipator and as dam spillways. In this case, they are called morning glory, and consists of an horizontal circular inlet followed by a vertical shaft which joins a tunnel through a bend. The bend is a critical point in spillway design , therefore the flow deflects in this region and causes high pressures in the convex part of the bend and negative pressures in the concaves part. The objective of this paper is the analyses of flow in a vertical shaft in order to get the influence of the curve goemetry. An experimental study has been carried out, using the spillway model of Paraitinga dam, which scale was 1:51,02, using new bend geometries, to evaluate pressures flow and air entrainment. The influence of the bend geometry has been noticed, and the new curves resulted in a more regular flow, that followed the path of the curve, besides obtained a higher flow up to achieve the submergence of the spillway. The experimental study confirmed that the maximum air entrainment takes place at 1/5 the submergence liquid flow value, regardless the curve geometry.

Key words: **shaft bend, vertical dropshafts, discharge rating curve**

¹ Doutoranda da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC da Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6021, CEP 13083-852, Campinas, São Paulo, FAX: (19) 3521-2411, lmcf@terra.com.br

² Professora Associada da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC da Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6021, CEP 13083-852, Campinas, São Paulo, FAX: (19) 3521-2411, bgenovez@fec.unicamp.br

1 - INTRODUÇÃO

Estruturas de queda com poços verticais são construídas desde a antiguidade e podem ser utilizadas para várias finalidades, como, por exemplo, vertedor em uma barragem ou como parte da rede de drenagem em áreas urbanas. Estruturas de queda com poços verticais também estão sendo construídas em grandes áreas metropolitanas, com a finalidade de transportar águas pluviais da área de drenagem superficial para galerias subterrâneas. Estas podem ser longas o suficiente para descarregar as vazões em locais mais a jusante, minimizando, ou até evitando o problema de inundações em áreas urbanas.

Como vertedor de barragem, têm a função de conduzir adequadamente e com segurança a cheia de projeto, até um local a jusante da barragem, sendo responsável pela integridade e segurança da obra. Portanto, devem ser dimensionadas de modo que tenham capacidade suficiente para descarregar as vazões de enchente.

Pelo fato de ser colocado internamente no lago, independente do corpo da barragem, este tipo de vertedor é recomendado quando não há espaço suficiente para construção de um vertedor convencional, no corpo da barragem, ou para o caso de barragens de terra ou enrocamento. Pode-se, inclusive, utilizar a mesma torre para a condução da vazão para as turbinas e para descarregar vazões de cheia, posicionando as tomadas de água em níveis diferentes. Outra vantagem do vertedor tulipa é que o túnel utilizado para o desvio do rio na fase de construção da barragem pode ser aproveitado como galeria do vertedor, desde que tenha sido dimensionado adequadamente para isto.

Este trabalho tem como objetivo analisar as características de descarga num poço vertical com emboque tipo tulipa para verificar a influência da geometria da curva de ligação.

2 - CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Estruturas de queda formadas por poços verticais são utilizadas para transportar água de uma cota superior a uma inferior e já eram utilizadas nos aquedutos romanos (Chanson, 2002). Segundo Lazzari (1959), o primeiro vertedor tipo tulipa foi construído em 1896 na Inglaterra, e a partir de 1949 foram realizados estudos em modelo reduzido dos vertedores tulipa de barragens na Argélia, em Portugal e na Itália.

Os poços verticais com emboque tipo tulipa foram estudados por diversos pesquisadores que definiram as suas características particulares. Pode-se citar, assim, o estudo do Wagner (1956). Entre os autores recentes que têm feito referência a este vertedor citam-se Senturk (1994) e Novak et al. (1996). Na Figura 1 mostra-se um esquema de um vertedor tipo tulipa. A entrada é geralmente circular em planta, com um perfil vertedor tipo Creager, pois este proporciona grandes descargas

para pequenos diâmetros de crista. O poço é projetado de modo que sua seção transversal permita a passagem da vazão líquida de projeto, sem a ocorrência de depressões inaceitáveis, podendo ser vertical ou inclinado.

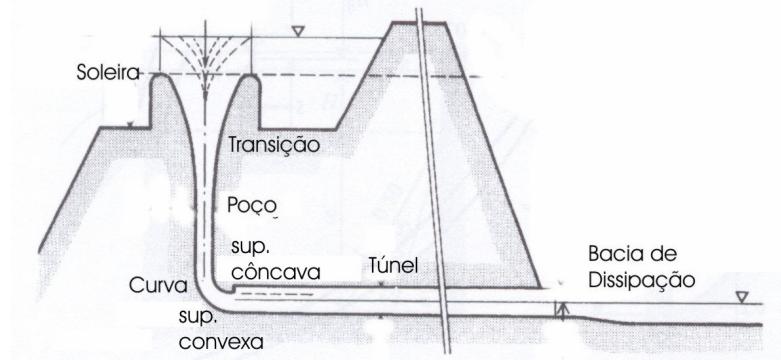


Figura 1 - Esquema de um vertedor tipo tulipa, segundo Novak et al. (1996).

A curva que liga o poço ao túnel é, geralmente, uma simples curva circular de seção e raio constantes e deve permitir a boa aderência do escoamento e permitir a passagem de materiais flutuantes que possam passar pelo poço.

A galeria usada para o desvio do rio na fase de construção da barragem pode ser usada para o túnel do vertedor, caso aquela tenha sido projetada para este fim. O túnel do vertedor deve trabalhar a seção livre ou plena, nunca deve ter os dois tipos de escoamento, pois a mudança de escoamento é acompanhada de ondas que provocam vibrações na estrutura.

Por fim, a estrutura de dissipação pode ser uma bacia convencional ou do tipo “flip bucket”, que lança o escoamento.

O dimensionamento de cada uma dessas partes de um vertedor tipo tulipa tem aspectos particulares. As grandezas para se projetar corretamente um vertedor deste tipo são: o desnível entre a cota máxima do reservatório e a do fundo da galeria de descarga, a vazão máxima a ser descarregada, a carga sobre a crista e a largura da crista. Várias investigações foram realizadas para auxiliar no projeto e dimensionamento do vertedor tulipa.

O perfil vertente tem o traçado da lâmina de água que escoa em um vertedor circular de parede delgada, como pode ser visto na Figura 2, e pode ser determinado através dos critérios estabelecidos por Wagner (1956), Lazzari (1959) e Marchi e Rubatta (1959). Castorani, di Santo e Piccini (1986) realizaram um estudo com base na norma italiana, sugerindo uma equação para o cálculo do perfil que relaciona a coordenada Y do perfil com o seu raio, que representa, neste caso, a coordenada X (ver Figura 2). Assim, o perfil vertedor pode ser calculado por:

$$Y = \frac{0,45}{h_0} (R - 0,5D)^2 \quad (1)$$

sendo Y, a coordenada do perfil, D, o diâmetro da seção de união da curva ou do poço, R, o

raio de curvatura do perfil vertente da tulipa e h_0 , a carga acima da crista do vertedor.

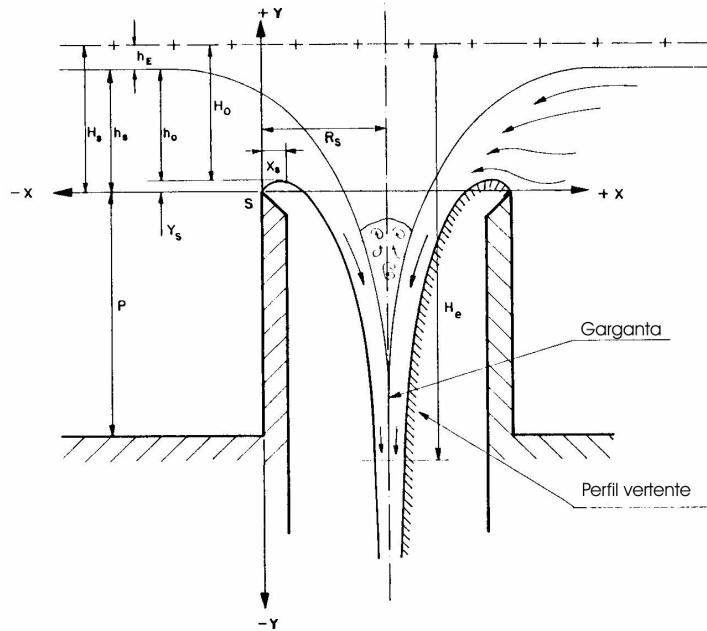


Figura 2 - Variáveis para o traçado do perfil vertente, adaptado de USBR (1987).

Além dos já citados, Viparelli (1990) também propôs um método para se determinar o perfil do vertedor. Segundo a autora, a partir dos critérios de Wagner (1956) e de Gardel (1949), pode-se definir a geometria da soleira vertente a partir dos valores conhecidos da vazão de projeto Q e da carga H_0 . Porém, Wagner não leva em consideração o coeficiente de descarga enquanto que Gardel não considera as pressões sobre o paramento do vertedor. Assim, Viparelli (1990), baseando-se nos resultados experimentais de Wagner e Gardel propõe um novo critério para o traçado do perfil do vertedor, a partir de uma vazão de projeto conhecida Q_p e de um valor característico do perfil da soleira γ , H_p ou R , sendo γ a relação entre h_0 e R , (ver Figura 2) H_p é a carga de projeto e R o raio da tulipa, pode-se definir somente um par de valores que satisfazem as condições. Por isso, este critério torna-se mais vantajoso que o de Wagner, já que, neste caso, quando são conhecidas a vazão Q e a carga H_p o cálculo de R não é direto, havendo a necessidade de tentativas.

Apesar de haver alguns estudos mais recentes, o critério apresentado pelo USBR (1987) ainda é o mais utilizado. Porém, deve-se considerar também o critério de Viparelli (1990), já que este apresenta a vantagem de se poder calcular o raio R da tulipa diretamente, sem a necessidade de tentativas.

Para unir o perfil vertente ao poço vertical é necessária uma transição, já que o poço é construído com diâmetro constante, para os vertedores de alta queda. A transição deve possuir uma geometria que permita um escoamento o mais aderente possível à estrutura, diminuindo assim o efeito das depressões que ocorrem nesta região. O USBR (1987) propõe uma equação para calcular o raio mínimo necessário da transição para escoar a vazão de projeto sem estrangulamento. Assim:

$$R_t = 0,275 \frac{Q^{0.5}}{H_a^{1/4}} \quad (2)$$

sendo Q a vazão descarregada, R_t o raio do jato e H_a a carga total até a garganta.

Segundo Genovez (1997) o poço vertical é projetado para escoar a vazão de dimensionamento sem restrições. Para uma seção circular de diâmetro D, sendo H_N a carga em uma seção N, nenhuma seção do poço vertical deverá ter diâmetro inferior ao determinado através da equação:

$$D^2 \geq \frac{Q}{\pi \sqrt{2gH_N}} \quad (3)$$

Por fim, a vazão é descarregada através do túnel, até a bacia de dissipação. Para dimensionar o túnel, considera-se que este e o poço vertical sejam construídos com a seção transversal constante, por razões práticas.

Segundo Castorani, Santo e Piccini (1986), a norma italiana especifica que os vertedores tipo tulipa devem ser dimensionados de maneira que a cota de afogamento resulte superior àquela do máximo nível do reservatório aumentado de 2/3 da borda livre líquida. O dimensionamento é feito impondo-se a condição de descarga livre na galeria e afogamento para a nova carga, para a vazão máxima.

A partir da imposição da norma, no que diz respeito à carga de projeto, adota-se um procedimento de cálculo para avaliar simultaneamente a viabilidade da obra, ligando a determinação do raio da crista R ao diâmetro D do túnel de descarga. Esta relação entre R e D é dada por:

$$R^2 = \frac{\eta a^2 D^4 (H^* + h' + 0,67 F_r - a^* D)}{4\pi^2 \mu^2 (h' + 0,67 F_r)^3 \left(1 + \frac{2\eta a^2 b L^*}{C^2 d^3 D}\right)} \quad (4)$$

sendo R o raio da tulipa, C o coeficiente de resistência, D o diâmetro do túnel, F_r a borda livre, h' carga sobre a crista para a vazão de projeto, H^* o desnível entre a crista do vertedor e a cota de fundo da galeria, L^* o comprimento da galeria, b o perímetro molhado do túnel referido ao diâmetro D, d' área do túnel referida ao quadrado do diâmetro D, a a área da seção de controle referida ao quadrado do diâmetro D, a^* altura da lâmina d'água referida ao quadrado do diâmetro D, η coeficiente de perda de carga na curva, μ coeficiente de descarga.

De acordo com a norma italiana, o dimensionamento do vertedor é feito considerando que este trabalhará afogado para a vazão máxima, que é uma condição não favorável à segurança da barragem, pois, a partir da vazão de afogamento, há um acréscimo grande do nível no reservatório para um pequeno acréscimo na vazão. Porém, nesta situação há um aumento no diâmetro do túnel e, consequentemente na capacidade de vazão, o que justificaria a adoção desse critério e o aumento no custo de construção. Porém, vale lembrar a necessidade de vertedores complementares, caso exista

a possibilidade de ocorrência de vazões maiores do que a máxima.

Um dos problemas no dimensionamento de um vertedor tipo tulipa é a curva que liga o poço vertical ao túnel, já que este é um ponto crítico, pois é nessa região que o escoamento sofre deflexão, dando origem a problemas de elevadas pressões na parte externa da curva e depressões na parte interna. Não existe ainda um critério específico para o cálculo do raio da curva, somente algumas recomendações. Além disso, poucos estudos experimentais foram realizados, para que se pudesse determinar uma geometria adequada para a curva.

O poço e o túnel devem ter o mesmo diâmetro, sendo que o túnel deve permitir a passagem do escoamento ar-água, sem que aconteça a mudança do tipo de escoamento de livre para forçado, evitando assim, problemas no funcionamento do vertedor devido a mudanças na seção de controle. Deve-se considerar ainda que sua seção transversal seja suficiente para que o escoamento seja livre para todo o intervalo de vazões, evitando a possibilidade de vibrações devido à mudança de controle da crista, da garganta ou da curva para o túnel. Segundo o USBR (1987), a seção disponível para o escoamento de água deve ser igual a 75%. Genovez e Genovez (2002) citam que o escoamento deve preencher até 2/3 da seção do túnel, com o objetivo de deixar espaço para permitir a passagem de ar. Genovez e Genovez (2000) indicaram aumentos de 29% a 97,5%, nos diâmetros dos túneis de vertedores tipo tulipa do Brasil caso fosse adotado o critério da norma italiana.

Pode-se encontrar uma revisão do dimensionamento de cada parte do vertedor tipo tulipa nos trabalhos de Genovez (1997) e Fais (2007).

Atualmente, com o grande desenvolvimento da computação, existe a possibilidade de se utilizar modelos matemáticos para simular escoamentos com certa precisão, tornando possível o estudo dos vários tipos de escoamento que aparecem em cada uma das partes de um vertedor tipo tulipa. Porém, para que essas simulações sejam feitas, são necessárias, às vezes, algumas simplificações, podendo levar a alguns erros. Portanto, o uso conjunto dos modelos matemáticos e físicos é importante, pois é possível, num primeiro momento, fazer as simulações matematicamente e, a partir daí, utilizar o modelo físico nas situações onde não há precisão da simulação.

3 - CURVA DE DESCARGA

A carga hidráulica sobre a entrada do vertedor pode originar diferentes tipos de escoamento, como se vê na Figura 3. A vazão é descarregada pela crista circular e segue pelo poço, podendo haver o arraste de ar. Na curva o escoamento sofre deflexão e segue através do túnel, a superfície livre. Mussali (1969), Ribeiro e Tomás (1976), USBR (1987) também descreveram as características do escoamento em um vertedor tipo tulipa.

Na Figura 4 mostra-se a curva de descarga do vertedor, adaptado de USBR (1987). Observa-

se que, para pequenas cargas, a vazão aumenta consideravelmente para pequenos acréscimos de carga. Neste caso, a transição trabalha parcialmente cheia e a água tende a se concentrar nas paredes laterais do poço.

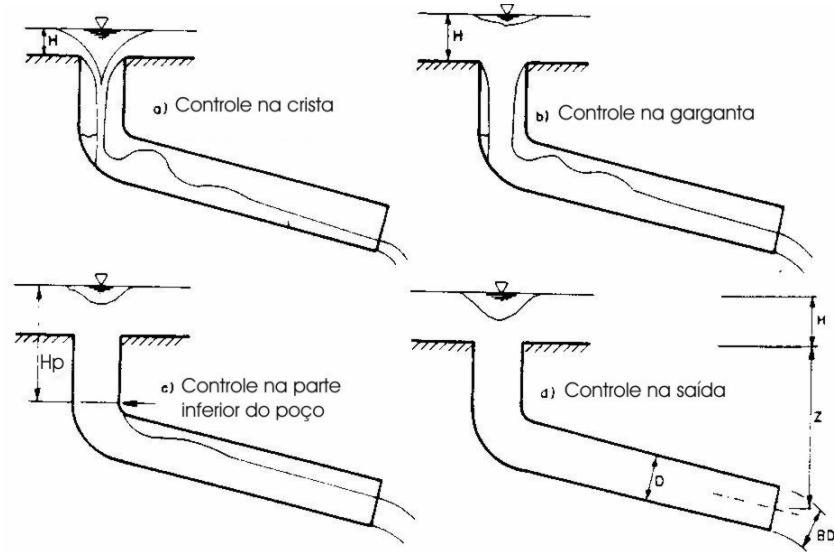


Figura 3 - Tipos de escoamento num vertedor tulipa, segundo Şentürk (1994).

Conforme se aumenta a carga na crista, o escoamento engrossa e poderá preencher toda a seção transversal. O ponto, a partir do qual o escoamento passa a ser feito a seção plena, é denominado de garganta. Devido ao encontro dos filetes d'água que caem, forma-se acima da garganta uma protuberância chamada de “boil” pela literatura inglesa. Ao se aumentar a carga, tanto a garganta como o “boil” sobem, até submergirem a crista. Assim, a transição passa a funcionar a seção plena, o poço vertical escoará a seção parcialmente plena e o controle passa a ser feito na garganta.

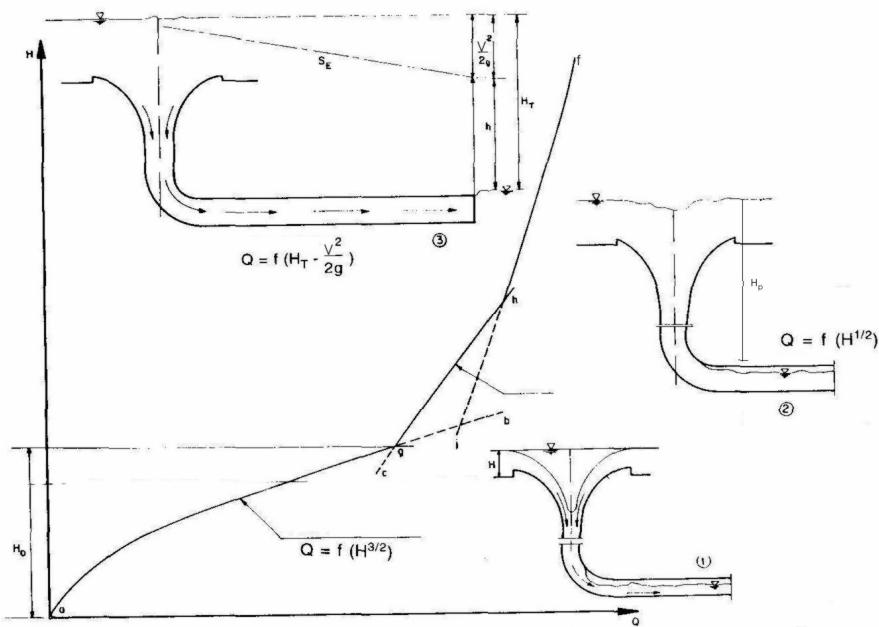


Figura 4 - Curva de descarga do vertedor tipo tulipa adaptado de USBR (1987).

A partir do ponto g da Figura 4, há um grande acréscimo da carga para um pequeno aumento da vazão, alterando a curva de descarga. Essa vazão, a partir da qual há uma mudança na inclinação da curva de descarga, corresponde à vazão de afogamento.

Com o progressivo aumento da vazão, o poço passa a escoar a seção plena e o controle desloca-se para a parte inferior do poço. Para cargas ainda maiores, o escoamento preencherá a parte interna da curva até atingir a saída do túnel.

Segundo Mussali (1969), as características do escoamento em um vertedor tipo tulipa dependem da dimensão dos seus diferentes elementos, assim, o diâmetro da crista, a geometria da transição e o diâmetro do poço vertical podem ser dimensionados para que o vertedor descarregue maior ou menor vazão.

O tipo de controle dependerá da finalidade da obra. Se o propósito é deixar passar todo o excesso d'água sem que este passe por cima da crista da barragem, o vertedor deverá ser projetado para funcionar com o controle na crista para toda a faixa de vazões. Por outro lado, se o propósito é o de limitar a vazão a jusante da barragem, o extravasor deverá ser projetado para funcionar livre com pequenas cargas e afogado para as grandes cargas.

Um dos problemas deste tipo de vertedor é quando a vazão de afogamento ocorre antes da vazão máxima de projeto, pois se pode ter o galgamento da barragem e sua consequente destruição. Além disso, as dimensões do poço e da curva devem ser tais que permitam a passagem de objetos que possam obstruí-los. Um outro problema que pode ocorrer é a vibração, já que as mudanças das seções de controle podem ser repentinhas e acompanhadas de vibrações.

A partir das informações apresentadas pode-se notar que o vertedor tipo tulipa pode ser uma boa opção tanto para descarregar vazões de enchente, como para limitar as vazões a jusante, já que, a partir da vazão de afogamento, não há grandes acréscimos de vazão, mesmo com o aumento da carga sobre a crista do vertedor. Além disso, devido à sua forma tipo revolução, as espessuras são pequenas quando comparadas com outros tipos de vertedores, gerando economia na execução.

4 - ESTUDO EXPERIMENTAL

Visto que a curva de ligação entre o poço e o túnel é um ponto crítico no escoamento em uma estrutura formada por poços verticais, e que há poucas recomendações a respeito de critérios de projeto, foi realizado um estudo experimental para verificar se a mudança na geometria da curva poderia contribuir para uma melhora no escoamento. Para a realização do estudo experimental foi empregado o banco de ensaio existente no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, segundo Genovez (1997). Foi utilizado o modelo do vertedor tipo tulipa da Barragem de Paraitinga,

construído na escala 1:51,02.

Foram analisadas uma curva de raio variável C2 (projeto original), conforme CTH (1971), uma curva com o perfil clotóide (C3) e a curva C4, conforme sugestão de Souza (2004). A curva C2, do protótipo, já havia sido estudada experimentalmente na escala 1:25, avaliando com recursos da época, somente os valores de pressão média. As curvas de ligação C2, C3 e C4 são de acrílico para se poder visualizar o escoamento no seu interior. Fais (2007) apresenta o equacionamento das novas geometrias ensaiadas, C3 e C4.

Na Figura 5, mostra-se a superposição das curvas ensaiadas. Nota-se que os traçados das curvas C3 e C4 são mais suaves que o da curva C2. As cotas de início das curvas são diferentes, pois, para que se pudesse traçar a espiral da curva C3, era necessário um espaço maior do que o do projeto original do vertedor, optando-se por incorporar o poço para se traçar adequadamente a curva.

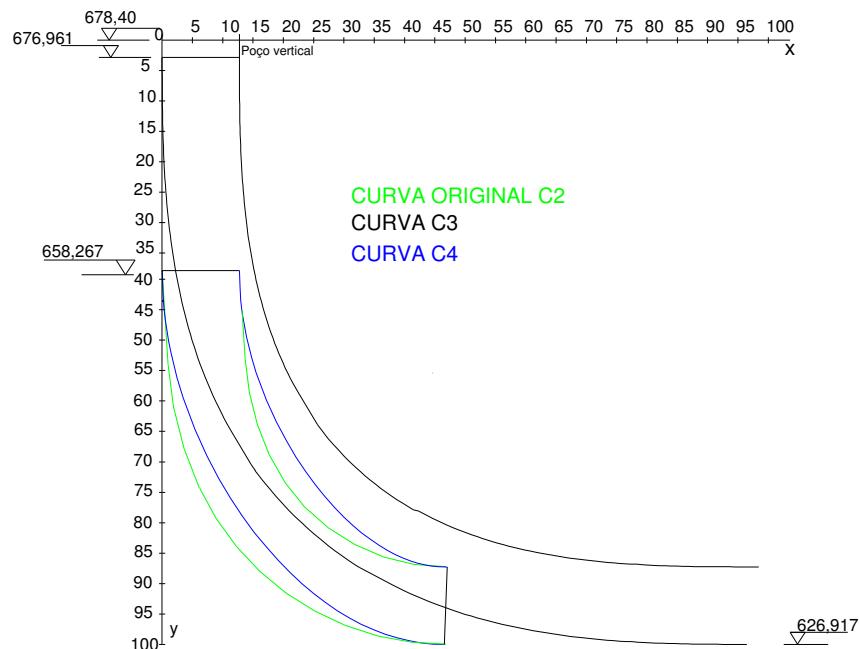


Figura 5 - Superposição das curvas ensaiadas.

Para o túnel de descarga do vertedor foi empregado tubo de PVC comercial. A transição final e o divergente foram construídos em plástico reforçado com fibra de vidro, conforme Genovez (1991). A medição dos níveis de água dentro do reservatório foi feita por meio de duas pontas limimétricas (0,80 m, precisão de 0,1mm) instaladas diametralmente opostas, visando verificar uma possível desuniformidade na aproximação da água ao modelo da tulipa.

A medição das vazões foi feita com o auxílio de medidor ultra-sônico instalado na tubulação de alimentação (system 990 Uniflow que opera na faixa de diâmetro de 0,0635m a 9,144m, precisão de 0,1 L/s), tomando-se o cuidado de garantir o escoamento a seção plena na tubulação onde está fixado o ultra-som (já que o medidor ultra-sônico não consegue medir vazões, quando a seção da

tubulação não está completamente cheia de água). O medidor ultra-sônico foi aferido com o uso de um medidor tipo Venturi previamente calibrado com caixa volumétrica.

Para medir o arraste de ar foi usado um anemômetro With Lambrecht nº 1400, (com velocidade mínima de 0,50 m/s e máxima de 50,00 m/s, temperatura inferior -30°C e superior 100°C e diâmetro exterior do aro 0,108m). O anemômetro havia sido calibrado em túnel de vento e foi instalado numa campânula, cujo diâmetro menor é 0,18m e o maior 1,00m, definidos por Genovez (1991), de forma que as perdas de carga na tubulação de medição não fossem influenciadas pelo diâmetro adotado na seção de medida.

Na primeira etapa foi feito o levantamento da curva cota x vazão do vertedor e a determinação da vazão de afogamento, a fim de se verificar se esta podia sofrer alguma alteração devido à mudança na geometria da curva. Assim, aumentava-se gradativamente a vazão líquida, e media-se a vazão de ar e a altura do nível de água com relação à crista da tulipa. A vazão foi aumentada até atingir o afogamento da tulipa.

A partir do procedimento descrito, iniciou-se a realização dos ensaios.

5 - RESULTADOS

De acordo com o procedimento apresentado, foram iniciados os ensaios.

Para cada uma das curvas a serem ensaiadas foi determinada a curva de descarga cota H x vazão Q e os resultados podem ser vistos na Figura 6, junto com a curva do protótipo CTH, transformada na escala de Froude.

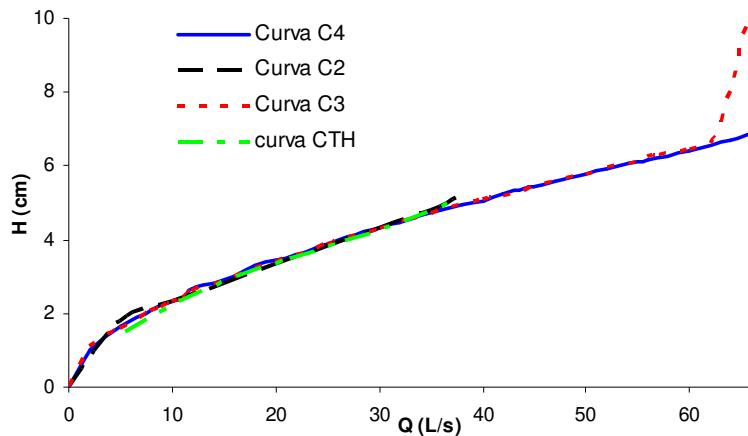


Figura 6 - Curva cota vazão para as curvas ensaiadas, modelo escala 1:51,02.

A tulipa afoga com uma vazão de aproximadamente $1171 \text{ m}^3/\text{s}$ para a curva C3 e $1246 \text{ m}^3/\text{s}$ para a curva C4, em valores de protótipo, o que representa um aumento de 27% e 35%, respectivamente, na vazão de projeto estabelecida pelo CTH (1971) para a curva policêntrica C2,

que é de 677 m³/s.

Na Figura 7 mostra-se a formação do “boil” que ocorreu para uma vazão de, aproximadamente, 1150 m³/s (em valores de protótipo), com a curva clotóide C3.



Figura 7 - Formação do “boil” na tulipa com a curva C3. Vazão de 1150 m³/s, em valores de protótipo.

Pode-se notar que a utilização das curvas C3 (clotóide) e C4 permitiu um aumento da vazão de afogamento. Desta forma, conclui-se que a geometria da curva é realmente importante, pois influencia o valor da vazão máxima descarregada.

Um dos problemas ao se estudar uma estrutura hidráulica é o chamado efeito de escala, ocasionado pela impossibilidade de redução das forças de viscosidade e tensão superficial, fazendo com que seus efeitos sejam exagerados no modelo. Portanto, ao se construir um modelo em escala de Froude, deve-se observar valores mínimos do número de Reynolds e de Weber, para verificar se os efeitos da tensão superficial e da viscosidade podem ser desprezados. Assim, pode-se dizer que o efeito de escala em modelos construídos segundo a escala de Froude pode ser evitado, desde que os efeitos da viscosidade, da tensão superficial e da compressibilidade do escoamento possam ser desprezados. Para isso, no caso de canais vertedores deve-se ter número de Reynolds maior do que 10⁵ (Kobus, 1982), resultado coincidente com o de Genovez (1991) para poços verticais e número de Weber maior do que 500 (Pinto, 1982).

A partir da Figura 6, nota-se que, no início do escoamento, quando as vazões são baixas e, conseqüentemente a altura de água acima da crista do vertedor, há uma diferença de até 7% entre os valores de vazão para as curvas C3 e C4 e a curva CTH, para a mesma altura de água. Binnie 1938), citado por Sarginson (1984) também encontrou diferenças de até 6% em modelos menores, quando transformados na escala Froude, evidenciando a ocorrência do efeito de escala.

A vazão em um vertedor tipo tulipa com escoamento livre pode ser calculada através da expressão:

$$Q = C \cdot 2\pi R \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad (5)$$

sendo C o coeficiente de descarga, R o raio da tulipa, g a aceleração da gravidade e H a carga sobre o vertedor.

Segundo Sarginson (1984) um dos fatores que contribuem para o aparecimento do efeito de escala em modelos de vertedores é a presença de uma camada limite do escoamento na crista do vertedor, proporcional ao seu raio. Em dois modelos geometricamente semelhantes, a espessura da camada limite é proporcionalmente maior no modelo menor. Para que o efeito de escala não ocorra, é necessário que essa espessura seja desprezível quando comparada ao nível de água na crista do vertedor. Neste caso, a Equação 5, utilizada para calcular a vazão descarregada pelo vertedor é válida.

Para a correção no valor da vazão devido à ocorrência do efeito de escala, Sarginson (1984) apresenta uma equação para a correção no valor do coeficiente de descarga C. Assim, tem-se:

$$C = 1,81 + 4,22/W \quad (6)$$

sendo $W = \rho g H^{3/2}/\sigma$ o número de Weber, ρ a massa específica da água, g a aceleração da gravidade, H o nível de água na crista do vertedor e σ a tensão superficial da água.

Assim, aplicando a Equação 6 para a correção dos valores do coeficiente de descarga para a curva C3 (para vazões até $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$) e comparando com os valores da curva de descarga obtida no modelo CTH transformado na escala de Froude, tem-se uma nova curva corrigida, como se mostra na Figura 8. Nota-se que, após a correção, a curva está bem próxima à curva CTH, o que comprova a ocorrência do efeito de escala, principalmente para as vazões menores.

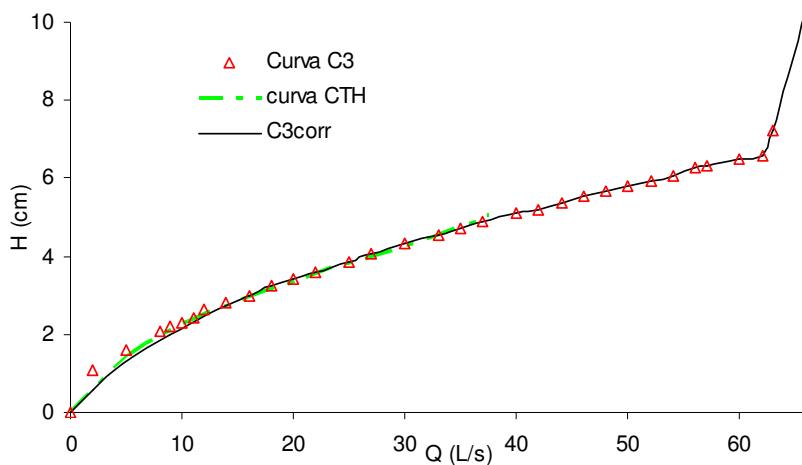


Figura 8 - Curva de descarga corrigida no modelo.

Na Figura 9 pode-se ver um gráfico do coeficiente de descarga em função de Y/R construído a partir dos resultados de Rubatta (1962) junto com os obtidos neste trabalho. De acordo com o autor, a variável Y é a coordenada medida entre a crista do vertedor e o ponto em que o perfil da soleira vertedora encontra o eixo vertical da tulipa. Nota-se, a partir do gráfico que os pontos seguem a mesma tendência, e esta não é influenciada pela mudança na geometria da curva. Além

disso, para a vazão de projeto, que é de 677 m³/s, tem-se um coeficiente de descarga de, aproximadamente 0,47, que é da mesma ordem de grandeza do encontrado por Viparelli(1990) e dos valores obtidos pelo USBR (1987).

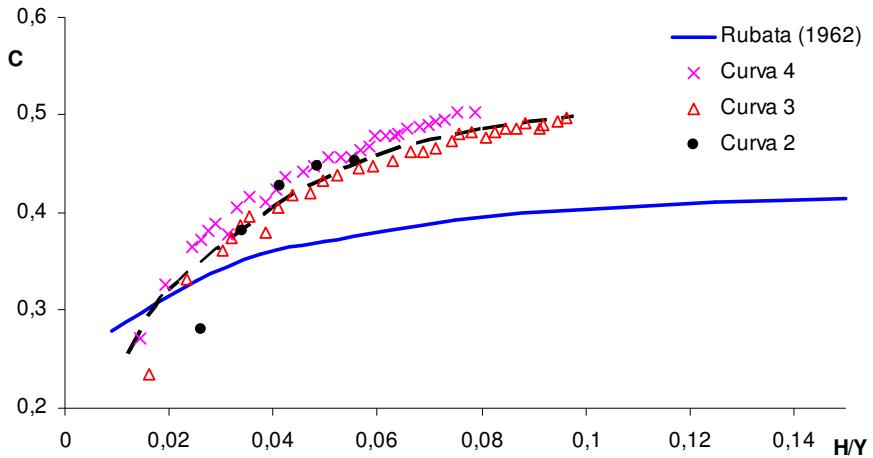


Figura 9 - Gráfico do coeficiente de descarga C em função de H/Y .

Pode-se observar também, no gráfico da Figura 9, que para valores de H muito pequenos, os pontos estão distantes dos demais, o que evidencia novamente a ocorrência do efeito de escala. Além disso, o perfil do vertedor utilizado neste estudo tem raio de 0,265m e um comprimento de 0,686m, diferente do perfil avaliado por Rubatta (1962), com raio igual a 0,25m e um comprimento de 0,20m, o que explica os valores maiores encontrados neste trabalho para o coeficiente de descarga.

Como as curvas foram feitas em acrílico, foi possível visualizar o escoamento em seu interior. Na Figura 10 mostra-se o esquema do tipo de escoamento que ocorre nas curvas de ligação poço-túnel.

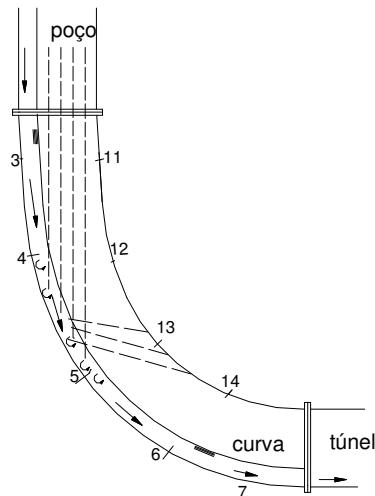


Figura 10 - Representação esquemática do escoamento nas curvas de ligação poço-túnel, segundo Fais (2007).

Observa-se, através da Figura 10, que o escoamento desce aderindo às paredes do poço, e outra parte cai livremente pelo interior do poço, sofrendo uma deflexão na curva, num ponto próximo à tomada T5. Nota-se que neste ponto, forma-se uma espécie de turbilhão, com um escoamento bastante desordenado. Na curva, o escoamento desce pela parte convexa e forma uma espécie de colchão para os filetes de água que caem pelo poço. A parte côncava da curva fica sem escoamento, exceto pelos jatos de água que atingem as tomadas T13 e T14. Esses jatos são resultado da deflexão do escoamento, que se faz aproximadamente a 90°.

Nas curvas com a nova geometria (C3 e C4), o escoamento era parecido com o que acontecia na curva C2 (policêntrica), exceto pelo fato de haver uma lâmina de água muito fina na parte côncava da curva, mesmo para vazões menores. Além disso, o escoamento acompanhava mais o traçado da curva na parte convexa. Visualmente, notou-se que o escoamento é melhor nas curvas C3 e C4 do que na C2. Esta nova situação novamente comprova que a alteração na geometria da curva permite um melhor escoamento no vertedor, contribuindo também com a segurança na operação deste tipo de vertedor.

5.1 - Arraste de ar no núcleo

A medição do arraste de ar foi feita de acordo com a metodologia apresentada, até chegar à vazão de afogamento da tulipa.

Para verificar se havia semelhança nos modelos, foi calculado o número de Weber, além do número de Mach, para verificar a compressibilidade do escoamento do ar. A partir dos resultados, verificou-se que o número de Mach é sempre menor do que 0,2, podendo, portanto, o escoamento do ar ser classificado como incompressível.

Na Tabela 1 mostram-se alguns valores da vazão de ar arrastado, para cada uma das curvas ensaiadas.

Tabela 1 - Valores característicos de vazão de ar Q_a e de vazão líquida Q .

C2		C3		C4	
Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q_a (m^3/s)
0,0073	0,0192	0,002	0,0198	0,002	0,0154
0,0200	0,0269	0,0121	0,030	0,016	0,0318
0,03676	0,0151	0,057	0,005	0,056	0,0027

Apesar de as novas curvas arrastarem mais ar do que a curva original do vertedor, a vazão de afogamento também é maior. As vazões de ar calculadas apresentam uma incerteza de $\pm 1,5\%$.

Para Genovez e Genovez (2002), na fase de dimensionamento é necessário conhecer a vazão

líquida Q , para a qual acontecerá a máxima vazão de ar, Q_a . A curva de arraste de ar de um vertedor tipo tulipa apresenta três pontos característicos. Para $Q=0$, a vazão Q_a é nula; para a vazão líquida máxima Q_{max} igual à vazão de projeto Q_0 a vazão Q_a é nula e, por último, o valor máximo da vazão de ar $Q_{a,max}$ que tem lugar para uma vazão Q . A maior quantidade de ar arrastado não coincide com a máxima vazão líquida. Os pontos característicos serão determinados segundo o desenvolvimento de Genovez (1991).

Considerando a vazão de ar confinada ao núcleo, sem se misturar à vazão líquida, a velocidade máxima de ar no núcleo seria V_{lim} e a correspondente vazão $Q_{a,lim}$ seria:

$$Q_{a,lim} = \left(V_{lim} \frac{\pi D^2}{4} \right) - Q \quad (5)$$

sendo $Q_{a,lim}$ a vazão de ar máxima que pode ser arrastada, V_{lim} a velocidade máxima do ar no núcleo, D o diâmetro do poço e Q a vazão líquida.

A velocidade V_{lim} pode ser colocada como igual a:

$$V_{lim} = \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/3} \left(\frac{Q}{\pi D} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Substituindo a expressão V_{lim} na Equação 5 obtém-se:

$$Q_{a,lim} = \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/3} \left(\frac{Q}{\pi D} \right)^{1/3} - Q \quad (7)$$

Admitindo um coeficiente de atrito constante, obtém-se o valor da vazão líquida Q para o qual acontece o valor nulo de Q_a , que resulta igual a:

$$Q = \left[\frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/3} \frac{1}{(\pi D^{1/3})} \right]^{3/2} \quad (8)$$

O valor da vazão líquida para o qual se tem o máximo da vazão de ar, $Q_{a,max}$ é obtido para $dQ_a/dQ=0$; desta forma resulta igual a:

$$Q = \left[\frac{1}{3} \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{8g}{f} \right)^{1/3} \frac{1}{(\pi D^{1/3})} \right]^{3/2} \quad (9)$$

A vazão de ar é nula quando a vazão líquida é a vazão de afogamento Q_s . Relacionando as equações 8 e 9 , obtém-se o valor da vazão líquida Q para a qual a vazão de ar é máxima, assim, segundo Genovez e Genovez (2002) tem-se:

$$Q = \frac{1}{5} Q_s \quad (10)$$

Na Figura 11 mostra-se a relação entre Q_a/Q_{amax} em função de Q/Q_0 apresentado em Genovez (1991), junto com os resultados obtidos neste trabalho.

Observando o gráfico nota-se que os resultados experimentais comprovam o valor teórico de que a vazão máxima de ar ocorre para uma vazão líquida de, aproximadamente 1/5 da vazão de

afogamento, mesmo para as novas geometrias.

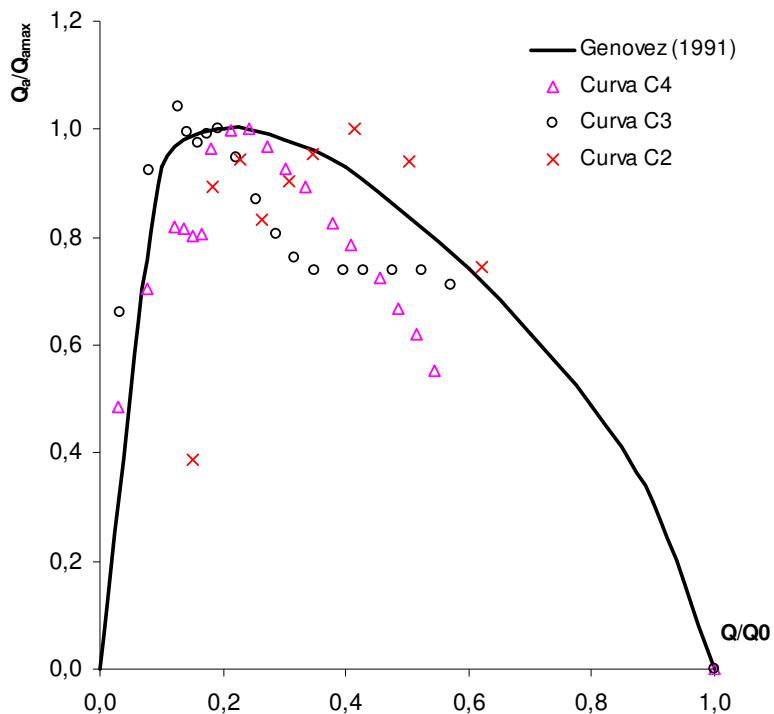


Figura 11 - Gráfico de Q_a/Q_{amax} em função de Q/Q_0 .

Genovez (1997), Ferreira e Genovez (2005) e Fais (2007) apresentam equações para se determinar a máxima vazão de ar arrastado, em função da vazão líquida. É importante que a vazão de ar seja calculada para verificar se há a necessidades de estruturas que permitam a passagem da vazão de ar no escoamento.

6 - CONCLUSÕES

Estruturas de queda formada por poços verticais são usadas desde a antiguidade, e são boas opções em sistemas de drenagem de áreas urbanas e como vertedores de usinas hidrelétricas, pois, não necessitam de grandes espaços para a sua construção.

Essas estruturas são formadas por uma entrada (que no caso de vertedores pode ter emboque tipo tulipa), à qual se segue um poço, que se liga a um túnel através de uma curva. Esse túnel conduz a vazão até a bacia de dissipação.

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que o vertedor tipo tulipa pode ser utilizado com segurança, já que a simples alteração na geometria da curva que liga o poço ao túnel possibilita que o vertedor descarregue uma vazão maior antes de atingir o afogamento. No caso deste vertedor ser utilizado para regular as vazões a jusante, uma vazão de

afogamento maior permite que o reservatório armazene uma quantidade de água maior.

Para o estudo do escoamento em estruturas hidráulicas a partir de modelos físicos, deve-se observar valores mínimos do número de Reynolds, Weber e Mach, para que se possa evitar o efeito de escala. Foi apresentada uma equação para corrigir valores de vazão na curva de descarga, que podem ocorrer devido ao efeito de escala. Pôde-se verificar ainda que, também com as novas curvas a máxima vazão de ar arrastado ocorre para uma vazão líquida igual a 1/5 da vazão de afogamento. A partir desse resultado, pode-se utilizar equações já apresentadas em estudos anteriores para se determinar a máxima vazão de ar arrastado, e dimensionar as estruturas de queda formadas por poços verticais, de modo que eles operem de maneira eficiente e com segurança.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - FCTH pelo auxílio na execução das curvas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento parcial desta pesquisa (FAPESP, processo 02/10348-0).

BIBLIOGRAFIA

CASTORANI, A., Di SANTO, A. e PICCINI, A.F. *Alcune considerazioni sul proporzionamento degli sfioratori a Cálice*. L'Energia Elettrica, n. 6, p. 238-246, 1986.

CHANSON, H. *An experimental study of Roman dropshaft hydraulics*. Journal of Hydraulic Research, v. 40, n. 1, p. 3-12, 2002.

EUA - Bureau of Reclamation - **Design of Small Dams**. Washington, D.C., 1987

FAIS, L.M.C.F. *Análise Experimental da Curva de Ligação Poço-Túnel em Vertedores com Emboque Tipo Tulipa*. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC da UNICAMP para obtenção do título de Doutor. Campinas, 2007.

FERREIRA, L.M.C e GENOVEZ, A.I.B. *Análise do Arraste de Ar em Poços Verticais com Diferentes Tipos de Emboque*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Paraíba. 20 a 24 nov 2005.

GARDEL, A. *Les évacuators des crues en déversoir circulaires*. Bulletin Tech. de la Suisse Romande, n. 27, 1949.

GENOVEZ, A. I. B. *Estudo do efeito de escala no arrastamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa*. Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor em Engenharia. São Paulo, 1991.

_____. *Determinação do comprimento limite no estudo do arrastamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa.* Tese apresentada à FEC da UNICAMP para obtenção do título de Livre Docente. Campinas, 1997.

GENOVEZ, A. I. B., GENOVEZ, A. M. *Considerações sobre o projeto dos vertedores com emboque tipo tulipa.* In: Congreso Latinoamericano de Hidráulica, XIX, 2000, Córdoba. **Tomo II**, Córdoba, 22 al 27 oct 2000, p. 673-680.

_____. *Critérios de Dimensionamento para Poços Verticais com Emboque Tipo Tulipa.* In: Congresso da Água, 6º, 2002, Porto. vol. 01, Porto: Associação portuguesa de Recursos Hídricos, p. 1-10.

KOBUS, H. Fundamentals. In: _____ *Hydraulic Modelling.* German Association for Water Resources an Land Improvement, Bulletin 7, 1980, Cap. 1.

LAZZARI, E. *Ricerca sperimentali sugli sfioratori a calice.* In: Convegno di Idraulica e Construzioni Idrauliche, 6º, 1959, Padova, Itália. **Atti B8**, Padova, 1959, 11p.

MUSSALLI, Y. G. *A study of flow conditions in shaft spillway.* Atlanta, EUA, 1969, 158p.

NOVAK, P. et al. *Hydraulic Structures.* Ed. E & FN Spon, UK, 1996.

PINTO, N. L, NEIDERT, S.H. *Model-prototype conformity in aerated spillway-flow.* In: International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures. 1982, Coventry, England sep 22-24, 1982.

RIBEIRO, A.A. e TOMAS, T. D. L. G. *Descarregadores em poço.* Porto, 1976.

RUBATTA, A. *Gli sfioratori a cálice. Conclusione di uma ricerca sperimentale.* L'Energia Elettrica, n. 2, p. 109 – 119, 1962.

SÃO PAULO (Estado). DAEE – Centro Tecnológico de Hidráulica. *Extravasor Paraitinga. Estudo em Modelo Reduzido da Barragem de Paraitinga.* Relatório Global, julho 1971, revisto em nov. 1977. São Paulo, CTH, 1977.

SARGINSON, E. J. *Scale effects in model tests on weirs.* In: Symposium on scale effects in Modelling Hydraulic Structures, 1984, Esslingen, Germany, 1984.

ŞENTÜRK, F. *Hydraulics of special types of spillways.* In: _____ *Hydraulics of dams and reservoirs.* Colorado, EUA: Water Resources Publications, 1994. Cap. 5.

VIPARELLI, R. *Proporzionamento di un imbocco a calice.* In: XXII Congresso di Idraulica e Construzioni Idrauliche, XXII, 1990, Cosenza, Itália. Cosenza, out 1990, p51-63.

WAGNER, W. E. *Morning glory shaft spillways: Determination of pressure-controlled profiles.* Transactions ASCE, v.121, p. 345-368, 1956.