

Pressões Médias e Flutuantes Devidas ao escoamento em uma Curva de Concordância Vertical entre Vertedouro e Canal Horizontal – Estudo Experimental

Mauricio Dai Prá, Gilberto Loguércio Collares

Centro de Desenvolvimento Tecnológico/Engenharia Hídrica – Universidade Federal de Pelotas – UFPel
mdaipra@gmail.com, gilbertocollares@gmail.com

Alexandre Augusto Mees Alves, Marcelo Giulian Marques

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
alexandremees@gmail.com, mmarques@iph.ufrgs.br

Recebido: 03/09/11 – revisão: 14/11/11 – aceito: 08/03/12

RESUMO

As curvas de concordância vertical têm por objetivo proporcionar a transição do escoamento de canais com distintas declividades de montante e jusante, de forma a atenuar esforços hidráulicos que ocorreriam caso essa mudança de declividade ocorresse de forma brusca. Em estruturas hidráulicas descarregadoras de barragens as curvas de concordância vertical apresentam-se como solução para o encaminhamento do fluxo de alta velocidade, orientando-o no sentido longitudinal da bacia de dissipação.

A avaliação das pressões médias e flutuantes induzidas por curvas de concordância vertical são avaliadas neste trabalho a partir da consideração das componentes de aceleração centrífuga induzidas ao escoamento pela curva, bem como a propagação destes efeitos médios e flutuantes a jusante na estrutura de dissipação.

Palavras-Chave: estruturas hidráulicas, curva de concordância vertical, flutuação de pressão.

INTRODUÇÃO

As curvas de concordância vertical em obras hidráulicas têm como principal objetivo promover a transição do escoamento entre canais de distintas declividades sem que tal mudança de geometria acarrete em esforços hidráulicos indesejáveis do ponto de vista estrutural.

No caso de estruturas de descarga de barragens, as curvas de concordância localizadas junto ao pé de vertedouros executam essa função de transição do escoamento, encaminhando fluxos de alta velocidade, oriundos do perfil vertente de forte declividade, em direção à bacia de dissipação plana e horizontal.

Este trabalho foi desenvolvido a partir da proposição de Dai Prá (2011) que prevê a identificação dos esforços hidrodinâmicos em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, análise esta que passa pela identificação da influência hidráulica da curva de concordância vertical.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em escoamentos a superfície livre ao longo de um canal de baixa declividade, as pressões médias verificadas obedecem à distribuição hidrostática de pressões, proporcionalmente à profundidade do escoamento no ponto em análise. Esse comportamento das pressões médias, contudo, se restringe àquelas situações nas quais as linhas de corrente do escoamento apresentam-se retilíneas, sem acelerações no sentido longitudinal, configurando escoamento paralelo. Desta forma verifica-se a distribuição hidrostática de pressões em escoamentos uniformes.

Em escoamentos gradualmente variados, mesmo que a curvatura das linhas de corrente induza componentes de aceleração longitudinal, os mesmos podem ser admitidos como paralelos, pois essas acelerações induzidas podem ser negligenciadas. Por outro lado, se a curvatura das linhas de corrente é significativa, o fluxo deve ser tratado como escoamento curvilíneo, quando representati-

vos componentes de aceleração são induzidos, resultando no surgimento de forças centrífugas normais ao sentido do escoamento. A força centrífuga induzida pela curvatura das linhas de corrente faz com que as pressões atuantes na massa líquida não sejam adequadamente representadas pela distribuição hidrostática.

No caso de curvas verticais convexas, as forças centrífugas atuam no sentido ascendente, se contrapondo à ação gravitacional, resultando em pressões atuantes menores que as pressões hidrostáticas. Por outro lado, no caso de curvas côncavas, as forças centrífugas atuam no sentido descendente, ou seja, favoravelmente à ação gravitacional, resultando em pressões atuantes maiores que as pressões hidrostáticas. A Figura 1 ilustra o comportamento das pressões em curvas côncavas e convexas, sendo P, Ps e Pc definidos junto às equações 1, 2 e 3.

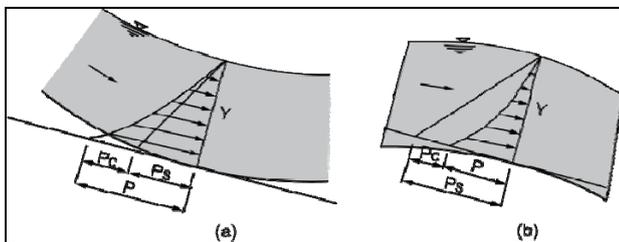


Figura 1 – Distribuição de pressões em curvas côncavas e convexas, adaptado de Baptista e Lara (2002).

Chow (1959) apresenta analiticamente a descrição das pressões médias atuantes em curvas verticais (P) (Equação 1) como a composição de duas parcelas distintas: uma relativa ao comportamento hidrostático das pressões (Ps) (Equação 2) e outra associada à pressão devida à força centrífuga induzida pela curvatura das linhas e corrente (Pc) (Equação 3).

$$P = P_s \pm P_c \quad (1)$$

$$P_s = \gamma Y \quad (2)$$

$$P_c = \frac{\gamma Y V^2}{g R} \quad (3)$$

Onde:

γ = peso específico da água,

Y = altura d'água tomada perpendicularmente ao fundo da curva vertical,

V = velocidade média do escoamento, e

R = raio da curva vertical.

LinFu e Jie (1985) consideram que escoamentos em curvas verticais de barragens podem ser considerados escoamentos planos irrotacionais, estabelecendo a Equação 4 como equação diferencial básica do escoamento. A Figura 2 apresenta os parâmetros considerados pelos autores, onde α é o ângulo formado a partir do centro da curva de concordância tomado como positivo tanto para montante quanto para jusante.

$$\frac{\partial u}{\partial Y} = \frac{u}{R} \quad (4)$$

onde:

u = velocidade na direção X no ponto em análise.

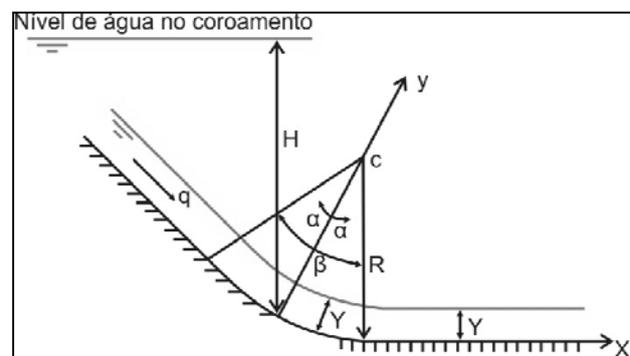


Figura 2 – Parâmetros utilizados por LinFu e Jie (1985) na avaliação de escoamentos em curvas de concordância vertical (adaptado).

A partir da consideração de que as linhas de corrente do escoamento podem ser admitidas como concêntricas à curva vertical pela teoria dos círculos concêntricos, os autores estabelecem o perfil de velocidades integrando a Equação 4. Aplicando este perfil de velocidades na conservação de energia (Equação de Bernoulli) fica estabelecido o comportamento geral das pressões na soleira curva. LinFu e Jie (1985) propõe, por fim, a avaliação individualizada da parcela de pressão devida à força centrífuga pelo respectivo coeficiente de pressão máxima (C_{PCM}), conforme Equação 5.

$$C_{PCM} = \frac{P_{CM}/\gamma}{H - Y} = 1 - \left(\frac{R - Y}{R} \right)^2 \quad (5)$$

onde:

P_{CM} = valor da máxima pressão devida à força centrífuga, e

H = carga na soleira curva correspondente ao ponto em análise.

Os autores identificam que a atuação da força centrífuga aumenta gradativamente até o ponto central da curva, onde se identifica a máxima pressão média devida à força centrífuga. A partir desse ponto central a influência passa a diminuir gradativamente até cessar em algum ponto a jusante. O comprimento longitudinal a partir do centro da curva, tanto para montante quanto para jusante, ao longo do qual a força centrífuga influencia o escoamento (L_c) pode ser quantificado, segundo LinFu e Jie (1985) pela Equação 6.

$$L_c = \frac{4 Y \text{sen}(\beta)}{C_{pCM}} \quad (6)$$

onde:

L_c = distância do ponto médio da curva aos pontos a jusante e a montante onde se anula a influência da força centrífuga.

β = ângulo da curva de concordância vertical.

LinFu e Jie (1985) propõem, ainda, a Equação 7 que exprime a distribuição de pressões devida à força centrífuga em soleiras curvas.

$$\frac{C_{pC}}{C_{pCM}} = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi X}{L}\right) \right] \quad (7)$$

onde:

C_{pC} = coeficiente de pressão devido à força centrífuga.

No que tange às flutuações de pressão ao longo de uma curva vertical, LinFu e Jie (1985) detectaram valores máximos no ponto de tangência de jusante, imediatamente anterior ao trecho plano horizontal. Os autores comentam, ainda, que as máximas flutuações de pressão são inferiores a 10% da energia cinética do escoamento.

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Instalação Experimental

Os trabalhos experimentais foram desenvolvidos no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos da Eletrobrás-Furnas (LAHE/FURNAS), situado em Jacarepaguá, no Rio de Janeiro/RJ.

O ponto de partida desta investigação experimental foi um modelo físico bidimensional em escala geométrica na razão de 1:32 da estrutura de descarga e dissipação de energia da UHE Porto Colômbia. Este modelo foi modificado a partir da retirada dos pilares que individualizavam os vãos das comportas, que por sua vez foram também retiradas, restando um perfil vertente livre com toda a largura do canal de ensaios.

A Tabela 1 apresenta o resumo das características do canal de ensaios e do modelo físico utilizado neste estudo.

Tabela 1 – Resumo das características do modelo físico

Característica	Dimensão
Volume da cuba de tranquilização (m ³)	15
Comprimento total do canal de aproximação (m)	10
Comprimento total da bacia de dissipação (m)	12
Comprimento da zona de medição na bacia de dissipação (m)	3,250
Largura do canal de aproximação e da bacia de dissipação (m)	1,150
Desnível entre a soleira do vertedouro e a bacia de dissipação (m)	0,563
Desnível entre a soleira do vertedouro e o piso do canal de aproximação (m)	0,375
Equação do perfil vertente tipo Creager (m)	$Y = -0,9686.X^{1,85}$
Raio da curva de concordância vertical (m)	0,390
Concordância entre o perfil vertente e plano horizontal da bacia de dissipação (graus)	45°

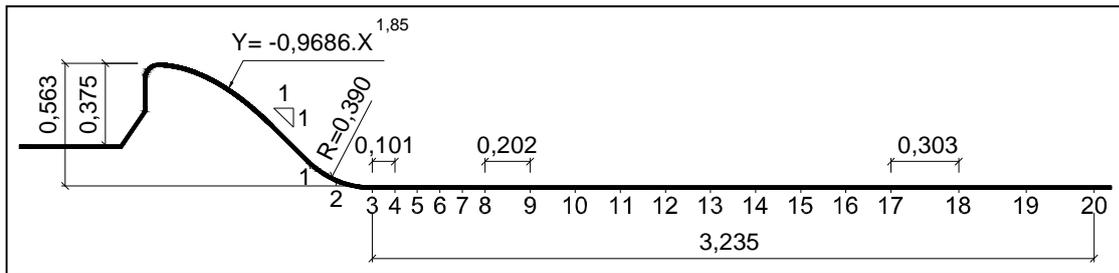


Figura 3 – Posição das tomadas de pressão ao longo da bacia de dissipação.

Metodologia

Condições de Ensaio

As condições de ensaio impostas ao longo dos experimentos tiveram como objetivo fundamental a coleta de dados médios (pressões e níveis da superfície livre da água) e flutuantes.

A Figura 3 apresenta as posições das tomadas de pressão estabelecidas em um único alinhamento longitudinal centralizado na largura do canal.

Tendo em vista se tratar de escoamento livre ao longo do perfil vertente e da bacia de dissipação, as condições hidráulicas consistiram da imposição pura e simples das vazões, com monitoramento da carga hidráulica de montante e sem qualquer controle de níveis d'água a jusante.

As medições foram realizadas para 6 vazões compreendidas entre 50 L/s e 250 L/s, ou ainda, 0,043 m³/s/m e 0,217 m³/s/m. Essas vazões foram garantidas através da manutenção do nível constante do reservatório superior do circuito de alimentação e estabelecidas a partir da manipulação de registros tipo gaveta com controle das vazões através de medidores eletromagnéticos.

Nível Médio da Superfície Livre D'água

A medição dos níveis médios da superfície livre d'água ao longo da curva de concordância vertical e a jusante da mesma foi efetuada a partir da utilização de uma ponta linimétrica, que consiste de uma escala graduada dotada de Vernier, fixada sobre um carrinho de medições metálico, com movimentação longitudinal, a partir de um sistema de rodízios sobre trilhos fixados internamente às paredes do canal.

Foram efetuadas medições de nível médio da superfície livre d'água em 20 posições fixas conforme apresentado na Figura 3. Os pontos de medi-

ção (P1 a P20) foram distribuídos ao longo da bacia de dissipação e da curva de concordância vertical com o perfil vertente.

As posições P1, P2 e P3 localizam-se na curva de concordância vertical, nos respectivos pontos de tangência (P1 e P3) e ponto central (P2). A partir da posição P3, a bacia de dissipação foi dividida em duas zonas distintas:

1. Entre P3 e P8, optou-se por maior discretização longitudinal, estabelecendo a distância entre pontos na ordem de 100mm.
2. Entre P8 e P17, optou-se por discretização longitudinal menor, estabelecendo a distância entre pontos da ordem de 200mm.
3. Entre P17 e P20, optou-se por mínima discretização longitudinal, estabelecendo a distância entre pontos da ordem de 300mm.

A Tabela 2 apresenta a descrição dos pontos de medição pela localização dos mesmos na estrutura a partir de distâncias e desníveis absolutos (relacionados à crista da soleira do vertedouro).

Salienta-se que todas as medições foram feitas verticalmente, sendo que para as posições na curva de concordância vertical as devidas correções foram conduzidas de forma analítica a partir da geometria da estrutura, visando a obtenção das profundidades do escoamento perpendiculares ao fundo do canal.

Pressões Médias

As pressões médias foram tomadas em 20 posições fixas ao longo de um único alinhamento longitudinal centralizado na largura do canal (P1 a P20), coincidentes com os pontos de medição de nível médio da superfície livre d'água, conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 3.

Tabela 2 – Localização dos pontos de medição de níveis médios da superfície livre d’água.

Ponto de medição	X*(m)	ΔY^{**} (m)
P1 – Final do perfil vertente e início da curva de concordância vertical	0,680	0,448
P2 – Centro da curva de concordância vertical	0,807	0,534
P3 – Final da curva de concordância vertical e início da bacia de dissipação	0,957	0,563
P4 – Bacia de dissipação	1,062	0,563
P5 – Bacia de dissipação	1,163	0,563
P6 – Bacia de dissipação	1,264	0,563
P7 – Bacia de dissipação	1,365	0,563
P8 – Bacia de dissipação	1,463	0,563
P9 – Bacia de dissipação	1,664	0,563
P10 – Bacia de dissipação	1,868	0,563
P11 – Bacia de dissipação	2,079	0,563
P12 – Bacia de dissipação	2,280	0,563
P13 – Bacia de dissipação	2,477	0,563
P14 – Bacia de dissipação	2,678	0,563
P15 – Bacia de dissipação	2,885	0,563
P16 – Bacia de dissipação	3,086	0,563
P17 – Bacia de dissipação	3,283	0,563
P18 – Bacia de dissipação	3,583	0,563
P19 – Bacia de dissipação	3,897	0,563
P20 – Bacia de dissipação	4,199	0,563

*X - corresponde à distância em planta entre a crista da soleira do vertedouro e o ponto de medição.

**AY - corresponde ao desnível entre a crista da soleira do vertedouro e o ponto de medição.

Construtivamente, as tomadas de pressão são formadas numa extremidade por um conduto de cobre, com 1,5mm de diâmetro interno, fixado à laje da bacia de dissipação, e na outra extremidade por uma peça também em cobre, roscada, para o engate do conduto que transmite a pressão para o quadro piezométrico.

O fundo do quadro piezométrico consistia de uma graduação milimétrica referenciada altimetricamente com o piso da bacia de dissipação, obtendo-se, assim, de forma imediata e por visualização, as pressões médias atuantes em cada ponto.

Pressões Flutuantes

As pressões flutuantes foram tomadas nas 14 primeiras posições (P1 a P14), tendo em vista a dis-

ponibilidade de instrumentação do LAHE/FURNAS para a condução deste estudo.

Os transdutores de pressão utilizados neste estudo foram da marca ZURICH, modelo PSI.420, com faixa de trabalho de -100mbar à 200mbar, com precisão de 0,1% FE.

As amostras de pressão adquiridas experimentalmente foram coletadas à taxa de 500 Hz com 10 minutos de duração e de forma simultânea para as 14 tomadas de pressão.

Sistema de Aquisição de Dados

Os dados de pressões flutuantes e extremas foram adquiridos a partir do sistema utilizado pelo LAHE/FURNAS, que consiste, fundamentalmente, em um conjunto composto por um computador de padrão industrial e um sistema de aquisição de dados externo ao computador.

O sistema externo utilizado é da marca LYNX Tecnologia, modelo AC2122, composto de três unidades acopladas em um único conjunto:

1. Gabinete composto por fonte de entrada de tensão (90 a 240 Volts), saída em tensão para alimentação auxiliar (24 Volts), conexões de entrada e saída e bornes de aterramento.
2. Placa controladora de aquisição composta por conversor A/D de 16bits com varredura de 16 canais analógicos e taxa máxima de aquisição de 32.000 amostras por segundo, com interface rede padrão Ethernet 10Mbits e protocolo TCP/IP.
3. Placa condicionadora de sinais com 16 canais amplificadores controlados por software, filtro passa baixas de segunda ordem com frequências de corte selecionadas por software, fonte de tensão para alimentação dos sensores independente para cada canal com tensão de saída selecionável por software, configuração de entrada dos sensores selecionada por software.

O software compatível com o sistema descrito é o AqDados 7, também da LYNX Tecnologia, através do qual foi possível coletar simultaneamente os sinais dos 14 transdutores de pressão, com taxa de aquisição configurável e armazenamento em disco durante a aquisição das amostras.

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nível Médio da Superfície Livre D'água no Escoamento Livre

Os resultados experimentais obtidos quanto ao perfil médio da linha d'água do escoamento livre serão confrontados com a proposta de LinFu e Jie (1984), notadamente quanto ao comportamento verificado na curva de concordância entre o perfil vertente e a bacia de dissipação.

Os referidos autores sugerem que o comportamento da superfície livre média do escoamento ao longo de uma curva vertical possa ser representado pela hipótese das curvas circulares concêntricas. Tal hipótese foi aplicada aos resultados experimentais deste estudo, conforme apresentado na Figura 4, na qual considerou-se, na teoria dos círculos concêntricos, que a profundidade do escoamento é constante ao longo da curva e igual àquela verificada no ponto de tangência entre a curva e a bacia de dissipação.

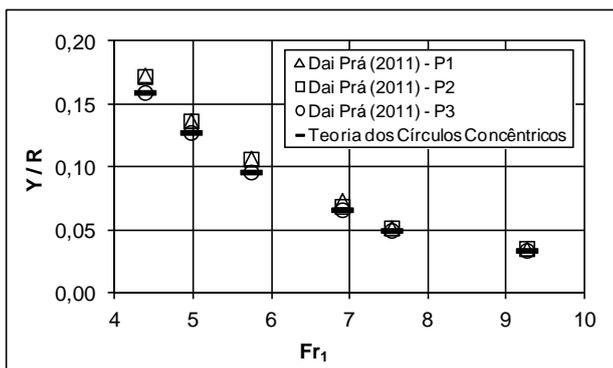


Figura 4 – Profundidade média do escoamento livre em relação ao raio da curva de concordância vertical para diferentes números de Froude.

Percebe-se que as profundidades do escoamento medidas nas três posições (P1, P2 e P3) ao longo da curva de concordância vertical ajustam-se adequadamente ao método apresentado por LinFu e Jie (1985), com alguma dispersão verificada nas posições P1 e P2 e para escoamentos com menores números de Froude. Tal constatação pode ser atribuída ao fato de que com o aumento da razão entre lâmina d'água e raio de curvatura (Y/R), a transição tende a perder a eficiência no que diz respeito à garantia de uma transição adequada do fluxo do perfil vertente para a bacia de dissipação.

Avaliação das Pressões Médias

Quanto às pressões médias devidas à força centrífuga verificadas na curva de concordância vertical, a comparação entre os coeficientes de pressão média máximos (C_{pCM}) verificados experimentalmente neste estudo estão apresentados na Figura 5, a partir da consideração de que o escoamento ao longo de uma curva vertical é composto por filetes líquidos concêntricos com a curva.

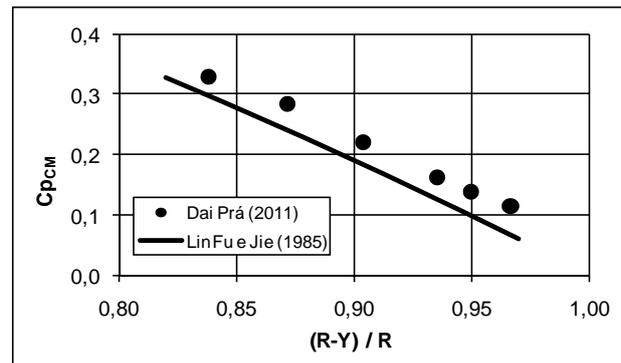


Figura 5 – Coeficientes de pressões médias máximas atuantes no centro da curva de concordância.

Percebe-se que os dados do presente trabalho apresentam uma mesma tendência de decréscimo do C_{pCM} para menores profundidade do escoamento (Y). Por outro lado não existe correspondência imediata entre os resultados previstos pela teoria dos círculos concêntricos de LinFu e Jie (1985) para as pressões médias máximas devidas à força centrífuga na curva de concordância vertical. Isso pode ser atribuído ao fato de que a montante da curva de concordância vertical não existe uma condição de canal longo o suficiente de forma a uniformizar os perfis de velocidade. Com isso, o fluxo vertente pelo perfil Creager a montante já ingressa na curva de concordância vertical com os perfis de velocidade condicionados pela geometria da soleira Creager, ocasionando pressões superiores àquelas esperadas em uma condição ideal de desenvolvimento do escoamento.

A partir disto, propõe-se aqui a inclusão de um fator de correção (α_{CM}) na proposta de LinFu e Jie (1985) adaptando-a para a determinação das pressões médias máximas no centro da soleira curva devido à aceleração centrífuga, de acordo com a Equação 8.

$$C_{p_{CM}} = 1 - \alpha_{CM} \left(\frac{R - Y}{R} \right)^2 \quad (8)$$

A Figura 6 apresenta graficamente a adaptação proposta, para $\alpha_{CM} = 0,95$, mostrando que um decréscimo de 5% no termo que relaciona a lâmina d'água com o raio da curva de concordância vertical, adapta de forma consistente a proposta de LinFu e Jie (1985), incluindo na mesma os efeitos advindos a montante da curva de concordância.

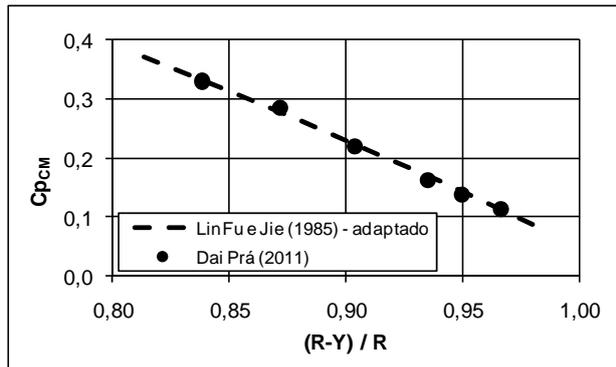


Figura 6 – Adaptação da proposta de LinFu e Jie (1985) para a determinação dos coeficientes das pressões médias máximas na curva de concordância vertical devida aos efeitos da força centrífuga.

Para avaliar os efeitos da curva de concordância sobre o escoamento livre é preciso estabelecer a região de influência, ou comprimento ao longo da bacia de dissipação, sobre o qual o escoamento tem as suas características hidráulicas distintas daquelas esperadas em um escoamento em regime rápido ao longo de um canal.

Assim, para avaliar o comprimento de influência da curva de concordância sobre o escoamento livre, do ponto de vista das pressões médias atuantes, conduziu-se a adimensionalização proposta por LinFu e Jie (1985), correlacionando os coeficientes de pressões médias máximas ($C_{p_{CM}}$) devidos à força centrífuga e os coeficientes de pressões médias (C_{p_c}) igualmente advindos da força centrífuga.

Na Figura 7 a razão entre os coeficientes de pressão comparada com o comprimento de influência da curva de concordância (L_c) com relação ao comprimento (X) tomado longitudinalmente junto ao fundo da soleira curva a partir do ponto central da mesma, de acordo com a Equação 6.

Percebe-se nos escoamentos com maiores números de Froude, que a proposta dos autores

tende a subestimar as pressões médias atuantes, subestimando, também, o comprimento de influência da curva de concordância vertical no escoamento ao longo da bacia de dissipação.

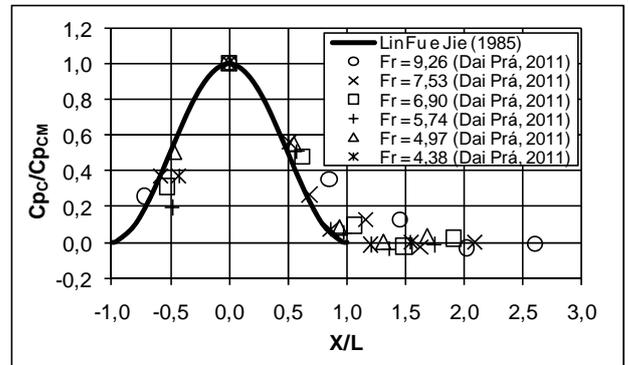


Figura 7 – Razão entre os coeficientes de pressões médias devida à força centrífuga na curva de concordância vertical entre o perfil vertente e a bacia de dissipação

A Figura 8 apresenta os resultados experimentais avaliados ao longo do comprimento longitudinal (L), tendo como posição inicial o centro da curva de concordância vertical, adimensionalizado pela energia cinética do escoamento imediatamente no início da bacia de dissipação.

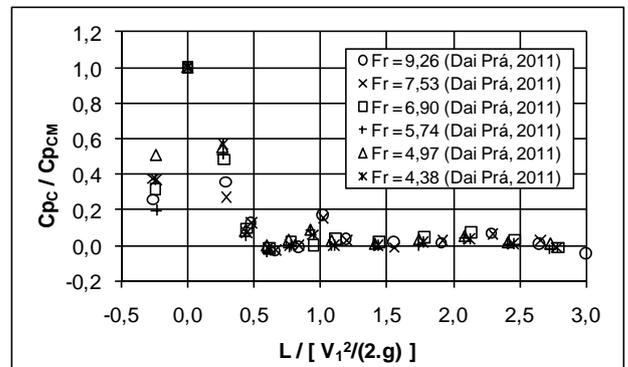


Figura 8 – Comprimento de influência da curva de concordância na relação entre os coeficientes das pressões médias e médias máximas.

Observa-se pela análise da Figura 8 que os dados adimensionalizados apresentam um crescimento até um valor máximo no centro da curva de concordância, decrescendo ao longo da curva até a posição adimensional 0,5 a partir da qual os valores estabilizam-se em torno de zero. Admite-se, com isso, que a influência da curva de concordância no

que diz respeito às pressões médias atuantes se faz presente até a distância equivalente à 50% da energia cinética do escoamento verificado no início da bacia de dissipação.

A partir da Figura 8 é possível extrair o comprimento de influência da curva de concordância vertical (L_c), para as avaliações experimentais deste estudo e comparar esses resultados com a proposta de LinFu e Jie (1985), conforme apresentado na Figura 9.

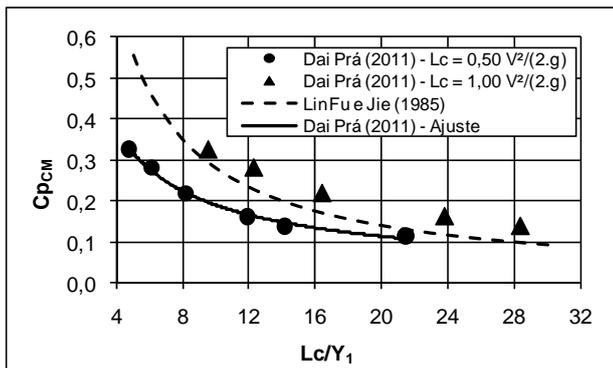


Figura 9 – Comprimento de influência da curva de concordância no coeficiente das pressões médias

Pela avaliação da Figura 9 percebe-se que o critério estabelecido por LinFu e Jie (1985) admite que os efeitos devidos à curva de concordância vertical se propagam mais a jusante do que o detectado neste estudo, tendo como envoltórias aqueles valores compreendidos entre 50% e 100% da energia cinética do escoamento.

Este trabalho propõe, então, a Equação 9 (coeficiente de correlação igual a 0,98) como representativa do comprimento de influência da curva de concordância ao longo da bacia de dissipação a partir do coeficiente de pressão média máxima identificado no ponto central desta curva e provocada pela força centrífuga.

$$C_{pCM} = 1,05 \left(\frac{Y_1}{L_c} \right)^{-0,743} \quad (9)$$

$$L_c = 0,5 \frac{V_1^2}{2g} \quad (10)$$

A Equação 9 pode ser reescrita em função do número de Froude (Fr_1) do escoamento conforme Equação 11.

$$C_{pCM} = 1,05 \left(\frac{Fr_1}{2} \right)^{1,486} \quad (11)$$

Uma vez avaliado o comprimento total de influência da curva de concordância vertical, faz-se necessário estabelecer a previsão das pressões médias ao longo dessa curva.

Para tal propõe-se a avaliação adimensional (Ψ_C) das pressões médias atuantes a partir do estabelecimento das pressões médias teóricas, composta por uma parcela hidrostática (P_s) e por uma parcela devida à força centrífuga (P_c), adimensionalizadas pelas pressões médias detectadas experimentalmente (P_x), conforme Equação 12. A Figura 10 apresenta graficamente os resultados obtidos.

$$\Psi_C = \left(\frac{P_s + P_c}{P_x} \right) \quad (12)$$

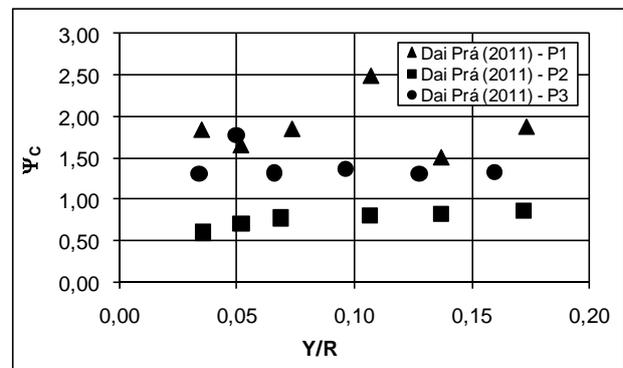


Figura 10 – Relação entre as pressões médias teóricas e as médias atuantes na curva de concordância vertical.

Tendo em vista que essa avaliação adimensional proposta não conduziu ao agrupamento dos resultados experimentais, propõe-se a correção do mesmo a partir do fator de proporcionalidade (K_C) (Equação 13), o qual contempla uma parcela de correção da pressão hidrostática, função da posição longitudinal do ponto em análise (α), uma parcela de correção da pressão centrífuga, função do ângulo total da curva de concordância vertical (β) e o número de Froude do escoamento (Fr_1).

$$K_C = \frac{\cos(\alpha)}{Fr_1^2 (1 + \sin(\beta))} \quad (13)$$

A Figura 11 ilustra os resultados obtidos com a adimensionalização proposta plotados frente

à profundidade relativa do escoamento com relação ao raio da curva de concordância vertical, mostrando que o fator de correção (K_C) incorporado na análise agrupa satisfatoriamente os resultados experimentais.

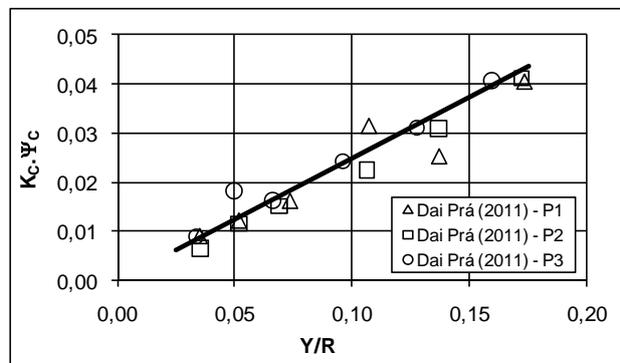


Figura 11 – Pressões médias atuantes na curva de concordância vertical corrigidas pelo fator K_C .

Este trabalho propõe, então, a Equação 14 (coeficiente de correlação igual a 0,935) representativa das pressões médias atuantes ao longo da curva de concordância vertical.

$$K_C \Psi_C = \frac{1}{4} \frac{Y}{R} \quad (14)$$

Avaliação das Flutuações de Pressão

No que tange às flutuações de pressão, tanto ao longo da curva de concordância quanto ao longo da bacia de dissipação, cabe salientar, inicialmente, que as amplitudes médias das flutuações de pressão verificadas experimentalmente apresentaram valores bastante diminutos, da mesma ordem de grandeza da incerteza de medição dos transdutores de pressão utilizados neste estudo, com exceção dos resultados experimentais verificados no centro da curva de concordância, que assumem valores superiores.

Independente desse fato, ainda que de relevada importância, optou-se por conduzir a análise das flutuações de pressão devidas ao escoamento livre uma vez que, quando da utilização dos adimensionais propostos, se pode detectar comportamentos que induzam a alguma percepção quanto à influência da curva de concordância nas flutuações de pressão verificadas ao longo da bacia de dissipação.

Procede-se, então, a referida avaliação a partir da adimensionalização das flutuações de pressão

de forma semelhante àquela apresentada por LinFu e Jie (1985) quando da análise das pressões médias. Salienta-se, contudo, que nesta análise, as flutuações estão sendo avaliadas de forma global, não conduzindo nenhum tipo de separação de efeitos como aqueles realizados na avaliação das pressões médias, quando as parcelas hidrostática e devida à força centrífuga foram consideradas separadamente.

A Equação 15 representa a razão entre a flutuação de pressão e a energia disponível no ponto em análise.

$$C\sigma = \frac{\sigma/\gamma}{H - Y} \quad (15)$$

Onde:

$C\sigma$ = coeficiente de flutuação de pressão na curva de concordância vertical,

σ = amplitude média da flutuação de pressão no ponto em análise,

H = diferença de cota entre o nível do reservatório e a cota da estrutura de descarga no ponto considerado, e

Y = a profundidade do escoamento no ponto considerado.

A partir disso, os coeficientes de flutuação de pressão ($C\sigma$) são correlacionados pelo coeficiente de máxima flutuação de pressão identificada na curva de concordância ($C\sigma_M$).

Aqui, cabe ressaltar que as máximas flutuações de pressão foram identificadas no ponto central da curva, não concordando com as afirmações de LinFu e Jie (1985), que registram as flutuações máximas no ponto de tangência entre a curva de concordância e a bacia de dissipação. Neste estudo as flutuações de pressão registradas no ponto de tangência representam, em termos médios absolutos, metade daquelas flutuações identificadas no ponto central da curva.

A Figura 12 apresenta, então, a razão entre os coeficientes de flutuação de pressão avaliados ao longo do comprimento longitudinal (L), tendo como posição inicial o centro da curva de concordância vertical, adimensionalizado pela energia cinética do escoamento imediatamente no início da bacia de dissipação.

Pela análise da Figura 12, observa-se um crescimento até o ponto central da curva de concordância a partir do qual a sua influência passa a decrescer até a posição adimensional 0,5. A partir

desse ponto, as flutuações de pressão identificadas junto ao fundo estabilizam-se em torno do valor correspondente a 30% das flutuações máximas verificadas no centro da curva de concordância.

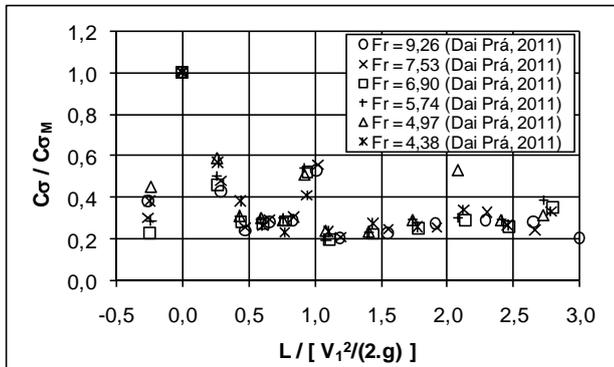


Figura 12 – Comprimento da influência da curva de concordância nas flutuações de pressão

Novamente, conforme apresentado na avaliação das pressões médias, a influência da curva se faz presente até a distância equivalente a 50% da energia cinética disponível no início da bacia de dissipação, confirmando o critério adotado anteriormente, apresentado na Equação 11.

A avaliação individualizada do comportamento das flutuações de pressão nas três tomadas de pressão localizadas na curva vertical fica comprometida, especialmente nas seções tangentes, tendo em vista que os valores detectados (da ordem de 1 a 3mm.c.a.) encontram-se dentro da faixa de erro dos transdutores de pressão utilizados nas medições experimentais.

Por outro lado, as flutuações de pressão no ponto central da curva de concordância vertical, e, portanto, as máximas flutuações de pressão, ainda que de pequeno valor absoluto (da ordem de 6mm.c.a.), mostraram relação bastante consistente na comparação com a energia cinética do escoamento na saída da curva de concordância.

Na Figura 13 estão apresentados os coeficientes de pressão máxima detectados experimentalmente e calculados com base na energia cinética na seção terminal da curva conforme Equação 16.

$$C_{Pm\acute{a}x} = \frac{\sigma_{Cm\acute{a}x} / \gamma}{V_1^2 / (2g)} \quad (16)$$

Onde:

$C_{Pm\acute{a}x}$ = coeficiente de pressão máxima,

$\sigma_{Cm\acute{a}x}$ = amplitude máxima da flutuação de pressão, e

V_1 = velocidade na seção terminal da curva de concordância vertical.

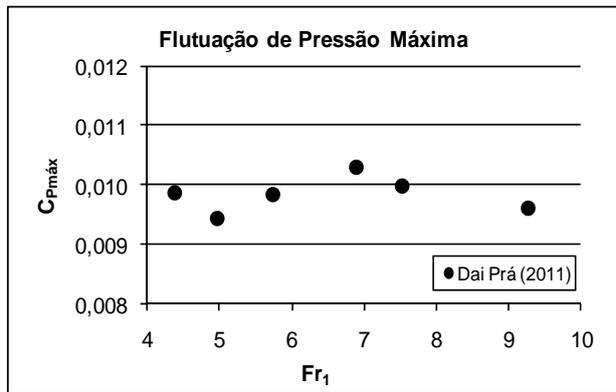


Figura 13 – Flutuação de pressão no ponto de central da curva de concordância frente o número de Froude do escoamento na seção terminal da mesma.

Pela avaliação da Figura 13, percebe-se que o máximo coeficiente de pressão verificado no ponto central da curva de concordância é da ordem de 1% da energia cinética na seção terminal da curva, conforme Equação 17, quando $\epsilon = 0,01$.

$$\frac{\sigma_{Cm\acute{a}x}}{\gamma} = \epsilon \frac{V_1^2}{2g} \quad (17)$$

Segundo LinFu e Jie (1985), $\epsilon < 0,10$, para as flutuações máximas de pressão que são verificadas na tangente de jusante de curvas de concordância verticais. Os mesmos autores afirmam que em paredes lisas e sem descolamento de fluxo, as flutuações de pressão são da ordem de 5% da energia cinética ($\epsilon = 0,05$) do escoamento.

Observa-se, com isso, que as máximas flutuações de pressão verificadas neste estudo (no ponto central da curva), se por um lado concordam com os referidos autores por serem inferiores a 10% da energia cinética, por outro, apresentam valores bastante inferiores àqueles previstos por LinFu e Jie (1985), da ordem de 5% no extremo de jusante da curva.

Cabe salientar, por fim, que as flutuações de pressão detectadas neste estudo no extremo de jusante da curva de concordância vertical apresentou valores em média equivalentes à 0,5% da energia cinética do escoamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que a influência da curva de concordância vertical entre o perfil vertente a 45° e a bacia de dissipação, tanto para as pressões médias quanto para as flutuações de pressão, cessam na mesma posição. Desta forma, a partir do ponto central da curva de concordância, posição de máxima pressão média, o comprimento total de influência se prolonga até a distância equivalente à 50% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva.

A estimativa das pressões médias ao longo da curva de concordância consiste em avaliar, em cada ponto, a pressão hidrostática e a pressão devida à força centrífuga. Identificou-se, contudo, a necessidade da inclusão de um fator de correção estabelecido como função (i) do número de Froude do escoamento (Fr_1), (ii) do ângulo total entre os pontos de tangência da curva de concordância (β) e (iii) da posição do ponto em análise, em relação ao ponto central da curva de concordância, representado pelo ângulo formado entre ambos (α).

As flutuações máximas de pressão foram identificadas no centro da curva de concordância vertical, e assumem valores da ordem de 1% da energia cinética do escoamento no ponto de tangência terminal da curva.

AGRADECIMENTOS

À Eletrobrás-Furnas a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico”, inserido no programa de P&D ANEEL.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. M. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, , 2002. 440 p.

CHOW, V. T. *Open channel hydraulics*. Michigan: McGraw-Hill Book, 1959. p. 393-438.

DAI PRÁ, M. *Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico*. 2011. 207 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesqui-

sas Hidráulica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

LINFU, Z.; JIE, X. Estudo das Características Hidráulicas e de Cavitação de Curvas Verticais em Canais considerando o escoamento bidimensional. *Shuili xuebao*, Beijing, n. 6, p. 19-27, Jun, 1985. (Traduzido do chinês por J. A. Pinto de Campos, Engenheiro Civil, Técnico Assessor - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985).

Mean and Fluctuating Pressures Caused by an Invert Vertical Transition Between the Spillway and the Horizontal Chammel – Experimental Study

ABSTRACT

A spillway invert vertical transition aims to redirect the spillway flow from two distinct channel slopes, downstream and upstream, in such a way as to minimize the hydraulic forces which would occur if the change in slopes was abrupt. In a dam discharge structure these transitions present as a solution to redirect the high speed flow, guiding it to the horizontal slope of the stilling basin.

An evaluation of mean and fluctuating pressures caused by the vertical transition curves is shown in the present work, regarding the centrifugal acceleration generated by the bend, as well as the propagation of these mean effects downstream in the dissipation structure.

Key-words: *Hydraulic Structures, invert vertical transition, pressure fluctuation.*