

USO DE FERRAMENTA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO ESTUDO DA AERAÇÃO AO LONGO DE VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Eudes José Arantes¹, Rodrigo de Melo Porto², Fernando Hermes Passig³ & Karina Querne Carvalho⁴

RESUMO --- Estudos do escoamento em vertedouros em degraus foram realizados experimentalmente por diversos autores, mas a utilização de ferramentas de computação numérica para a simulação destes casos ainda é muito escassa. Neste trabalho realizou-se um estudo da simulação numérica do escoamento sobre vertedores em degraus, utilizando-se um programa de fluidodinâmica computacional (CFD). As características dos escoamentos nos vertedouros em degraus para a distribuição da concentração de ar e para o ponto de início da aeração foram obtidas, com boas comparações entre os resultados experimentais e numéricos. Desta forma, todas estas análises serviram, tanto para validar a utilização das ferramentas de fluidodinâmica computacional, como para caracterizar os escoamentos. Pontos em que o crescimento da camada limite encontra-se com a superfície livre foram determinados para caracterizar o início da aeração e esta foi comparada com as curvas propostas por Tozzi (1992). Resultados numéricos foram comparados com duas equações teóricas nas quais os parâmetros obtidos na simulação foram similares àqueles observados experimentalmente no estudo do escoamento da aeração. Foi possível concluir que a utilização das ferramentas de fluidodinâmica promoveu a realização das análises do escoamento em vertedouros em degraus, representando as características deste escoamento aerado em uma forma adequada.

ABSTRACT --- Studies of flow in stepped spillways were carried out experimentally by several authors, but the use of numeric computation tools to the simulation of these cases is still very scarce. In this work it was done a study of the numeric simulation of the flow in stepped spillways using computation fluid dynamic (CFD) software. The characteristics of the flow in stepped spillways to the distribution of air concentration and to the initial point of aeration were obtained with good comparisons between the experimental and numeric results. Thus, all the analyses were applied to validate the utilization of computation fluid dynamic tools and to characterize the flow. Points in which the growth of the boundary layer reaches the free surface were determined to characterize the beginning of the aeration and it was compared with the curves proposed by Tozzi (1992). Numeric results were compared with two theoretical equations in which the obtained parameters from the simulation were similar to those observed experimentally in the study of the flow aeration. It was possible to conclude that the utilization of the fluid dynamic tools promoted the carry out of analyses of stepped spillways flow, representing the characteristics of this aerated flow in an adequate way.

Palavras-chave: canais com degraus, fluidodinâmica computacional, escoamento aerado, escoamentos turbulentos,

1) Professor da UTFPR, Campus Campo Mourão, Caixa Postal 271, Campo Mourão-PR, 87301-006, e-mail: eudesarantes@utfpr.edu.br

2) Professor da USP/EESC/SHS. Caixa Postal 359, São Carlos-SP, 13560-970, e-mail: rodrigo@sc.usp.br

3) Professor da UTFPR, Campus Campo Mourão, Caixa Postal 271, Campo Mourão-PR, 87301-006, e-mail: fhpassig@utfpr.edu.br

4) Professora da UTFPR, Campus Campo Mourão, Caixa Postal 271, Campo Mourão-PR, 87301-006, e-mail: kquerne@utfpr.edu.br

INTRODUÇÃO

A aeração acrescida ao escoamento em vertedouro em degrau amplia a possibilidade de diminuir o risco de potencial de cavitação da estrutura do vertedouro. De acordo com Peterka (1953), uma concentração de ar em torno de 7% é suficiente para evitar o risco de cavitação em superfície de concreto, porque a compressibilidade da mistura ar-água pode absorver o impacto do colapso das bolhas vaporizadas. Bindo et al. (1993) descreveram que a macro-turbulência criada pelos degraus no interior do escoamento favorece o desenvolvimento da camada limite, cuja espessura aumenta mais rapidamente do que em calhas lisas.

Com o avanço da tecnologia computacional das últimas décadas, a resolução numérica das equações representativas dos escoamentos passou a ser viável para muitas condições. Nos dias de hoje é possível realizar uma simulação do escoamento tridimensional, multifásico, transiente, turbulento, etc; utilizando um computador pessoal, mas, dependendo do grau de detalhamento do resultado pretendido, esta simulação pode demorar horas, dias ou meses.

A fluidodinâmica computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamic*) constitui em uma ferramenta capaz de reproduzir numericamente os fenômenos de transportes em escoamentos em qualquer domínio e características diversas. Para isto existem softwares desenvolvidos para construção da geometria, geração de malha, pré-processamento, processamento e a visualização dos resultados.

As ferramentas de fluidodinâmica computacional ainda são pouco utilizadas em projetos de obras hidráulicas. Apesar do custo computacional ainda ser alto, dependendo das condições de escoamento, ele tende a diminuir com os avanços tecnológicos. Outra dificuldade na utilização desta ferramenta para projetos é o custo de licenciamento dos softwares, mas acredita-se que com a maior concorrência no mercado, o desenvolvimento de softwares ou, quem sabe, o aparecimento de bons softwares livres podem diminuir este custo, que atualmente pode ser da mesma ordem ou até maior que o computacional.

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da aeração do escoamento em vertedouros em degraus por meio da comparação de resultados experimentais com os simulados numericamente. Para caracterização da aeração do escoamento foi determinado o ponto de início da aeração do escoamento, em função do crescimento da camada limite e da macro-rugosidade dos degraus. Duas equações, para a distribuição da concentração de ar, foram comparadas com os resultados da simulação numérica. Para se avaliar os campos de escoamento sobre vertedouros em degraus com confiabilidade desejada e obter resultados de utilidade prática via CFD, foi essencial a escolha dos modelos representativos dos escoamentos que representam de forma adequada os fenômenos envolvidos, para comparação com testes experimentais disponíveis na literatura.

Estudo da Aeração ao Longo de Vertedouros em Degraus

A Figura 1 (CHANSON e TOOMBES, 2003) ilustra o escoamento sobre um vertedouro em degraus e também algumas de suas características: onde C representa a fração de vazios; V , a velocidade; F , a taxa de formação de bolha (Hz), ou seja, o número de bolha detectado pelo sensor da sonda por segundo; da profundidade de água limpa equivalente; y , a distância medida perpendicularmente ao pseudo-fundo formado pelas extremidades dos degraus; h , a altura do degrau e ϕ , o ângulo entre a horizontal e o pseudo-fundo.

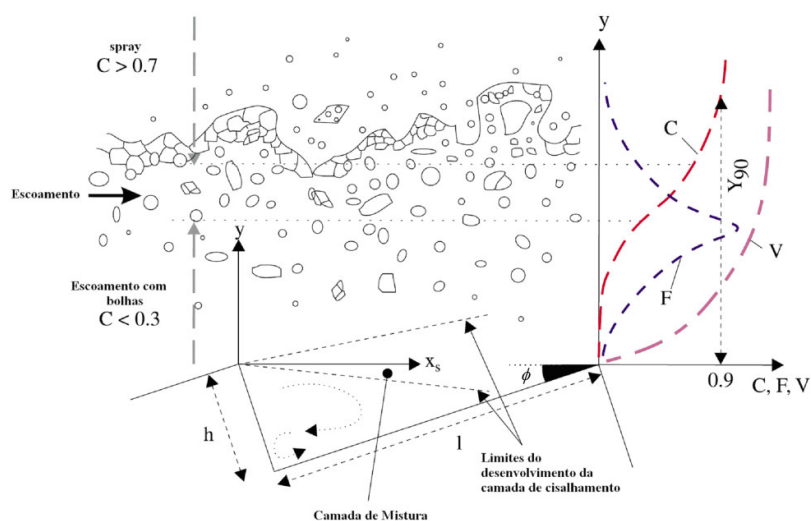


Figura 1.: Escoamento Ar-Água

(Fonte: Adaptado de GONZALEZ e CHANSON, 2004).

Diversos trabalhos experimentais com vertedouros em degraus foram realizados com a finalidade de estudar a aeração do escoamento. Essery e Horner (1978) observaram que a entrada de ar no escoamento é um fator dominante no regime de escoamento deslizante (*skimming flow*). A aeração do escoamento ao longo da calha em degraus em regime *skimming* foi subdividida por Matos e Quintela (1996) em quatro diferentes regiões, descritas na sequência e ilustradas na figura 2:

- zona sem aeração do escoamento: localizada no trecho de montante da calha, no interior da qual se desenvolve a camada limite turbulenta, até atingir a superfície livre da água.
- zona com aeração parcial do escoamento: trecho em que o ar atmosférico incorpora-se ao escoamento, sem, contudo atingir o fundo da calha;
- zona com aeração total do escoamento: trecho em que o ar, embora ocupando a totalidade da seção transversal, apresenta uma concentração média variável no sentido do escoamento;

- zona com regime uniforme do escoamento: a concentração média de ar e a velocidade média da água não variam ao longo da calha.



Figura 2. Regiões do escoamento ao longo de um vertedouro em degrau com regime *skimming*
(Fonte: Adaptado de MATOS e QUINTELA, 1996).

Definições da posição onde o escoamento ao longo de calhas em degraus inicia o processo de aeração da superfície livre da água foram apresentadas por Tozzi (1992) e Chanson (1994). Tozzi (1992) propôs, com base nos seus resultados experimentais, a equação (1) para determinação da espessura da camada limite turbulenta ao longo da calha em degraus com declividade 1V:0,75H.

$$\frac{\delta}{L_A} = 0,080 \left(\frac{L_A}{k_a} \right)^{-0,233} \quad (1)$$

onde: δ é a espessura da camada limite; L_A , a distância, ao longo da calha do vertedouro, entre a posição de início do desenvolvimento da camada limite e o início da aeração do escoamento e k_a , a altura da rugosidade [$k_a = h \cdot \cos(\phi)$].

O cálculo das profundidades do escoamento ao longo da calha, associado ao conhecimento das respectivas espessuras da camada limite, permite definir a posição de início da aeração do escoamento.

Modelagem da transferência na interface ar-água em escoamento tipo *skimming*.

No regime de escoamento *skimming*, o escoamento de um degrau ao outro se comporta de forma coerente, deslizando sobre os degraus, sendo amortecido por um fluido recirculante preso

entre eles. No que tange a alguns aspectos consensuais, a concentração média de ar do escoamento deslizante sobre turbilhões em regime uniforme é semelhante àquela que se obteria no escoamento aerado uniforme em um vertedouro de calha lisa de igual declividade (MATOS, 1999). Os modelos de Wood (1984, apud CHANSON, 1994), deduzidos para paramentos lisos são, em geral, segundo Matos (1999), aplicáveis para estimar a distribuição de concentração de ar no trecho do escoamento gradualmente variado, com exceção da proximidade da pseudosoleira do vertedouro e nas zonas onde o efeito da ondulação da superfície seja relevante. A concentração média de ar na seção de afloramento da camada limite fica em torno de 0,20.

Segundo Matos (1999), a concentração média de ar ao longo de vertedouros em degraus depende de:

$$C_{\text{média}} = \mathfrak{F}\left(C_i; s'; \text{sen } \theta; \frac{v_b \delta \cos \theta}{q}\right) \quad (2)$$

$$s' = \frac{(L - L_A)}{\delta} \quad (3)$$

v_b - velocidade ascensional das bolhas no sentido perpendicular do fluxo;

C_i - concentração média de ar na seção de afloramento da camada limite;

s' - posição longitudinal adimensional ao longo da pseudo-soleira;

L - posição longitudinal ao longo da pseudo-soleira, cuja origem é a crista da ogiva do vertedouro.

A concentração de ar, C , é definida como o volume de ar por unidade de volume total. A altura de água característica em um escoamento, d , pode ser definida por:

$$d = \int_0^{y_{90}} (1 - C) dy \quad (4)$$

onde y é a distância medida perpendicularmente ao pseudo-fundo e y_{90} é a altura em que a concentração de ar é de 90%. A concentração de ar média para a profundidade y_{90} , $C_{\text{média}}$, é definida por:

$$(1 - C_{\text{média}}) y_{90} = d \quad (5)$$

No escoamento auto-aerado, a distribuição de concentração de ar pode ser estimada por um modelo de difusão das bolhas de ar na mistura ar-água (WOOD, 1984, apud CHANSON, 1994).

A equação de conservação para uma mistura em uma região de equilíbrio, independente na direção longitudinal é:

$$D \frac{d}{dy} [\rho(1 - C)] = \rho(1 - C) v_w \cos \phi \quad (6)$$

em que D é a difusividade para a massa específica média, $\rho(1 - C)$ e representa o efeito da massa de água por unidade de volume, v_w é a velocidade da água. Quando C é grande, existe a presença de

gotas de água no ar, e quando C é pequeno, existem bolhas de ar presente na água. Como a velocidade tende a zero próximo à superfície sólida, pode-se assumir que no intervalo entre $y = 0$ e $y_{90} = y$ a velocidade da água é:

$$v_w \propto C.y \quad (7)$$

Através de uma simplificação, considerando a difusividade D constante e substituindo 7 em 6, determina-se a equação para o perfil de concentração:

$$C = \frac{\beta}{\beta + \exp\left(-\gamma \cdot \cos\phi \left(\frac{y}{y_{90}}\right)^2\right)} \quad (8)$$

em que β e γ são variáveis em função da concentração média de ar e ϕ é a inclinação do vertedor. As variáveis β e γ são empíricas e não têm significado físico.

Chanson (1995, 1997) propôs um novo modelo de difusão de bolhas de ar em um desenvolvimento teórico e obteve uma boa comparação com dados experimentais em modelos e em protótipos.

Em um escoamento uniforme, Chanson (2000) propôs uma equação de continuidade para o ar, em um escoamento ar-água similar à apresentada por Wood (1984, apud CHANSON, 1994):

$$\frac{d}{dy} \left(D_t \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) = v_w \cos\phi \cdot \frac{\partial}{\partial y} (C \cdot \sqrt{I - C}) \quad (9)$$

onde D_t é a difusividade turbulenta na direção normal ao escoamento. Da integração da equação 9 tem-se:

$$C = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y}{2 \cdot D' \cdot y_{90}} \right) \quad (10)$$

em que D' é a difusividade turbulenta adimensional e K' uma constante de integração. D' e K' são função da concentração média de ar $C_{\text{médio}}$, que podem ser estimados por:

$$D' = \frac{0,848 \cdot C_{\text{médio}} - 0,00302}{1 + 1,1375 \cdot C_{\text{médio}} - 2,2925 \cdot C_{\text{médio}}^2} \quad (11)$$

$$K' = \operatorname{arctanh}(\sqrt{0,1}) + \frac{0,5}{D'} \quad (12)$$

Para $C_{\text{médio}} < 0,7$ a equação 10 compara-se favoravelmente a dados obtidos em modelos e em protótipos de canais com degraus (BAKER, 1994; RUFF e FRIZELL, 1994; TOZZI et al., 1998; CHAMANI e RAJARATNAM, 1999; MATOS et al, 1999 e CHANSON et al 2002).

Determinação da concentração de ar média em escoamento skimming.

Tozzi et al. (1998) apresentaram resultados de distribuição de concentração de ar obtidos em modelos reduzidos de vertedouros em degraus com declividades iguais a 1V:6,69H ($\phi = 8,5^\circ$) e 1V:0,775H ($\phi = 52,2^\circ$). Os testes realizados na calha com inclinação $\phi = 8,5^\circ$ conduziram a um perfil de concentração de ar cuja distribuição apresentou-se praticamente idêntica aos valores apresentados por Straub e Anderson (1958), para calhas lisas. Entretanto, os resultados obtidos para a calha com inclinação de $52,2^\circ$ não apresentaram a mesma tendência da proposição de Straub e Anderson (1958), conduzindo a um menor valor de concentração média de ar (47% na calha em degraus contra os 64% previstos para as calhas lisas por Straub e Anderson, 1958). Da mesma forma que Matos e Frizell (1997), os autores observaram em seus experimentos que a região próxima ao degrau, contém uma menor quantidade de ar que no escoamento turbulento em calhas alisadas. Justificaram, porém, que esse efeito é aparentemente explicado pelo forte gradiente de pressões na região, provocando um empuxo maior às bolhas, que tendem a se distanciar do fundo da calha em degraus.

Chamani e Rajaratnam (1999) comentaram que devido à turbulência produzida pelos degraus, a concentração média de ar resultou maior que a obtida em uma calha lisa - equação 13. Um ajuste realizado pelos autores, com seus resultados obtidos em modelo, conduziu à proposição da seguinte equação para o cálculo da concentração média de ar:

$$C_{\text{médio}} = 0,93 \cdot \log \left(\frac{(\sin \phi)^{0,1}}{q^{0,3}} \right) + 1,05 \quad (13)$$

com q = vazão específica no modelo em l/s/m.

Matos (2000), para o mesmo estudo realizado por Matos e Frizell (1997), apresentaram os seguintes resultados obtidos nos testes com vazão específica de 0,1 m³/s/m: concentração média de ar igual a 35% no degrau 16 (0,66 m abaixo da crista), 51% no degrau 24 (1,30 m abaixo da crista) e 57 % no degrau 34 (2,10 m abaixo da crista). Considerando resultados experimentais obtidos por outros pesquisadores, definiu a equação 14, que relaciona a concentração média de ar $C_{\text{média}}$ em função do parâmetro H_{barr}/y_c

$$C_{\text{médio}} = 0,62 - \frac{55,9}{\left(\frac{H_{\text{barr}}}{y_c} \right)^2} \quad (14)$$

Estudos Numéricos do escoamento em vertedouros em degrau.

Cheng et al (2004) também simularam o escoamento em vertedouros com degraus utilizando o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ e o modelo de volume de fluidos. (VOF). Eles implementaram uma malha não estruturada para ajustar a forma complexa do domínio. O método de acoplamento para as

XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos

equações de pressão e de velocidades utilizado foi o método PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Na simulação numérica, além dos vetores velocidade (Figura 3), eles determinaram os perfis de concentração de ar adimensionalizados em três degraus (Figura 4), obtendo bons resultados comparando com os experimentos.

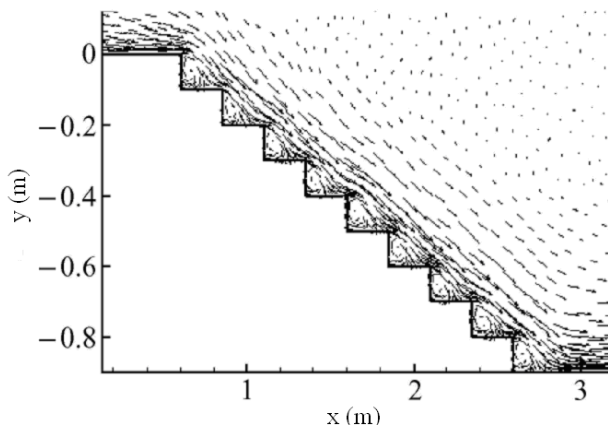


Figura 3. Vetores velocidade dos fluidos no vertedor em degrau
(Fonte: CHENG et al, 2004).

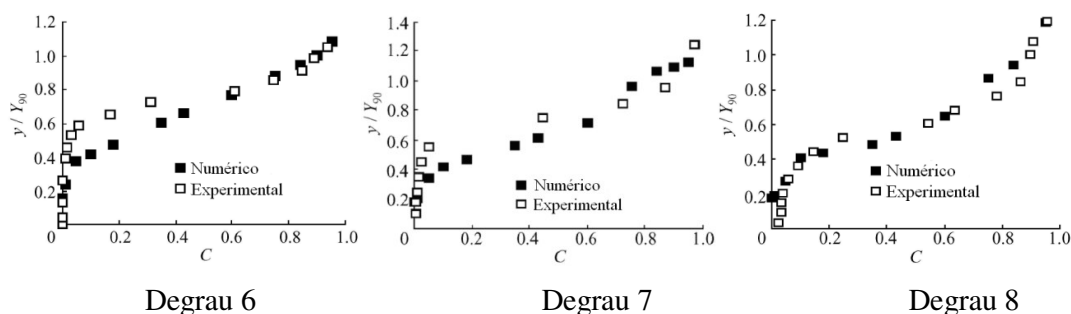


Figura 4. Concentração de ar em relação a altura adimensionalizada y/y_{90} .
(Fonte: CHENG et al, 2004).

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelos Multifásicos.

Os modelos multifásicos são utilizados em simulações em fluido dinâmica computacional, de forma a representar as diferentes fases ou misturas dos fluidos presentes nos escoamentos. Estes modelos são divididos basicamente em modelos multifásicos euleriano-euleriano ou euleriano-lagrangeano (CFX, 2004). Os modelos multifásicos euleriano-euleriano representam duas ou mais fases do escoamento pelo método de Euler de abordagem no estudo de escoamento, em que, as determinações das grandezas características do campo do escoamento são representadas em função do tempo, na superfície de controle e no volume de controle. Os modelos multifásicos euleriano-lagrangeano representam uma das fases na forma de Euler e a outra na forma de Lagrange. Esta

última consiste em isolar um sistema e estudar o comportamento individual de cada molécula ou partícula desse sistema (ROMA, 2006). Para este trabalho foi utilizado o modelo multifásico euleriano-euleriano.

Geração da Geometria e da Malha.

A geração da geometria e da malha são processos em que a experiência do usuário do software é importante. Para a geração da geometria é necessário o conhecimento dos fenômenos envolvidos de forma que as faces do contorno sejam adequadas para que os resultados obtidos para os escoamentos sejam representativos. Por exemplo: em escoamentos em canais é necessário que a entrada do domínio e a saída do domínio sejam localizadas em seções de condições de escoamento conhecidas ou possuir uma geometria adequada para possibilitar o desenvolvimento do escoamento.

Os softwares para a geração da malha permitem determinar o grau de refinamento da malha para determinadas faces ou contornos, possibilitando a construção de malhas mais finas em regiões de interesse e mais grosseira em regiões de menor valia para os resultados da simulação, sempre estando de acordo com as condições de angulação da malha e da diferenciação do tamanho das malhas adjacentes.

Condições de Simulação.

No módulo de pré-processamento do CFX (CFX-Pre) são implementados as condições do domínio, do contorno, iniciais e a condições numéricas das simulações.

As condições de domínio utilizadas nas simulações foram basicamente as seguintes:

- Fases do escoamento: As fases presentes no escoamento em canais são água e ar. Estas fases são consideradas fluidos contínuos e foi utilizada a diferença de massa específica com parâmetro de separação de fases.
- Utilizou-se a pressão nula como pressão de referência, de modo que todas as pressões calculadas representam a pressão relativa em relação.
- Considerou-se a aceleração da gravidade igual a $9,806 \text{ m/s}^2$, além massa específica de referência igual à massa específica média do ar ($1,185 \text{ kg/m}^3$).
- O modelo de turbulência adotado em todas as simulações foi o *SSG Reynolds Stress*, que constitui o modelo de Tensões de Reynolds para a condição anisotrópica com a possibilidade de uso da lei da parede.
- O modelo multifásico escolhido foi o homogêneo (*Multiphase Homogeneous Model*) com o modelo de mistura na interface (*Mixture Model*) e coeficiente de tensão superficial de $0,0732 \text{ N/m}$.

As condições de contorno para os estudos realizados podem ser divididas em cinco condições:

- Entrada (*inlet*): É a face do domínio de fluido em que é inserida a condição de entrada no escoamento, onde o fluido escoa somente para dentro do domínio. Para o escoamento multifásico em condutos livres é utilizada uma função *step* para representar a mudança da condição de fluido de água para fluido ar, caracterizando a presença da superfície livre.
- Saída (*outlet*): As condições de saída representam o fluido que escoa somente para fora do domínio.
- Aberto (*opening*). O fluido pode escoar para fora ou para dentro do domínio, simultaneamente, dependendo das condições do escoamento. Normalmente utiliza-se esta condição na região do domínio em contato com a pressão atmosférica e as condições do escoamento estabelecem a condição de entrada ou saída do escoamento.
- Parede (*wall*). As paredes representam as condições de contorno impermeável para o escoamento. Existem as condições de parede sem resistência (*free slip*), parede lisa (*smooth wall*) ou parede rugosa (*rough wall*), esta última condição de parede foi adotada em todas as simulações desenvolvida neste trabalho. Para habilitação da condição de parede rugosa é necessário que a função parede esteja disponível para o modelo de turbulência escolhido.
- Plano de simetria (*symmetry*): Nesta condição de contorno o escoamento é simétrico de forma que o gradiente normal à face das variáveis é nulo e o escoamento de um lado do plano é uma imagem espelhada do escoamento do outro lado. Esta condição foi utilizada para representar os escoamentos através da simulação de um domínio de menor espessura que o real, considerando a distância suficientemente grande das paredes laterais, de forma a minimizar o seu efeito no escoamento. Sabe-se que esta simplificação prejudica a representação da turbulência anisotrópica, mas a simulação com a condição real de largura do vertedouro seria de difícil aplicação devido à grandeza da malha necessária para representação do escoamento e o grande esforço computacional requerido.

Nas condições iniciais de uma simulação são estabelecidas as grandezas representativas da condição do escoamento ao iniciar o cálculo numérico. O campo de velocidade inicial do escoamento, os perfis iniciais de pressão, bem como as condições iniciais de turbulência, são estabelecidos nestas configurações de partida da simulação.

Para as simulações do escoamento, os vertedouros foram iniciados na forma inoperante e todo o desenvolvimento do escoamento foi realizado com frentes de escoamentos iniciando a operação do vertedouro. Para tanto, como condição inicial do escoamento o volume de fluido foi iniciado com a presença de ar em todo o domínio e o campo de velocidade nulo. A partir do início da simulação na condição de contorno de entrada do domínio foi inserido um escoamento de água com

a vazão a ser estudada. O escoamento foi desenvolvido em todo o domínio até estabelecer a condição de estacionário.

Finalizando as configurações necessárias para o início das simulações numéricas é necessário o estabelecimento das condições numéricas da simulação. Nas simulações realizadas neste trabalho utilizaram-se as seguintes configurações:

- Tipo de simulação: A simulação pode ser realizada na forma transiente ou em estado estacionário. Nas simulações transientes é realizado o cálculo numérico estabelecendo um critério de convergência para cada passo de tempo (*time step*). Nas simulações em estado estacionário (ou falso transiente) o passo de tempo é adiantado em cada iteração, de forma que ao estabelecer o regime estacionário a convergência é alcançada. Tendo em vista a consideração de regime estacionário nas condições finais do escoamento em vertedouros, utilizou-se a condição de estado estacionário para a maioria das simulações realizadas neste trabalho.
- Esquema de advecção: O esquema de Alta Resolução (*High Resolution*) utiliza um fator de combinação, que depende dos gradientes das grandezas calculadas para a escolha da melhor forma de resolução. Esse esquema é o mais robusto numericamente, mas é o que melhor representa os resultados da simulação.

Controle de convergência: Nas simulações realizadas com a condição de regime estacionário, utilizou-se, como controle da escala de tempo, a condição física com valor constante do passo de tempo. Dependendo das condições da simulação, como velocidade e tamanho da malha, o passo de tempo foi calculado utilizando o critério de BULGARELLI (FORTUNA - 2000):

$$\Delta t \leq \tau_s \left[\frac{|u|_{\max}}{\Delta x} + \frac{|v|_{\max}}{\Delta y} + 2\nu \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right) \right]^{-1} \quad (15)$$

em que $0 < \tau_s < 1$ é um fator de segurança.

Os critérios de convergência disponíveis no pacote computacional Ansys CFX 10.0 são: erro médio quadrático (RMS – *Root Mean Square*) ou o valor residual máximo normalizado no domínio (MAX). Nas simulações realizadas neste trabalho utilizou-se a opção RMS com valor para objetivo de convergência de 10^{-5} .

Acompanhamento da Resolução e Visualização dos Resultados.

Após a preparação das definições no módulo de pré-processamento inicia-se a resolução da simulação do módulo de resolução (CFX – *Solver*). O processo numérico da simulação é apresentado durante o cálculo, sendo possível acompanhar a convergência e verificar possíveis problemas numéricos no decorrer dos cálculos.

Após o término dos cálculos, com o estabelecimento da convergência da simulação utilizou-se o módulo de pós-processamento (CFX – *Post*) para aquisição dos resultados. Neste módulo é possível representar graficamente as características dos escoamentos, através de vetores de velocidades, contornos que representam isolinhas de pressão, velocidade, concentração de ar, etc; além de ferramentas diversas que permitem visualizar isosuperfícies e gráficos para as variáveis diversas em todo o domínio.

A possibilidade de visualizar as variáveis resultantes das simulações em todo o domínio é uma atribuição da solução numérica. Muitas vezes existem dificuldades em determinar experimentalmente algumas características dos escoamentos em locais de difícil aquisição de dados, já para as simulações numéricas não existem estas dificuldades.

Geometria do Vertedouro em degraus

Para esta etapa do trabalho, a simulação do escoamento em vertedouros em degraus constituiu-se na reedição dos ensaios realizados por Tozzi (1992), utilizando-se as ferramentas de fluidodinâmica computacional para caracterização do escoamento em vertedouros em degraus. O vertedouro estudado por Tozzi (1992) apresenta as configurações apresentadas nas configurações da figura 5.

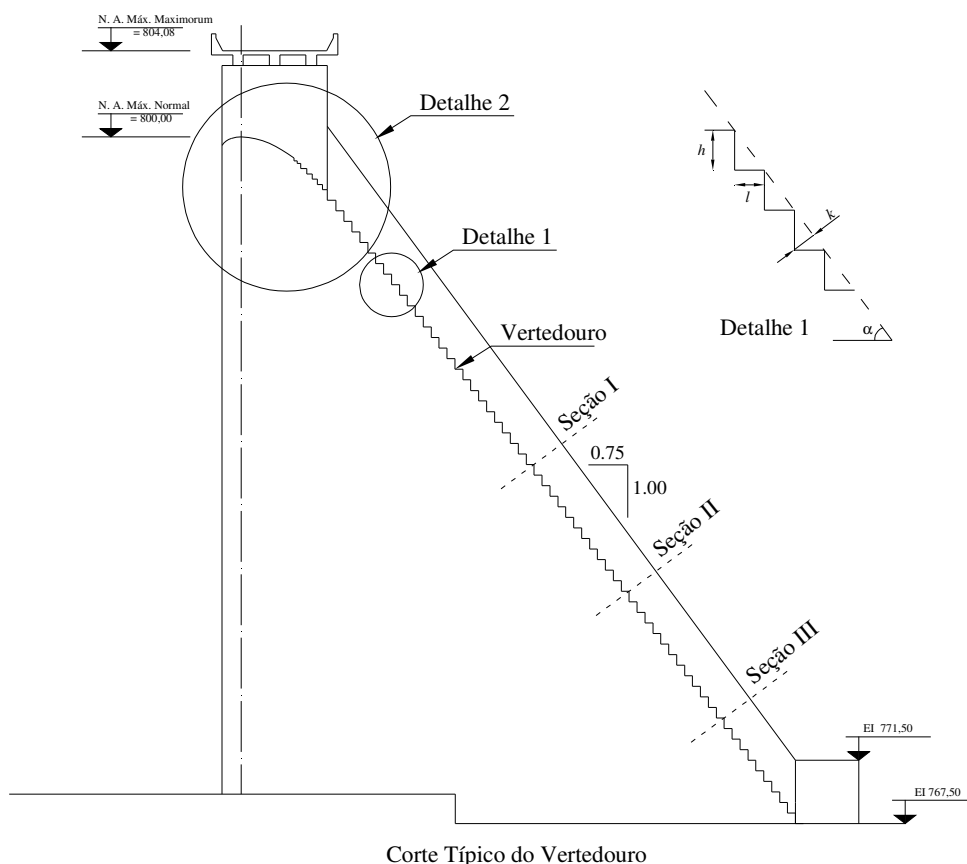


Figura 5: Dimensões principais do Vertedouro do Aproveitamento Hidroelétrico de Cubatão.
(Fonte: Adaptado de TOZZI,1992).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Posição de Início de Aeração do Escoamento.

O ponto de início da aeração do escoamento foi determinado utilizando-se os resultados da simulação numérica na ferramenta CFD. Sabe-se que o início da aeração do escoamento em vertedouros ocorre com o encontro da linha de crescimento da camada limite, com a linha de desenvolvimento da superfície livre. Dessa forma, foram obtidos os valores da espessura desta camada e da superfície livre ao longo do vertedouro em degrau, buscando a determinação do ponto de início da aeração caracterizado pelo encontro destas duas linhas. Na figura 6, é apresentado o desenvolvimento da superfície livre obtido experimentalmente por Tozzi (1992) e o determinado numericamente para a vazão específica de 120,5 l/s/m e rugosidade k_a igual a 2 cm, verificando-se uma boa aproximação. Nesta figura também é apresentado o crescimento da camada limite, determinada pelo ponto onde a velocidade equivale a 99% da velocidade máxima. Verifica-se que o ponto de encontro entre a camada limite e a superfície livre ocorreu a um comprimento de 124,5 cm, a uma altura de 3,69 cm.

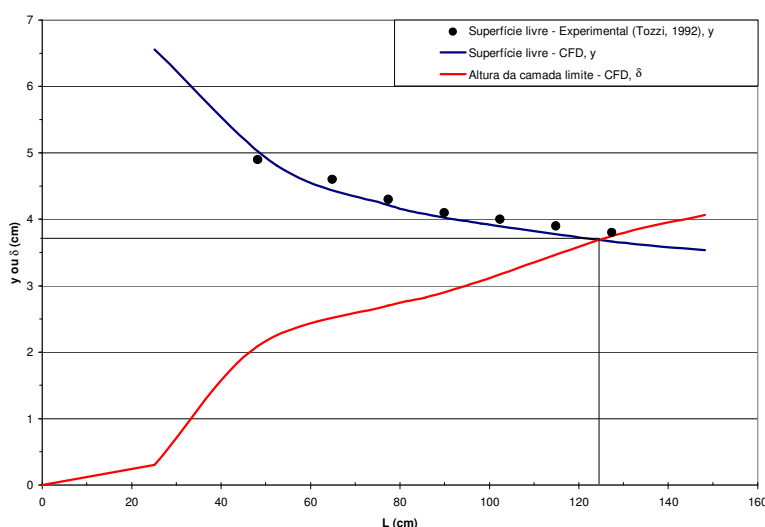


Figura 6: Crescimento da camada limite e altura da superfície livre (início a aeração) para vazão de 120,5 l/s.m ($k_a = 2$ cm).

Este mesmo procedimento para determinação do início da aeração do escoamento foi realizado para as outras vazões específica e rugosidades, utilizando os resultados das simulações.

Na tabela 1 estão apresentados os resultados de comprimento (L_a) e a espessura da camada limite (δ) no ponto de início da aeração, para as vazões específicas e rugosidades simuladas.

Também são mostrados os adimensionais L_a/k_a e δ/L_a calculados para comparação com os resultados experimentais determinados por Tozzi (1992).

No gráfico da figura 7 estão apresentados os pontos dos adimensionais L_a/k_a e δ/L_a encontrados numericamente neste trabalho e experimentalmente por Tozzi (1992) e ainda a curva da equação 1. Verifica-se que os resultados para os adimensionais encontrados numericamente, utilizando-se o conceito de início da aeração caracterizada pelo encontro da camada limite com a superfície livre, representaram de forma similar os resultados encontrados por Tozzi (1992), fortalecendo mais uma vez a utilização da ferramenta CFD para caracterização deste tipo de escoamento.

Tabela 1. Resultados da Simulação Numérica (CFD) para diferentes rugosidades.

		Vazão específica (l/s/m)			
		86,1	120,5	163,5	201,4
$k_a = 2 \text{ cm}$	$L_a \text{ (cm)}$	95,9	124,5	161	159,4
	$\delta \text{ (cm)}$	3,09	3,69	4,3	5,23
	L_a/k_a	47,95	62,25	80,5	79,7
	δ/L_a	0,0322	0,0296	0,0267	0,0328
$k_a = 3 \text{ cm}$	$L_a \text{ (cm)}$	84,4	116,8	122,9	136,6
	$\delta \text{ (cm)}$	3,18	3,7	4,7	5,47
	L_a/k	28,13	38,93	40,97	45,53
	δ/L_a	0,0377	0,0317	0,0382	0,0400
$k_a = 6 \text{ cm}$	$L_a \text{ (cm)}$	79	84,1	104,9	125,9
	$\delta \text{ (cm)}$	3,32	4,41	5,1	5,69
	L_a/k_a	13,17	14,02	17,48	20,98
	δ/L_a	0,0420	0,0524	0,0486	0,0452

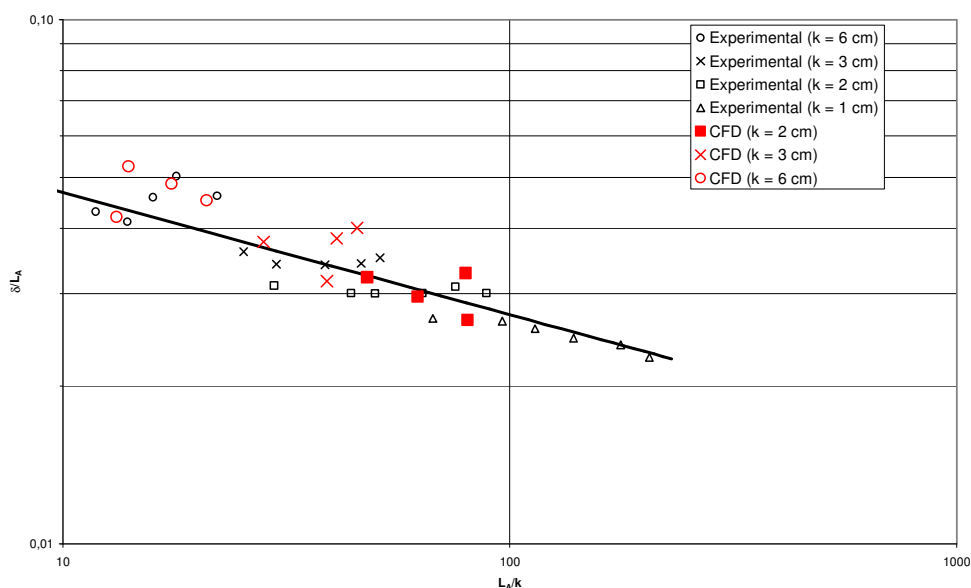


Figura 7. Relação entre os adimensionais L_a/k_a e δ/L_a .

Utilizando os dados da posição de início da aeração, L_a , e altura da camada limite, δ , foram calculados, na tabela 2, os valores do adimensional s' (equação 3) para as condições de vazões e rugosidades para as três seções para os dados das simulações numéricas na condição de modelo reduzido.

Tabela 2. Valores de s' .

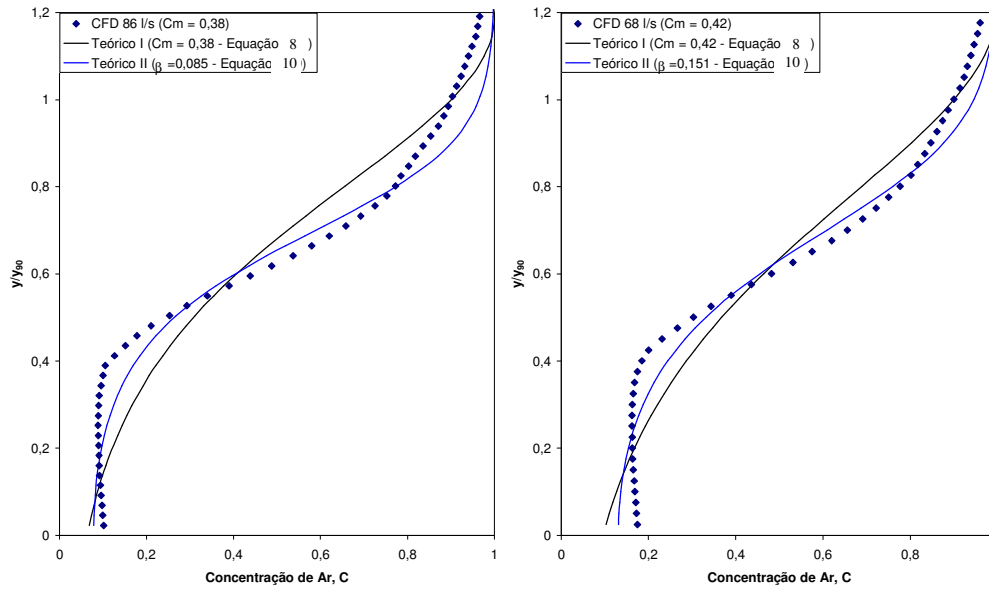
		Vazão Específica (l/s/m)				
			86,1	120,5	163,5	201,4
	Seção	Li	s'			
$k_a = 2 \text{ cm}$	I	148,23	16,93	6,43	----	----
	II	198,23	33,11	19,98	8,66	7,42
	III	248,23	49,30	33,53	20,29	16,99
$k_a = 3 \text{ cm}$	I	148,23	20,07	8,50	5,39	2,13
	II	198,23	35,80	22,01	16,03	11,27
	III	248,23	51,52	35,52	26,67	20,41
$k_a = 6 \text{ cm}$	I	148,23	20,85	14,54	8,50	3,92
	II	198,23	35,91	25,88	18,30	12,71
	III	248,23	50,97	37,22	28,10	21,50

Estudo da Aeração do Escoamento.

A variação da aeração do escoamento na seção III da figura 5 foi determinada para as vazões específicas (68,8 l/s/m; 86,1 l/s/m; 120,1 l/s/m; 163,5 l/s/m e 201,4 l/s/m) e rugosidades ($k_a = 2 \text{ cm}$; $k_a = 3 \text{ cm}$ e $k_a = 6 \text{ cm}$). Na figura 8 são apresentados os perfis de aeração para as vazões específicas 68,8 l/s/m e 86,1 l/s/m com rugosidade k_a igual a 2 cm e comparados com as equações 8 e 10, propostas respectivamente por Wood et. al (1989) e Chanson et. al (2004). Os resultados para outras configurações de vazão específica e rugosidades também foram determinados.

Para determinação dos perfis de aeração do escoamento em vertedouros em degraus foi necessária a realização do refinamento da malha, utilizando o gradiente de concentração de ar como parâmetro. Pode-se verificar na figura 8 que as duas equações teóricas, determinadas utilizando-se os parâmetros dos resultados da simulação, se aproximam dos valores de concentração determinados numericamente, sendo a equação 10 a que melhor representou o perfil de concentração.

Na equação 8 é necessária a determinação dos parâmetros β e γ para a aproximação da curva teórica à curva resultante da simulação. Os valores destes parâmetros foram determinados para a variação da concentração de ar na seção de estudo III, para as vazões e rugosidades de estudo. Na tabela 3 são apresentados os valores da concentração média e dos valores dos parâmetros β e γ .



Figuras 8: Perfil de aerção do escoamento na seção III
(68,8 l/s/m e 86,1 l/s/m, $k_a = 2$ cm).

Tabela 3. Valores da concentração média e dos parâmetros β e γ .

		Vazão específica (l/s/m)				
		68,8	86,1	120,5	163,5	201,4
$k_a = 2$ cm	$C_{\text{médio}}$	0,421	0,378	0,289	0,238	0,211
	β	0,151	0,085	0,024	0,011	0,007
	γ	7,91	9,61	12,23	12,66	12,94
$k_a = 3$ cm	$C_{\text{médio}}$	0,464	0,418	0,314	0,251	0,218
	β	0,256	0,137	0,034	0,015	0,011
	γ	6,39	8,34	11,46	12,38	12,04
$k_a = 6$ cm	$C_{\text{médio}}$	0,497	0,438	0,329	0,272	0,248
	β	0,354	0,205	0,061	0,023	0,015
	γ	5,62	6,77	9,24	11,40	12,21

Os parâmetros encontrados para o ajuste da equação 8 foram comparados com duas curvas propostas por Straub e Anderson (1958) para o escoamento em um canal liso. Na figura 9 é apresentado um gráfico que mostra a relação entre a concentração média ($C_{\text{médio}}$) e o parâmetro $\gamma \cos(\phi)$. Verifica-se que a ordem de grandeza dos valores encontrados numericamente são próximos aos valores experimentais, determinados por Straub e Anderson (1958), sendo os resultados numéricos maiores. Os resultados para as diferentes rugosidades ($k_a = 2$ cm; $k_a = 3$ cm e $k_a = 6$ cm) diferenciaram-se entre si, tanto no formato da curva, como na proximidade à curva teórica. Esta diferenciação pode ser atribuída ao processo de refinamento da malha, para melhor caracterizar os perfis de aerção, o ocorre em regiões de diferentes tamanhos de malha para as diferentes vazões específicas.

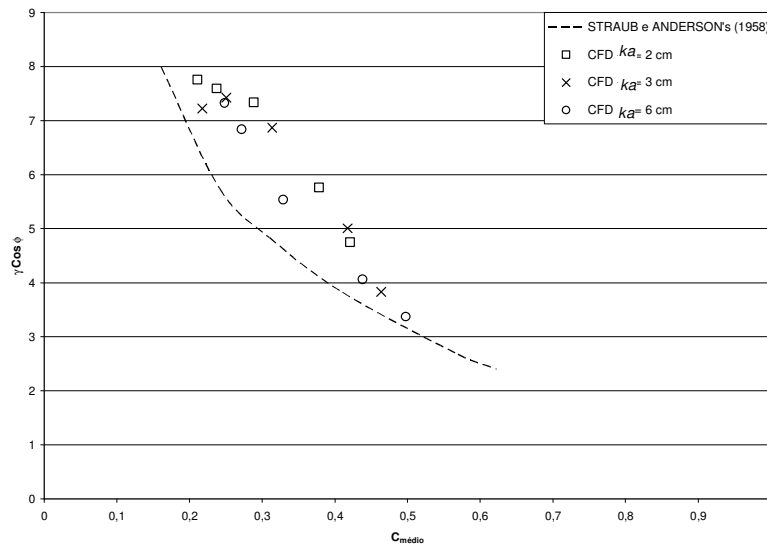


Figura 9. Relação entre a concentração média e $\gamma \cdot \cos(\phi)$.

O parâmetro β em relação à concentração média também foi comparado com uma curva proposta por Straub e Anderson (1958). Na figura 10 é apresentada esta comparação e verifica-se que os pontos determinados na simulação numérica representam os resultados de forma similar à curva experimental de Straub e Anderson (1958), sendo os valores do parâmetro β menores para os dados numéricos. Na comparação entre os resultados numéricos, não se visualizou uma grande diferença entre o comportamento das curvas para as diferentes rugosidades.

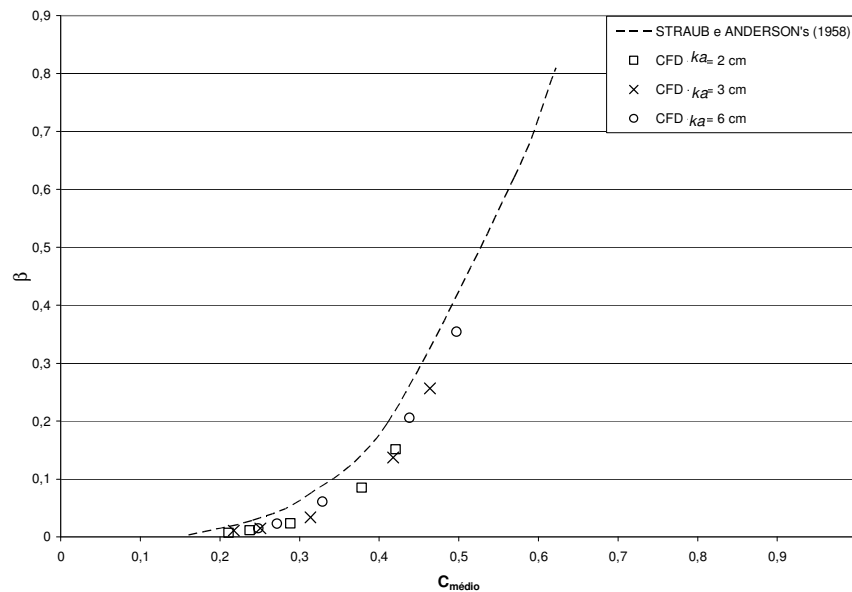


Figura 10. Relação entre a concentração média e o parâmetro β .

Os resultados obtidos numericamente para a concentração média de ar na seção de estudo III em relação ao parâmetro H_{barr}/γ_c , foram comparados com uma equação teórica proposta por Matos (2000) para vertedouro em degrau – equação 2.48 e com os resultados experimentais de Tozzi

(1992), Matos (2000) e Diez-Cascon et al (1991). Estas comparações são apresentadas na figura 11 em que se pode visualizar que os resultados numéricos possuem a mesma tendência que os resultados experimentais de Tozzi (1992) e de Matos (2000), se aproximando da equação proposta por Matos (2000), sendo os resultados para a rugosidade maior ($0,27 < k_a/D_h \leq 0,57$ ou $k_a = 6$ cm, D_h o diâmetro hidráulico) as que se aproximam melhor desta curva. Comparando-se os adimensionais k_a/D_h para os resultados numéricos e experimentais, verifica-se que a concentração de ar obtida numericamente no CFD está aquém dos resultados obtidos da forma experimental, pois segundo Matos (2000) a concentração de ar cresce com o aumento do adimensional k_a/D_h . Acredita-se que esta diferenciação entre os resultados para as diferentes rugosidades pode ser atribuída ao desenvolvimento do perfil de aeração, que deve estar mais próximo da região uniforme do escoamento para a maior rugosidade e em desenvolvimento para as menores rugosidades, nesta mesma seção de estudo.

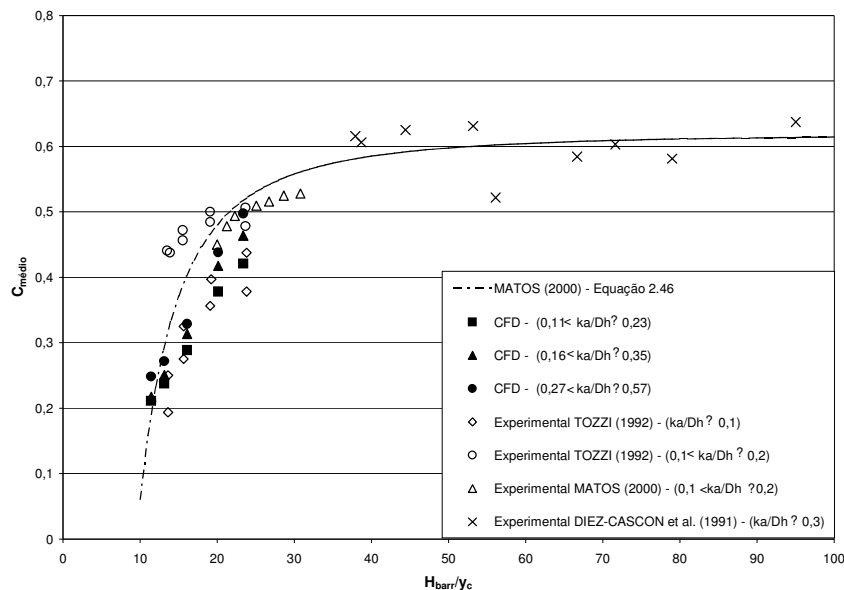


Figura 11. Relação entre a concentração média e o adimensional H_{barr}/y_c .

CONCLUSÕES

Os estudos sobre escoamentos em vertedouros em degraus foram realizados experimentalmente por diversos autores, mas a utilização de ferramentas de computação numérica ainda é muito escassa nesse particular. Assim, propôs-se para esta pesquisa, a utilização de ferramentas de fluidodinâmica computacional, com o intuito de caracterizar o escoamento sobre o vertedouro em degraus, com a comparação dos resultados das características do escoamento aerado para condições teóricas, experimentais e numéricas.

Utilizou-se um pacote computacional para a simulação numérica dos escoamentos. O software utilizado foi o ANSYS CFX 10[®]. Os procedimentos para as simulações numéricas constituíram em: geração da geometria e da malha, estabelecimentos das condições de contorno e iniciais, escolha dos modelos de simulação e dos critérios, resolução e visualização dos resultados.

O modelo de turbulência adotado em todas as simulações foi o SSG Reynolds Stress, que constitui o modelo de Tensões de Reynolds para a condição anisotrópica com a possibilidade de uso da lei da parede. No estudo para determinação do início da aeração foram determinados os pontos em que o crescimento da camada limite encontra-se com a superfície livre e comparou-se com a curva proposta por Tozzi (1992), para o início da aeração. Para o estudo da aeração do escoamento comparou-se os resultados numéricos com duas equações teóricas em que os parâmetros determinados com base na simulação foram próximos aos encontrados experimentalmente por Straub e Anderson (1958) para calhas alisadas. Pode-se concluir que a utilização das ferramentas de fluidodinâmica computacional proporcionou a realização de análises do escoamento em vertedouro em degraus, representando de forma adequada às características desse escoamento.

BIBLIOGRAFIA

- BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. “*The stepped spillway of M’Bali Dam.*” *J. Int. Water Power and Dam Construction*, v. 45, n. 1, p. 35 – 36. 1993.
- CFX. *CFX 5 Solver Theory*. Ansys Canada Ltda, Waterloo, Ontario, Canada. p. 250. 2004.
- CHANSOON, H. “*Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways.*” *Journal of Hydraulic Research*. v. 32, n. 3, p. 445 – 460. 1994
- CHANSOON, H. “*Measuring Air-Water Interface Area in Supercritical Open Flow.*” *Water Resources*. IAWPRC v. 31, n. 6, p. 1414-1420. 1997
- CHANSOON, H. “*Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel.*” *Journal of Hydraulic Research*, v. 34, n. 3, p. 421–429. 1996.
- CHANSOON, H.; TOOMBES, L. “*Stream Reaeration in Nonuniform Flow: Macroroughness Enhancement.*” *Journal of Hydraulic Engineering*, p. 222-223. Mar. 2000.
- CHANSOON, H.; TOOMBES, L. “*Strong Interactions between Free-Surface aeration and turbulence in an open channel flow.*” *Experimental Thermal and Fluid Science*. 27, p. 525-535. 2003
- CHANSOON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. “*Flow resistance in skimming flows and its modelling.*” *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(6): 809–819. 2002
- CHENG, X.; LUO, L.; ZHAO, W.; LI, R. “*Two-phase flow simulation of aeration on stepped spillways.*” *Progress in Natural Science*, v. 14, n. 7, p. 626-630. 2004.
- DIEZ-CASCON, J.; BLANCO, J. L.; REVILLA, J.; GARCIA, R. “*Studies on hydraulic behavior of stepped spillways.*” *Journal International Water Power and Dam Construction*, v. 43, n. 9, p. 22 – 26. 1991.
- MATOS, J. Discussão do artigo: “*Characteristics of skimming flow over stepped spillways.*” *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. v. 126 n.11, p. 860-873. 2000.

- MATOS, J.; FRIZELL, K. H. “Air concentration measurements in highly turbulent aerated flow.” Proc., 28th IAHR Congr., Theme D, Vol. 1, Sam S. Y. Wang and Torkild Carstens, eds., San Francisco, p. 149–154. 1997
- MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C. “Emulsioneamento de ar e energia específica residual do escoamento em descarregadores de cheias em degraus”. In: Congresso da Água, 3., Lisboa, 1996; Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA, 7., Lisboa, 1996. [Anais] Lisboa: APRH, ABES, v. 2, p. 495-503. 1996
- MATOS, J.; SANCHEZ, M.; QUINTELA, A.; DOLZ, J. “Characteristic depth and pressure profiles in skimming flow over stepped spillways.” In Proceedings of the 28th Biennial Congress of the International Association for Hydraulic Research, Graz, Austria, p. 22–27, Session B14. CD-ROM. Ago. 1999.
- PETERKA, A. J. “The Effect of entrained Air on Cavitation pitting”. In: Minnesota International Hydraulics Convention. Minneapolis. Proceeding. Minneapolis: IARH/ASCE, 1953. p. 507-518. 1953.
- ROMA, W. *Fenômenos de Transporte para Engenharia*. Editora Rima. 2006.
- STRAUB, L. G.; ANDERSON, A. G. (1958). „Experiments on self-aerated flow in open channels”. Proc. ASCE, v. 87, n. 7, p. 1890-1 – 1890-35. 1958.
- TOZZI, M. J. “Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus.” Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 1992.
- TOZZI, M. J.; TANIGUCHI, E.; OTA, J. J. “Air concentration in flows over stepped spillways”. Proceedings of FEDSM’98. 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Junho de 1998.
- WOOD, I. R. “Air Entrainment in High Speed Flows”. Proc. Intl. Symp. on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, IAHR, Esslingen, Alemanha, editora H. KOBUS, artigo 4.1, 1984.