

# ANÁLISE DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS EM COMPORTAS HIDRÁULICAS

Jell Lima de Andrade<sup>1</sup> e José Carlos C. Amorim<sup>2</sup>

**Resumo** - Foi realizada uma análise numérica do escoamento e dos esforços hidrodinâmicos presentes durante o acionamento da comporta vagão da câmara de descarga da Eclusa de Ibitinga - CESP. A solução numérica foi obtida resolvendo-se as equações de Navier-Stokes em uma malha não-estruturada pelo método de elementos finitos. Para descrever o comportamento turbulento do escoamento foi utilizado o modelo de turbulência k-ε. Os resultados numéricos confirmam a viabilidade de utilização desta técnica para análise e solução desse tipo de problema.

**Abstract** - A numerical analysis has been developed for calculating viscous flows controlled by a vertical lift gate and hydrodynamic forces acting on it. The numerical solution is obtained from the incompressible Navier-Stokes equations. The numerical technique is based on a finite element method. Turbulence effects are simulated by a k-ε turbulence model. The procedure developed here is applied for a vertical lift gate operating in a CESP installation, and the results are compared with available experimental data at various opening positions.

**Palavras-Chave** - simulação numérica; método de elementos finitos; modelagem de turbulência; comportas hidráulicas.

## INTRODUÇÃO

As comportas hidráulicas são importantes componentes de reservatórios, eclusas e usinas hidrelétricas, sendo utilizadas como equipamentos de segurança e controle de vazão.

As comportas tipo vagão são freqüentemente utilizadas para fechamento de emergência em tomadas d'água de usinas hidrelétricas e grandes condutos, sendo projetadas para fechar somente sob o efeito de seu peso próprio. Por outro lado, os custos relativos aos equipamentos de levantamento destas comportas são normalmente bastante elevados, o que leva os projetistas a procurarem reduzir ao máximo os esforços de acionamento. Nestas condições é de vital importância a determinação precisa dos esforços hidrodinâmicos - uplift e downpull - causados pelo escoamento através das comportas, os quais estão presentes durante as operações de abertura e fechamento das mesmas, uma vez que estes podem causar sérios problemas operacionais, incluindo o não fechamento das comportas ou mesmo seu arremetimento, ou podem onerar significativamente a execução de seu projeto.

A natureza dos esforços hidrodinâmicos tipo uplift e downpull consiste nas diferentes distribuições de pressão verificadas no topo e no fundo das comportas quando as mesmas estão sob fluxo. Estas distribuições de pressão são afetadas por diversos fatores incluindo o tipo de escoamento, características geométricas das comportas e dos poços, características geométricas dos condutos ou tomadas d'água, perdas de carga a montante e a jusante das comportas, condições de aeração e propriedades do fluido (Naudascher, 1964). Um estudo detalhado da influência destes fatores nos valores dos esforços hidrodinâmicos é apresentado por (Sagar, 1977) e (Sagar e Tullis, 1979).

Como os fatores relacionados acima podem variar amplamente de um projeto a outro e em virtude do grau de confiabilidade requerido na previsão dos esforços hidrodinâmicos, os

---

1 Mecânica Pesada S.A.  
Av. Charles Schneider s/n  
12040-001 Taubaté - SP  
Fone: (012) 225-3047 Fax: 225-3005

2 IME - DE/2  
Praça General Tibúrcio, 80  
22290-270 Rio de Janeiro - RJ  
Fone: (021) 541-7931 Fax: 295-7146  
E-mail: jcamorim@ime.eb.br

quais devem ser determinados durante a fase de projeto das comportas, os mesmos têm sido obtidos através de ensaios de modelos reduzidos, o que implica quase sempre em custos elevados e prazos dilatados para a conclusão dos projetos destes equipamentos, limitando as possibilidades de otimização geométrica dos mesmos.

Por outro lado, a abordagem analítica do problema, em virtude da complexidade dos fatores envolvidos e da natureza das equações que regem o escoamento através das comportas, limita-se a uma formulação unidimensional do problema (Naudascher, 1986), a qual apresenta determinadas limitações, na medida em que alguns fatores deixam de ser considerados ou são utilizados coeficientes experimentais válidos somente para configurações similares ao casos ensaiados.

Assim, considerando-se o desenvolvimento dos recursos computacionais em software e hardware e a evolução das pesquisas em dinâmica dos fluidos computacional (CFD), pretende-se neste trabalho demonstrar as potencialidades de utilização de modelos numéricos para previsão dos esforços hidrodinâmicos em comportas hidráulicas.

## EQUAÇÕES BÁSICAS

Para um fluido incompressível em regime permanente tem-se:

Equação de Navier-Stokes média de Reynolds:

$$\rho \cdot U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[ \rho \cdot (\nu + \nu_t) \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \cdot g_i \quad (1)$$

Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

A viscosidade turbulenta  $\nu_t$  é calculada a partir de:

$$\nu_t = c_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

A energia cinética turbulenta  $k$  é obtida da equação de transporte:

$$U_i \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = G - \varepsilon \quad (4)$$

Onde o termo de produção  $G$  é dado por:

$$G = \nu_t \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

A dissipação  $\varepsilon$  é obtida a partir da equação abaixo:

$$U_i \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = c_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot G - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Os valores das constantes utilizadas no modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$  são:  $c_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_k = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ,  $c_{1\varepsilon} = 1.44$  e  $c_{2\varepsilon} = 1.92$ .

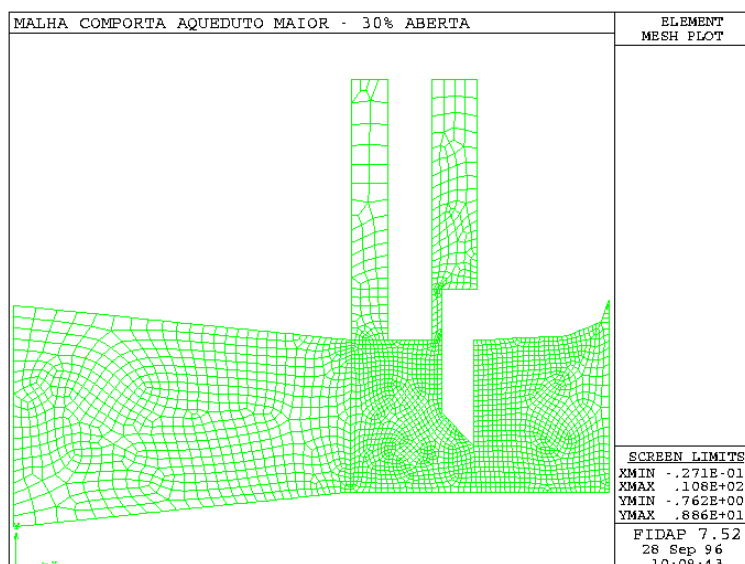


Figura 1 - Malha do Domínio de Cálculo

## DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E DOMÍNIO DE CÁLCULO

A comporta em estudo no presente trabalho está localizada no aqueduto maior da câmara de descarga da Eclusa de Ibitinga - CESP.

Como a comporta é operada sob fluxo torna-se necessário o conhecimento preciso dos esforços hidrodinâmicos sobre a mesma para as várias condições de operação. Neste sentido foram realizados pelo Centro Tecnológico de Hidráulica - USP ensaios em modelo reduzido, visando a determinação dos esforços hidrodinâmicos através do método indireto, ou seja medindo-se a distribuição da pressão ao longo das faces da comporta em função de sua abertura.

Para a realização da modelagem numérica foi adotado um domínio de cálculo bidimensional. Sua discretização foi feita utilizando-se elementos quadrilaterais isoparamétricos de quatro nós. Nesses elementos foi utilizada uma aproximação bilinear para as componentes da velocidade, e a pressão foi considerada constante em todo elemento.

A malha para execução do cálculo foi criada por um gerador automático do programa FIDAP a partir da discretização do contorno do domínio de cálculo, permitindo a concentração de nós nas regiões de forte gradiente, conforme mostrado na Figura 1.

## CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como condição de contorno na seção de entrada foi imposto um perfil de velocidade constante obtido a partir dos valores das vazões medidas nos ensaios em modelos reduzidos. Os valores de  $k$ - $\epsilon$  foram adotados como constantes através da seção de entrada, os quais correspondem a um escoamento totalmente desenvolvido em um tubo.

Na saída foi imposto gradiente igual a zero para todas os graus de liberdade com exceção da pressão, a qual foi imposta como constante através da seção de saída.

A utilização do modelo de turbulência tipo  $k$ - $\epsilon$  impõe limitações quanto a modelagem da viscosidade na região afetada pela presença de um contorno sólido, uma vez que o mesmo só é válido para altos valores do número de Reynolds. Por outro lado, a utilização de um modelo de turbulência para baixo número de Reynolds requer um grande número de elementos na região próxima à parede, a fim de capturar as variações dos graus de liberdade nesta região.

A fim de contornar os problemas indicados acima, as regiões próximas aos contornos sólidos do domínio de cálculo são modeladas utilizando-se um tipo específico de elemento, o qual possui funções de forma especiais baseadas em perfis universais de variação para as

regiões próximas às paredes e que dependem do número de Reynolds característico da turbulência, sendo automaticamente ajustadas ao longo da resolução do problema, a fim de representar com a precisão necessária as variações locais do escoamento. As equações de  $k$  e  $\epsilon$  não são resolvidas nos elementos especiais, sendo utilizado para isso o modelo do comprimento de mistura de Van Driest.

## SOLUÇÃO NUMÉRICA

A metodologia numérica adotada para a resolução do sistema de equações não lineares do problema proposto é o algoritmo segregado, no qual cada equação de conservação é resolvida separadamente de uma maneira seqüencial e desacoplada.

Neste algoritmo a matriz global do sistema é decomposta em sub-matrizes, sendo que cada uma governa as variáveis associadas a somente uma equação de conservação. Estas sub-matrizes são resolvidas de uma forma seqüencial utilizando o método de eliminação de Gauss. Como a armazenagem das sub-matrizes requer um menor espaço em disco, a solução segregada necessita de uma capacidade de memória bem menor que o método de solução das equações completamente acoplado.

## RESULTADOS OBTIDOS

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se a distribuição de pressão para a comporta do aqueduto maior aberta a 30% e a 70% respectivamente.

Pode-se evidenciar a influência das perdas de cargas localizadas, impostas pela redução da área de passagem do fluido entre a face montante da comporta e a parede do poço, no nível de pressão agindo na face superior da comporta. Tal resultado é amplamente discutido por (Sagar e Tullis, 1979) e (Naudascher, 1986) sendo um dos importantes fatores que determinam os esforços hidrodinâmicos.

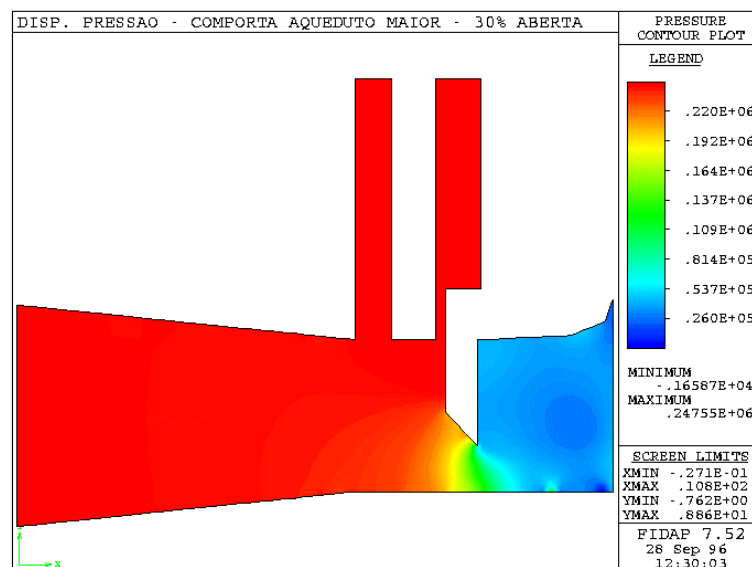


Figura 2 - Distribuição de Pressão - Comporta 30% Aberta

Nas Figuras 2 e 3 verifica-se a variação da pressão na face inferior da comporta. Os valores das pressões nesta região são inferiores aos da face superior da mesma, resultando em uma força devido à pressão, orientada de cima para baixo, caracterizando um esforço do tipo downpull, reproduzindo os resultados obtidos nos ensaios de modelo reduzido.

Na região superior, a jusante da comporta, obtém-se uma zona de alta recirculação e baixa pressão, a qual é maior para a comporta aberta a 30%. Como as condições de contorno aplicadas na seção de saída do domínio de cálculo equivalem a uma condição de gradiente

igual a zero para todas as variáveis exceto para a pressão, imposta constante, estas condições de contorno não são totalmente aplicáveis, já que a zona de recirculação tende a se estender além do limite jusante do domínio de cálculo. A fim de reduzir a influência das condições de contorno de jusante seria necessário aumentar o domínio de cálculo para jusante, o que implicaria em um considerável aumento do esforço computacional, justificando a manutenção das condições de contorno adotadas.

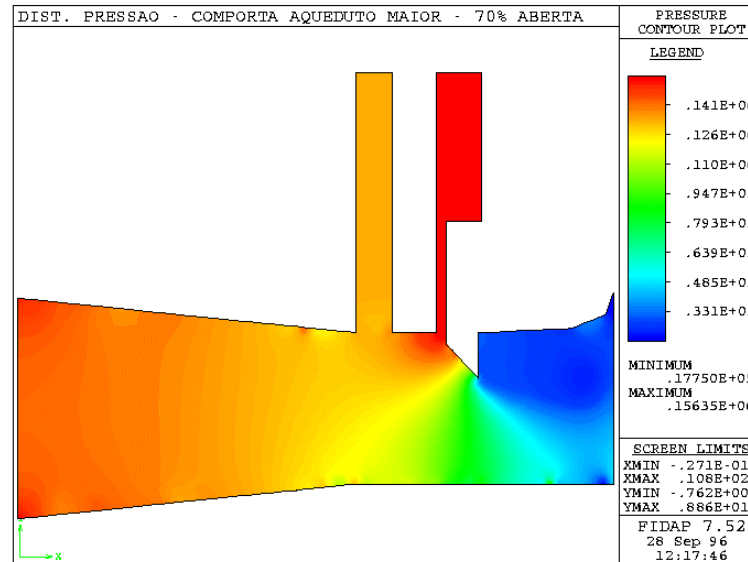


Figura 3 - Distribuição de Pressão - Comporta 70% Aberta

Nos gráficos das Figuras 4 e 5 estão representadas as distribuições de pressões sobre as faces da comporta para as condições de 30% e 70% de abertura, obtidas nos ensaios de modelo reduzido e na simulação numérica. Comparando os resultados da simulação numérica e dos ensaios em modelo reduzido pode-se observar que as diferenças entre os dois métodos são em média em torno de 11%.

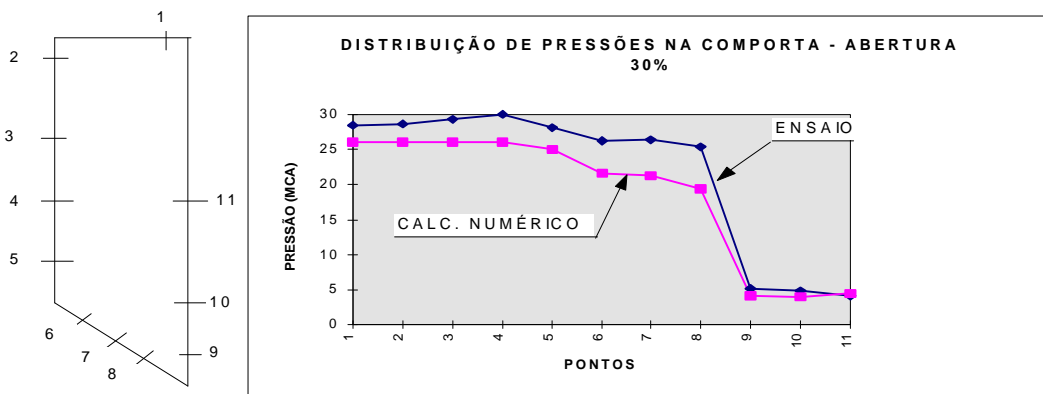


Figura 4 - Distribuição de Pressão sobre a Comporta 30% Aberta

## CONCLUSÕES

Foram apresentados e discutidos os principais pontos envolvidos na elaboração de um modelo numérico para cálculo dos esforços hidrodinâmicos em comportas hidráulicas.

Os resultados obtidos representam de maneira satisfatória o comportamento do escoamento, reproduzindo os resultados dos ensaios de modelo reduzido e confirmando as análises feitas em estudos anteriores. Por outro lado, considerando as limitações impostas sobre o modelo numérico, tais como abordagem bidimensional e domínio de cálculo truncado a jusante, bem como os erros de transposição dos resultados dos ensaios de modelo reduzido

para o protótipo, pode-se concluir das Figuras 4 e 5, que os resultados numéricos reproduzem quantitativamente os resultados dos ensaios em modelo reduzido.

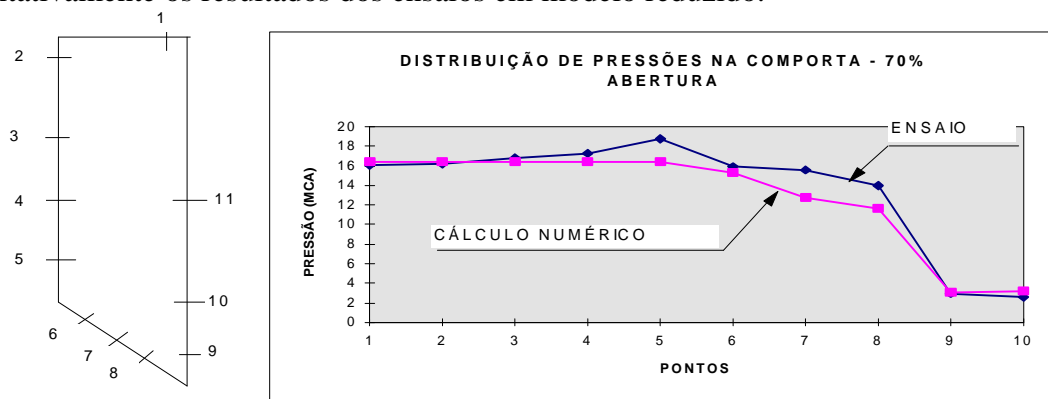


Figura 5 - Distribuição de Pressão sobre a Comporta 70% Aberta

O modelo numérico apresentado envolveu um total de aproximadamente 150 horas-homem no preparo dos dados e obtenção e análise dos resultados, as quais seriam gastas em um período corrido de apenas um mês. Além disso, o modelo numérico permitiu a execução de alterações na geometria do modelo com grande facilidade, tendo sido possível estudar outras configurações do escoamento e da comporta em um reduzido período de tempo.

Assim, pode-se concluir pela viabilidade de utilização da modelagem numérica na previsão dos esforços hidrodinâmicos em comportas hidráulicas, ficando demonstradas suas potencialidades para este tipo de aplicação. Por outro lado, considerando-se que este trabalho encontra-se em sua fase inicial, deverão ser abordados futuramente aspectos importantes dos escoamentos através das comportas, tais como:

- a existência de configurações do escoamento apresentando superfícies livres tanto no poço da comporta como a jusante da mesma;
- a introdução de efeitos tridimensionais que afetam o escoamento principalmente nas regiões das ranhuras das peças fixas;
- a introdução de efeitos de transitórios hidráulicos decorrentes do fechamento das comportas sob fluxo.

## REFERÊNCIAS

- NAUDASCHER E., ASCE M., KOBUS H. E., RAO R. P. R.; Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates; *Journal of HYDRAULICS DIVISION*, Maio; pp. 155-191, 1964.
- NAUDASCHER E., ASCE F., RAO P.V., RICHTER A., VARGAS P., WONIK G.; Prediction and Control of Downpull on Tunnel Gates; *Journal of Hydraulic Engineering*; vol. 112; No 5; Maio; 1986.
- REDDY J.N., GARTLING D. K.; *The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics*; CRC Press; 1994
- SAGAR B. T. A.; Downpull in High-Head Gate Installations; Partes 1 a 3; *Water Power and Dam Constructions*; Março a Maio; 1977.
- SAGAR B. T. A., TULLIS J. P.; Downpull on Vertical Lift Gates; *Water Power and Dam Constructions*; Dezembro; 1979.