

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE ESCOAMENTO COM BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS EM PLACA DE ORIFÍCIO DE ENTRADA CÔNICA

Mara Nilza Estanislau Reis

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30535-610.

mara@pucminas.br

Cleide Barbosa Soares

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

cleide.barbosa@ig.com.br

Leonardo Roberto da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

lrsilva@feb.unesp.br

Geraldo Augusto Campolina França

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901

franca@demec.ufmg.br

J. A. Soares

Estudante de Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30535-610

joaosoares@yahoo.com.br

C. H. L. Fossa

Estudante de Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30535-610

cal_bhz@yahoo.com.br

Resumo. Apesar dos avanços tecnológicos que permitem disponibilizar medidores de vazão cada vez mais sofisticados, destacam-se os medidores do tipo pressão diferencial, dentre os quais os mais difundidos são placa de orifício, venturi e bocal. Para escoamentos com baixos números de Reynolds, não devem ser utilizadas placas de orifício de canto vivo, devido a uma grande variação do coeficiente de vazão em função do número de Reynolds (BS 1042). Nesta situação, utilizam-se placas de orifício de entrada cônica. As placas de orifício de entrada cônica mantêm constante o valor do coeficiente de vazão mesmo para baixos números de Reynolds, tornando-as adequadas para medição de vazões de fluidos viscosos. Neste trabalho é feito um estudo experimental e numérico do escoamento com baixos números de Reynolds em placa de orifício de entrada cônica com relação de diâmetros, $\beta = 0,53$. Alguns modelos de turbulência foram usados nas simulações através do software CFX. Os coeficientes de vazão foram comparados com os dados experimentais disponíveis e com os valores recomendados pela norma BS 1042. Os resultados numéricos estão em boa concordância com os experimentais para o número de Reynolds abaixo de 3150 na tubulação.

Palavras chave: placas de orifício de entrada cônica, coeficiente de vazão, modelamento numérico, metodologia experimental.

1. Introdução

A placa de orifício mantém-se ainda como um dos elementos primários mais usados na medição de vazão na indústria e, apesar do avanço tecnológico que tem disponibilizado medidores de vazão cada vez mais sofisticados, não se espera que a participação desse dispositivo no mercado seja inferior a 40% num futuro próximo. Devido à simplicidade de instalação e manutenção, boa exatidão e custo relativamente baixo, os medidores do tipo orifício representam ainda cerca de 80% dos sistemas de medição de vazão nos diversos segmentos industriais. Dentre esses

medidores, as placas de orifício são as mais utilizadas, pois, além das vantagens já citadas, têm uma ampla aplicabilidade, inclusive para fluidos corrosivos (Martins, 1998).

A placa de orifício concêntrico de cantos vivos foi extensivamente estudada. Para altos números de Reynolds o coeficiente de vazão é bem definido chegando a ser quase constante. Para escoamentos com baixos números de Reynolds, como normalmente acontece para fluidos viscosos, as placas de orifício concêntrico de cantos vivos não podem ser utilizadas, pois neste caso apresentam uma grande variação do coeficiente de vazão em função do número de Reynolds. Tendo em vista a importância industrial da medição de tais fluidos, existe um grande interesse entre usuários dos medidores de vazão do tipo pressão diferencial em todo o dispositivo que possua um coeficiente de vazão constante para baixos números de Reynolds. Vários perfis de placas foram experimentados para casos de medição de vazão onde o número de Reynolds é relativamente baixo. Das várias formas experimentadas, algumas são mais difundidas e comentadas em normas como a AFNOR NF 10-101 ou a BS 1042 [1989]. A placa de orifício de entrada cônica é a forma que se revelou mais adequada para medição de vazão de fluidos viscosos com baixos números de Reynolds, conforme ilustra a Fig.1.

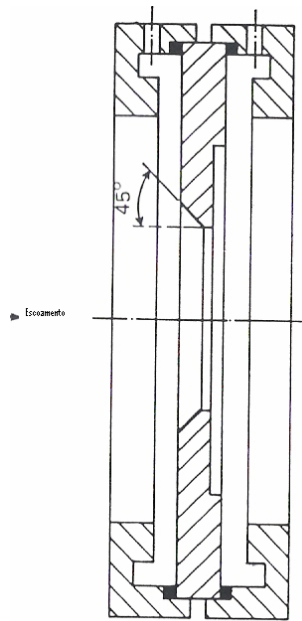


Figura 1. Representação Esquemática da Placa de Orifício de Entrada Cônica.

A placa de orifício de entrada cônica foi inicialmente desenvolvida em 1930 por H.E. Dall da George Kent Ltd assim como Kent PL. Alguns dados sobre Kent PL estão disponíveis nas especificações de patentes dos Estados Unidos (US Patent, 1938), e Linford (1961) referenciados no trabalho de Dall, que resultaram nas curvas características apresentando as variações do coeficiente de vazão em função do número de Reynolds. Os dados da placa de orifício de entrada cônica são mencionados na BS 1042: Parte 1: 1964 e são baseados na informação obtida pela George Kent Ltd. A placa com orifício de entrada cônica é usada em aplicações onde o número de Reynolds inferior varia de 25 a 75, de acordo com o valor da relação β .

Desde a publicação da BS 1042: Parte 1: 1964 foram exploradas as características da placa de orifício de entrada cônica por vários pesquisadores (Kastner e McVeigh, 1965; Stoll e Zientara, 1974; McVeigh, 1974; Turton, 1975; Ho e Leung, 1985). Entretanto, muitos dos resultados obtidos nestes estudos foram em placas de orifício de entrada cônica que não atendem as especificações de dimensionamento recomendadas pela norma. Deste modo, poucos resultados experimentais sobre as placas de orifício de entrada cônica que satisfazem às especificações da norma estão relativamente disponíveis, fazendo-se necessário um estudo mais aprofundado sobre suas características.

As características dos medidores de vazão são afetadas por vários parâmetros, dentre as quais, existe uma grande variação da escala em relação aos valores encontrados na prática. Devido ao grande avanço tecnológico na área computacional, simulações numéricas podem ser feitas com descrição espacial detalhada das grandezas de interesse e sua evolução ao longo do tempo, rapidez e baixo custo, qualidades difíceis de serem obtidas nas simulações experimentais. O esforço experimental pode ser então extremamente reduzido. Assim, o uso do modelo apropriado da simulação de turbulência no computador pode ser de extremamente útil no estudo da performance dos medidores de vazão.

Neste trabalho é feito um estudo experimental e numérico do escoamento com baixos números de Reynolds em placa de orifício de entrada cônica com relação de diâmetros, $\beta = 0,53$. Alguns modelos de turbulência foram usados nas simulações através do software CFX.

Os coeficientes de vazão foram comparados com os dados experimentais disponíveis e com os valores recomendados pela norma BS 1042 [1989].

Os resultados numéricos estão em boa concordância com os experimentais para o número de Reynolds abaixo de 3150 na tubulação.

2. Descrição geral e funcionamento do banco de fluxo

O banco de fluxo consiste em uma bancada experimental para estudo do escoamento transiente em um sistema de medição de vazão do tipo placa de orifício. Para tal estudo, a propagação de uma flutuação de vazão conhecida é relacionada a uma flutuação de pressão, permitindo a calibração dinâmica do sistema de medição. A flutuação de vazão em torno de um escoamento médio, também conhecido, é produzida pelo movimento harmônico de um êmbolo. A variação de pressão através do orifício é determinada experimentalmente através de transdutores de pressão acoplados a um sistema de aquisição dinâmica de dados.

O esquema geral do sistema é mostrado na Fig. 2.

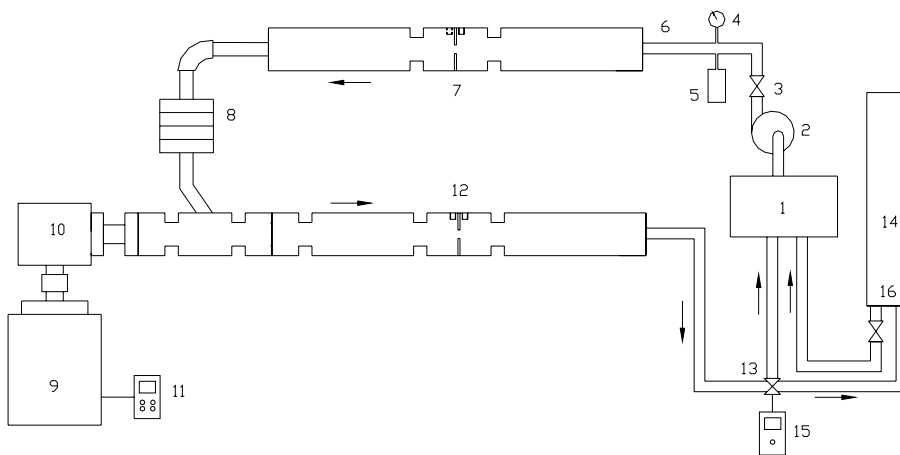


Figura 2. Esquema Geral do Banco de Fluxo.

Utilizando a Fig. 2 é apresentada a seguir uma descrição completa do banco de fluxo utilizado para o estudo do escoamento transiente (pulsante) de líquidos.

O óleo contido no tanque de armazenamento (1) é bombeado pela bomba de palhetas (2) a uma vazão constante Q_b . A vazão da bomba é controlada por uma válvula reguladora de vazão com compensação de temperatura (3). Um acumulador (5) utilizando gás nitrogênio a 4 bar de pressão é responsável pela minimização da pulsação provocada pela bomba na linha. O óleo segue pela tubulação de acrílico (6) até o primeiro sistema de medição de vazão (7). Este sistema é constituído pela mesma placa de orifício utilizada no sistema dinâmico e dois transdutores de pressão do tipo capacitivos. Sua finalidade é comprovar que o comprimento de tubo reto utilizado no sistema de medição de vazão dinâmica é grande o bastante para não interferir nos valores de vazão encontrados em regime permanente. Depois de passar pelo amortecedor tipo ressonador em série (8), o óleo entra em contato com o gerador de flutuação de vazão (10) através de uma ramificação presente na tubulação. Este dispositivo é acionado por um motor de corrente alternada (9), sendo sua rotação alterada pelo uso de um inversor de frequência (11). Em seguida, o óleo segue para o segundo sistema de medição de vazão (12), constituído por uma placa de orifício e um par de transdutores de pressão capacitivos. Quando o gerador de pulsos é acionado, o sistema (12) indica uma diferença de pressão que equivale a uma vazão média acrescida de uma flutuação de vazão amortecida e defasada. O amortecedor (8), associado à inclinação do tubo que leva o óleo ao sistema de medição de vazão dinâmica, tem como finalidade impedir a propagação desta flutuação para o sistema de medição (7). Depois de passar pelo sistema de medição dinâmica (12), o óleo passa por uma válvula direcional (13), que alterna o caminho percorrido pelo óleo entre a cuba de medição (14) e o tanque (1). Para a calibração do sistema e determinação da vazão estática Q_0 , utiliza-se um temporizador (15), que atua sobre a abertura da válvula direcional, permitindo a entrada do óleo circulante para a cuba graduada durante um determinado intervalo de tempo.

2.1. A Placa de orifício

A placa possui orifício de entrada cônica, de diâmetro ($d = 11,6 \text{ mm}$), com relação de diâmetros $\beta = 0,53$ foi construída segundo a norma BS 1042. O orifício de entrada cônica, mostrado na Fig.3, é usado em aplicações onde o número de Reynolds inferior varia entre 80 e $2 \times 10^5 \beta$.

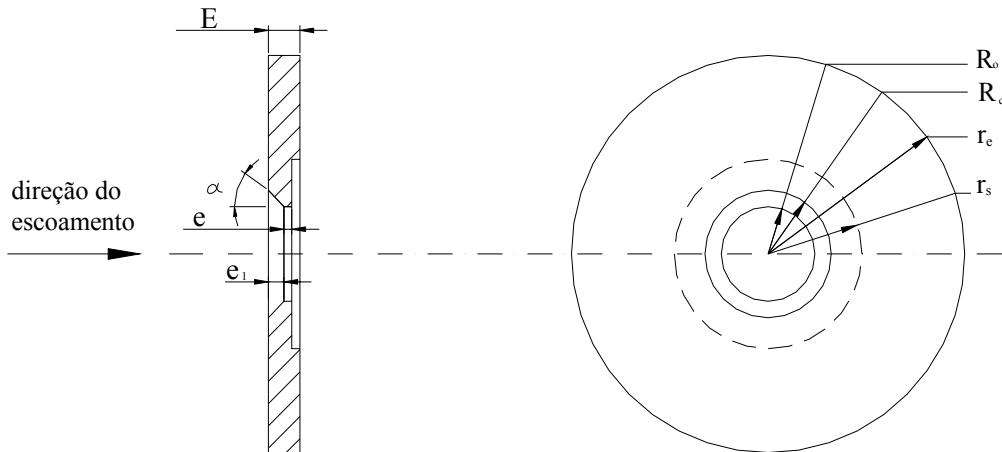


Figura 3. Placa de Orifício Cônica.

A Tabela 1 contém as dimensões da placa utilizada no experimento.

Tabela 1 - Dimensões (em mm) da placa de orifício de entrada cônica.

Placa de entrada cônica								
$d/D = \beta$	R_0	r_e	E	e	e_1	α	R_c	r_s
0,53	5,8	28,5	3,0	0,2	0,5	45,0	6,15	23,2

3. O modelo numérico

3.1. O código computacional

O pacote CFX apresenta um código *CFD* com aplicação geral, que utiliza o método dos volumes finitos. O pacote combina um processo avançado de resolução de equações discretizadas com ferramentas de pré e pós-processamento. Nos métodos tradicionais de modelamento com códigos *CFD*, geometrias complexas apresentam grandes limitações e requerem grandes investimentos e tempo para definir o problema. O pacote CFX supera estas dificuldades ao incorporar um pré-processamento baseado em *CAD* (desenho assistido por computador) para a geometria e malha o *ANSYS WORKBENCH*, que apresenta ferramentas para a criação de geometrias e um gerador automático de malhas não estruturadas. O pacote apresenta ainda um pré-processador físico, CFX-Pre, que permite definir todas as características físicas do problema, material, modelo de turbulência, etc., com grande detalhe e ampla gama de opções, e ainda um pós-processador, CFX-Post, que oferece inúmeras ferramentas para tratamento quantitativo e qualitativo dos resultados.

O conjunto de equações resolvidas são as equações transientes de Navier-Stokes na sua forma conservativa.

3.2. Modelo de turbulência

A placa de orifício de entrada cônica é essencialmente usada nas condições de baixo número de Reynolds. Portanto, um modelo turbulento de baixo número de Reynolds seria necessário para o estudo de suas características. Uma das vantagens da formulação *k- ω* é o tratamento próximo da parede para computações com baixo número de Reynolds, modelo desenvolvido por Wilcox (1986). O modelo não envolve as funções complexas não lineares requeridas para o modelo do *k- ϵ* e é consequentemente mais exato e mais robusto. Um modelo *k- ϵ* de baixo Reynolds exigiria tipicamente uma definição próxima da malha muito refinada, enquanto um modelo *k- ω* requer um refinamento dez vezes menor. Em escoamentos industriais, mesmo refinamentos dez vezes menores não podem ser garantidos na maioria das aplicações e para esta razão, um novo tratamento próximo da parede foi desenvolvido para os modelos *k- ω* . Ele permite o deslocamento suave de uma formulação de baixo Reynolds para uma formulação de função de parede. (Neto, 2004)

O problema principal com o modelo $k-\omega$ é sua sensibilidade forte às condições de escoamento livre. Dependendo do valor especificado para ω na entrada, uma variação significativa nos resultados do modelo pode ser obtida. O modelo *S.S.T.*, desenvolvido por Menter (1993), consiste em uma transformação do modelo do $k-\varepsilon$ a uma formulação $k-\omega$ e uma adição subsequente das equações correspondentes. O modelo $k-\omega$ é multiplicado desse modo por uma função acopladora $F1$ e o modelo transformado $k-\varepsilon$ por uma função $1-F1$. $F1$ se torna igual a um perto da superfície e a zero na camada limite. Na borda e na parte externa da camada limite, o modelo padrão do $k-\varepsilon$ é recuperado. O modelo leva em consideração o transporte das tensões turbulentas e dá previsões altamente exatas do início e da quantidade de separação do escoamento sob gradientes adversos de pressão. As equações finais do modelo são as seguintes:

A equação k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + (P_k - \beta' \rho k \omega) \quad (1)$$

Onde: k é a energia cinética turbulenta e P_k é o produto turbulento devido a viscosidade e forças de empuxo.

A equação ω :

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 \quad (2)$$

Onde: ω é a frequência turbulenta.

Além às variáveis independentes, a densidade, ρ , e o vetor da velocidade, U , são tratados como as quantidades sabidas do método de Navier Stokes.

Os coeficientes do modelo novo são uma combinação linear dos coeficientes correspondentes dos modelos subjacentes:

$$\Phi_3 = F1\Phi_1 + (1 - F1)\Phi_2 \quad (3)$$

Sendo Φ_1 os coeficientes do modelo $k-\omega$ e Φ_2 os coeficientes do modelo $k-\varepsilon$.

O comportamento apropriado do transporte pode ser obtido por um limitador a formulação da viscosidade turbulenta:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF2)} \quad (4)$$

$$\text{Onde: } v_t = \mu_t / \rho \quad (5)$$

$F2$ é uma função de acoplamento, que restringe o limitador à camada limite da parede, porque as suposições subjacentes não estão corretas para escoamentos livres. S é uma medida invariante da taxa da tensão.

As funções de acoplamento são críticas ao sucesso do método. Sua formulação é baseada na distância à superfície mais próxima e nas variáveis do escoamento.

$$F1 = \tanh(\arg_1^4)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{CD_{kw} \sigma_{\omega 2} y^2} \right] \quad (6)$$

Onde y é a distância à parede mais próxima e v é a viscosidade cinemática e:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega, 1 \times 10^{-10} \right) \quad (7)$$

$$F2 = \tanh(\arg_2^2)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \quad (8)$$

Essas equações, juntamente com as da conservação de massa e a de momento, foram aplicadas para o escoamento através da placa de orifício de entrada cônica; considerando que o escoamento é constante e laminar. As coordenadas cilíndricas e polares foram utilizadas no modelamento matemático.

3.3. Geometria da placa

A seção da placa de orifício utilizada no modelamento numérico encontra-se representada na Fig.4.

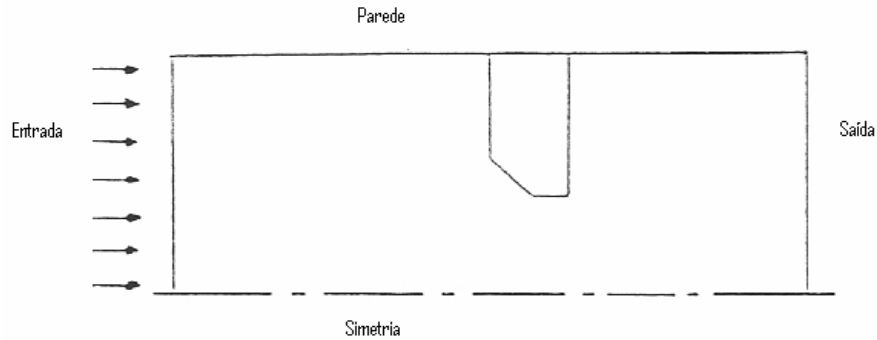


Figura 4. Representação da Seção Utilizada no Modelamento Numérico.

O parâmetro utilizado para criar a malha é o comprimento de escala, que é o tamanho máximo do elemento triangular a ser criado nas faces do sólido.

Nas regiões onde o escoamento apresenta grandes gradientes de velocidade, vórtices ou alguma característica que seja importante é necessário densificar a malha criando o que se chama de refino de malha.

A geometria utilizada inicialmente foi uma simetria de 1/8 que equivale a um ângulo de 45°.

O comprimento de escala utilizado foi de 0,9mm, ou seja, o maior elemento tem 0,9mm.

Na região refinada, mostrada na Fig. 5, que fica nas proximidades da placa de orifício, o comprimento de escala utilizado foi de 0,3mm.

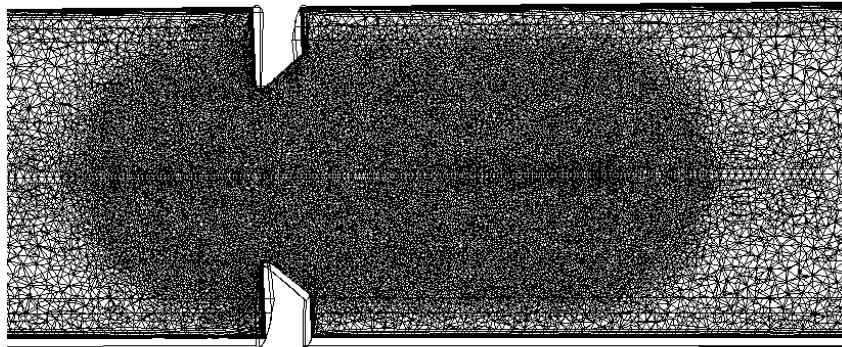


Figura 5. Refino da Malha Próximo a Placa de Orifício.

Além disso, foi criado um tipo de refino próximo à parede do tubo, chamado *Inflation*, que é a região estruturada na vizinhança da parede. Para o *inflation*, foram criadas 7 camadas, com o comprimento total máximo das 7 camadas de 2 mm, Fig. 6.

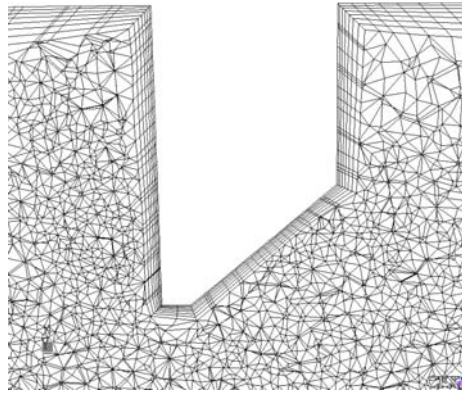


Figura 6. Detalhe do Refino e do Inflation.

O coeficiente de vazão é o parâmetro de maior importância para um medidor do tipo pressão diferencial. Conseqüentemente, pode se dizer que modelo correto foi obtido quando a escolha dos trechos retos de 55 D a montante e 16 D a jusante da placa de orifício foram suficientemente grandes, de modo que quaisquer acréscimos nestes trechos não afetaram no resultado do coeficiente de vazão. Um maior refinamento de malha foi feito para que o coeficiente de vazão continuasse inalterado.

Os limites de aplicação para placas de orifício de entrada cônica estão especificados na BS 1042: Seção 1.2: 1989 para relações de diâmetros, β , $0,1 \leq \beta \leq 0,316$, e para o número de Reynolds na tubulação Re_D , $80 \leq Re_D \leq 2 \times 10^5 \beta$. Os testes foram realizados com a relação de diâmetros, $\beta = 0,53$ e com o valor de Reynolds Re_D de 3150.

3.4. Condições de contorno

As condições de contorno do problema são:

- fronteira oeste em ($z = 0$): velocidade prescrita na entrada (vazão conhecida);
- fronteira leste em ($z = L$): escoamento localmente parabólico;
- fronteira norte em ($r = R$): parede impermeável;
- fronteira sul em ($r = 0$): simetria.

A Fronteira Norte é constituída pela parede do tubo, onde as velocidades são iguais a zero.

$$v_z = 0 \quad v_r = 0 \quad (9)$$

A Fronteira Sul é constituída pelo centro do tubo, onde é imposta a condição de simetria.

$$\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial v_r}{\partial r} = 0 \quad \text{ou} \quad (v_r(t) = 0) \quad (10)$$

A Fronteira Oeste corresponde a extremidade da tubulação, a montante da placa de orifício, onde inicia-se a análise. O comprimento da tubulação até a face de entrada da placa de orifício é 15 D. Este comprimento de entrada é sugerido pela ISO 5167 [1991] como sendo suficiente para que o perfil de velocidade desenvolva-se totalmente.

$$v_z = 2\bar{U} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$v_r = 0$$

Onde \bar{U} é obtida a partir da vazão total $Q_i(t)$ ou Q_o .

A Fronteira Leste corresponde à última seção da tubulação, a jusante da placa de orifício, analisada durante a simulação. A distância desta tubulação à face de saída da placa de orifício é de 55 D. Considerou-se que esta distância da placa de orifício foi suficiente para que o perfil de velocidade novamente se desenvolvesse.

4. Resultados

O modelo numérico S.S.T. foi usado para simular a vazão através de uma placa de orifício de entrada cônica. Resultados numéricos foram obtidos usando tubulação de 21,89 mm de diâmetro, sendo o fluido utilizado óleo hidráulico Móbil DTE 24 (ISO VG 32) com densidade de 864 kg/m³ e viscosidade absoluta de 26,78 x 10⁻³ Pa.s.

As dimensões reais para a placa de orifício de entrada cônica foram utilizadas na simulação.

Os coeficientes de vazão obtidos a partir dos resultados da simulação estão apresentados na Tab.2. Para a placa de orifício de entrada cônica, o valor do coeficiente de vazão é dado na BS 1042: Seção 1.2: 1989 foi de 0.734 (com incerteza de 2%) para valores de Reynolds entre 80 e 2 x 10⁵ β. Assim, pode-se observar que o modelo desenvolvido pode nos predizer o valor do coeficiente de vazão entre ±3% do valor determinado pela norma.

Com a necessidade de verificar a validação do modelo, os coeficientes de vazão obtidos numericamente devem ser comparados com os resultados experimentais disponíveis. Apenas um número limitado de resultados experimentais havia sido publicado sobre a placa de orifício de entrada cônica (Kastner e McVeigh, 1965; Stoll e Zientara, 1974; McVeigh, 1974; Turton, 1975; Ho e Leung, 1985). Das informações disponíveis, aquelas apresentadas por Stoll e Zientara, cobriram uma grande margem de valores de Reynolds e relações de diâmetros, β. Os outros trabalharam com uma margem limitada.

Tabela 2 - Coeficientes de vazão obtidos numericamente.

β	Re	Cd
0,53	80	0,7239 (-1,38%)
	1000	0,7476 (1,85%)
	2000	0,7520 (2,45%)
	4000	0,7545 (2,79 %)
	6000	0,7556 (2,94%)
	10000	0,7492 (2,07 %)

A Figura 7 mostra o coeficiente de vazão obtido numericamente com os resultados experimentais obtidos e de Stoll e Zientara. O coeficiente de vazão calculado numericamente é relativamente menor que os dados experimentais para os valores de baixos Reynolds e maiores que os dados experimentais para os valores de altos Reynolds. Enquanto os dados experimentais mostram um decréscimo do coeficiente de vazão em um valor crítico de Reynolds de 2000, o modelo numérico tende a predizê-lo com um valor maior de Reynolds. A comparação do coeficiente de vazão obtido numericamente com os resultados experimentais pode ser considerada razoável.

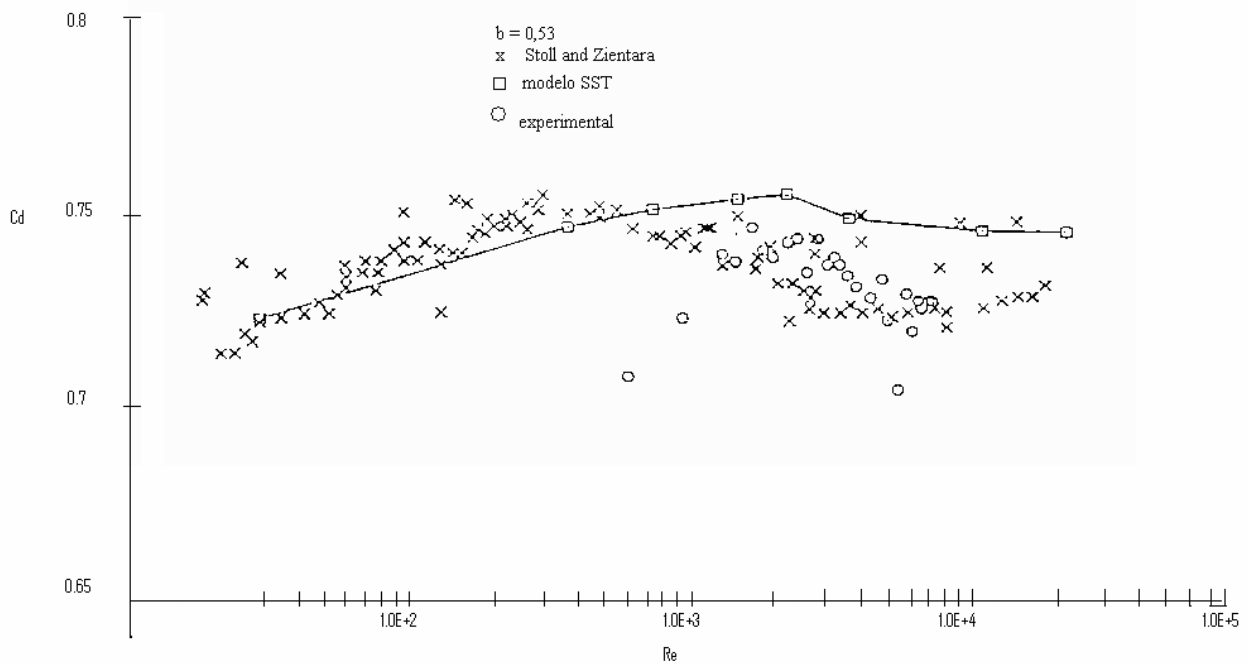


Figura 7. Comparação Entre os Valores Obtidos Numericamente e Experimentalmente.

5. Conclusões

O trabalho apresentado neste documento mostra a aplicação do modelo *S.S.T.*, para a simulação de vazão através da placa de orifício de entrada cônica. O modelo numérico desenvolvido mostra que é capaz de prever o valor do coeficiente de vazão da placa de orifício de entrada cônica com um erro de até $\pm 3\%$ do valor estabelecido na norma e encontrado experimentalmente. Como existe um número limitado de resultados experimentais disponíveis sobre as características da placa de orifício de entrada cônica, o modelamento numérico pode ser bastante útil para fornecer maiores dados sobre estas características.

Assim, o uso do modelo apropriado de turbulência na simulação pode ser extremamente útil no estudo da performance da placa de orifício de entrada cônica, isso, somado com os experimentos realizados, ajudará a direcionar para uma melhor compreensão dos dados obtidos, acarretando em uma melhor utilização da placa de orifício de entrada cônica como um medidor de vazão para baixos números de Reynolds.

6. Referências

- AEA Technology plc. CFX-5.7 Documentation, 2003, AEA Technology Engineering Software Ltd, United Kingdom.
- BS 1042, 1989, "Measurement of Fluid Flow in Closed Conduits" (Section 1.2) – British Standard Institution.
- Ho, Y. S., and Leung, T. P., 1985, "Performance of conical entrance orifice plates at low Reynolds numbers". *Int J Heat & Fluid Flow*, 6(2), June, pp.122-125.
- ISO 5167-1, 1991, "Measurements of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices" – part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-section Conduits Running Full – International Organization for Standardization.
- ISO/TR 3313, 1994, "Measurements of Pulsating Flow in a Pipe by Means Orifice Plates, Nozzles or Venturi Tubes Inserted, in Particular in the case of sinusoidal or Square Wave Intermittent Periodic Type Fluctuations" – International Organization for Standardization.
- Kastner, L. J., and McVeigh, J. C., 1965, "A reassessment of metering orifices for low Reynolds numbers". *Proc Instn Mech Engrs*, 180(Part 1) (13), pp.331-345.
- Launder, B. E., and Spalding D. B., 1974, "The numerical computation of turbulence flows". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, pp. 269-289.
- Martins, N., 1998, "Manual de medição de vazão: através de placas de orifício, bocais e venturis". Rio de Janeiro: Interciência: Petrobrás, 297p.
- McVeigh, J. C., 1974, "The effect of installation conditions on the discharge coefficient of the conical entrance orifice plate at low Reynolds numbers". *Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry*. 1(2), pp.533-537 Instrument Society of América.
- Menter, F. R., 1993, "Multiscale model for turbulent flows". Na 24th Fluid Dynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Menter, F. R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". *AIAA-Journal*., 32(8).
- Neto, A. S., 2004, "Turbulência nos Fluidos Aplicada" – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica.
- Patel, V. C., Rodi, W., and Scheuerer, G., 1985, "Turbulence models for near-wall and low Reynolds number flows: A review". *AIAA Journal*, 23, Sep, pp.1308-1319.
- Stoll, H. W., and Zientara, D., 1974, "The conic entrance orifice plate, An investigation of its performance characteristics". *Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry*, 1(2), pp.517-522. Instrument Society of América.
- Turton, R. K., 1975, "A note on flow through conical entrance orifice plates". *Conf on Fluid Flow Measurement in the Mid-1970's*, Glasgow, Paper A-3.
- Valle, R. M., 1994, "Escoamento Laminar em Placas de Orifício – Análise Teórica e Experimental em Regime Permanente e Transiente", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Wilcox, D.C., 1986, "Multiscale model for turbulent flows". Na 24^o AIAA (Aerospace Sciences Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics).

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF FLOW WITH LOW REYNOLDS NUMBERS IN CONICAL ENTRANCE ORIFICE PLATE.

Mara Nilza Estanislau Reis

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil – 30535-610.

mara@pucminas.br

Cleide Barbosa Soares

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

cleide.barbosa@ig.com.br

Leonardo Roberto da Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – Brasil – CEP 30480-000.

lrsilva@feb.unesp.br

Geraldo Augusto Campolina França

Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG – Brasil – 31270-901

franca@demec.ufmg.br

J. A. Soares

Estudante de Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil –

CEP 30535-610

joaosoares@yahoo.com.br

C. H. L. Fossa

Estudante de Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico – Belo Horizonte – MG – Brasil –

CEP 30535-610

cal_bhz@yahoo.com.br

Abstract

Despite the technological advances that make available ever more sophisticated flow meters, the differential pressure meters stand out. Among the most widely used of them all are orifice plate, venturi and nozzles. For flow with low Reynolds numbers, concentric orifice plates should not be used due to a great variation in the coefficient of discharge resulting from the Reynolds number (BS 1042). In this situation, conical entrance orifice plates are used. The conical entrance plates keep the value of the same coefficient of discharge constant for low Reynolds numbers, therefore lending itself to the measurement of viscous fluid. This paper presents an experimental and numerical study of the flow with low Reynolds numbers in conical entrance plate with diameter ratio, $\beta = 0,53$. Some models of turbulence had been used in the simulations through software CFX. The coefficients of discharge were compared with the experimental data available and the values recommended in BS 1042. The numerical results are in good agreement with the experimental results for the Reynolds number below 3150 in the tube.

Keywords: conical entrance orifice plate, coefficient of discharge, numerical modelling, experimental methodology.