
ESTUDO NUMÉRICO DE MEDIDOR DE VAZÃO TIPO CONE

Daniel Roberto Luckner Alberti

Estevan da Silva Belnomo

Mark Bauke Seifert

Otávio Marcuz Visioni

Edvaldo Angelo

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

O estudo proposto analisa um medidor de vazão tipo cone por meio da determinação do coeficiente de descarga por meios computacionais. Medidores de vazão são amplamente utilizados na indústria, pois garantem que este importante parâmetro de processo seja atendido de acordo com a demanda necessária. Existem muitos tipos de medidores de vazão, que podem determinar a grandeza por meios indiretos, como a medição pela pressão diferencial em placas de orifício ou até a medição direta de velocidade do escoamento, como os medidos eletromagneticamente. O medidor de vazão tipo cone funciona com o mesmo princípio de funcionamento do tubo de Pitot, e as características construtivas lhe conferem maior precisão na determinação da vazão quando comparado às placas de orifício.

Palavras-chave: Medidor tipo cone. Coeficiente de descarga. CFD.

1 INTRODUÇÃO

Medidores de vazão são dispositivos construídos com a finalidade de medir a quantidade de fluido que atravessa uma determinada região em certo intervalo de tempo. O interesse nestes dispositivos é muito grande, pois há inúmeras aplicações industriais e cotidianas em que a medição de vazão é importante. Entre essas aplicações é possível citar a necessidade de mensurar quantidades de fluido em linhas de combustível, água e gás, entre outros. Essas medições devem ser precisas, especialmente pois, em muitos casos, proveem dos elementos quantitativos para cobranças financeiras dos fornecedores dos fluidos ou ainda estão ligadas a parâmetros de segurança ou de controle de processos de linhas de fluidos em escoamento.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é simular numericamente um medidor tipo cone, utilizando um modelo matemático desenvolvido com o auxílio do *software* comercial ANSYS CFX[®]. O modelo desenvolvido tem característica tridimensional e estuda um escoamento incompressível, permanente de fluido newtoniano (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). São simuladas variações geométricas para o medidor do tipo cone e indicadas as diferenças entre os escoamentos produzidos pelas alternativas geométricas estudadas. Os resultados são comparados com os reportados na literatura e também a uma placa de orifício normalizada. O parâmetro de comparação escolhido foi o coeficiente de descarga, diretamente relacionado à perda de carga imposta pelo medidor.

3 MODELAMENTO DO MEDIDOR DE VAZÃO

O medidor de vazão tipo cone, estudado neste trabalho, obedece ao mesmo princípio de funcionamento do tubo de Pitot (indicado esquematicamente na Figura 1). Desse modo, o equacionamento matemático deste último é útil na compreensão do princípio de funcionamento do medidor em formato de cone. A geometria do tubo foi desenvolvida em 1732 pelo francês Henri Pitot, que realizou o invento chamado,

posteriormente, em sua homenagem, de tubo de Pitot. Todavia, o tubo de Pitot é um medidor de velocidade do escoamento e não um medidor de vazão.

Para o modelamento matemático preliminar, é possível a utilização da equação de Bernoulli (Equação 1) entre os pontos 1 e 2 do escoamento indicado na Figura 1.

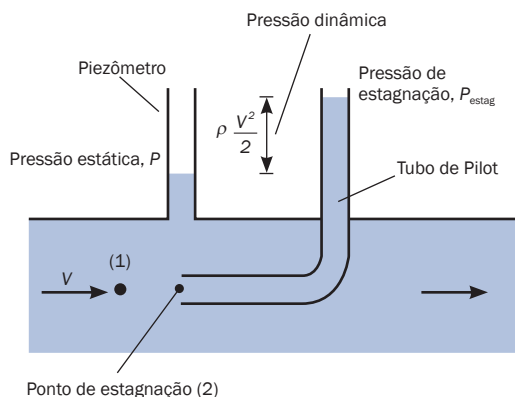


Figura 1 Representação esquemática do Tubo de Pitot

Fonte: Elaborada pelos autores.

A equação de Bernoulli é uma aproximação da equação da conservação de energia.

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (1)$$

em que:

p = Pressão u a velocidade do escoamento.

z = Cota em relação a um plano horizontal de referência.

ρ = Densidade do fluido e g a aceleração da gravidade.

A equação de Bernoulli é uma equação aproximada, pois várias hipóteses simplificadoras são empregadas para sua obtenção, entre elas escoamento permanente, isotérmico, incompressível e unidimensional de fluido ideal (ÇENGEL; CIMBALA, 2007), o que caracteriza um escoamento ideal, ou seja, sem viscosidade). A geometria do tubo de Pitot obriga a estagnação do escoamento (na entrada do tubo de Pitot), transformando toda a energia cinética das partículas de fluido no ponto 1 em energia de pressão no ponto 2 (pressão de estagnação). A diferença de energia de pressão entre os pontos 2 e 1 é justamente a parcela de energia cinética carregada pelo escoamento ao passar pelo ponto 1. Desse modo, a velocidade do escoamento pode ser obtida com a Equação 2.

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

A diferença de pressão $\Delta p = p_2 - p_1$ do escoamento pode ser medida facilmente por um transdutor de pressão diferencial ou manômetro. Assim, a geometria imposta ao escoamento é capaz de modificar a velocidade e a medida da variação da pressão pode ser correlacionada à velocidade original. É fato que a realização de medições de pressão é relativamente fácil. Os medidores de vazão com base neste princípio (variação da velocidade por características geométricas e medição da variação de pressão) são chamados de medidores de vazão por obstrução e são amplamente utilizados para medir vazões de gases e líquidos (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Entre os mais conhecidos medidores de vazão que utilizam esse princípio, é possível citar a placa de orifício e o tubo de Venturi. A Figura 2 indica o medidor do tipo cone.

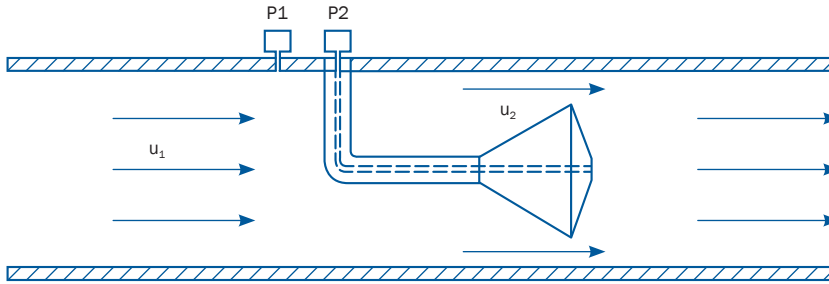


Figura 2 Medidor de vazão tipo cone

Fonte: Elaborada pelos autores.

A mesma equação de Bernoulli aplicada ao medidor do tipo cone, usando a característica geométrica β , que é a relação quadrática de áreas entre as seções 2 e 1, indicada na Equação 3 (ÇENGEL; CIMBALA, 2007), obtém a Equação 4:

$$\beta^2 = \frac{A_2}{A_1} = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

em que:

Q = Vazão volumétrica.

D = Diâmetro da tubulação em que o cone é instalado.

d = Maior diâmetro do cone.

A Equação 4 admite escoamento ideal, ou seja, desconsidera as perdas por atrito. A presença de perdas é inevitável, uma vez que o fluido tem viscosidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Além disso, a corrente de fluido continua se contraindo após a passagem pela restrição, em um fenômeno conhecido como *vena contracta* (contração de veia de escoamento). As perdas podem ser estimadas pela incorporação do adimensional conhecido como coeficiente de descarga C_D , conforme indicado na Equação 5.

$$Q = C_D \cdot \frac{A_2}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

O coeficiente de descarga varia de acordo com o número de Reynolds e também com o parâmetro β . Segundo o princípio de funcionamento já descrito, um medidor de vazão tipo cone mede a vazão porque é adequado para gerar pressão diferencial e o equacionamento é capaz de correlacioná-la com a velocidade anterior ao mesmo, obtendo (indiretamente) a vazão. Quando o fluido escoar através do cone, à jusante forma-se uma área de baixa pressão graças a restrição geométrica (SAPRA et al., 2011). A pressão diferencial pode ser medida por duas tomadas instaladas adequadamente. Uma num ponto que tangencia o escoamento da tubulação, fazendo uma medição estática da pressão (p_1), e a outra tomada num ponto após o cone, que mede a pressão dinâmica (p_2).

Para a modelagem dos cones estudados, o diâmetro da tubulação é admitido constante, conforme especificação de tubo 4 polegadas Schedule 40s, com diâmetro interno de 0,10226 m. Os valores de β estudados são de 0,4; 0,5; 0,6 e 0,7, por terem dados que se equiparam aos modelos de medidores disponibilizados comercialmente (como as placas de orifício). Na condição de contorno de entrada, foi estipulada uma velocidade de 0,1 m/s e, na saída, uma pressão nula na escala efetiva. As dimensões dos cones foram projetadas conforme cotas indicadas na Figura 3 e valores indicados na Tabela 1.

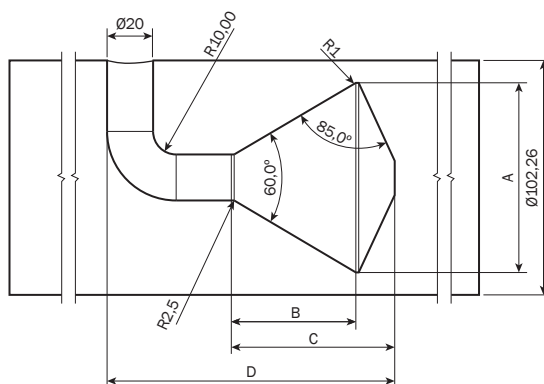


Figura 3 Dimensões do medidor de vazão tipo cone

Fonte: Elaborada pelos autores.

TABELA 1

Dimensões do medidor de vazão tipo cone

Cota	$\beta = 0,4$	$\beta = 0,5$	$\beta = 0,6$	$\beta = 0,7$
A	93,90 [mm]	88,74 [mm]	81,98 [mm]	73,20 [mm]
B	64,94 [mm]	60,47 [mm]	54,62 [mm]	47,01 [mm]
C	83,97 [mm]	78,29 [mm]	70,87 [mm]	61,22 [mm]
D	138,30 [mm]	132,62 [mm]	125,20 [mm]	115,55 [mm]

Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1 Modelo de escoamento

Inicialmente, foi determinado o número de Reynolds do escoamento para estimar o nível de turbulência, por meio do quociente de forças de inércia e de forças viscosas, conforme a Equação 6.

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (6)$$

em que:

μ = Viscosidade dinâmica do fluido.

O fluido considerado para o estudo é a água em temperatura constante de 25°C, com densidade ρ de 997,0 kg/m³ e uma viscosidade dinâmica de 1,003E-3 Pa.s (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Com esses dados colocados na Equação 6, obtém-se um número de Reynolds igual a 10.165. Portanto, é um número de Reynolds maior ou igual a 4.000, o que caracteriza um escoamento turbulento (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

Um regime turbulento apresenta comportamento caótico. As velocidades absolutas e várias outras características do fluxo variam aleatoriamente. A natureza aleatória de um fluxo turbulento impede previsões completas quanto ao movimento das partículas do fluido. Assim, torna-se necessário aplicar um modelo de turbulência que tenha a capacidade de descrever os fenômenos envolvidos.

No escoamento turbulento, as propriedades como velocidade, temperatura e pressão estão sujeitas a flutuações, variando em função da posição e do tempo. Portanto, valores instantâneos podem ser representados como a soma de uma média ponderada sobre o tempo com uma parte flutuante, conforme a Figura 4.

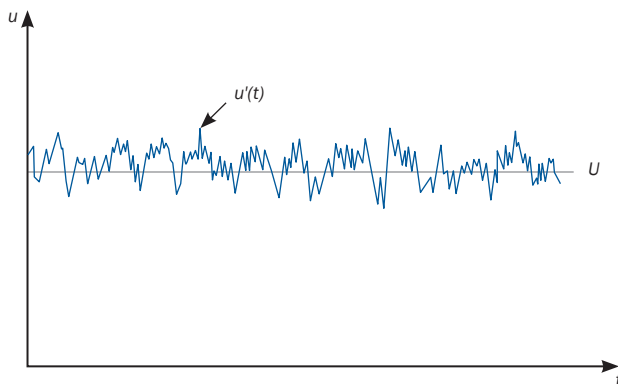


Figura 4 Variações de velocidade turbulenta para uma posição fixa em um escoamento permanente

Fonte: Elaborada pelos autores.

É possível citar entre os muitos modelos matemáticos existentes para tratamento da turbulência os modelos: comprimento de mistura de Prandtl e o modelo $k-\epsilon$ (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). A teoria de Prandtl é incapaz de descrever fluxos com separação e recirculação, características presentes em escoamentos turbulentos em tubos com restrições internas, como a apresentada. Assim, o modelo mais indicado é o modelo $k-\epsilon$, que combina a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, também chamado de modelo de turbulência a duas equações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

4 ESTUDO DE MALHA

A malha é a divisão do domínio computacional ou a discretização dele. O estudo da densidade de malha torna-se necessário, pois a densidade inadequada pode causar erros numéricos significativos.

Os erros numéricos podem ser de arredondamento, de iteração e de discretização – este último por consequência da transformação das equações de meio contínuo para um sistema de equações algébricas. Por isso, o primeiro passo no pré-processamento é certificar-se de que a malha está coerente com o estudo. Para ter certeza da acurácia de uma malha, torna-se importante ter as soluções exatas para os casos estudados, no processo de verificação e validação (KATZ; SANKARAN, 2011), o que não é possível para escoamentos complexos, limitando as comparações com os estudos experimentais que, porventura, possam ser desenvolvidos.

O processo de verificação da malha consiste na realização de refinamentos sucessivos até a obtenção da convergência dos resultados. Assim, eles se tornam “independentes da malha” (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). Também na comparação de malhas, a malha mais precisa será aquela que apresentar uma queda mais rápida dos resíduos de erro (KATZ; SANKARAN, 2011) durante o processo de solução iterativa.

4.1 Configurações de malha

Existem, basicamente, três tipos de malha: estruturadas, não estruturadas e híbridas. Na primeira, não há distorções na ordem, sempre tentando manter uma certa uniformidade entre os elementos. Na segunda, tal uniformidade não é respeitada. Na terceira, há a opção de realizar uma mistura dos dois primeiros tipos, o que se torna conveniente em regiões de camada-limite, causando a possibilidade de concentração de elementos de malha nestas regiões (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Seis configurações de malhas híbridas diferentes foram utilizadas nos estudos.

A primeira malha construída teve uma distribuição grosseira de elementos (malha 1). Após o refinamento, a malha resultante apresentou aspecto visual mais denso e, conseqüentemente, um número maior de elementos. Subseqüentemente, mais dois refinamentos foram realizados, assim como os gráficos de resíduos de erro, para comparação, conforme os dados podem ser observados na Tabela 2 e nas figuras 5 e 6.

TABELA 2

Configurações de malha

Recurso	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5	Malha 6
Nº de nós	76.545	430.494	445.189	520.816	988.185	2.186.231
Nº de elementos	165.173	1.307.135	1.357.287	1.843.598	3.159.394	7.460.414

Fonte: Elaborada pelos autores.

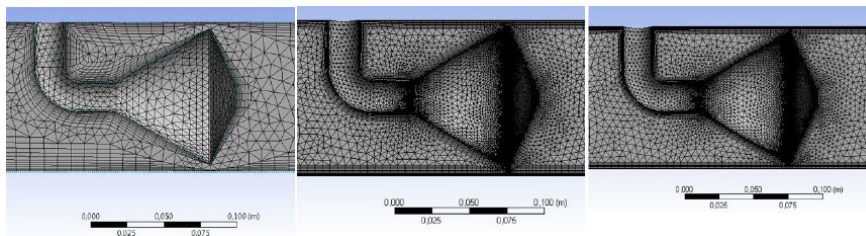


Figura 5 Aspecto visual das malhas 1, 2 e 3

Fonte: Elaborada pelos autores.

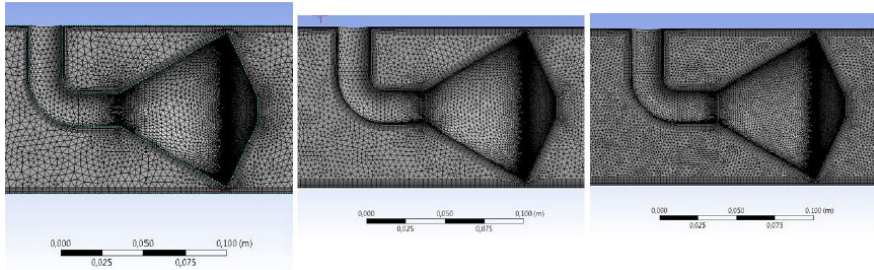


Figura 6 Aspecto visual das malhas 4, 5 e 6

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados de simulações feitas sempre sob as mesmas condições de contorno são indicados. O primeiro ponto observado é a queda do resíduo de erro no decorrer do processamento iterativo. O segundo ponto é a diferença percentual comparativa de resultados. A configuração de malha a ser escolhida foi aquela que apresentou a menor diferença percentual (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). Desse modo, foi possível observar uma convergência para os valores da malha com maior número de elementos e nós (Gráfico 1).

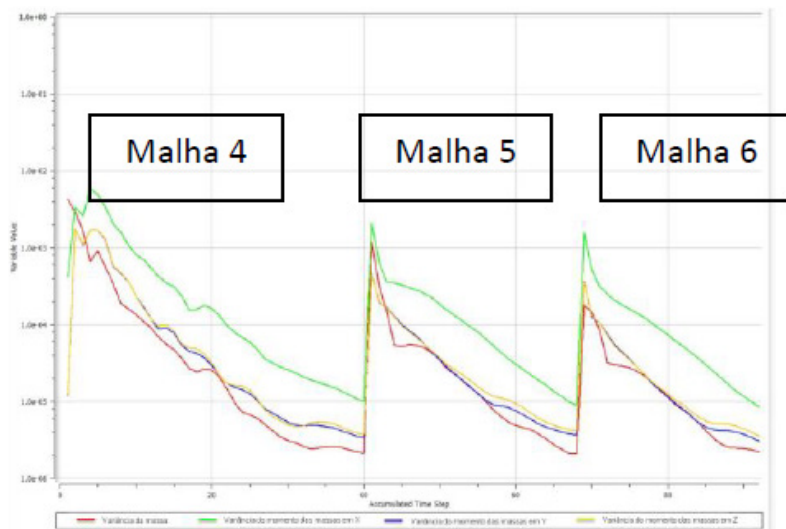


Gráfico 1 Comparativo de gráfico de erro residual entre malhas 4, 5 e 6

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela análise do decaimento residual de erros, desconsidera-se a malha 1, pois ela não tem uma precisão adequada. As malhas 2 e 3 apresentaram uma flutuação de valores de perda de carga em proporção acima do aceitável, que seria em torno de 5% de erro entre as duas medições (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). Assim, essas medições também foram desconsideradas para o estudo. Já nas malhas 4, 5 e 6, foi possível notar uma pequena variação dos valores de perda de carga, sendo elas consideradas para a comparação. Os resultados são comparados na Tabela 3.

TABELA 3

Resultados das simulações da malha

Malha	Variável de pressão [Pa]		Diferença de pressão [Pa]
	Montante	Jusante	
Malha 1	1,740E+02	-3,349E+01	207,49
Malha 2	1,808E+02	-5,449E+01	235,29
Malha 3	1,728E+01	-5,434E+01	227,14
Malha 4	1,801E+02	-6,170E+01	241,80
Malha 5	1,773E+02	-5,856E+01	235,86
Malha 6	1,780E+02	-5,693E+01	234,93

Fonte: Elaborada pelos autores.

O Gráfico 2 indica uma comparação gráfica entre as respostas para as diversas malhas testadas.

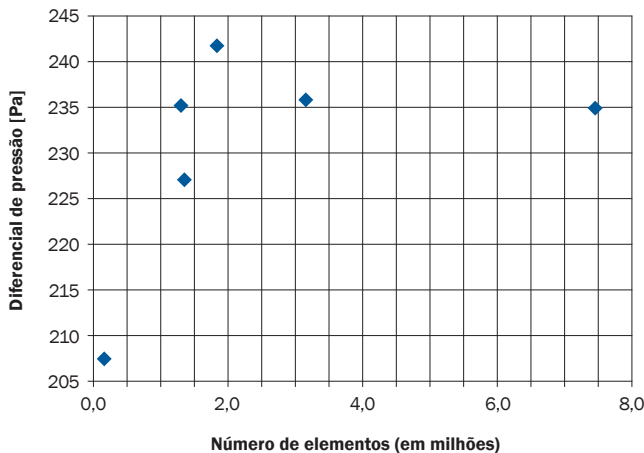


Gráfico 2 Diferencial de pressão em função do número de elementos de cada malha

Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, conclui-se que a malha 5 tem precisão adequada. A configuração de malha para as diversas condições ensaiadas numericamente foi semelhante à da malha 5.

5 RESULTADOS

O objetivo da simulação é estudar a perda de carga com a variação do perfil geométrico de cone e realizar comparações com o trabalho de Hollingshead et al. (2011) e Katz e Sankaran (2011) e com uma placa de orifício dimensionada para as mesmas condições conforme norma. Foram tomados como configuração inicial os planos para determinação de pressão conforme indica a Figura 7. Nela, nota-se ainda a distribuição de velocidades na região do cone. É possível verificar que, logo após a contração, o escoamento continua a se contrair, sendo este uma das razões pela qual o coeficiente de descarga deve ser aplicado. A vantagem aqui é que esta contração é menor se comparado a uma placa de orifício, por exemplo.

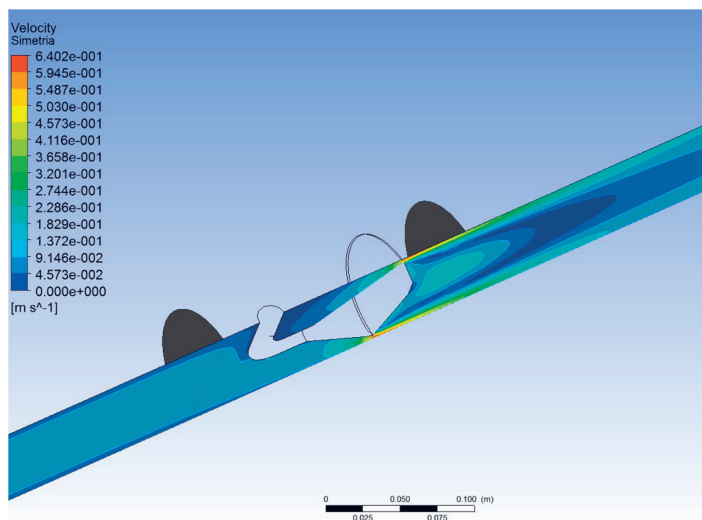


Figura 7 Planos de medição de pressão

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os planos foram chamados de “Montante” e “Jusante” no ANSYS CFX®. Com estes, foi possível medir as variáveis disponíveis na Tabela 4. O cone serve como um

condicionador de vazão e pressão, o que faz com que à jusante do medidor tenha-se um gradiente de pressão mais linear (Figura 8), obtendo adicionalmente uma uniformidade maior no valor de pressão na seção transversal do duto.

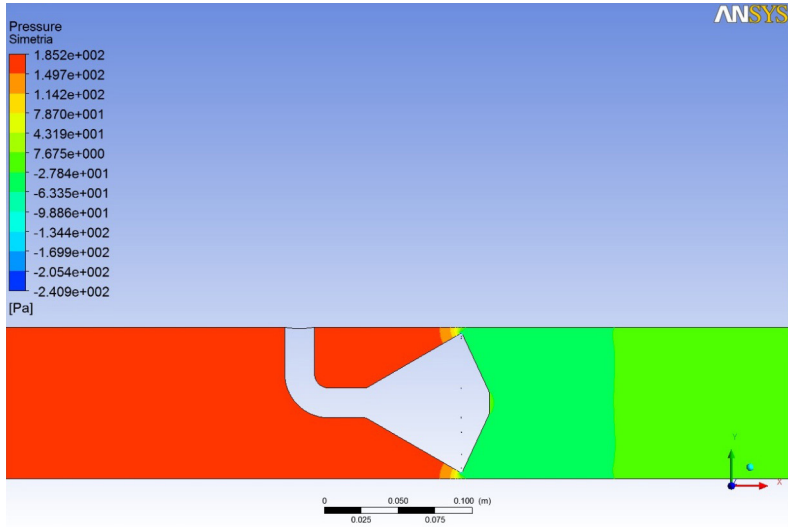


Figura 8 Gradiente de pressão no cone

Fonte: Elaborada pelos autores.

As variáveis medidas foram pressão e velocidade, para determinar o coeficiente de descarga pelo emprego da Equação 5, com resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 4

Valores medidos das simulações

Característica geométrica β	Pressão [Pa]		Velocidade [m/s]	
	Montante p1	Jusante p2	Montante	Jusante
0,4	1,808E+2	-5,449E+1	9,167E-2	2,987E-1
0,5	6,453E+1	-3,245E+1	9,093E-2	2,529E-1
0,6	2,668E+1	-1,838E+1	9,105E-2	1,984E-1
0,7	1,173E+1	-9,449E+0	9,088E-2	1,576E-1

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os resultados do coeficiente de descarga são apresentados na Tabela 5 e indicados no Gráfico 3.

TABELA 5

Variação do coeficiente de descarga

Característica geométrica β	Coefficiente de descarga CD
0,4	0,969
0,5	0,890
0,6	0,869
0,7	0,868

Fonte: Elaborada pelos autores.

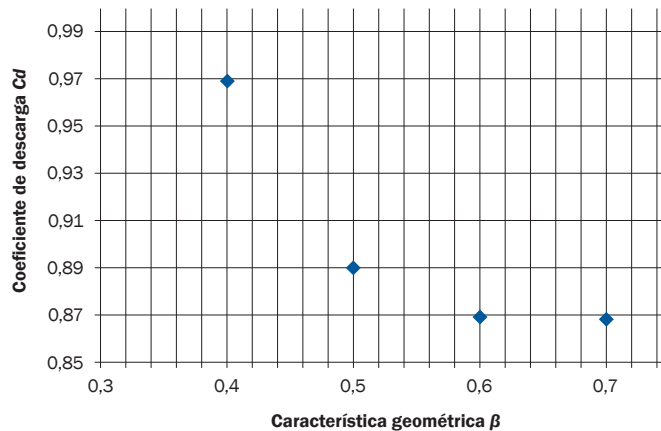


Gráfico 3 Variação do coeficiente de descarga

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Tabela 6 indica uma comparação entre os coeficientes de descarga obtidos nas simulações numéricas aos coeficientes de descarga de uma placa de orifício normalizada para medição da mesma vazão e também os resultados encontrados na literatura científica.

TABELA 6

Comparação de coeficientes de descarga

Característica geométrica β	Coefficiente de descarga C_D encontrado para o cone	Coefficiente de descarga para placas de orifício conforme norma ISO 5167-2/2003	Coefficiente de descarga C_D para $Re = 10.000$ conforme o trabalho de Hollingshead, et al. (2011)
0,4	0,969	0,678	-
0,5	0,890	0,717	-
0,6	0,869	0,767	0,773
0,7	0,868	0,828	0,766
0,8	-	-	0,723

Fonte: Elaborada pelos autores.

Pelas comparações, é possível notar que o coeficiente de descarga para os medidores tipo cone não são muito maiores que 0,8 (HOLLINGSHEAD et al., 2011). Essa diferença pode ser justificada pelas diferenças impostas nas condições do fluido e de escoamento, o que podem causar variações da perda de carga no elemento cônico. A equação utilizada para determinação do coeficiente de descarga das placas de orifício leva em conta os valores experimentais descritos por Miller (1996). Em semelhança entre o presente estudo e os dados disponíveis na literatura (HOLLINGSHEAD et al., 2011), nota-se que o coeficiente de descarga decai conforme o aumento da característica geométrica β , tanto nas simulações executadas quanto nas indicações da literatura. Para β igual a 0,7, não se conseguiu reproduzir exatamente o indicado no trabalho usado na comparação.

Na comparação com uma placa de orifício dimensionada conforme normas da International Organization for Standardization (2003a, 2003b), a diferença básica é que a norma calcula o coeficiente de descarga para uma placa de orifício que causa uma diminuição na restrição conforme β aumenta, o que diminui a quantidade de regiões de recirculação do escoamento (vórtices) após a placa, reduzindo sua perda de carga. Assim, conclui-se que o estudo da norma apresenta um cálculo coerente para a aplicação nas placas de orifício, porém as conclusões não se tornam viáveis em medidores de vazão tipo cone que, apesar de funcionarem pelo mesmo princípio de medição de vazão por pressão diferencial, não apresentam a criação de grandes vórtices e condicionam o escoamento, promovendo um perfil de pressão mais homogêneo (após o medidor) que uma placa de orifício.

Portanto, conclui-se que a utilização do medidor de vazão do tipo cone é mais vantajosa se comparada à medição das placas de orifício, já que apresenta um coeficiente de descarga maior, ou seja, uma perda de carga menor no escoamento em que se deseja medir a vazão. Evidentemente, a comparação indicada se refere apenas ao parâmetro indicado (coeficiente de descarga), desprezando quaisquer análises de custos dos medidores.

6 CONCLUSÃO

Os medidores de vazão são instrumentos de grande utilidade e tem diversas e importantes aplicações práticas em diversos processos industriais. Este estudo apresentou uma análise de um medidor de vazão do tipo cone por meio da simulação computacional e da comparação dos resultados a um medidor do tipo placa de orifício e a resultados indicados na literatura. Os modelos utilizaram diferentes geometrias.

Considerando o escoamento turbulento, foi possível notar que o medidor tipo cone tem coeficiente de descarga altamente relacionado à sua característica geométrica. Os resultados para o coeficiente de descarga, comparado com o medidor cônico a um medidor muito utilizado industrialmente, indicam um potencial de utilização dos medidores do tipo cone por apresentarem menores perdas de carga, desprezadas comparações de custo dos medidores.

NUMERICAL INVESTIGATION OF CONE FLOW METER

Abstract

The proposed study aimed to an analysis of a cone flow meter by determining of the discharging coefficient by CFD. Flow meters are highly used in the industry, because they ensure this important process parameter be in accordance with design. There are many types of flow meters, like the differential pressure measurement by orifice plates or even the direct flow velocity measurement by electromagnetic measurement. The cone flow meter works with the same principles applied to the Pitot's tube, but it has an important characteristic which makes it physically compact and ensure a better precision, when compared to the orifice plates.

Keywords: Cone flow element. Discharge coefficient. CFD.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos*. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

HOLLINGSHEAD, C. L. et al. Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 78, n. 3/4, p. 559-566, Sept. 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 1: General principles and requirements. Suíça, 2003a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full: Part 2: Orifice plates. Suíça, 2003b.

KATZ, A.; SANKARAN, V. Mesh quality effects on the accuracy of CFD solutions on unstructured meshes. *Journal of Computational Physics*, v. 230, n. 20, p. 7670-7686, Aug. 2011.

MILLER, R. W. *Flow measurement engineering handbook*. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 1996.

SAPRA, M. K. et al. Experimental and CFD investigation of 100 mm size cone flow elements. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 22, p. 469-474, Oct. 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *Introduction to computational fluid dynamics*. Nova York: Longman Scientific & Technical, 1995.

Contato

Daniel Roberto Luckner Alberti
danluckner@gmail.com