

# ESTUDO DE CASO DA INFLUÊNCIA DO FATOR DE RELAXAÇÃO SOBRE O PERFIL DE VELOCIDADE EM UM ESCOAMENTO TURBULENTO DE AR ATRAVÉS DE UMA PLACA DE ORIFÍCIO

## Sinthya Gonçalves Tavares

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

## Mara Nilza Estanislau Reis

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

**Resumo.** O fator de relaxação é utilizado de forma intensiva nos métodos numéricos como ferramenta de melhoria do processo de convergência. Porém, com exceção de alguns programas abertos onde o usuário experiente pode atuar, a maioria dos programas comerciais são caixas-pretas e a metodologia de aplicação dos fatores de relaxação na solução das equações algébricas envolvidas no problema nem sempre é suficientemente clara. Além disto, mesmo com a escolha inadequada do fator de relaxação, os programas, por serem robustos, chegam a apresentar resultados convergentes, embora nem sempre realistas. Neste trabalho, será descrito um problema desta natureza. Ao analisar numericamente e experimentalmente o escoamento turbulento de ar com número de Reynolds de  $8,55 \times 10^4$  em um tubo com e sem a presença de uma placa de orifício concêntrico com relação de diâmetros,  $\beta$ , igual a 0,687 notou-se que, na ausência da placa de orifício, os modelos  $k-\epsilon$ , com lei de parede padrão, previam perfeitamente o perfil de velocidade do ar no tubo, em comparação com aquele obtido com um tubo de Pitot. Porém, quando da presença da placa de orifício, embora os valores obtidos numericamente para o diferencial de pressão na placa também concordassem com os resultados experimentais, ocorria uma distorção do perfil de velocidade nas regiões próximas da parede do tubo a montante da placa de orifício. Verificou-se que tal problema estava associado com a escolha do fator de relaxação adotado para as variáveis envolvidas no problema e isto somente foi identificado devido à extensa bibliografia sobre o assunto que permitia o conhecimento prévio do perfil de velocidade esperado para aquela região do escoamento. A ferramenta computacional utilizada neste estudo foi o programa COMPACT-2D (Computer Analysis of Convective Transport) versão 4.0 desenvolvido por Patankar e que emprega o método dos volumes finitos.

*Palavras chave:* fator de relaxação, métodos numéricos, perfil de velocidade, placa de orifício, mecânica dos fluidos

## 1. Introdução

O progresso ocorrido nos últimos anos no setor da informática tem disponibilizado ao mercado aplicativos cada vez mais potentes, incentivando, assim, a utilização de ferramentas numéricas na solução de problemas. Não representa, pois, novidade a utilização de modelagem numérica em pesquisas, visando a validação resultados experimentais, ou no setor industrial, na representação e previsão de processos. Neste sentido, não raro, a formação do profissional de engenharia e de ciências térmicas têm sido direcionada ao tratamento numérico dos fenômenos estudados.

Fundamental ao sucesso da implementação dos métodos numéricos, o fator de relaxação é utilizado de forma intensiva como ferramenta de melhoria do processo de convergência. Porém, com exceção de alguns programas abertos onde o usuário experiente pode atuar, a maioria dos programas comerciais são caixas-pretas e a metodologia de aplicação dos fatores de relaxação na solução das equações algébricas envolvidas no problema nem sempre é suficientemente clara. Além disto, mesmo com a escolha inadequada do fator de relaxação, os programas, por serem robustos, chegam a apresentar resultados convergentes, embora nem sempre realistas (Versteeg et al., 1995 e Maliska, 1995).

Este trabalho descreve um problema desta natureza. Ao analisar numericamente e experimentalmente o escoamento turbulento de ar com número de Reynolds de  $8,55 \times 10^4$  em um tubo com e sem a presença de uma placa de orifício concêntrico com relação de diâmetros,  $\beta$ , igual a 0,687, notou-se que, na ausência da placa de orifício, os modelos  $k-\epsilon$ , com lei de parede padrão, previam perfeitamente o perfil de velocidade do ar no tubo, em comparação com aquele obtido com um tubo de Pitot. Quando da presença da placa de orifício os valores obtidos numericamente para o diferencial de pressão na placa também concordaram com os resultados experimentais. Porém, notou-se uma pequena

distorção do perfil de velocidade, caracterizada por uma aceleração anormal do fluido, nas regiões próximas da parede do tubo a montante da placa de orifício, em posições concordantes com a posição de instalação da placa.

Após verificação e utilização de malhas de diversas dimensões, verificou-se que o problema estava associado com a escolha do fator de relaxação adotado para as variáveis envolvidas. Vale salientar que a identificação do problema somente foi possível devido à extensa bibliografia sobre o assunto que permitia o conhecimento prévio do perfil de velocidade esperado para aquela região do escoamento. Obviamente, em situações diversas, onde o fenômeno físico simulado numericamente não é perfeitamente conhecido, ou não se possui dados anteriores ou experimentais para efeito de comparação, cuidados especiais devem ser tomados no sentido de evitar falsos resultados.

A ferramenta computacional utilizada neste estudo foi o programa COMPACT-2D (*Computer Analysis of Convective Transport*) versão 4.0 desenvolvido por Patankar e que emprega o método dos volumes finitos. O programa permite associar valores diversos de fator de relaxação,  $\alpha$ , a cada uma das variáveis envolvidas no processo. O programa utiliza ainda a sobre-relaxação ( $0 < \alpha < 1$ ) conjugada com o método de Gauss Seidel. As não linearidades são resolvidas utilizando-se um procedimento iterativo para obtenção da solução. Para controlar a variação da solução e garantir a solução convergida, é conveniente utilizar fatores de relaxação, seja para as equações de conservação, seja para as grandezas auxiliares.

## 2. Metodologia experimental

A bancada de testes utilizada neste estudo, instalada no laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, está apresentada, esquematicamente, na Fig. 1, com cotas em milímetros.

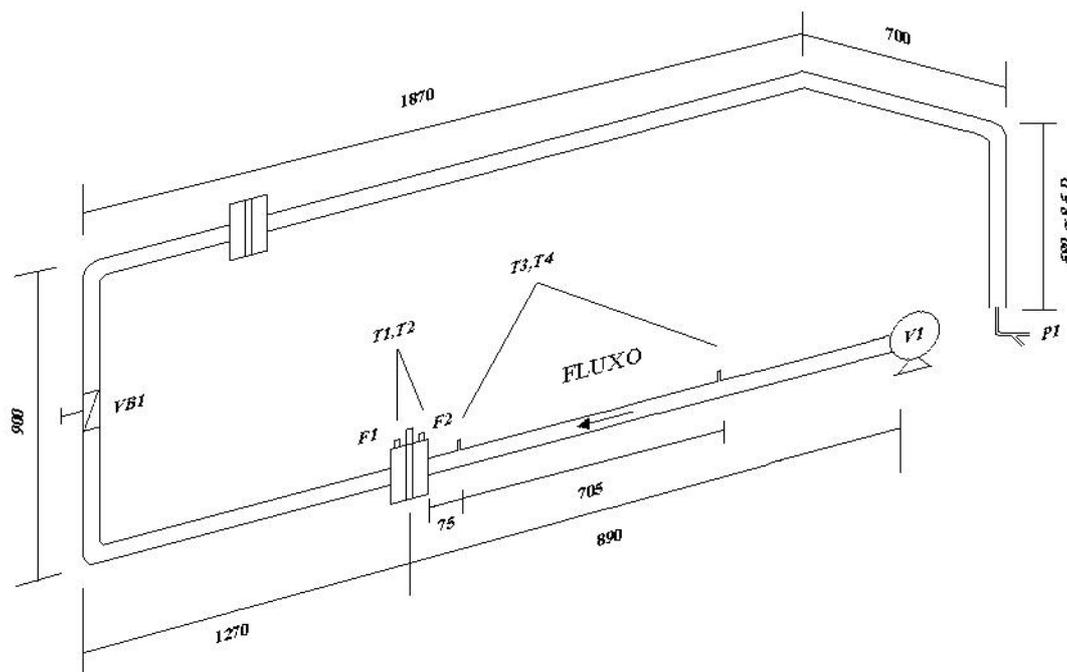


Figura 1. Esquema da bancada de testes

A bancada consiste em uma tubulação de aço galvanizado de 2 ½" de diâmetro onde, entre os flanges F1 e F2, é instalada a placa de orifício. Sobre os flanges F1 e F2, estão localizadas as tomadas de pressão T1 e T2. A distância de uma polegada a montante e a jusante das faces da placa de orifício ao centro das tomadas de pressão foi utilizada, obedecendo os critérios da norma NBR ISO 5167-1 (1994) para tomadas nos flanges. Neste trabalho, foi utilizada uma placa de orifício concêntrica com relação de diâmetros,  $\beta$ , igual a 0,687. O ar é insuflado na tubulação através do ventilador, V1, instalado em uma das extremidades do sistema. Modificações nas condições do escoamento podem ser provocadas pela variação na abertura da válvula borboleta, VB1. A bancada permite a obtenção de números de Reynolds em um intervalo relativamente pequeno, de aproximadamente de  $3 \times 10^4$  a  $9 \times 10^4$ . As propriedades do ar são determinadas, após o estabelecimento do regime permanente, com os valores da pressão barométrica média local, da pressão manométrica medida em T3 e da temperatura medida com um termopar tipo K na saída do sistema. As tomadas T3 e T4 fornecem também leituras de pressão em um trecho reto de tubulação de 705 mm de comprimento, a montante da placa de orifício. A diferença de pressão entre as tomadas T1 e T2 e entre as tomadas T3 e T4 são medidas com um

manômetro de tubo em U com escala em mm de coluna de água. O tubo pitot, P1, instalado na seção de saída da tubulação, é utilizado para a medida do perfil de velocidade experimental.

Foram utilizados nove pontos de medida de valores de pressão dinâmica com o tubo pitot ao longo do diâmetro interno do tubo, sendo oito pontos definidos pela metodologia dos setores circulares de áreas iguais e o nono ponto no centro da seção transversal do tubo. A Figura 2 apresenta um esquema da instalação do tubo de Pitot, onde D é o diâmetro da tubulação e y as distâncias, a partir da parede, dos pontos de medição. Estas distâncias, y, estão definidas na Tab. 1.

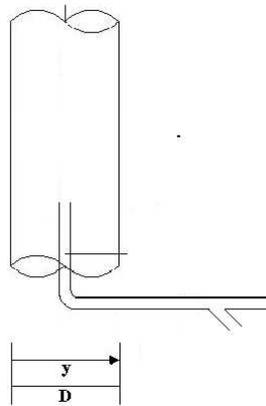


Figura 2. Esquema da instalação do tubo de Pitot

Tabela 1. Distâncias a partir da parede interna do tubo para medição da pressão dinâmica

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
y (mm)	2,2	7,2	13,3	22,1	34,3	46,4	55,2	61,3	66,3

Como as leituras obtidas no pitot são de pressão dinâmica, esta deve ser transformada em velocidade. Para tubo pitot, esta transformação é obtida pela equação:

$$u_i = \sqrt{\frac{2P_{d,i}}{\rho}} \quad (1)$$

onde  $u_i$  é a velocidade local do fluido,  $P_{d,i}$  a pressão dinâmica local do fluido e  $\rho$  é a massa específica do fluido (White, 1994). Com as velocidades locais pode-se definir o perfil de velocidade experimental.

A velocidade média,  $\bar{u}$ , é dada por:

$$\bar{u} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \sqrt{\frac{2P_{d,i}}{\rho}} \quad (2)$$

onde n é o número de medidas feitas com o Pitot.

Para a abertura da válvula borboleta que fornecia número de Reynolds igual a  $8,55 \times 10^4$ , a velocidade média medida pelo tubo de Pitot foi de 22,25 m/s. A temperatura média do fluido durante os ensaios foi de 31,8°C.

### 3. Modelo numérico

O modelo numérico adotado considera escoamento bidimensional, turbulento e em regime permanente, com condições de contorno prescritas para as velocidades, a energia cinética turbulenta e a dissipação da energia cinética turbulenta. A resolução do sistema de equações algébricas resultantes foi realizada com o auxílio do programa computacional COMPACT-2D Versão 4.0, com formulação de volumes finitos e utilizando o modelo k-ε padrão na modelagem do escoamento turbulento. O ar foi considerado como gás ideal.

O modelo k-ε avalia a viscosidade turbulenta a partir de uma relação entre a energia cinética turbulenta e a dissipação da energia cinética turbulenta. Utiliza ainda as equações de transporte de energia cinética turbulenta e da dissipação.

As equações governantes, em coordenadas cilíndricas, podem ser escritas em uma forma geral para uma variável genérica  $\phi$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u\phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S^\phi + P^\phi \quad (3)$$

onde t é o tempo, r coordenada radial, z a coordenada axial, v a velocidade na direção r, u a velocidade na direção z, S<sup>φ</sup> e P<sup>φ</sup> são termos fonte e Γ<sup>φ</sup> a difusividade.

Considerando-se as hipóteses de regime permanente e fluido incompressível, tem-se:

$$\rho \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(u\phi) \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) + S^\phi + P^\phi \quad (4)$$

Para cada uma das equações, os termos fontes S<sup>φ</sup> e P<sup>φ</sup> e a difusividade Γ<sup>φ</sup> são avaliados por expressões diferentes. Estas expressões são dadas na Tab. 2.

Tabela 2. Expressões para φ, Γ<sup>φ</sup>, S<sup>φ</sup>, P<sup>φ</sup>

	φ	Γ <sup>φ</sup>	S <sup>φ</sup>	P <sup>φ</sup>
Massa	1	0	0	0
Quantidade de Movimento em r	v	μ <sub>e</sub>	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - 2 \frac{\mu_e v}{r^2}$	$-\frac{\partial p}{\partial r}$
Quantidade de Movimento em z	u	μ <sub>e</sub>	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right)$	$-\frac{\partial p}{\partial z}$
Energia Cinética Turbulenta	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$\mu_t \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] - \rho C_d \varepsilon$	0
Dissipação da Energia Cinética Turbulenta	ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$\mu_t \frac{C_1 \varepsilon}{k} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left( \frac{v}{r} \right)^2 \right] - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k}$	0

onde k é a energia cinética turbulenta, ε é a dissipação da energia cinética turbulenta, μ<sub>e</sub> a viscosidade efetiva do escoamento, μ<sub>t</sub> a viscosidade turbulenta do escoamento, p a pressão e σ<sub>k</sub>, σ<sub>ε</sub>, C<sub>D</sub>, C<sub>1</sub> e C<sub>2</sub> constantes do modelo turbulento.

O modelo k-ε apresenta algumas dificuldades na descrição dos escoamentos na região próxima a parede, onde o número de Reynolds local baixo devido a predominância das tensões viscosas. Por não poder ser simplesmente ignorada na modelagem numérica, surge a necessidade da utilização de modelos que descrevem o escoamento nesta região.

Segundo Bortolus (1995), várias soluções foram propostas com o objetivo de contornar a dificuldade do modelo k-ε em descrever o escoamento em regiões próximas à parede, as quais se dividem basicamente em dois grupos. O primeiro, chamado modelo de alto número de Reynolds turbulento deriva basicamente do modelo k-ε padrão de Launder e Spalding (1974) com funções de paredes e requer um malha pouco refinada junto à parede. Embora em alguns casos não descreva adequadamente o escoamento, possui uma maior robustez e facilidade de convergência. O segundo grupo é conhecido como modelos de baixo número de Reynolds turbulento e utiliza uma malha bastante refinada junto a parede. Apesar de reproduzir melhor o escoamento requer um tempo computacional elevado.

O COMPACT-2D Versão 4.0, utiliza os modelos de alto número de Reynolds e trata as fronteiras da região de parede como sendo os primeiros pontos da malha computacional que descreverá o escoamento na região central. O domínio desta região da parede é definido como sendo  $y^+ \leq 11,5$ , onde:

$$y^+ = \frac{\rho u^*}{\mu} y \quad (5)$$

sendo u\* a velocidade de atrito definida por:

$$u^* = (\tau_w / \rho)^{1/2} \quad (6)$$

e  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento na parede definida por:

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (7)$$

A facilidade de aplicação do programa faz com que não seja necessária uma preocupação em descrever as condições de contorno no limite entre a região central e a região da parede, bastando definir as condições de contorno nas fronteiras norte, sul, leste e oeste.

A Figura 3 apresenta um detalhamento da malha utilizada quando simulada a presença da placa de orifício. A malha ficou constituída de 122 volumes na direção do escoamento principal e 80 na direção transversal. Ela foi refinada nas regiões próximas da placa e da parede, respeitando a limitação do modelo k- $\epsilon$  padrão para a dimensão do primeiro elemento junto à parede. Dois elementos da malha, não representados na Fig. 3, coincidem diretamente com a posição das tomadas de pressão da placa.

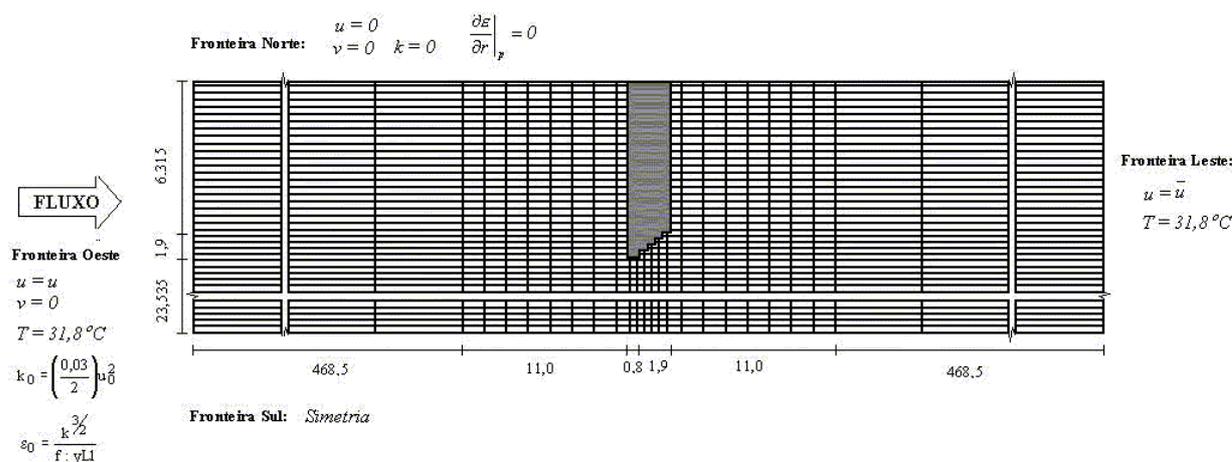


Figura 3. Configuração da malha com presença de placa de orifício

As seguintes condições de contorno foram adotadas no modelo:

*Fronteira Norte:* constituída pela parede do tubo, onde as velocidades  $u$  e  $v$  e energia cinética turbulenta  $k$  são iguais a zero. A condição da dissipação é dada por:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial r} \Big|_p = 0 \quad (8)$$

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

*Fronteira Oeste:* corresponde à extremidade da tubulação a montante da placa de orifício. O comprimento da tubulação até a face de entrada da placa de orifício é de  $7D$ , ou seja,  $479,5$  mm. Este comprimento de entrada é sugerido pela NBR ISO 5167-1 (1994) como sendo suficiente para que o perfil de velocidade desenvolva-se totalmente. A velocidade média na entrada foi escolhida de forma a manter o escoamento com números de Reynolds de  $8,55 \times 10^4$ . A temperatura do fluido,  $T$ , foi considerada  $31,8^\circ C$ , que é o valor médio das temperaturas obtidas durante os experimentos. Os valores de energia cinética e dissipação definidos na entrada são:

$$k_0 = \left(\frac{0,03}{2}\right) u_0^2 \quad (9)$$

$$\epsilon_0 = \frac{k^{3/2}}{f \cdot yL1} \quad (10)$$

onde  $u_0$  é a velocidade na entrada,  $f$ , uma fração entre 0,3 e 1,0 e  $yL1$ , o comprimento do segmento de entrada.. O valor de  $f$  escolhido foi 0,36.

*Fronteira Leste:* corresponde à última seção da tubulação a jusante da placa de orifício. A distância desta tubulação à face de saída da placa de orifício também é de 7D, ou seja, 479,5 mm, para garantir o desenvolvimento do escoamento. Todas as derivadas das propriedades são nulas na direção do escoamento nesta seção.

Quando da simulação sem a placa de orifício, foram utilizados o mesmo comprimento total de tubo (961,7mm) e condições de contorno de quando a simulação foi feita com a placa. Condições idênticas também para a malha, que manteve o mesmo número de volumes de controle, porém, distribuídos uniformemente. Visando reproduzir as condições da bancada experimental, para a medição do diferencial de pressão no trecho reto, utilizou-se pontos da malha distanciados em 705 mm.

Utilizou-se inicialmente o valor do fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000), ou seja,  $\alpha = 0,7$  para todas as variáveis (u, v, p, T, K,  $\epsilon$ ).

#### 4. Resultados

A Figura 4 apresenta o perfil de velocidade obtido experimentalmente, o perfil a montante da placa, obtido pela simulação numérica, e o perfil, também obtido através da simulação, sem a presença da placa de orifício. O valor do fator de relaxação adotado para todas as variáveis envolvidas (u, v, p, T, K,  $\epsilon$ ) foi o sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000), ou seja,  $\alpha = 0,7$ .

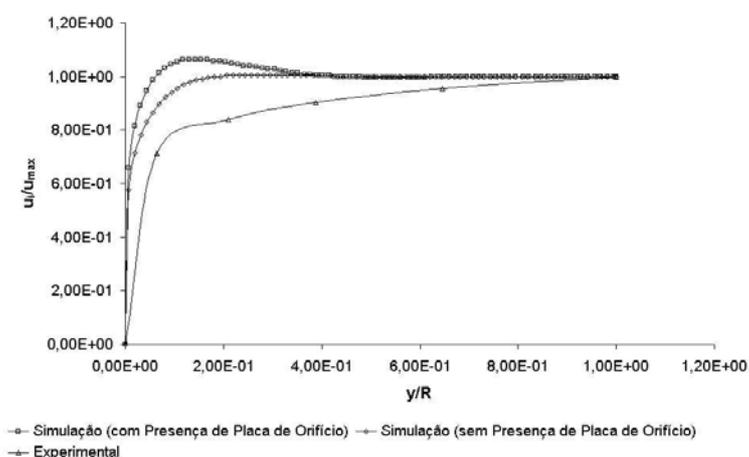


Figura 4. Perfil de velocidade experimental x perfil de velocidade numérico ( $\alpha=0,7$ )

Quando da simulação com a placa de orifício, o resultado indicou um perfil de velocidade disforme, caracterizado por uma aceleração anormal do fluido nas regiões próximas da parede do tubo em posições concordantes com a posição de instalação da placa. Nenhum problema foi constatado quando da simulação sem a placa de orifício. O teste de malha descartou prováveis problemas relacionados a malha pouco refinada. Tentou-se, então, mudar os valores do fator de relaxação das variáveis envolvidas.

A Figura 5 apresenta os perfis de velocidade para vários valores do fator de relaxação. Os valores utilizados foram os mesmos para todas as variáveis (u, v, p, T, K,  $\epsilon$ ).

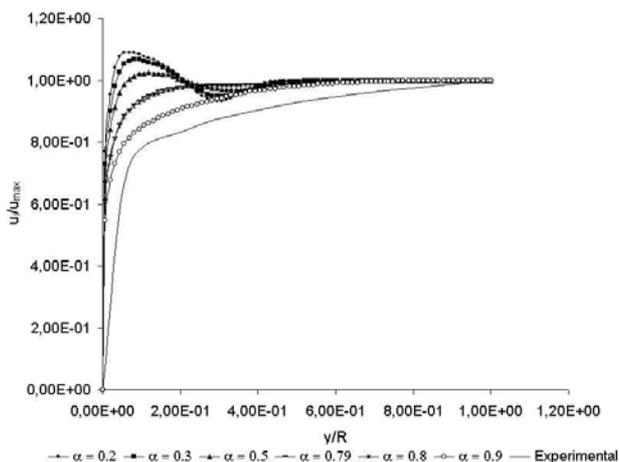


Figura 5. Perfil de velocidade numérico para diversos valores de  $\alpha$

Os perfis de velocidade apresentaram maiores distorções para baixos valores do fator de relaxação. O perfil de velocidade que melhor representou o escoamento turbulento utilizou um fator de relaxação igual a 0,79. Tentou-se, então, diversas conjugações de valores para o fator de relaxação das variáveis.

A Figura 6 apresenta os perfis de velocidade obtidos numericamente quando variou-se o fator de relaxação para a velocidade u. O fator de relaxação das demais variáveis (v, p, T, K, ε). manteve-se igual a 0,27.

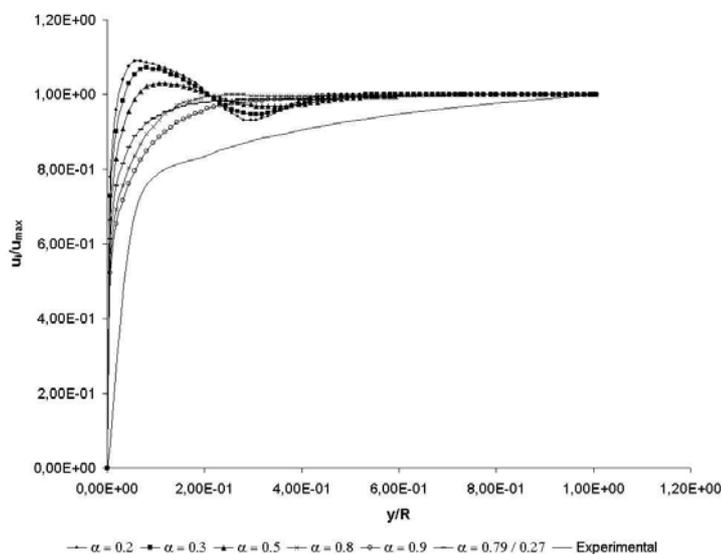


Figura 6. Perfil de velocidade numérico para diversos valores de  $\alpha_u$  ( $\alpha_{v,p,T,k,\epsilon}=0,27$ )

Pouco progresso foi obtido com relação aos resultados expressos na Fig. 5; grandes diferenças foram percebidas no perfil de velocidade, associadas à modificação no fator de relaxação da variável velocidade u. O resultado que melhor representou o perfil turbulento utilizou um fator de relaxação,  $\alpha$ , igual a 0,79, o que coincide com a informação expressa da Fig. 5.

A Figura 7 apresenta os perfis de velocidade obtidos quando o fator de relaxação para a variável velocidade u foi mantido a 0,79. Variou-se, porém, o fator de relaxação para as demais variáveis (v,p,T,k,ε).

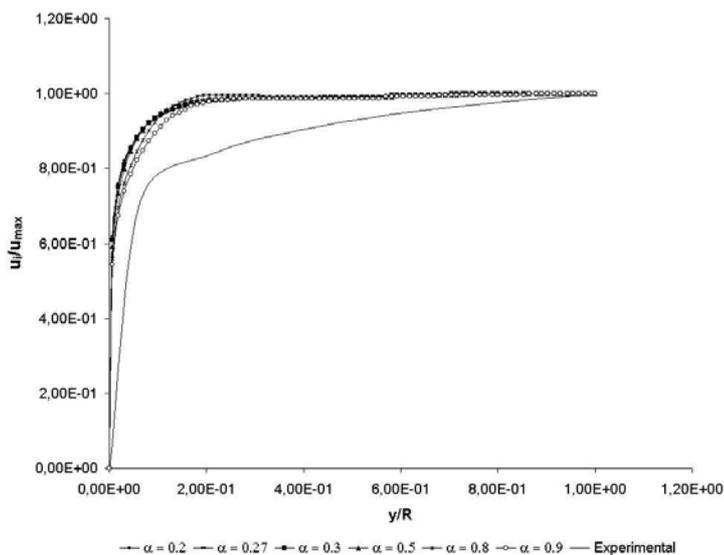


Figura 7. Perfil de velocidade numérico para diversos valores de  $\alpha_{v,p,T,k,\epsilon}$  ( $\alpha_u=0,27$ )

Embora valores diversos tivessem sido adotados para o valor do fator de relaxação das variáveis, pouca diferença notou-se nos perfis de velocidades obtidos. Tal situação confirmou a profunda influência da variável velocidade u sobre os resultados obtidos.

Percebeu-se, portanto, que as distorções observadas nas Figs. 4, 5 e 6 estavam realmente associadas ao valor do fator de relaxação da variável velocidade u, sendo que os valores adotados para as demais variáveis pouco

influenciavam nos resultados. Porém, isto só foi possível devido ao conhecimento prévio do perfil de velocidade esperado para a região.

Em contra partida, ajudou a mascarar o problema ocorrido no perfil de velocidade o fato de que os valores obtidos para o diferencial de pressão,  $\Delta P$ , na placa concordaram bem com os resultados experimentais quando da utilização do fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000).

Uma vez definido o valor de fator de relaxação da variável velocidade  $u$  igual a 0,79, e sabendo-se que o valor adotado para as demais variáveis pouco influenciava no perfil de velocidade, a metodologia para a escolha do fator de relaxação ideal para as variáveis  $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$  e  $\epsilon$ , baseou-se na comparação do  $\Delta P$  obtido numericamente com aquele obtido experimentalmente. O valor do fator de relaxação para as variáveis  $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$  e  $\epsilon$ , que melhor atendia tal imposição, foi 0,27.

O diferencial de pressão entre as tomadas da placa obtido numericamente e experimentalmente está apresentado na Tab. 3. A incerteza da medição foi de 17,5 Pa. O desvio foi calculado por:

$$\text{Desvio (\%)} = \left( \frac{\Delta P_{\text{experimental}} - \Delta P_{\text{modelo } k-\epsilon}}{\Delta P_{\text{experimental}}} \right) \quad (11)$$

Tabela 3. Diferencial de pressão na placa de orifício obtido experimentalmente x obtido pela simulação numérica

	Fator de relaxação		$\Delta P$ (Pa)	Desvio (%)
	variável $u$	variáveis $v$ , $p$ , $T$ , $k$ e $\epsilon$ ,		
Experimental	-	-	2568,00	-
Modelo $k-\epsilon$	0,79	0,2	2591,18	0,90
	0,79	0,3	2513,08	2,13
	0,79	0,5	2263,51	11,86
	0,79	0,7	2187,61	14,81
	0,79	0,8	2187,61	14,81
	0,79	0,9	2144,00	16,51
	0,7	0,7	2591,00	0,90
	<b>0,79</b>	<b>0,27</b>	<b>2575,33</b>	<b>0,29</b>

No caso do trecho reto, apesar do perfil de velocidade não ter sofrido alterações quando utilizado o fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000), o resultado obtido para o diferencial de pressão não foi tão positivo. Trabalho semelhante de conjugação de fatores de relaxação daquele realizado para o perfil de velocidade a montante da placa foi então feito para o trecho reto, porém no sentido de validar o diferencial de pressão experimental.

A Tabela 4 apresenta os valores do diferencial de pressão obtidos experimentalmente e através da simulação numérica para o trecho reto. A incerteza da medição foi de 17,5 Pa.

Tabela 3. Diferencial de pressão no trecho reto experimentalmente x obtido pela simulação numérica

	Fator de relaxação		$\Delta P$ (Pa)	Desvio (%)
	Variável $u$	variáveis $v$ , $p$ , $T$ , $k$ e $\epsilon$ ,		
Experimental	-	-	52	-
Modelo $k-\epsilon$	0,7	0,7	104	50,0
	0,79	0,27	55	5,77

Mais uma vez, somente a comparação entre resultados numéricos e experimentais foi capaz de indicar os valores ótimos para o fator de relaxação. Apesar do perfil de velocidade no trecho reto ter sido perfeitamente previsto pelo modelo  $k-\epsilon$ , o procedimento numérico somente foi validado em relação ao diferencial de pressão quando valores diferentes para o fator de relaxação daquele indicado por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000) foram utilizados. Desta forma, o fator de relaxação que melhor representava o problema descrito neste estudo foi de 0,79 para a velocidade  $u$  e 0,27 para as demais variáveis.

## 5. Conclusões

Neste trabalho foi analisado numericamente e experimentalmente o escoamento turbulento de ar com número de Reynolds de  $8,55 \times 10^4$  em um tubo com e sem a presença de uma placa de orifício concêntrico com relação de diâmetros,  $\beta$ , igual a 0,687.

A bancada de testes está instalada no laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. A ferramenta computacional utilizada na modelagem numérica foi o programa COMPACT-2D Versão 4.0. (2000) que utiliza formulação de volumes finitos e modelo k- $\epsilon$  padrão na modelagem do escoamento turbulento.

Na ausência da placa de orifício, e utilizando o fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000), os modelos k- $\epsilon$ , com lei de parede padrão, previram perfeitamente o perfil de velocidade do ar no tubo, em comparação com aquele obtido experimentalmente com um tubo de Pitot. Quando da presença da placa de orifício, embora os valores obtidos numericamente para o diferencial de pressão na placa também concordassem com os resultados experimentais, foi notada uma pequena distorção do perfil de velocidade, nas regiões próximas da parede do tubo, a montante da placa de orifício.

Após realizar teste de malha, verificou-se que o problema não estava associado ao refinamento da malha, mas sim com a escolha do fator de relaxação adotado para as variáveis envolvidas. Tentou-se, então, variar estes valores.

Quando utilizados valores iguais para todas as variáveis, os perfis de velocidade apresentaram maiores distorções para fatores de relaxação menores. O perfil de velocidade que melhor representou o escoamento turbulento utilizou um fator de relaxação igual a 0,79.

Ao variar o fator de relaxação para a velocidade  $u$ , mantendo-se constante, e igual a 0,27, o fator de relaxação das demais variáveis ( $v, p, T, k, \epsilon$ ), grandes diferenças foram percebidas no perfil de velocidade.

Pouca variação foi notada nos perfis de velocidades obtidos quando o fator de relaxação para a variável velocidade  $u$  foi mantido a 0,79 e variou-se o fator de relaxação para as demais variáveis ( $v, p, T, k, \epsilon$ ). Tal situação confirmou a profunda influência da variável velocidade  $u$  sobre os resultados obtidos.

Percebeu-se, portanto, que as distorções observadas no perfil de velocidade estavam realmente associadas ao valor do fator de relaxação da variável velocidade  $u$ , sendo que os valores adotados para as demais variáveis pouco influenciavam nos resultados. Porém, isto só foi possível devido ao conhecimento prévio do perfil de velocidade esperado para a região.

Em contra partida, ajudou a mascarar o problema ocorrido no perfil de velocidade o fato de que os valores obtidos para o diferencial de pressão,  $\Delta P$ , na placa concordaram bem com os resultados experimentais quando da utilização do fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000).

Definido o valor de fator de relaxação da variável velocidade  $u$  igual a 0,79, e sabendo-se que o valor adotado para as demais variáveis pouco influenciava no perfil de velocidade, a metodologia para a escolha do fator de relaxação ideal para as variáveis  $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$  e  $\epsilon$ , baseou-se na comparação do  $\Delta P$  obtido numericamente com aquele obtido experimentalmente.

No caso da simulação com placa de orifício, a conjugação de fatores de relaxação que validou os resultados experimentais, tanto do ponto de vista do diferencial de pressão quanto do perfil de velocidade foi  $\alpha$  igual a 0,79 para a variável velocidade  $u$  e  $\alpha$  igual a 0,27 para as demais variáveis ( $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$  e  $\epsilon$ ).

No caso do trecho reto, apesar do perfil de velocidade não ter sofrido alterações quando utilizado o fator de relaxação sugerido por Patankar no manual do COMPACT-2D Versão 4.0 (2000), o resultado obtido para o diferencial de pressão não foi tão positivo. Mais uma vez a conjugação de fatores de relaxação que validou os resultados experimentais, tanto do ponto de vista do diferencial de pressão quanto do perfil de velocidade foi  $\alpha$  igual a 0,79 para a variável velocidade  $u$  e  $\alpha$  igual a 0,27 para as demais variáveis ( $v$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $k$  e  $\epsilon$ ).

Vale salientar que a identificação do problema somente foi possível devido à extensa bibliografia sobre o assunto que permitia o conhecimento prévio do perfil de velocidade esperado para o escoamento e resultados experimentais que previam o diferencial de pressão na placa e no trecho reto. Obviamente, em situações diversas, onde o fenômeno físico simulado numericamente não é perfeitamente conhecido, ou não se possui dados anteriores ou experimentais para efeito de comparação, cuidados especiais devem ser tomados no sentido de evitar falsos resultados.

## 6. Referências Bibliográficas

- NBR ISO 5167-1, 1994, "Medição de Vazão de Fluidos por Meio de Instrumentos de Pressão- Parte 1: Placas de Orifício, Bocais e Tubos de Venturi Instalados em Seção Transversal Circular de Condutores Forçados", ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow", 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc.
- Bortolus, M. V., 1995, "Modelisation et Simulation des Transferts Thermiques Parietaux en Ecoulement Turbulent Complexe", Tese de Doutorado, Université Paul Sabatier, França.
- Maliska, R. C., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional", LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ.
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows: Computer Methods in Applied Mechanics", Vol. 3, pp 269-289.
- Reference Manual for Compact – 2D Version 4.0, 2000, "A General Purpose Computer Program for Two-Dimensional Fluid Flow and Heat Transfer", Innovative Research, Inc, Plymouth, USA.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 1995, "An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method", Longman Scientific & Technical.

## **STUDY OF CASE OF THE RELAXION FACTOR INFLUENCE ON THE VELOCITY PROFILE IN A TURBULENT AIR FLOW THROUGH A ORIFICE PLATE**

Sinthya Gonçalves Tavares

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

Mara Nilza Estanislau Reis

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

### **Abstract**

The relaxation factor is used in an intensive way as tool of improvement of the convergence process in the numeric methods. However, except for some open programs where the experienced user can act, most of the commercial programs is black boxes and the methodology of application of the relaxation factors in the solution of the algebraic equations involved in the problem it's not always sufficiently clear. Besides, even with the inadequate choice of the relaxation factor, the programs, for they be robust, get to present convergent results, although not always realists. In this work, a problem of this nature will be described. During the numerical and experimental analysis of the air turbulent flow with Reynold's number of  $8,55 \times 10^4$  in a tube with and without the presence of a concentric orifice plate, with relationship of diameters,  $\beta$ , equal to 0,687, was noticed that, in the absence of the orifice plate, the model  $k-\varepsilon$ , with pattern wall law, foresaw perfectly the velocity profile of the air in the tube, in comparison with that obtained with a Pitot tube. However, when of the presence of the orifice plate, although the values obtained numerically for the differential of pressure in the plate also agreed with the experimental results, it happened a distortion of the velocity profile in the close areas of the tube wall to amount of the orifice plate. It was verified that such problem was associated with the choice of the relaxation factor adopted for the variables involved in the problem and this was only identified due to the extensive bibliography on the subject that allowed the previous knowledge of the expected velocity profile for that area of the drainage. The computacional tool used in this study was the program COMPACT-2D (Computer Analysis of Convective Transport) version 4.0 developed by Patankar and that it uses the method of the finite volumes.

**Keywords:** relaxation factor, numeric methods, velocity profile, orifice plate, fluid mechanics