

Modelo de fechamento de segunda ordem da turbulência aplicado ao escoamento sobre degrau descendente

*Priscila P Araujo, André L T Rezende
Instituto Militar de Engenharia
Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,
*priscila.pires.engenergia@gmail.com

RESUMO: O escoamento sobre degrau descendente é um caso complexo no escopo da dinâmica dos fluidos computacional, presente em vários casos na Engenharia. No presente trabalho, são realizadas simulações computacionais utilizando a modelagem da turbulência das equações médias de Reynolds (RANS) para um escoamento bidimensional e em regime permanente. Os modelos de turbulência utilizados são o Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) e o Reynolds Stress Model (RSM). Os resultados foram comparados com os dados da literatura usando simulação numérica direta (DNS). O principal objetivo do trabalho é a comparação dos diferentes modelos de turbulência utilizados, com foco nos resultados de segunda ordem da turbulência. Os resultados apresentados no modelo RSM estão mais próximos dos resultados encontrados pelo uso da simulação numérica direta. Os principais resultados analisados são o comprimento de recolamento, a velocidade média, o coeficiente de pressão, as intensidades de turbulência e componentes do tensor de Reynolds.

PALAVRAS-CHAVE: Degrau descendente. Modelos de fechamento de segunda ordem. DNS. RSM. SST $k-\omega$.

ABSTRACT: The flow over a backward facing step is a complex case in the scope of computational fluid dynamics, present in several cases in engineering. In the present work, computational simulations are performed using Reynolds Averaged NavierStokes equations (RANS) for a two-dimensional and steady state flow. The turbulence models used are Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$) and Reynolds Stress Model (RSM). The results were compared with the literature data using direct numerical simulation (DNS). The main objective of the work is to compare the different turbulence models, focusing on the second order turbulence closure. The results presented in the RSM model are closer to the results found on direct numerical simulation. The main results analyzed in this paper are the reattachment length, mean velocity, pressure coefficient, turbulence intensity components and Reynold shear stress components.

KEYWORDS: BFS. Second-order turbulence closure. DNS. RSM. SST $k-\omega$.

1. INTRODUÇÃO

O uso da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) tem se tornado cada vez mais viável no ramo de simulação de escoamentos, com ou sem transferência de calor, devido ao fato do grande avanço tecnológico com o surgimento de computadores rápidos e com elevada capacidade de armazenamento. A tendência é que a quantidade de pesquisadores e adeptos da simulação numérica cresça significativamente nos próximos anos, devido à sua simplicidade e versatilidade na aplicação de inúmeros problemas na área da Engenharia [1].

Os métodos numéricos têm como significativa vantagem a possibilidade de resolver problemas complexos com diferentes condições de contorno, apresentando resultados em um curto intervalo de tempo. Com a utilização da simulação numérica, tanto o tempo como o custo do projeto pode ser reduzido. O objetivo do CFD é diminuir o número de experimentos e estudar problemas que não poderiam ser reproduzidos em laboratório. A utilização das técnicas de simulação numérica computacional contribui fortemente para o desenvolvimento de uma etapa na Engenharia, onde a simulação numérica desempenha um papel decisivo nos custos e na qualidade dos projetos, juntamente com as técnicas experimentais [1].

Existem inúmeros casos presentes na natureza e na Engenharia de escoamentos turbulentos com separação de escoamento que merecem ser estudados e que podem ser aprofundados através de simulações computacionais. O escoamento sobre um canal com a presença de um degrau descendente trata-se de um desses casos onde há a separação do escoamento devido ao gradiente adverso de pressão provocado pela súbita mudança na geometria.

O presente trabalho trata-se da simulação computacional

e análise do escoamento turbulento sobre um canal com degrau descendente por meio da construção de uma geometria relativamente simples com a grande vantagem de apresentar características importantes para o âmbito do estudo de escoamentos turbulentos com separação de escoamento. Os casos simulados no atual trabalho são baseados no estudo realizado por [2], utilizando a mesma geometria e número de Reynolds, com o objetivo de validar os resultados obtidos.

O foco principal desse trabalho está relacionado à utilização e comparação de dois modelos de turbulência do tipo RANS: o SST $k-\omega$, um tipo de modelo de viscosidade turbulenta, e o RSM, um modelo de fechamento de segunda ordem. Os resultados obtidos nas simulações realizadas com ambos os modelos serão comparados com os resultados obtidos por [2], ao utilizar um modelo de simulação numérica direta. Os principais resultados analisados são o comprimento de recolamento, contornos e perfis de velocidade média, contornos do coeficiente de pressão e grandezas de segunda ordem, como perfis da intensidade de turbulência e da tensão de cisalhamento de Reynolds.

O presente trabalho está dividido em introdução, seguida por uma seção sobre o degrau descendente, apresentando as etapas presentes nesse caso. A etapa seguinte é uma breve descrição dos estudos realizados anteriormente sobre o degrau descendente, ressaltando os primeiros estudos experimentais e computacionais realizados. As próximas seções tratam da descrição das equações que governam o caso estudado, os modelos de turbulência utilizados durante o trabalho, as condições de contorno, a malha construída e o método numérico. Após isso, são apresentados os resultados obtidos pelas simulações computacionais realizadas, comparando-os com os resultados presentes no estudo de [2], bem como suas análises e discussão. Por fim, tem-se a conclusão encontrada

através da realização desse trabalho e são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2. DEGRAU DESCENDENTE

O estudo do escoamento turbulento sobre um degrau descendente foi iniciado através de experimentos realizados em laboratório, uma vez que o trabalho computacional exigido para a construção de casos tridimensionais era muito elevado, e ao longo dos anos, tem ganhado destaque na área experimental de dinâmica dos fluidos. Os estudos realizados por [3] e [4] são os primeiros a ganhar relevância no ramo do degrau descendente, tornando-se referência para os estudos posteriores desse campo.

Com o avanço tecnológico e o conseqüente desenvolvimento computacional, a simulação numérica do escoamento turbulento em um degrau descendente tem crescido e se tornado relevante na comunidade CFD. O degrau descendente é um protótipo de separação, recirculação e recolamento do escoamento que ocorre na natureza e em diversas situações da Engenharia, como no escoamento ao redor de edifícios, mostrado na Fig. 1.

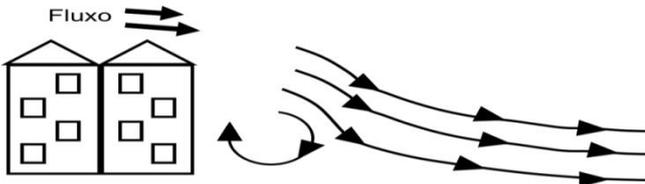


Fig. 1 – Escoamento ao redor de um edifício.

A separação do escoamento causada por um gradiente adverso de pressão é um fenômeno comum em muitas aplicações práticas na Engenharia, como no escoamento ao longo de um aerofólio, mostrado na Fig. 2. O gradiente adverso de pressão diz respeito ao aumento da pressão estática na direção em que o escoamento ocorre, afetando significativamente o escoamento. O aumento da pressão provoca o retardamento do escoamento, sentido mais fortemente nas regiões próximas à parede. A diminuição contínua da velocidade do escoamento faz com que a tensão de cisalhamento na parede torne-se nula, no ponto chamado ponto de separação. A partir desse ponto, a tensão de cisalhamento torna-se negativa e o escoamento é invertido, gerando a zona de recirculação do escoamento.

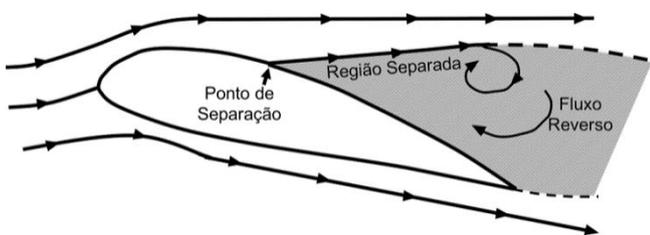


Fig. 2 – Separação de fluxo em um aerofólio.

Em diversos casos da Engenharia, o gradiente adverso de pressão é causado por uma mudança súbita na geometria, levando à separação do escoamento e o posterior recolamento. Tal fenômeno pode ser observado também em dispositivos, tais como equipamentos eletrônicos de resfriamento, câmaras de combustão, difusores e válvulas.

Nesse contexto, o degrau descendente é um dos casos mais estudados, com o objetivo de compreender os efeitos

no escoamento provocados por uma mudança súbita na geometria, utilizando uma geometria simples.

O degrau descendente apresenta as características principais presentes em casos com separação de escoamento, como as etapas citadas anteriormente, apesar de sua geometria relativamente simples. Por isso, tem sido muito estudado em casos de simulação computacional, por exigir um menor esforço computacional quando comparado a outros casos e apresentar resultados satisfatórios no âmbito do estudo dos fenômenos causados pela separação de escoamento.

Na Fig. 3 é mostrado o escoamento turbulento sobre um degrau descendente, onde pode ser observada a separação do escoamento, a zona de recirculação e o recolamento do escoamento.

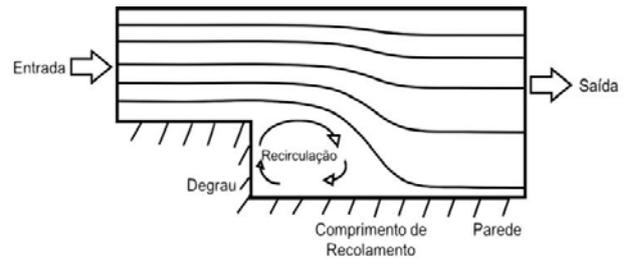


Fig. 3 – Escoamento sobre um degrau descendente.

O primeiro estudo computacional relevante sobre degrau descendente, com comparações com resultados experimentais, foi realizado por [5], onde foi realizada a simulação numérica direta de um degrau descendente em um canal aberto com raio de expansão $E_R=1,2$. O raio de expansão é uma relação entre a altura do canal de saída e a altura do degrau, dado pela Eq. 1.

$$E_R = \frac{L_y}{L_y - h} \tag{1}$$

onde L_y é a altura do canal de saída e h é a altura do degrau.

O estudo realizado por [5] tem número de Reynolds $Re=5100$, sendo esse definido em função da altura do degrau, da viscosidade cinemática do fluido e da velocidade média de entrada, dado por:

$$Re = \frac{U \times h}{\nu} \tag{2}$$

onde U é a velocidade média de entrada, h é a altura do degrau e ν é viscosidade cinemática do fluido.

Esse estudo tornou-se referência para todos os modelos de turbulência e criou um padrão em simulações de escoamento turbulento separado, mostrando como principais resultados os campos de velocidade e pressão médias e as componentes do tensor de Reynolds. Além disso, apresenta como resultado principal o comprimento de recolamento $X_R=6,28$, sendo esse um importante parâmetro no estudo do degrau descendente, definido como a distância da aresta do degrau até a posição em que há o recolamento do escoamento.

O estudo de [2] trata de uma simulação numérica direta tridimensional de um canal com uma súbita expansão, com um raio de expansão $E_R=2$ e um número de Reynolds $Re=9000$, baseado na velocidade de entrada e altura do degrau. Nesse trabalho, a discretização é realizada por meio de um método de elemento espectral periódico. São encontrados, além da bolha de recirculação primária, redemoinhos

de canto secundários e terciários e pode-se observar uma pequena formação de redemoinho a jusante do redemoinho de canto secundário, mostrado por meio das linhas de fluxo. O comprimento de recolamento encontrado é de $X_R=8,62$. As flutuações médias de pressão e da velocidade do escoamento mostraram que a oscilação da posição de recolamento deve-se à interação dos vórtices com a bolha de recirculação.

Vários estudos realizados na área estudada no presente trabalho discutem sobre a dependência do tamanho da zona de recirculação e do comprimento de recolamento em relação ao raio de expansão para diferentes números de Reynolds e modelos de turbulência. O estudo feito por [6] relata que o tamanho da zona primária de recirculação aumenta com o aumento de E_R . O trabalho de [7] afirma que X_R varia em função de Re e E_R e, dependendo do valor de Re , zonas secundárias de recirculação podem surgir a jusante da zona primária de recirculação, além da separação do escoamento na parede superior. No estudo de [8] são construídos diversos casos com diferentes valores de raio de expansão e conclui que o valor do comprimento de recolamento aumenta com o aumento do raio de expansão.

3. EQUAÇÕES DE GOVERNO

As hipóteses adotadas nas simulações realizadas no presente trabalho são as seguintes: fluido newtoniano, escoamento em regime permanente, escoamento incompressível e propriedades físicas constantes.

As equações que governam o problema são a equação de conservação de massa e a equação da conservação da quantidade de movimento linear, dadas pelas Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

onde ρ é a densidade, $\nu = \mu / \rho$ é a viscosidade cinemática, μ é a viscosidade molecular, p é a pressão e g_i é a aceleração da gravidade.

4. MODELAGEM DA TURBULÊNCIA

A simulação computacional realizada no atual estudo é baseada nas equações médias de Reynolds, por meio de uma técnica denominada Reynolds Average Navier-Stokes (RANS). A escolha dessa técnica neste trabalho deve-se ao fato de que a mesma não exige um esforço computacional elevado e gera resultados de alta qualidade, sendo a técnica mais utilizada atualmente na resolução de casos de Engenharia pela indústria. Outra grande vantagem é que só depende do campo de velocidade média e do escoamento em regime permanente.

4.1 Equações médias de Reynolds - RANS

O escoamento sobre um canal com um degrau descendente construído no presente trabalho é governado pela aplicação do modelo de equações de médias de Reynolds (RANS) nas equações de conservação de massa e de conservação da quantidade de movimento de Navier-Stokes para escoamento incompressível. O modelo das equações médias

de Reynolds é baseado na decomposição do vetor velocidade em $u_i = \bar{u}_i + u_i'$, onde \bar{u}_i representa o vetor velocidade média e u_i' representa o vetor de flutuação da velocidade. Sendo assim, a equação média (RANS) de movimento linear, para o estado estacionário e escoamento incompressível e a equação média (RANS) de conservação de massa são dadas por

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

onde $\overline{u_i' u_j'}$ é o termo tensor de Reynolds, que representa a influência das flutuações no escoamento médio.

O tensor de Reynolds é um tensor simétrico e a sua presença adiciona seis novas incógnitas ao problema, sendo necessária assim a adição de equações para determinar os valores das tensões turbulentas. Surge então o problema de fechamento matemático da turbulência, o que leva a necessidade da aplicação de modelos para avaliar o tensor de Reynolds. Nesse âmbito, são utilizadas duas classes de modelos: modelos de viscosidade turbulenta e modelos de fechamento de segunda ordem.

Os modelos de viscosidade turbulenta modelam a tensão de Reynolds baseada na hipótese de Boussinesq, por meio de uma analogia entre as tensões turbulentas e as tensões viscosas do escoamento laminar, onde as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidade média do escoamento e o coeficiente de proporcionalidade é denominado viscosidade turbulenta.

$$\overline{u_i' u_j'} = -2\bar{S}_{ij} \nu_t + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right); k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (8)$$

onde \bar{S}_{ij} é a taxa média de deformação, k é a energia cinética turbulenta e $\nu_t = \mu_t / \rho$, onde μ_t é a viscosidade turbulenta, definida de acordo com os modelos.

O modelo de viscosidade turbulenta utilizada neste trabalho é o modelo de duas equações diferenciais parciais, denominado Shear-Stress Transport $k-\omega$ (SST $k-\omega$).

Segundo [9], nos modelos de viscosidade turbulenta de duas equações, as equações são normalmente fechadas por meio de suposições apropriadas para modelar os termos de turbulência. No entanto, uma suposição que normalmente é feita para simplificar as equações é que o número de Reynolds é suficientemente grande. Para os escoamentos externos, o número de Reynolds é definido de acordo com a velocidade de escoamento livre e a espessura da camada-limite, enquanto para os escoamentos internos, o número de Reynolds é definido com base na velocidade média de entrada e na largura do duto. Essa suposição relacionada a um elevado número de Reynolds torna esses modelos não aplicáveis em casos de escoamentos próximos à parede e, portanto, limita o alcance da aplicabilidade dos modelos. Sendo assim, os modelos de fechamentos de duas equações não são totalmente adequados para escoamentos turbulentos com tais complexidades como gradiente de pressão adverso, rotação de fluido, etapas de recirculação e recolamento, dentre outros.

Como solução para esse problema, surgem os modelos de

fechamento de segunda ordem, onde são resolvidas versões simplificadas do tensor de Reynolds por meio de diversos tipos de aproximações e hipóteses. O modelo de fechamento de segunda ordem utilizado no presente trabalho é o Reynolds Stress Model - RSM.

4.1.1 Modelo SST

O modelo SST k- ω (Shear-Stress Transport k- ω) [10] foi proposto para as simulações de escoamentos aeronáuticos com altos gradientes adversos de pressão e separação de camada limite, por meio de uma combinação dos modelos k- ϵ e k- ω . Com respeito a casos de escoamentos com camada limite, o modelo k- ω apresenta melhores resultados que o modelo k- ϵ na solução da região viscosa próxima à parede, e seus resultados têm sido satisfatórios em casos que envolvem gradientes de pressão adversos. Entretanto, o modelo k- ω exige uma condição de contorno não nula para ω para correntes livres não turbulentas, e o escoamento calculado apresenta elevada sensibilidade ao valor especificado. Foi demonstrado também por [11] que o modelo k- ϵ não apresenta essa deficiência. Logo, o modelo SST k- ω é a combinação robusta e precisa do modelo k- ω na região próxima das paredes com a independência da corrente livre do modelo k- ϵ fora da camada limite. Para isso, o modelo k- ϵ é escrito em termos da taxa de dissipação específica, ω . Em seguida, o modelo k- ω padrão e o modelo k- ϵ modificado são multiplicados por uma função de mistura e somados. A função de mistura denominada é um (levando ao modelo k- ω padrão) na região interna da camada limite turbulenta e é igual a zero (modelo k- ϵ padrão) na borda externa da camada. Essa função de mistura é dada por:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (9)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}; \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right); \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (10)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_D \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10} \right) \quad (11)$$

onde $CD_{k\omega}$ é a parte positiva do termo de difusão cruzada e d é a distância até a parede mais próxima.

A viscosidade turbulenta é formulada da seguinte maneira:

$$\nu_t = \frac{a_1 \omega}{\max(a_1 \omega; SF_2)} \quad (12)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi^2); \Phi = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}; \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right) \quad (13)$$

onde $S = (2\overline{S_{ij}}\overline{S_{ij}})^{0.5}$ diz respeito ao módulo do tensor taxa de deformação médio $\overline{S_{ij}}$, diz respeito a função de mistura para a viscosidade turbulenta no modelo SST k- ω e d é a distancia da parede. A energia cinética turbulenta é a taxa de dissipação específica ω desse modelo podem ser obtidas pela solução das suas equações de conservação, onde o conjunto de fechamento para o SST k- ω é calculado por meio do uso de uma função de mistura entre as constantes, do modelo k- ω padrão e do modelo k- ϵ , fazendo $\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$.

As constantes utilizadas no modelo SST k- ω são mostradas na Tabela 1.

Tab 1: Constantes do modelo SST k- ω .

Constante	ϕ_1	ϕ_2
B	0,0750	0,0828
β^*	0,09	0,09
σ_k	0,5	1,0
σ_ω	0,5	0,856
σ_D	0,856	0,856
A	5/9	0,44

4.1.2 Modelo RSM

O modelo tratado anteriormente é um modelo RANS baseado na Hipótese de Boussinesq. Apesar de apresentar uma boa solução para o problema de fechamento das equações médias de Reynolds, os modelos do tipo RANS apresentam algumas falhas, geralmente relacionadas as limitações impostas pelo conceito de viscosidade turbulenta [12].

O modelo RSM (Reynolds Stress Model) é uma alternativa ao modelo tratado anteriormente, baseado na determinação de equações diretas para o transporte de Reynolds. Os modelos do tipo RSM normalmente são denominados modelo de fechamento direto ou modelo de segunda ordem [13].

As equações de transporte para as tensões de Reynolds podem ser determinadas através das equações de Navier-Stokes e são dadas por:

$$\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j \bar{u}_i}}{\partial x_i} = D_{ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (14)$$

O lado esquerdo da Eq. 14 diz respeito ao transporte convectivo do tensor de Reynolds ao longo do escoamento médio.

O primeiro termo do lado direito é denominado termo de transporte difusivo e representa a taxa de difusão provocada pela viscosidade molecular do fluido, pelas flutuações p' da pressão e pela turbulência. O termo de transporte difusivo é dado pela Eq. 15.

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\overline{u'_i u'_j u'_i} + \frac{p'}{\rho} (\delta_{ij} u'_i + \delta_{ii} u'_j) \right] \quad (15)$$

O segundo é termo de produção de tensão e representa a taxa de produção da tensão turbulenta ao passo que a mesma é transportada ao longo do escoamento, sofrendo influência dos gradientes de velocidade média [12]. Este termo é apresentado abaixo.

$$P_{ij} = - \left[\overline{u'_i u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i}} + u'_j u'_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] \quad (16)$$

O termo de pressão Φ_{ij} , dado pela Eq. 17, envolve correlações entre taxas de deformação e flutuações de pressão e atua na redistribuição de energia entre os componentes normais da tensão de Reynolds quando $i=j$ e na redução da tensão cisalhante quando $i \neq j$. Esse termo tende a tornar a turbulência mais isotrópica e a sua modelagem tem sido objetivo de vários estudos, sendo um dos temas principais no desenvolvimento dos modelos de fechamento de segunda ordem [14].

$$\Phi_{ij} = \frac{p'}{\rho} \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right] \quad (17)$$

O termo ϵ_{ij} diz respeito à taxa de dissipação do tensor de



Fig. 4 - Geometria construída.

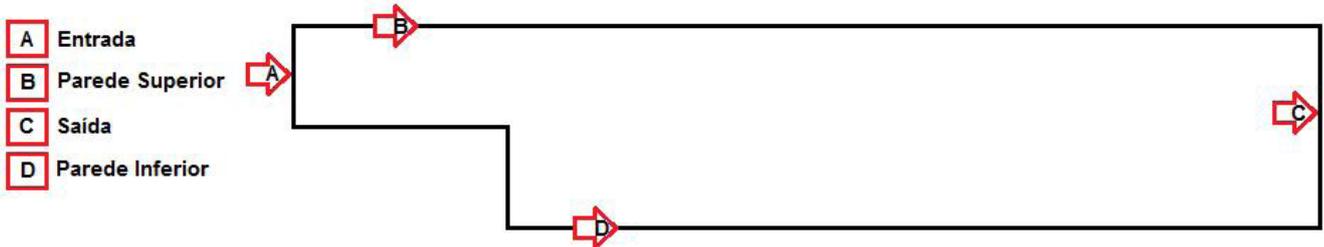


Fig. 5 - Regiões construídas.

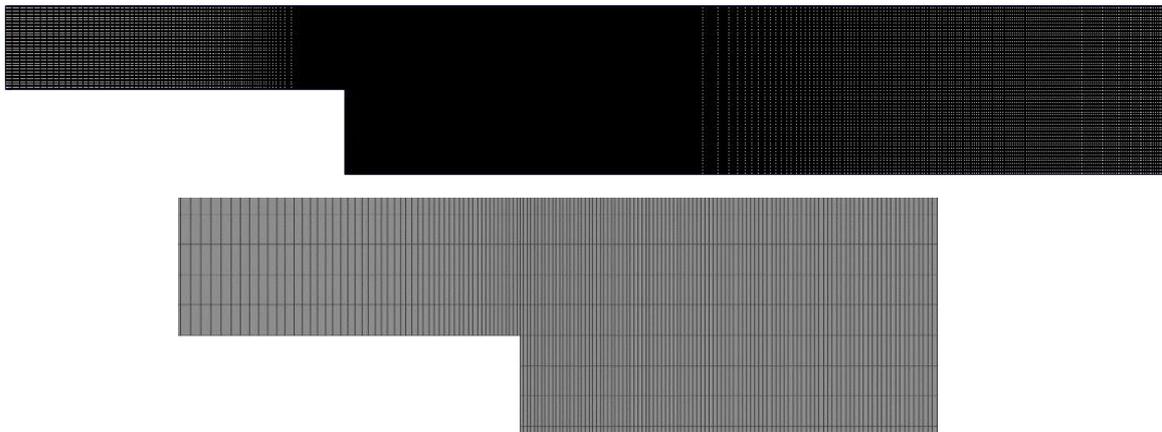


Fig. 6 - Malha construída.

Reynlds provocada pela viscosidade, dado pela Eq. 18.

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \left[\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j} \right] \quad (18)$$

5. DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Os casos construídos neste trabalho tem um raio de expansão $E_R=2$. O canal de entrada tem largura $L_x=4h$ e altura igual a h e o canal de saída apresenta largura $L_x=29h$ e altura $L_y=2h$. O valor de h utilizado nas simulações realizadas no presente trabalho é igual a 1m. A geometria construída no presente trabalho é apresentada logo acima, na Fig. 4.

Sendo assim, o domínio computacional desse caso é de $L_x \times L_y = 33h \times 2h$.

O número de Reynolds dos casos construídos nesse trabalho é de $Re=9000$. As condições de contorno para os casos construídos com modelagem RANS nesse trabalho são apresentadas na Fig. 5.

A região A mostrada na figura anterior, denominada Entrada, representa a entrada de fluxo, onde há velocidade de entrada com valor apenas na componente x , tendo valor nulo na componente y . Sendo assim, a velocidade média de entrada estabelecida nesse trabalho é de 1 m/s e pressão manométrica de escoamento nessa região igual a zero. Além disso, na região A o valor da intensidade de turbulência determinado é de 5% U e a taxa de viscosidade turbulenta igual a 10.

As regiões B e D são, respectivamente, a parede superior

e inferior do caso estudado. Ambas apresentam condições de contorno do tipo parede com a condição de não deslizamento na parede.

A região C é de saída do escoamento, é uma condição do tipo pressão de saída, com pressão manométrica igual a zero, intensidade de turbulência de 5% U e taxa de viscosidade turbulenta igual a 10.

A malha gerada e utilizada em todos os casos no presente trabalho tem 155000 elementos e 156751 nós, mostrada na Fig. 6.

A região próxima ao degrau recebeu um tratamento da malha mais refinado, uma vez que é a região de maior interesse nesse caso.

6. MÉTODO NUMÉRICO

Em todos os casos simulados no presente trabalho, foi utilizado o método numérico denominado Método dos Volums Finitos [15] para discretizar as equações de governo. O esquema de interpolação usado é o QUICK [16] e o esquema SIMPLE [17] foi usado no acoplamento pressão-velocidade. Para a resolução do sistema de equações lineares, foi utilizada a técnica Multigrid [18]. O problema foi considerado convergido quando todos os resíduos forem menores que 10^{-6} .

O software ANSYS FLUENT® foi usado para a construção da geometria, construção das malhas, além de suporte aos métodos numéricos e equações de governo e no pós-processamento dos casos construídos.

7. RESULTADOS

7.1 Comprimento de recolamento

O comprimento de recolamento (X_R) é uma importante grandeza analisada no escoamento sobre um degrau descendente. No presente trabalho, o valor do comprimento de recolamento é determinado através da curva de coeficiente de atrito na parede inferior. Ao olhar a curva de coeficiente de atrito em função de x , o valor do comprimento de recolamento é encontrado quando o coeficiente de atrito é igual a zero.

Os valores do comprimento de recolamento encontrados foram comparados com o valor encontrado por [2], mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Comprimentos de recolamento para diferentes modelos de turbulência.

Modelo	Re	ER	XR
DNS [2]	9000	2	8,62
SST k- ω	9000	2	8,50
RSM	9000	2	5,86

Na Tabela 2, pode-se observar que o comprimento de recolamento do caso simulado com o modelo SST k- ω tem valor próximo do comprimento de recolamento encontrado por [2], com o modelo de simulação numérica direta. Observa-se também que o recolamento do escoamento no caso simulado com o modelo RSM ocorre consideravelmente antes dos outros dois modelos, apresentando o menor valor do comprimento de recolamento.

7.2 Perfil de velocidade

No presente trabalho são analisados os perfis de velocidade em quatro diferentes posições do escoamento, obtidos nas

simulações com os modelos SST k- ω e RSM e comparados com os resultados obtidos por [2]. A Fig. 7 apresenta os perfis de velocidade nas seguintes posições: $x/h = 0,5$, $x/h = 4$, $x/h = 8$ e $x/h = 20$.

A primeira posição está localizada logo após o degrau e pode-se observar que o escoamento totalmente desenvolvido se estende livremente. Em $x/h = 4$, nota-se a presença de valores negativos de velocidades, representando a presença de fluxo inverso, provocado pelo gradiente de pressão adverso que causa a separação da camada limite. Nessa posição, pode-se observar que os valores de velocidade próximos à parede inferior encontrados com o modelo RSM são maiores que outros dois modelos analisados. Conseqüentemente, a presença de fluxo inverso é menor nessa posição para o caso simulado com o modelo RSM. Tal resultado é explicado pelo fato de que o comprimento de recolamento do modelo RSM é consideravelmente menor que o comprimento de recolamento dos outros dois modelos de turbulência analisados, sendo assim, na posição $x/h = 4$ o recolamento está mais próximo para o caso com o modelo RSM.

Na posição $x/h = 8$, também se observa uma diferença entre os valores mostrados no perfil de velocidade obtido pelo modelo RSM e os demais, devido ao fato de que o recolamento do escoamento já ocorreu no mesmo, enquanto está próximo de ocorrer nos modelos SST k- ω e DNS. Na última posição pode ser observado, em todos os casos, que, embora não esteja totalmente desenvolvido, o escoamento tende ao equilíbrio.

7.3 Contorno de velocidade

A Fig. 8 apresenta os contornos de velocidade obtidos nas simulações com os modelos SST k- ω , RSM e DNS. Em todos os casos, pode-se ver a presença de uma bolha principal de recirculação e uma pequena bolha secundária, próxima à aresta do degrau. Como já esperado, o contorno de velocidade do caso simulado com o modelo de turbulência SST k- ω é o mais parecido com o resultado obtido por [2], uma vez que ambos apresentam comprimento de recolamento com valores próximos. O contorno de velocidade obtido pela simulação com o modelo RSM mostra que o recolamento nesse ocorre antes que os demais, apresentando uma menor bolha secundária de recirculação.

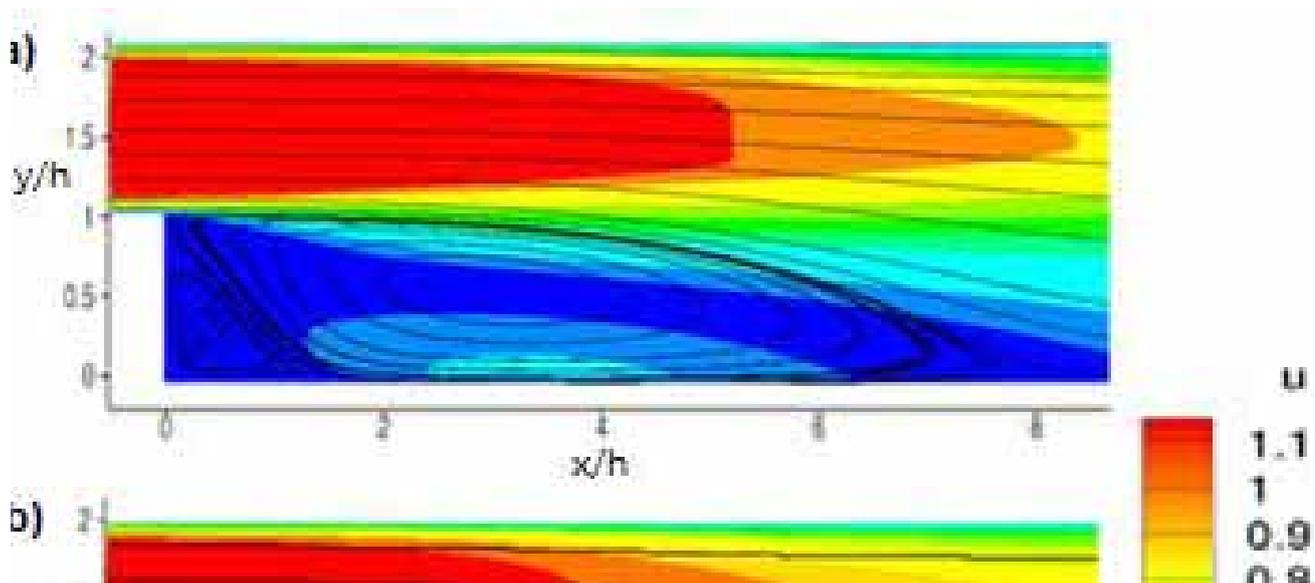
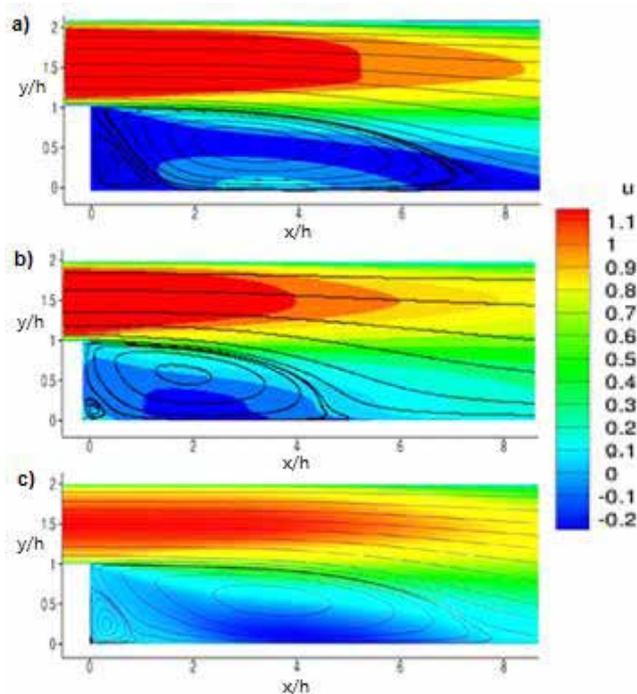


Fig. 7 - Perfis de velocidade em diferentes posições: a) $x/h=0,5$; b) $x/h=4$; c) $x/h=8$; d) $x/h=20$.



7.4 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO

As curvas de distribuição de pressão ao longo do canal com degrau descendente foram construídas, utilizando a fórmula dada pela Eq. 19.

$$\frac{P - P_w}{0,5\rho U^2} \quad (19)$$

onde P_w é a pressão na parede de topo.

Assim como foi feito para os perfis de velocidade, a distribuição de pressão é analisada em quatro diferentes posições ao longo do canal e os resultados obtidos nas simulações realizadas são comparados com os resultados obtidos pela simulação numérica direta [2]. A Fig. 9 mostra as curvas de pressão dos três modelos de turbulência tratados no presente trabalho em quatro diferentes posições.

Na primeira posição, observa-se que o comportamento da curva obtida pelo modelo RSM assemelha-se ao da curva obtida por simulação numérica direta [2], fato que não pode ser observado no resultado encontrado pelo modelo SST k- ω . Em $x/h = 4$, pode-se notar que os valores de pressão estática na parede superior são maiores que os valores encontrados na parede inferior e essa diferença entre as pressões da parede inferior e superior é maior logo abaixo do degrau, justamente por se tratar da zona de recirculação. Na curva de distribuição de pressão obtida pelo modelo RSM em $x/h = 4$, há uma queda de pressão na região próxima ao degrau e se observa que os valores de pressão da parede inferior e superior são muito próximos. Nas duas últimas posições, os três modelos apresentam curvas muito próximas e, em $x/h = 20$, a distribuição de pressão torna-se mais uniforme.

A Fig. 10 apresenta os contornos do coeficiente de pressão obtidos nas simulações tratadas no presente trabalho. O coeficiente de pressão é dado pela Eq. 20.

$$C_p = \frac{P - P_0}{0,5\rho U^2} \quad (20)$$

onde P_0 é a pressão de referência, obtida no ponto (-4, 1,5).

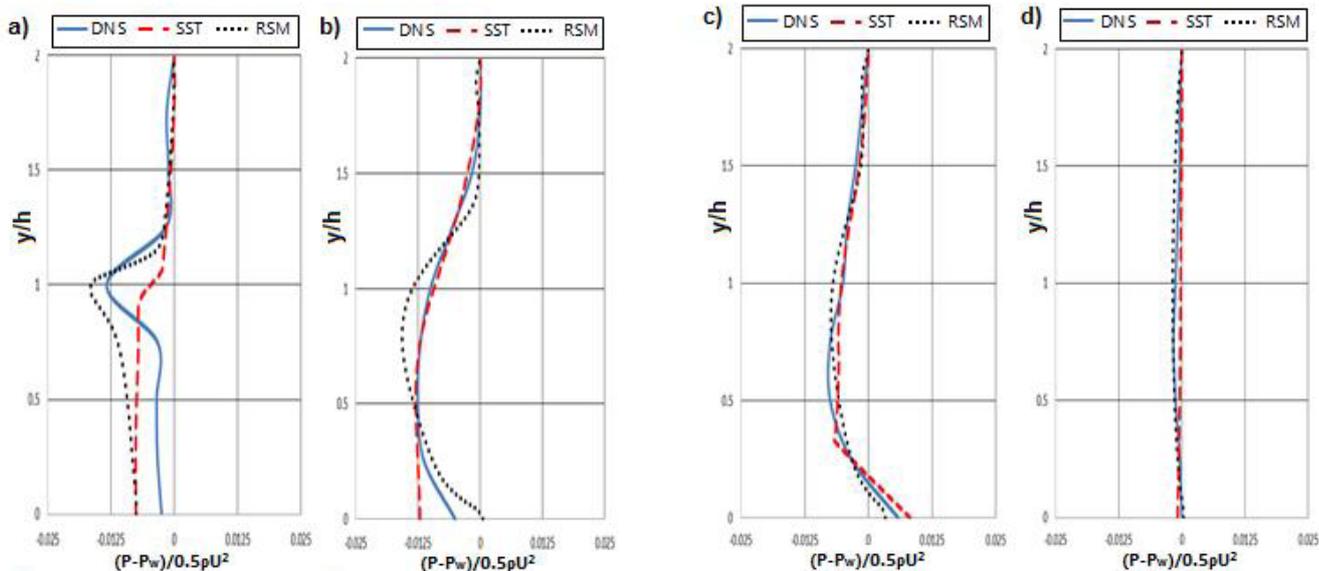


Fig. 9 – Pressão estática em diferentes posições: a) $x/h=0,5$; b) $x/h=4$; c) $x/h=8$; d) $x/h=20$.

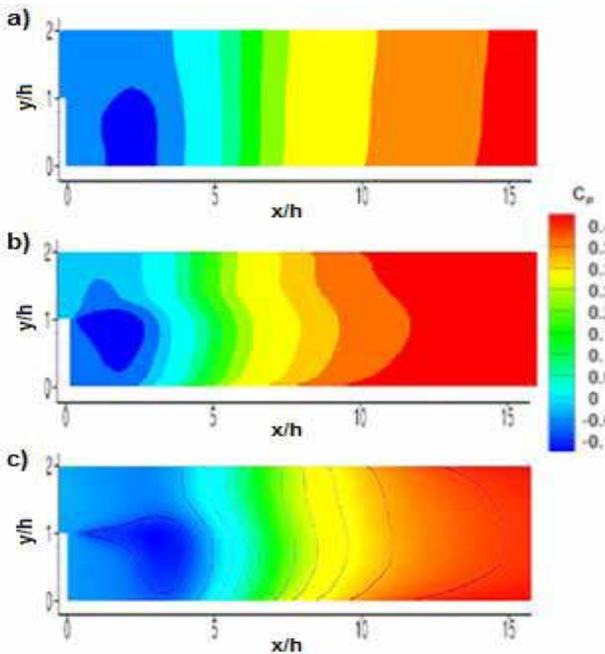


Fig. 10 – Contornos de coeficiente de pressão obtidos. a) SST $k-\omega$; b) RSM; c) DNS [2].

Observa-se uma zona de queda de pressão na região logo após o degrau em todos os casos, sendo mais claramente observada no contorno de pressão obtido com o modelo RSM. Pode ser notado também que, por apresentar um recolamento mais precoce, o campo de pressão obtido na simulação com o RSM tende ao equilíbrio antes que os obtidos com os outros dois modelos discutidos nesse trabalho.

7.5 Grandezas de segunda ordem

Os resultados relacionados às grandezas de segunda ordem obtidos pelas simulações realizadas com os modelos de turbulência SST $k-\omega$ e RSM são apresentados e analisados, comparados com os resultados obtidos pela simulação numé-

rica direta [2]. A distribuição de turbulência afeta diretamente o campo de velocidade e de pressão através do degrau descendente. Serão analisados os perfis das intensidades de turbulência e da tensão cisalhante de Reynolds nas mesmas quatro posições em que foram mostrados anteriormente os perfis de velocidade e de distribuição de pressão.

A Fig. 11 apresenta os perfis de $\sqrt{u'u'}/U_b$ obtidos nas simulações realizadas no presente trabalho, comparados com os resultados encontrados por [2]. Pode-se observar que os valores encontrados na simulação com o modelo RSM são maiores em todas as posições do escoamento analisadas, resultado já esperado ao olhar para os contornos de velocidade mostrados na Fig. 8, onde a bolha de recirculação primária presente no modelo RSM é a menor entre os três modelos analisados. Nota-se, no perfil de intensidade turbulenta, um acentuado pico na primeira posição da Fig. 11, $x/h = 0,5$, ocasionado pela presença da bolha secundária de recirculação. Em $x/h = 4$, há o aumento dos valores de intensidade turbulenta, provocado pela bolha principal de recirculação, e nota-se também um pico mais acentuado na parede superior. A terceira posição analisada é a região próxima ao recolamento e nessa posição pode ser observado o surgimento de um pico na parede inferior, que aumenta mais a jusante do canal. Mais a jusante os picos são suavizados e, na posição $x/h = 20$, o escoamento está mais equilibrado, tendendo ao escoamento totalmente desenvolvido, acentuando-se os picos na parede inferior e superior.

Os perfis de intensidade turbulenta são mostrados na Fig. 12. O perfil apresentado na primeira posição, na camada de mistura, tem comportamento similar ao perfil de $\sqrt{u'u'}/U_b$, mostrado na Fig. 11. Mais a jusante, o pico existente na parede superior diminui e a curva apresenta uma forma mais convexa, devido ao elevado grau de intensidade de turbulência no meio do canal. Na última posição, em $x/h = 20$, os níveis de intensidade turbulenta vertical são menores, uma vez que o escoamento está mais equilibrado, próximo ao canal de saída.

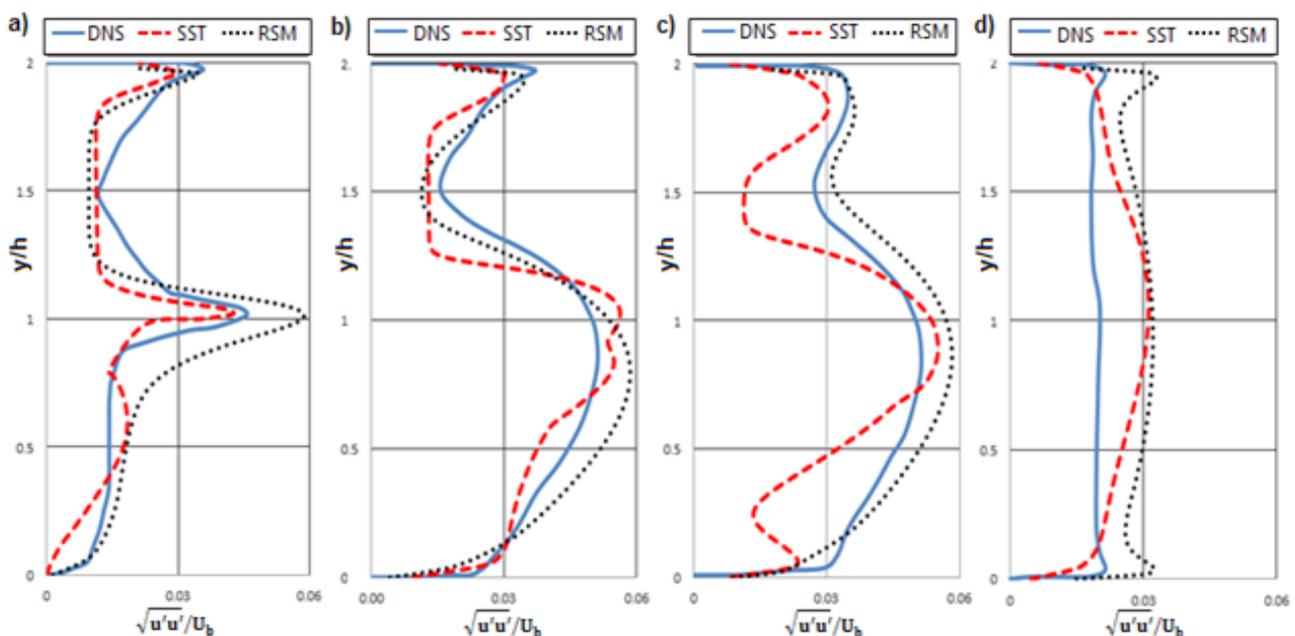


Fig. 11 – Perfil de $\sqrt{u'u'}/U_b$ em diferentes posições: a) $x/h=0,5$; b) $x/h=4$; c) $x/h=8$; d) $x/h=20$.

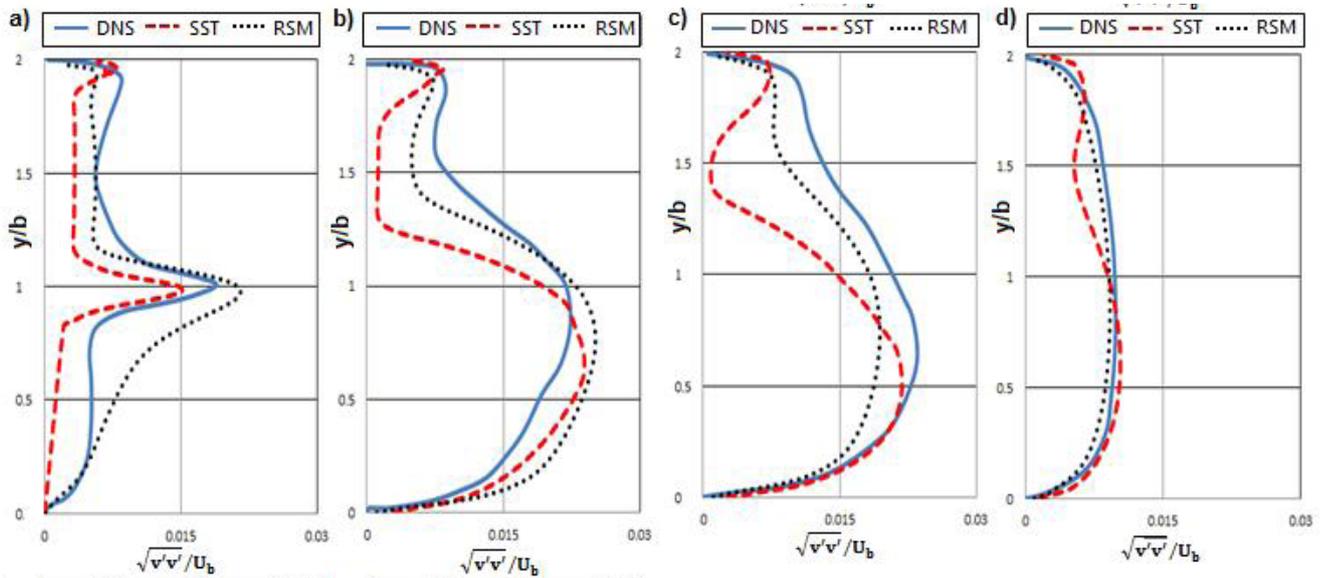


Fig. 12 – Perfil de $\sqrt{v'v'}/U_b$ em diferentes posições: a) $x/h=0.5$; b) $x/h=4$; c) $x/h=8$; d) $x/h=20$.

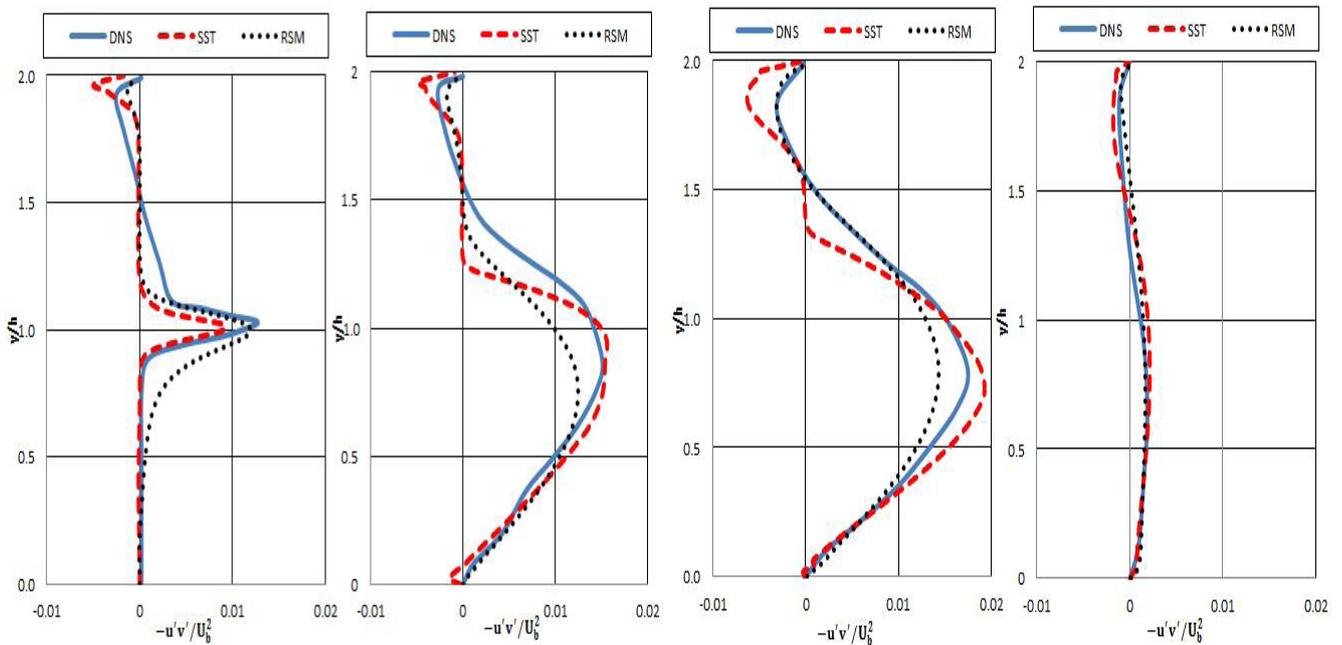


Fig. 13 – Perfil de $-u'v'/U_b^2$ em diferentes posições: a) $x/h=0.5$; b) $x/h=4$; c) $x/h=8$; d) $x/h=20$.

A Fig. 13 apresenta os perfis da tensão cisalhante de Reynolds nas quatro posições tratadas ao longo do presente trabalho. Assim como nos perfis de intensidade turbulenta na primeira posição, o perfil da tensão cisalhante apresenta um grande pico em $y/h = 1$, na altura do degrau. Esse pico é provocado pela presença da bolha secundária de recirculação na região de mistura. Observa-se o aumento dos valores de pico da tensão cisalhante de Reynolds em $x/h = 4$ e $x/h = 8$, posições onde se encontra a bolha principal de recirculação e a região de recolamento. Na última posição, os valores de tensão cisalhante de Reynolds são baixos, uma vez que o escoamento encontra-se mais equilibrado nessa região mais a jusante. Ao observar os perfis de tensões de cisalhamento mostrados pode-se notar que os valores máximos encontram-se em posições afastadas da parede, demonstrando um nível insuficiente de tensão de cisalhamento na parede.

Ao analisar os perfis de intensidades turbulentas e tensão cisalhante de Reynolds mostrados anteriormente é no-

tável que valores máximos das intensidades turbulentas e da tensão cisalhante de Reynolds têm uma tendência uniforme, dada por um aumento contínuo em direção a um valor de pico na região mais próxima ao recolamento, seguido da diminuição dos valores mais a jusante do escoamento, retratando uma mudança significativa na estrutura da camada de cisalhamento.

Quando comparado com o desempenho do modelo SST $k-\omega$ em relação aos resultados obtidos pela simulação numérica direta, o modelo RSM apresenta o melhor comportamento dos perfis em todas as posições mostradas. Esse resultado já era esperado, uma vez que o modelo RSM é um modelo de fechamento de segunda ordem, onde as intensidades de turbulência são calculadas diretamente, diferentemente do que acontece no modelo SST $k-\omega$, onde as grandezas de segunda ordem são calculadas por equações a partir da viscosidade turbulenta.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho, dois modelos de turbulência baseados nas equações médias Reynolds aplicados as equações de Navier-Stokes (RANS) foram utilizados para estudar o escoamento turbulento sobre um degrau descendente: modelos SST k- ω e RSM. Os resultados obtidos foram comparados com os estudos realizados por [2], utilizando um modelo de simulação numérica direta (DNS).

Com relação ao comprimento de recolamento, o modelo SST k- ω apresentou um resultado mais próximo do encontrado por [2] e foi observado que o recolamento no caso com o modelo RSM ocorreu muito antes que os outros dois casos analisados no presente trabalho. Sendo assim, a bolha de recirculação principal do modelo RSM é muito menor que as bolhas principais dos outros dois modelos. O comprimento de recolamento encontrado no modelo RSM é $X_r = 5,86$, enquanto os valores encontrados por [2] e com o uso do modelo SST k- ω são, respectivamente, $X_r = 8,62$ e $X_r = 8,50$.

Nos dois modelos utilizados no presente trabalho, a formação de uma bolha primária na região logo após o passo é visualizada através das linhas de velocidade, além da presença de uma bolha secundária apresentada nos resultados encontrados por [2].

Com relação aos resultados das grandezas de segunda ordem – intensidades de turbulência e tensão cisalhante de Reynolds – os resultados obtidos usando o modelo de turbulência RSM estão mais próximos dos resultados encontrados por [2], quando comparados aos resultados gerados pelo uso do modelo SST k- ω . O resultado condiz com o que já era esperado, uma vez que o modelo RSM é um modelo de fechamento de segunda ordem, onde essas grandezas são obtidas de maneira direta, enquanto o modelo SST k- ω calcula os valores de intensidade turbulenta e tensão cisalhante de Reynolds a partir de uma equação aproximada envolvendo a viscosidade turbulenta.

REFERÊNCIAS

- [1] Maliska, C.R., 2004, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional". Ed. LCT, Rio de Janeiro.
- [2] Kopera, M. A. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. University of Warwick, 2011.
- [3] Armaly, B. F.; Durst, Pereira, J. C. F.; Schönung, B. Experimental and Theoretical Investigation of Backward-Facing Step Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 473 - 4961, 1983.
- [4] Lee, T.; Mateescu, D. Experimental and Numerical Investigation of 2-D Backward-Facing Step Flow. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 12, pp. 703 – 716, 1998.
- [5] Le, H.; Moin, P.; Kim, J. Direct numerical simulation of turbulent flow over backward-facing step. *Journal of Fluid Mechanics*, 330, pp. 349-374, 1997.
- [6] Xie, W. A.; Xi, G. N. Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics of Separation and Reattachment Flow over a Backward-Facing Step. *International Journal of Refrigeration*, 2016.
- [7] Shahi, M.; Kok, J. B. W.; Pozarlik, A. On Characteristics of a Non-Reacting and a Reacting Turbulent Flow over a Backward-Facing Step (BFS). *Internacional Communications in Heat and Mass Transfer*, 61, pp. 16-25, 2014.
- [8] Ratha, D.; Sarkar, A. Analysis of Flow over Backward Facing Step with Transition. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 9, pp. 71-81, 2015.
- [9] So, R.M.C.; Lai, Y. G.; Zhang, H. S. Second-Order Near-Wall Turbulence Closures: A Review. *AIAA Journal*. Vol. 29, no. 11, pp. 1819-1835.
- [10] Menter, F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [11] Cazalbou, J. B.; Sparlat P. R.; Bradshaw P. On the Behavior of 2-Equation Models at the Edge of a Turbulent Region. *Physics of Fluids*, Vol. 6, No. 5, pp. 1797-1804, 1993.
- [12] Rezende, A. T., 2009. Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Finita Inclinada. PUC, Rio de Janeiro, Brasil.
- [13] Launder B. E.; Shima N. Second-Moment Closure for the Near-Wall Sublayer: Development and Application. *AIAA Journal*, 27(10):1319-1325, 1989.
- [14] Rezende, A.L.T.; Nieckele, A.O. Evaluation of turbulence models to predict the edge separation bubble over a thin aerofoil. 20th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2009, pp. 2-4. Gramado, RS, Brasil. 2009.
- [15] McDonald, P. W. The computation of transonic flow through two-dimensional gas turbine cascades. *ASME*, pp. 71-89, 1971.
- [16] Leonard, B. P. A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 59-98. 1979.
- [17] Patankar, S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. John Benjamins Publishing, 197p, 1980.
- [18] Hutchinson, B. R.; Raithby G. D. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy. *Numerical Heat Transfer*, pp. 511-537, 1986.