

Na Fig. 5.37 (b) nota-se também a falta de informação turbulenta da camada limite de entrada, sendo as flutuações v' captadas por todos os modelos abaixo dos níveis experimentais para $y/h > 1,5$. Com exceção dessa subpredição na região cisalhante, os níveis previstos pelos modelos LES, LESVD e DES são muito bons. Uma pequena superestimação para o caso LES é detectada na faixa $0,5 < y/h < 1,5$ nas estações $x/h = 4$ e $x/h = 6$, fato esse apreciável em todas as estações dos resultados de Le, Moin e Kim (1997). Ainda que ínfimo, o caso SA apresenta um pequeno nível de flutuação nas proximidades de $y/h = 1$, mas nada que venha a gerar alguma estrutura turbilhonar.

Diferenças maiores em relação aos dados experimentais e entre os diversos modelos testados são constadas quando analisamos a componente $\overline{u'v'}$ do tensor de Reynolds, Fig. 5.37 (c). Para a estação $x/h = 4$ o valor máximo experimental não é alcançado por nenhum modelo, sendo o LES o que chega mais próximo. Os casos LESVD e DES apresentam resultados iguais, prevendo um valor máximo inferior ao experimental. Para a estação $x/h = 6$ mantém-se essa subpredição, mas com um distanciamento entre os resultados dos casos LESVD e DES, com o LESVD prevendo um máximo mais próximo de experimental. Na estação $x/h = 10$ os resultados são melhores, ocorrendo uma superestimação do valor máximo pelo caso LES. O modelo LESVD prevê com mais acurácia a curva experimental do que o modelo DES, na faixa $y/h < 1$ onde todos os modelos subestimam o valor da componente do tensor de Reynolds. Na estação $x/h = 19$ os resultados são muito próximos aos experimentais, destacando-se a leve defasagem da curva do caso DES. Assim como para as componentes de flutuação u' e v' o componente $\overline{u'v'}$ do tensor de Reynolds mostra-se nulo em todas as estações para o caso SA na Fig. 5.37 (c).

Com base nos dados apresentados nas seções anteriores é possível avaliar as qualidades de cada um dos modelos de turbulência testados. Seus méritos e deficiências são realçados no escoamento sobre o degrau, que, apesar de simples geometricamente, consegue simular regiões parietais, cisalhantes livres, descolamento, recolamento e interação entre essas zonas. Os casos LES, LESVD e DES apresentam resultados topológicos muito semelhantes, formando os mesmos tipos de estrutura e diferindo mais drasticamente no comprimento de recolamento. O caso SA é muito diferente, não gerando nenhum tipo de instabilidade ou flutuação, apresentando uma solução média no tempo e perdendo bastante informação da física do escoamento.

As evoluções da velocidade, do coeficiente de pressão e do tamanho de bolhas de recirculação são fortemente dependentes do comprimento de recolamento, justificando as semelhanças entre os casos LESVD e DES que prevêem um X_R quase idêntico. Valores superestimados são previstos pelos casos LES e SA, apesar de, entre os modelos, os

resultados serem diferentes. Sem dúvida o papel do modelo de turbulência fica realçado quando analisamos os resultados, mas a suspeita de que as condições de contorno possam estar influenciando a qualidade dos resultados é um fato que necessita de maior aprofundamento.

Diversos estudos, sobre a influência das condições de contorno de entrada no degrau já foram realizados experimentalmente, detectando sua forte influência sobre o comprimento de recolamento, já abordados no Capítulo IV. O uso de condições de contorno de entrada permanentes no caso do degrau tem sido uma prática comum e de certa forma satisfatória, como visto na análise dos resultados anteriores. Na utilização de modelos do tipo RANS, onde a própria descrição do escoamento é média, utilizar condições de contorno permanentes é aceitável, visto que o modelo não tem capacidade de simular instabilidades físicas reais em uma camada limite.

Se estivermos interessados em utilizar um modelo capaz de descrever fenômenos complexos como escoamentos turbulentos, nada mais sensato que utilizar condições de contorno igualmente turbulentas. Isto é totalmente justificável na simulação do escoamento sobre o degrau, principalmente no caso onde a camada limite de entrada tem sua espessura da ordem da altura do degrau. O conteúdo turbulento da camada limite de entrada afeta a estrutura do escoamento após a expansão e a estrutura do escoamento após expansão pode afetar a camada limite de entrada, como observado nos casos LES, LESVD e DES onde flutuações na camada cisalhante acabam por injetar perturbações na camada limite de entrada.

A influência do nível de perturbação da camada limite de entrada sobre o comprimento de recolamento já foi comprovado experimentalmente por Isomoto e Honami (1989). Portanto, a perturbação induzida pela recirculação principal observada nos casos LES, LESVD e DES pode estar retraindo o comprimento de recolamento, conforme as flutuações se propagam na camada limite de entrada. A Fig. 5.38 mostra uma comparação dos perfis de intensidade turbulenta na direção longitudinal para uma estação imediatamente após o degrau. Os níveis de flutuações computados são confrontados com os dados experimentais de Jovic e Driver (1994) para uma estação anterior ao degrau ($x/h = -3$). Percebe-se que os níveis mais elevados são encontrados para os casos LESVD e DES, seguidos pelo caso LES e o caso SA. Apesar dos dados experimentais pertencerem à outra localização, são expostos juntos aos computados como meio de comparação da forma e valor máximo das curvas.

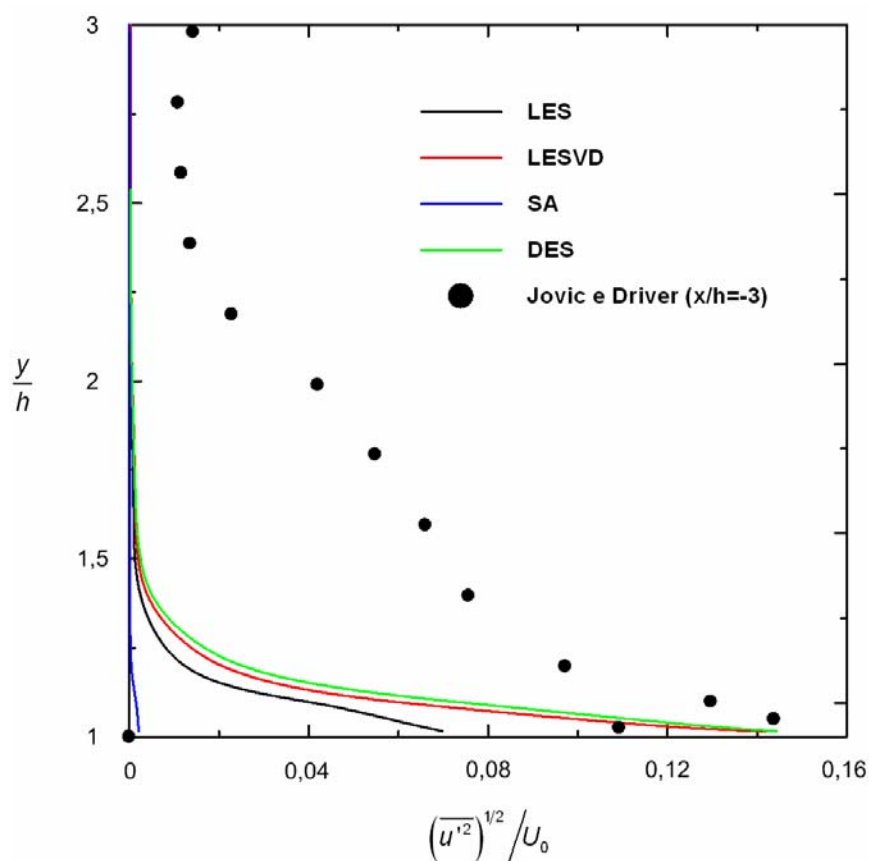


Figura 5.38. Perfis de intensidade turbulenta longitudinal em uma estação imediatamente após o degrau.

Como indicado por experimentos, altos níveis de flutuação da camada limite de entrada remetem a comprimentos menores de recolamento. Isso coloca em questão até que ponto a modelagem é responsável pelos valores encontrados para o comprimento de recolamento. A condição de contorno de entrada pode ter um peso tão elevado quanto à modelagem da turbulência no escoamento sobre o degrau. A próxima seção apresenta resultados que sustentam essa hipótese, sendo o escoamento estudado sob três formas distintas de aplicação das condições de contorno.

5.7 O escoamento sobre o degrau com condições de contorno turbulentas

A importância das condições de contorno de entrada no caso do escoamento sobre o degrau é sem dúvida grande. A presente seção expõe isso através da comparação de três

modos distintos de aplicação das condições de contorno utilizando o modelo LES de Smagorinsky, Fig. 5.39.

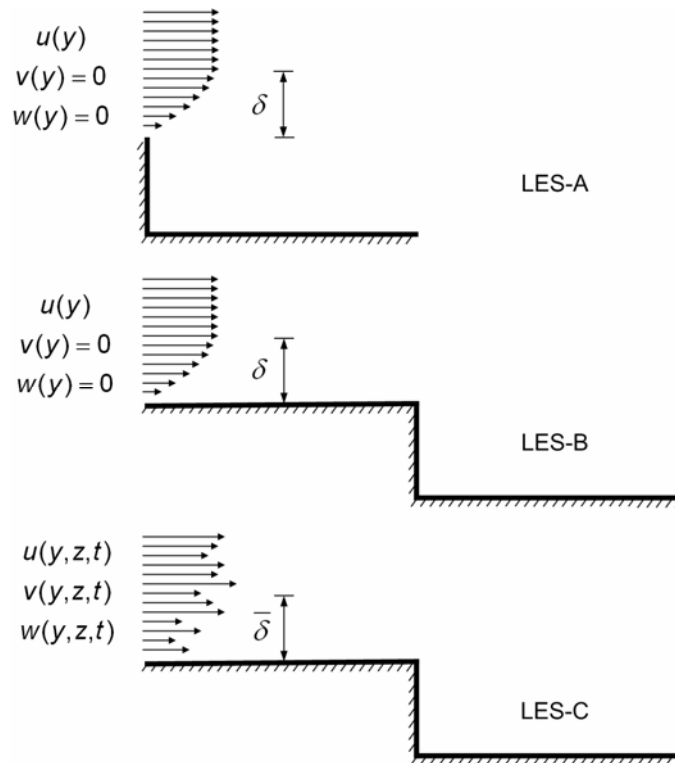


Figura 5.39. Casos comparativos LES-A, LES-B e LES-C.

Através do caso LES-A se pretende desacoplar a influência da perturbação da camada limite de entrada do restante do escoamento. Os casos LES-B e LES-C, com um comprimento de entrada $X_i = 3h$, possibilitam a análise da influência da perturbação injetada pela recirculação principal sobre a camada limite de entrada e a influência de uma camada limite de entrada turbulenta desenvolvida sobre o escoamento no degrau respectivamente.

A aplicação das condições de contorno de entrada para os casos LES-A e LES-B é trivial, bastando impor o perfil de velocidade média, como feito na seção anterior para o caso LES. A principal diferença acontece para o caso LES-A, onde o perfil de velocidades é aplicado exatamente sobre o degrau, sem a presença de um comprimento de entrada. Isso permite isolar totalmente os efeitos da bolha de recirculação sobre a camada limite de entrada. O caso LES-B é na realidade o caso LES da seção anterior, aqui renomeado apenas para fins de comparação com os outros casos.

O caso LES-C é o que requer maior atenção, pois as três componentes da velocidade são funções do tempo e espaço. Isso permite caracterizar completamente a camada limite de entrada, com flutuações e estruturas turbilhonares típicas desse tipo de escoamento, dando um caráter muito mais real à simulação. Mas, ao impor esse tipo de condição de contorno, cria-se mais um problema, o de como gerá-la. Um esforço computacional extra será despendido na geração dessas condições através do método de Lund, Wu e Squires (1998). A seção seguinte apresenta os resultados da simulação de uma camada limite turbulenta com o intuito de validar a metodologia e reproduzir a camada limite de entrada obtida no experimento de Jovic e Driver (1994) com os modelos LES, LESVD e DES.

5.7.1 Simulação da camada limite de entrada

A proposta inicial para a utilização do método de Lund, Wu e Squires (1998) seria unir a geração da condição de contorno ao caso do degrau adicionando um comprimento extra de entrada X_i , permitindo que o próprio caso gerasse suas condições de contorno. No entanto, dificuldades de convergência do método foram observadas no acoplamento do método no caso do degrau, identificando-se forte sensibilidade às condições iniciais e a pequenos gradientes de pressão encontrados no escoamento nas proximidades do degrau.

A solução adotada foi computar os casos separadamente, gerando primeiramente uma camada limite turbulenta e um domínio retangular de onde é extraída uma longa seqüência de planos contendo as velocidades instantâneas u , v e w que são armazenadas e utilizadas como condição de contorno no caso do degrau, Fig. 5.40. Essa escolha implica em computar um caso exclusivo para gerar as condições de contorno e pré-armazenar uma grande quantidade de informação, pois os planos são armazenados a cada passo de tempo.

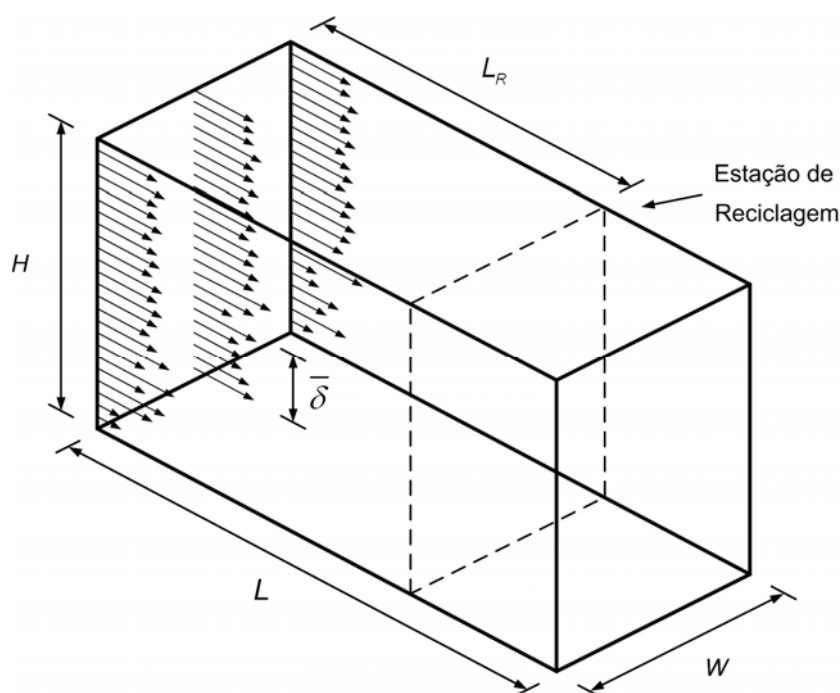


Figura 5.40. Domínio utilizado na simulação da camada limite de entrada.

O tamanho do domínio e os parâmetros da malha utilizados estão intimamente ligados aos casos computados anteriormente para o degrau, com os mesmos níveis de refinamento, sendo representados em função da altura do degrau h , ver Tab. 5.7.

Tabela 5.7. Domínio e malha empregados na simulação da camada limite de entrada.

	L	H	W	L_R	$\bar{\delta}$
	$10h$	$5h$	$4h$	$7h$	$1,15h$
Nº volumes	100	45	40		

O campo inicial de velocidades utilizado nas simulações é formado pelo perfil médio de velocidade obtido por Jovic e Driver (1994) acrescido de um ruído de 10% de U_0 às três componentes. Esse tipo de imposição de um perfil médio de boa qualidade se mostrou essencial à convergência do método. O passo de tempo utilizado é o mesmo que o dos casos LES, LESVD, SA e DES $0,01h/U_0$.

A nomenclatura dos casos para a camada limite de entrada segue o padrão já utilizado, sendo adicionada a terminação LWS, obtendo-se LES-LWS, LESVD-LWS e DES-LWS. Uma vez que o caso SA não apresentou habilidade de simular instabilidades, foi

descartado a utilização de uma condição mais elaborada como a proposta pelo método de Lund, Wu e Squires (1998).

Antes do método de Lund, Wu e Squires (1998), tentou-se a aplicação de um perfil médio com sobreposição de ruído branco, mas nenhuma instabilidade se forma, sendo as flutuações impostas rapidamente dissipadas. O método de Klein, Sadiki e Janika (2003) também foi testado, apresentando resultados medianos, porém, as instabilidades formadas são insignificantes, com as clássicas estrias próximas à parede de baixa intensidade. Além disso, a falta de informação entre as fases das flutuações geradas compromete a representação da condição de contorno aplicada.

Resultados topológicos para iso-superfícies de velocidade nos três casos (LES-LWS, LESVD-LWS E DES-LWS) são apresentados na Fig. 5.41. Grande atividade tridimensional é observada, apesar de, em média, o escoamento de uma camada limite ser bidimensional. Estruturas de maior tamanho são observadas nas iso-superfícies $u = 0,95U_0$ para os três casos, que novamente, assim como no degrau apresentam muitas semelhanças. As diferenças são mais apreciáveis para as iso-superfícies $u = 0,5U_0$, que ocorrem junto à parede inferior, com as características estruturas estriadas, sendo essas mais alongadas para os casos LES-LWS e DES-LWS e mais curtas no caso LESVD-LWS.

A Fig. 5.42 traz as estrias caracterizadas pelo campo de velocidade u em um plano xz junto à parede, $y = 0,1 \bar{\delta}$. Percebe-se claramente que nos casos LES-LWS e DES-LWS as estruturas são mais alongadas, com estrias de baixa velocidade muito semelhantes, mas com estrias de alta velocidade mais intensas e largas para o caso LES-LWS. Para o caso LESVD-LWS estrias curtas são novamente observadas.

É interessante notar que apesar dos planos apresentados na Fig. 5.42 serem muito próximos da parede ($y = 0,1 \bar{\delta}$), velocidades bastante altas são observadas, demonstrando que velocidades da ordem de U_0 são injetadas no interior da camada limite.

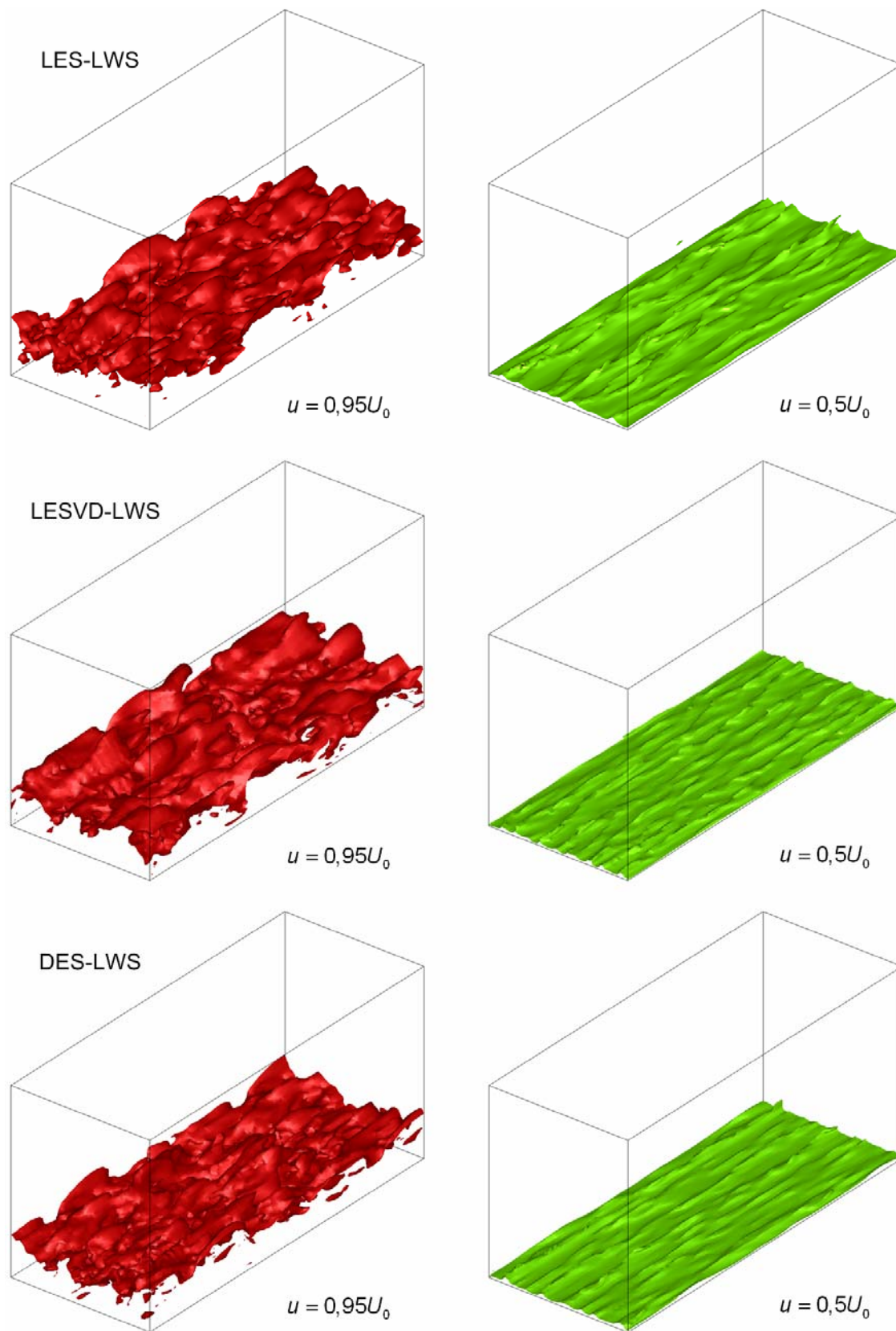


Figura 5.41. Iso-superfícies de velocidade u .

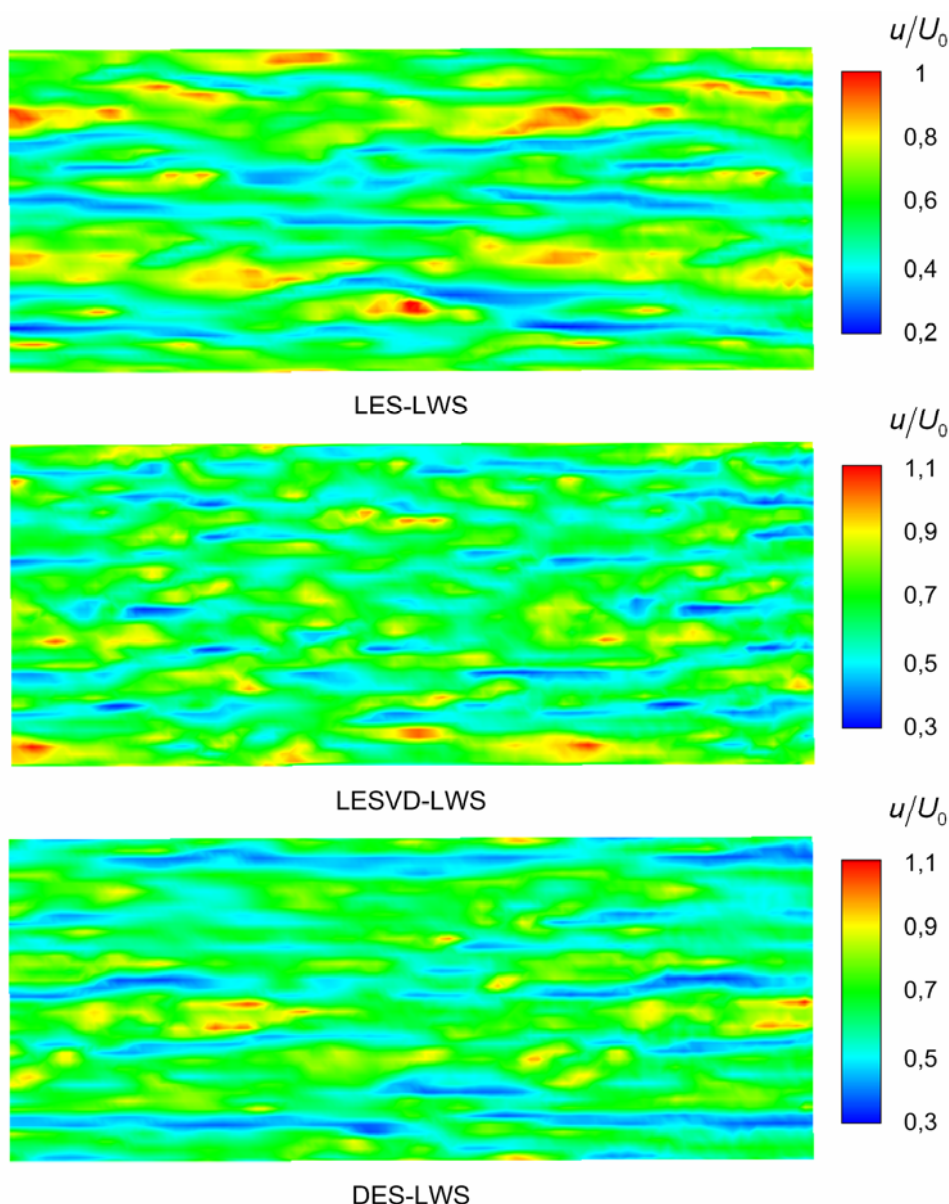


Figura 5.42. Identificação de Estruturas estriadas. Plano xz , $y=0.1h$.

Essa injeção de altas velocidades em regiões próximas à parede fica clara, ao analisarmos um plano de corte zy , Fig. 5.43. O caso LES-LWS é o que apresenta as perturbações mais severas, seguido pelo caso LESVD-LWS e DES-LWS, mas o padrão de desenvolvimento das instabilidades é análogo.

Porém, apesar das semelhanças no campo de velocidades, grandes diferenças são observadas nos campos de viscosidade efetiva, Fig. 5.44. Padrões semelhantes são observados nos casos LES-LWS e LESVD-LWS para $\mu_{ef} = 1.2\mu$, diferenciando-se pela ausência de viscosidade turbulenta junto à parede para o caso LESVD-LWS devido à

correção imposta pelo amortecimento de Van Driest. O amortecimento tem seu papel realçado para a iso-superfície $\mu_{ef} = 1,5\mu$, com fraca presença de viscosidade para o caso LESVD-LWS e intensa viscosidade efetiva para o caso LES-LWS.

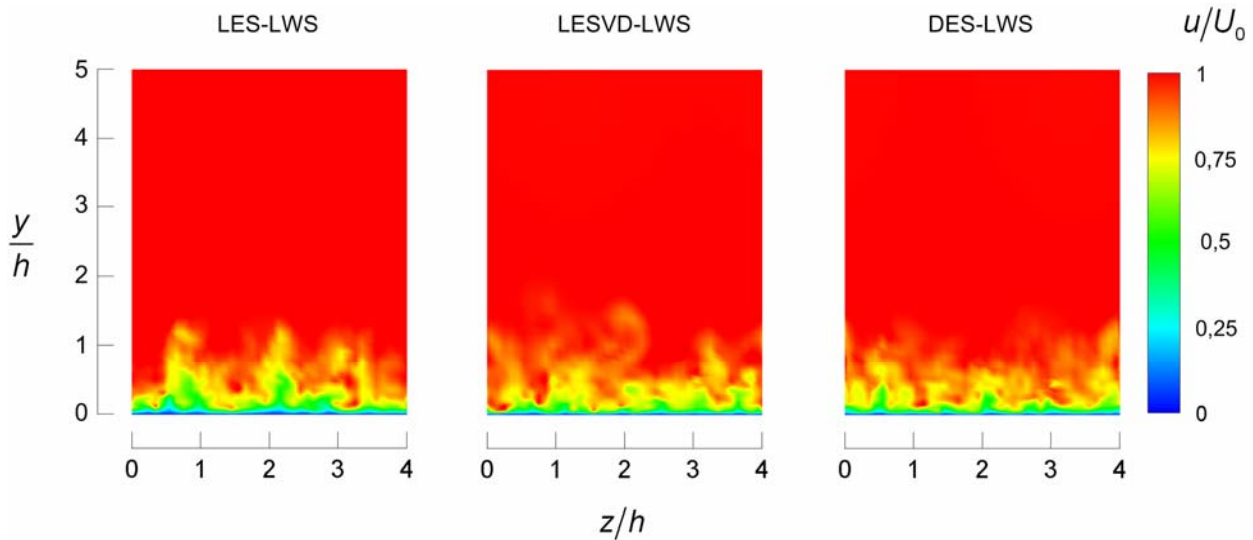


Figura 5.43. Contornos de velocidade longitudinal instantânea. Plano zy.

O caso DES-LWS tem um comportamento bem diferenciado com relação aos casos LES-LWS e LESVD-LWS como pode ser visto na Fig. 5.44. Apesar dos campos de velocidade apresentarem estruturas turbilhonares bastante intensas, o campo de viscosidade efetiva apresenta-se mais próximo de um modelo RANS do que de um modelo LES para o caso DES-LWS. Isso já é esperado, visto que o modelo foi desenvolvido para atuar como RANS em regiões parietais e LES em regiões de escoamento cisalhante livre.

Diferenças e semelhanças à parte, o objetivo de utilizar a metodologia desenvolvida por Lund, Wu e Squires (1998) é descrever uma camada limite turbulenta de forma fiel, com seu perfil médio e flutuações como condição de contorno no escoamento sobre o degrau.

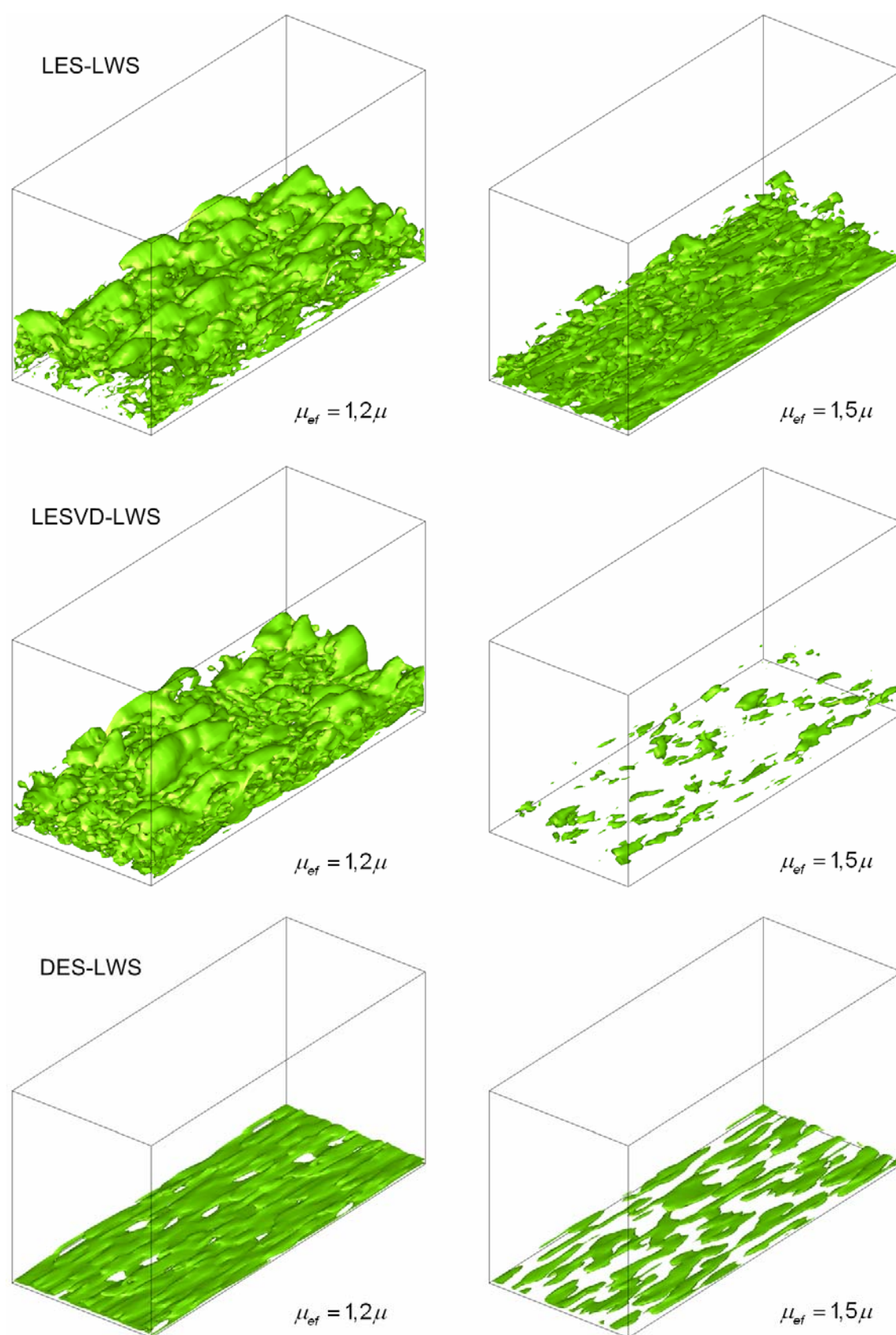


Figura 5.44. Iso-superfícies de viscosidade efetiva.

Os perfis de velocidade média U são apresentados na Fig. 5.45, observando excelente concordância com os dados experimentais de Jovic e Driver (1994).

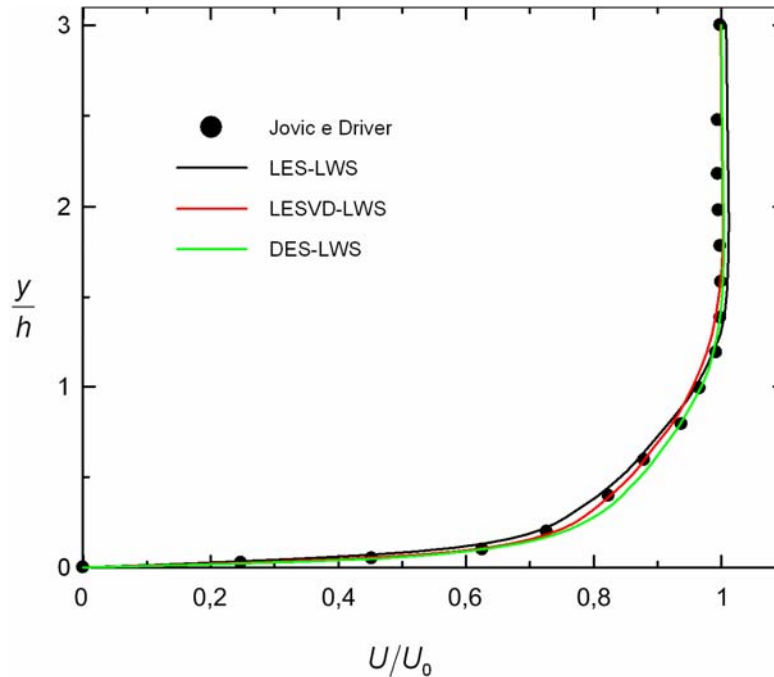


Figura 5.45. Comparação entre os perfis médios de velocidade obtidos pelo método de Lund, Wu e Squires (1998) e os dados experimentais de Jovic e Driver (1994).

Diferenças maiores entre as modelagens ocorrem quando os perfis são apresentados em função da velocidade de cisalhamento em coordenadas logarítmicas, Fig. 5.46. Os dados de Jovic e Driver (1994) seguem muito bem a lei $\log$, apesar da região logarítmica ser pequena devido ao relativo baixo número Reynolds envolvido. Nenhuma das três metodologias de modelagem conseguiu recuperar com acuracidade o perfil médio, falha esta possivelmente provocada pela má predição do coeficiente de atrito, que influencia a adimensionalização empregada no gráfico.

O caso DES-LWS é o que mais se aproxima dos dados experimentais e da lei $\log$ demonstrando sua qualidade na descrição de escoamentos parietais, sendo também o caso que melhor descreve o u^+ máximo, indicando que o coeficiente de atrito por ele previsto é o que mais se aproxima do valor experimental.

A Fig. 5.47 traz os perfis RMS de u' e v' juntamente com o tensor de Reynolds. Todos os modelos seguem muito bem a tendência dos dados experimentais, sendo o caso LES-LWS o que apresenta as maiores discrepâncias, principalmente para as flutuações da componente vertical da velocidade e componente $\overline{u'v'}$ do tensor de Reynolds.

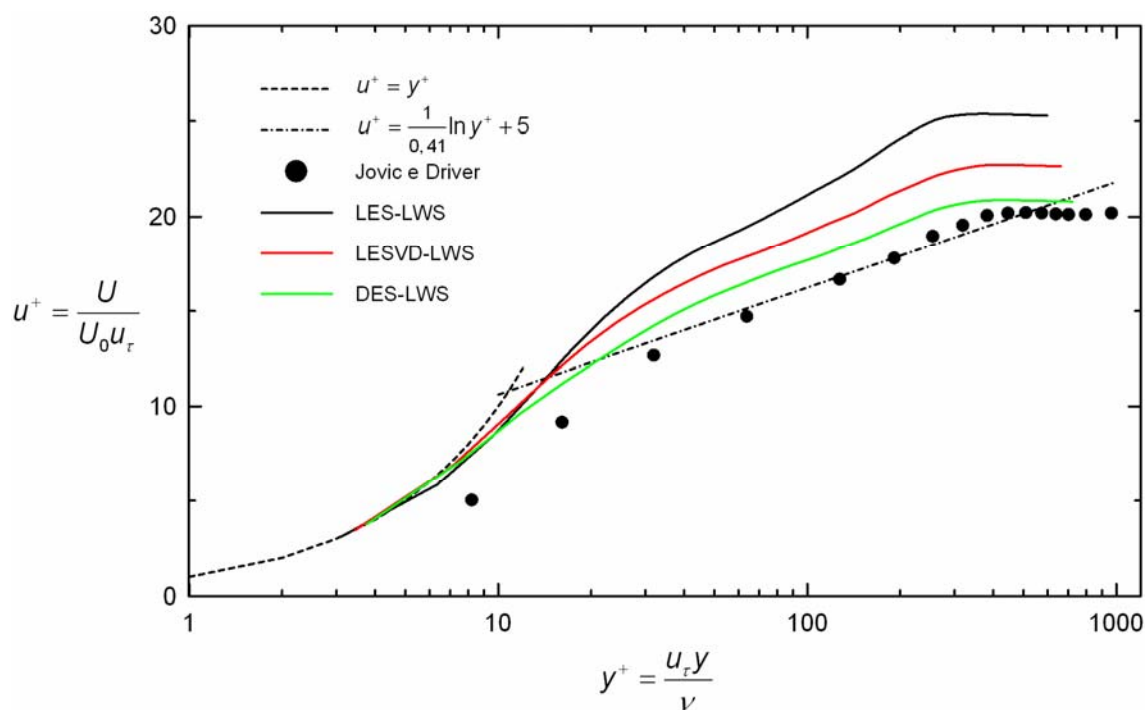


Figura 5.46. Perfis médios em escala logarítmica.

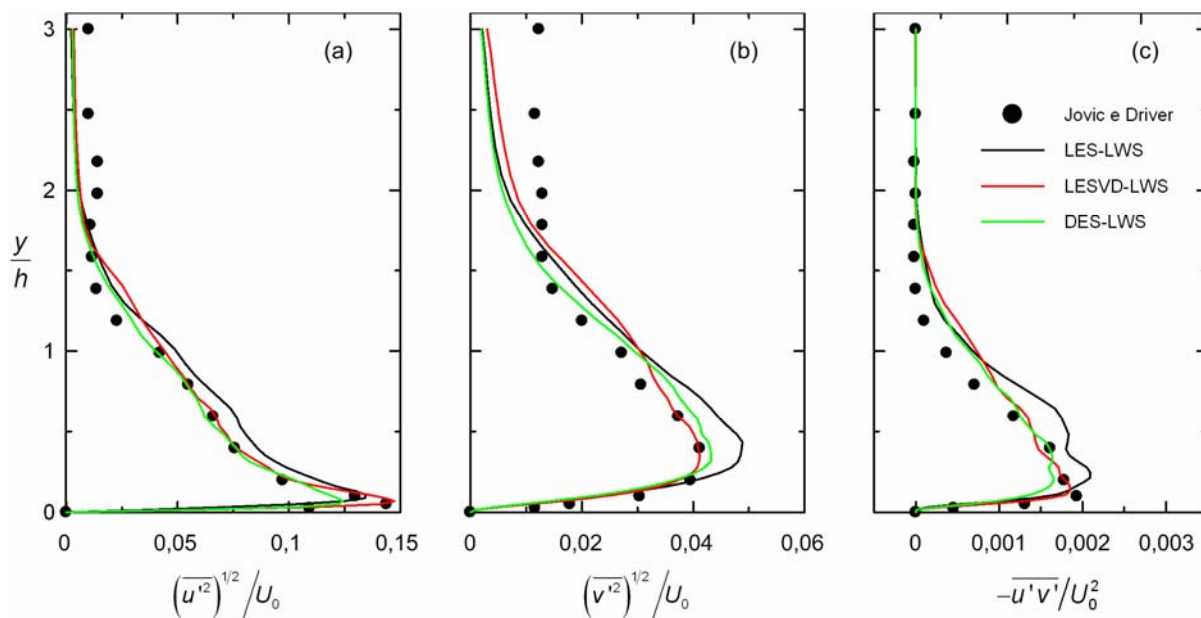


Figura 5.47. Valores RMS de u' e v' e componente do tensor de Reynolds.

Os dados apresentados qualificam a metodologia de Lund, Wu e Squires (1998) como uma forma segura de gerar condições de contorno reais de uma camada limite turbulenta.

Os dados são agora utilizados como condição de entrada no escoamento sobre o degrau, podendo com isso demonstrar a grande influência que a condição de contorno exerce sobre o escoamento.

5.7.2 Influência da condição de contorno de entrada

Depois de constatada a possível influência das condições de contorno de entrada sobre o escoamento no degrau e estabelecida uma metodologia para geração de condições de contorno turbulentas, resta agora confrontar os resultados obtidos pelos casos LES-A, LES-B e LES-C.

A Fig. 5.48 apresenta os campos de velocidade instantânea u para as três configurações simuladas, sendo notável a presença de atividade turbulenta na camada limite de entrada para o caso LES-C.

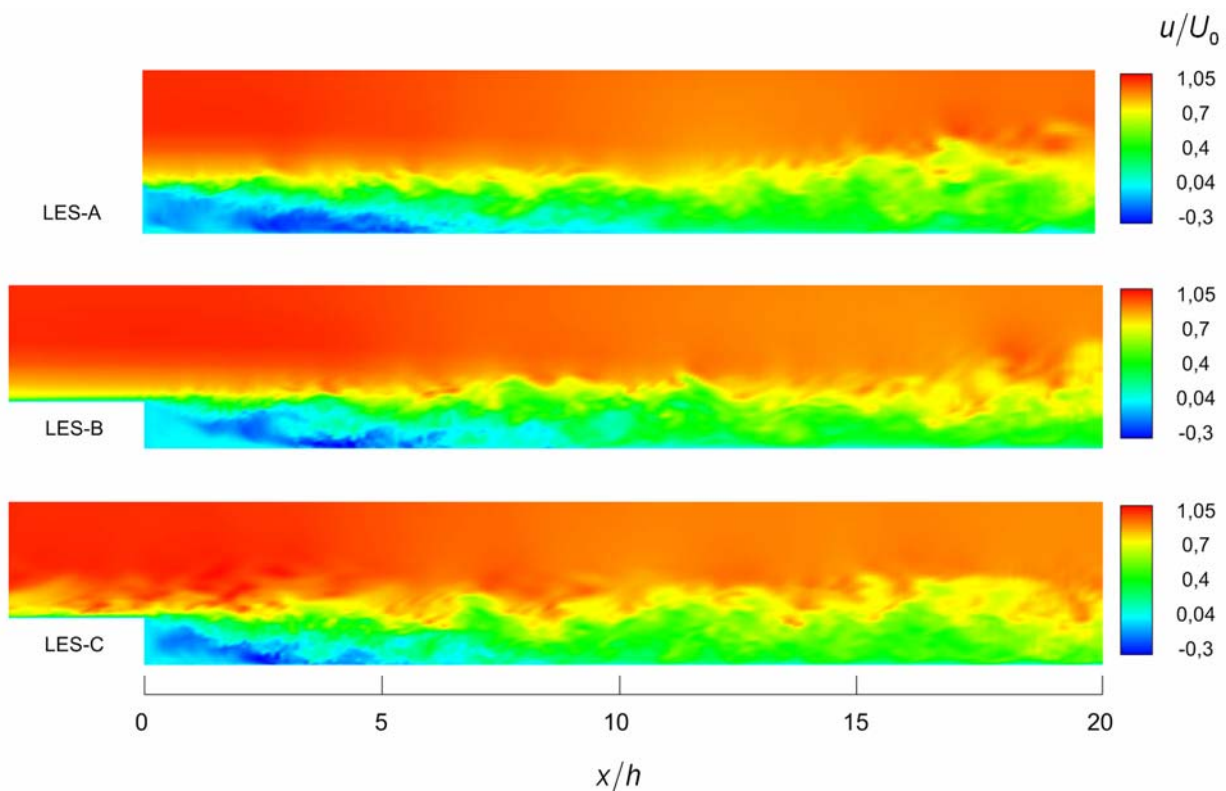


Figura 5.48. Campos de velocidade instantânea u , $z = W/2$ e $t = 1200h/U_0$.

A camada cisalhante é bastante ativa nos três casos, com regiões de desenvolvimento da nova camada limite ($x/h > 10$) praticamente idênticas. A diferença mais importante ocorre no comprimento de recolamento, que é visualmente menor no caso LES-C, onde o nível de flutuações na camada limite de entrada é superior aos demais casos.

As iso-superfícies de velocidade longitudinal u ajudam a realçar as diferenças entre os casos, Fig. 5.49, percebendo-se o modo como as camadas limites chegam ao degrau.

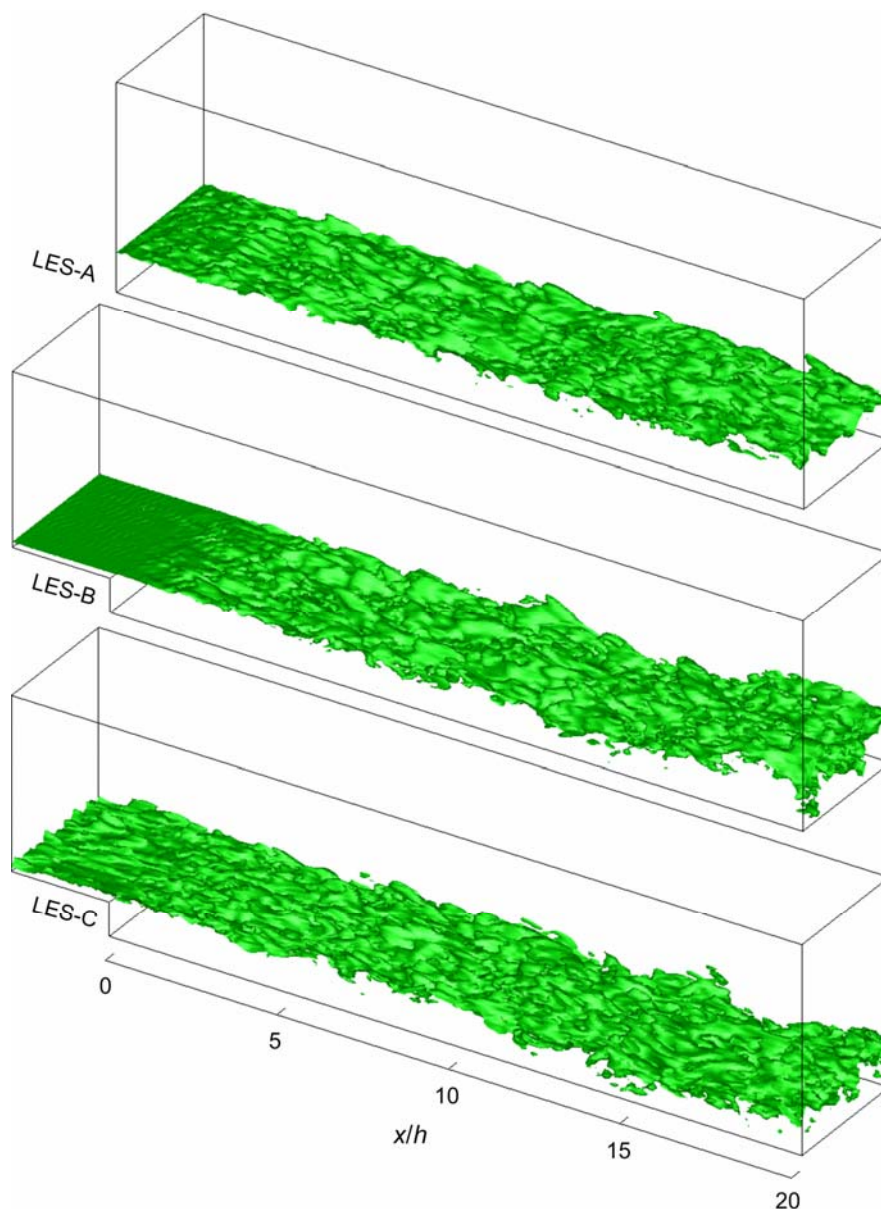


Figura 5.49. Iso-superfícies de velocidade instantânea $u = 0,7U_0$. $t = 1200h/U_0$.

O escoamento mostra-se tridimensional em todos os casos, com estruturas na camada limite de entrada para o caso LES-C e posterior fenômeno de *flapping*.

O incremento de realismo na simulação do degrau com condições de contorno turbulentas não ocorre apenas no caráter topológico, mas também na precisão dos dados estatísticos. As distribuições de velocidade média U e fração $\Gamma(\%)$ para os casos LES-A,

LES-B, e LES-C em função da coordenada x/h são apresentadas nas Fig.s 6.50 e 6.51 respectivamente.

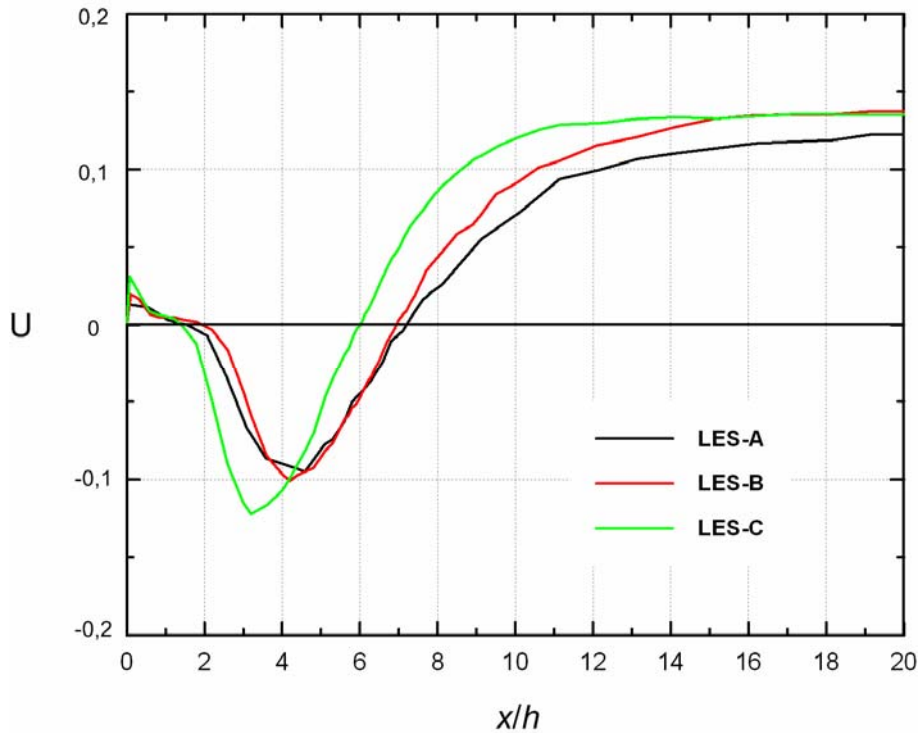


Figura 5.50. Comprimento de recolamento determinado pela velocidade média.

Há significativa diferença entre os resultados, ocorrendo uma redução de praticamente 15% no comprimento de recolamento para o caso LES-C em relação aos casos LES-A e LES-B, atingindo $X_R = 6h$. Como sempre, o valor de X_R para o método p.d.f., Fig. 5.51, é ligeiramente maior que o determinado pela velocidade média. O comprimento de recolamento médio obtido pelo caso LES-C é idêntico ao experimental, conforme pode ser observado na Tab. 5.8, considerando que a incerteza do experimento é superior à diferença encontrada. Isso deixa claro que tão importante quanto a modelagem da turbulência, a aplicação de condições de contorno que simulem adequadamente a realidade são vitais quando objetivamos modelar um escoamento turbulento.

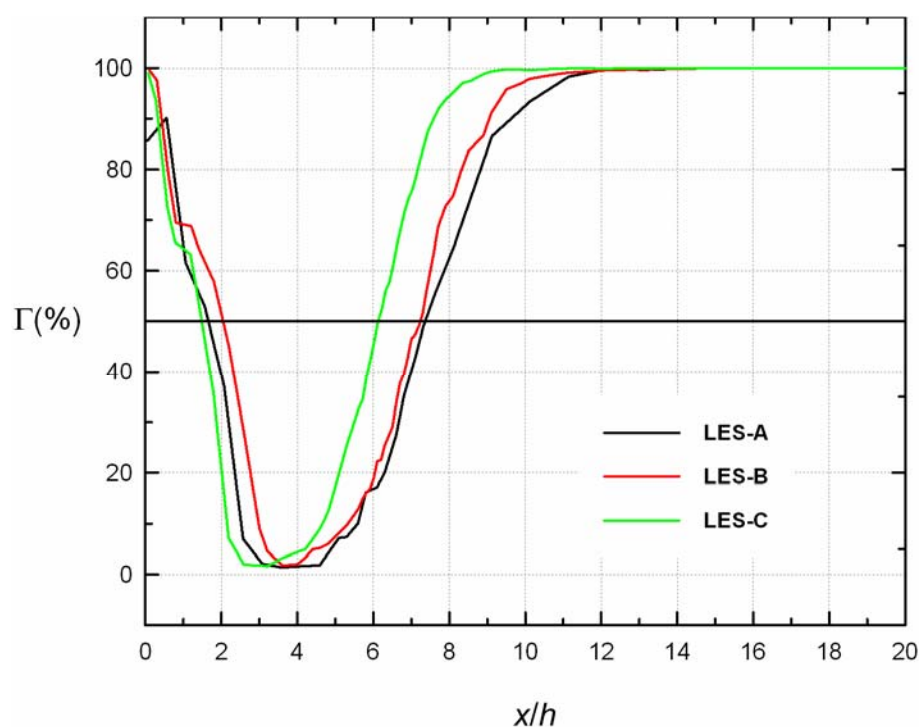


Figura 5.51. Comprimento de recolamento determinado pelo método p.d.f.

Tabela 5.8. Comprimento de recolamento, casos LES-A, LES-B e LES-C.

CASO	Comprimento de recolamento X_R			Erro(%)
	Velocidade Média(x/h)	p.d.f.(x/h)	Média (x/h)	
Jovic e Driver (1994) - Experimental	-	-	6,0±0,15	-
Le, Moin e Kim (1997) - DNS	-	-	6,28	4,6%
LES-A	7,2	7,36	7,28	21,3%
LES-B	6,94	7,23	7,09	18,2%
LES-C	6,02	6,12	6,07	1,0%

A redução no comprimento de recolamento leva a um ganho expressivo também no coeficiente de pressão, com caso LES-C acompanhando muito bem os dados experimentais de Jovic e Driver (1994), principalmente na zona de maior gradiente. Isto pode ser visto na Fig. 5.52. Com o bom comprimento de recolamento estimado pelo caso LES-C, o início do gradiente adverso de pressão ($x/h \approx 3$) coincide com os dados experimentais, sendo a inclinação muito próxima à experimental e levemente superior aos demais casos.

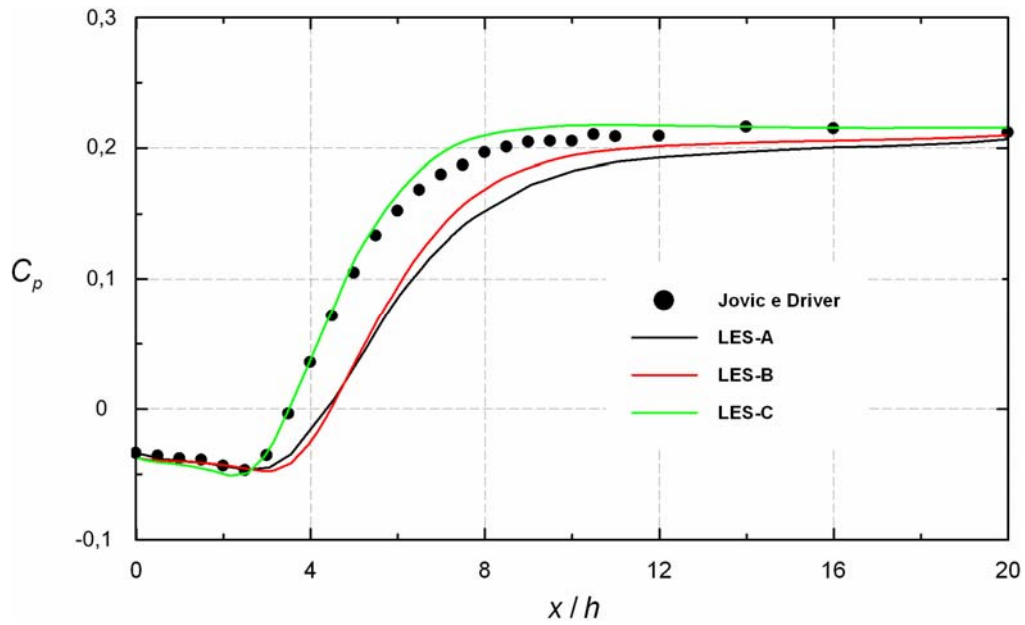


Figura 5.52. Coeficiente de pressão para os casos LES-A, LES-B e LES-C.

Ganhos expressivos em acuracidade foram obtidos para os perfis médios de velocidade, com os dados do caso LES-C descrevendo perfeitamente o experimento de Jovic e Driver (1994) para a velocidade média U , conforme mostra a Fig. 5.53.

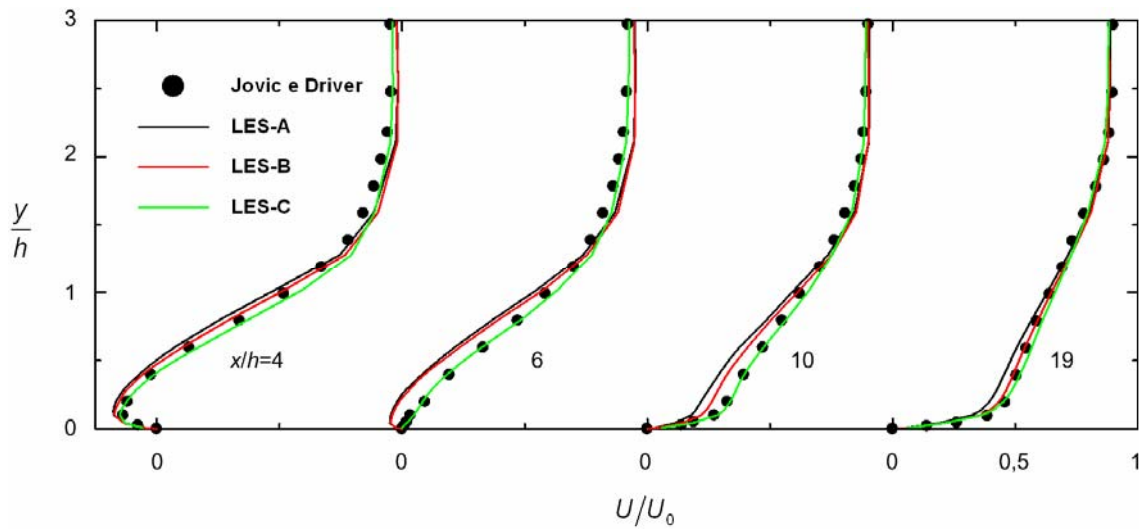


Figura 5.53. Perfis de velocidade média U/U_0 .

A Fig. 5.54 traz os perfis RMS de velocidade e tensor de Reynolds, observando-se melhorias para o caso LES-C principalmente nos perfis $x/h = 4$ e $x/h = 6$, onde o déficit de flutuações na região $y/h > 1,5$ observado nos casos LES-A e LES-B é corrigido.

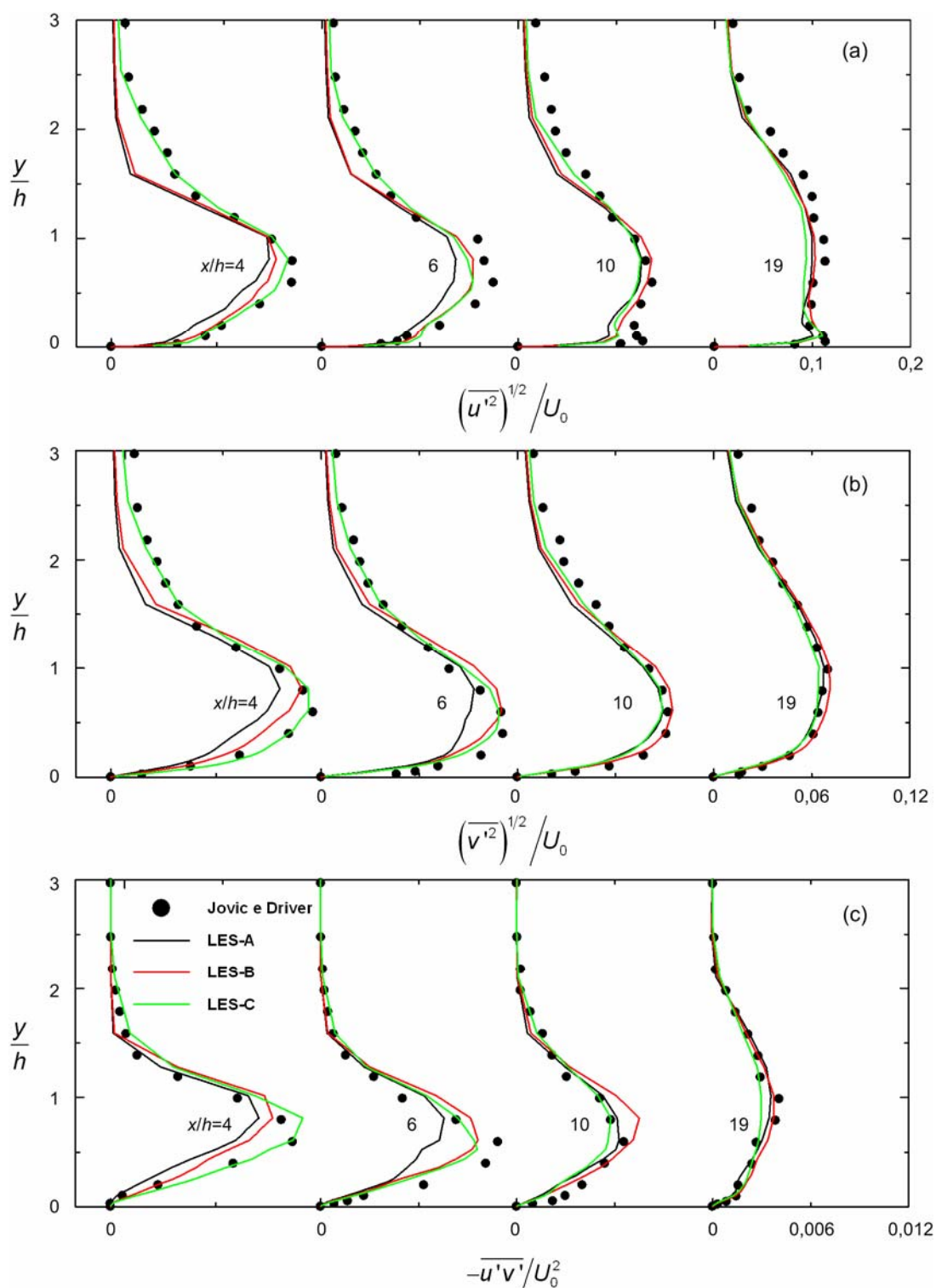


Figura 5.54. Perfis RMS de velocidade e componente do Tensor de Reynolds.

Analisando os dados apresentados nessa seção, fica evidente que a condição de contorno de entrada na simulação do escoamento turbulento sobre o degrau tem um papel decisivo. De nada adianta a utilização de um sofisticado modelo de turbulência se as condições de contorno não forem consistentes com os dados experimentais. Mesmo um modelo simples como o de Smagorinsky teve seus resultados significativamente melhorados quando da utilização de uma condição de contorno adequada.

Novos casos são então computados, estendendo-se a utilização de condições de contorno turbulentas aos casos LESVD e DES através dos casos LESVD-C e DES-C respectivamente. Os resultados obtidos com o modelo SA são apresentados na forma original, uma vez que a topologia do escoamento é idêntica àquela apresentada nas seções anteriores. Os resultados serão apresentados de forma compacta, com comentários sucintos e objetivos.

A Tabela 5.9 apresenta o comprimento de recolamento obtido com a utilização das condições de contorno turbulentas. Observa-se que os casos LES-C e DES-C apresentam melhorias em relação aos seus casos originais mostrados na Tab. 5.4, principalmente para o caso LES-C, onde houve redução de 15% no comprimento de recolamento. Outro fato interessante é que se observam valores inferiores aos experimentais para X_R , para os casos LESVD-C e DES-C.

Tabela 5.9. Comprimento de recolamento, casos LES-C, LESVD-C, DES-C e SA.

CASO	Comprimento de recolamento X_R			Erro (%)
	Velocidade Média (x/h)	p.d.f. (x/h)	Média (x/h)	
Jovic e Driver (1994) - Experimental	-	-	6,0±0,15	-
Le, Moin e Kim (1997) - DNS	-	-	6,28	4,6%
LES-C	6,02	6,12	6,07	1,0%
LESVD-C	5,52	5,68	5,60	6,6%
DES-C	5,67	5,83	5,75	4,2%
SA	7,26	7,26	7,26	21%

A Fig. 5.55 traz os coeficientes de pressão, com resultados satisfatórios obtidos para todos os modelos, percebendo-se um comprimento de recolamento subestimado nos casos LESVD-C e DES-C, marcado pelo ganho de pressão adiantado, o qual ocorre nas proximidades de $x/h = 2$ e não em $x/h = 2,5$ como nos casos LESVD e DES.

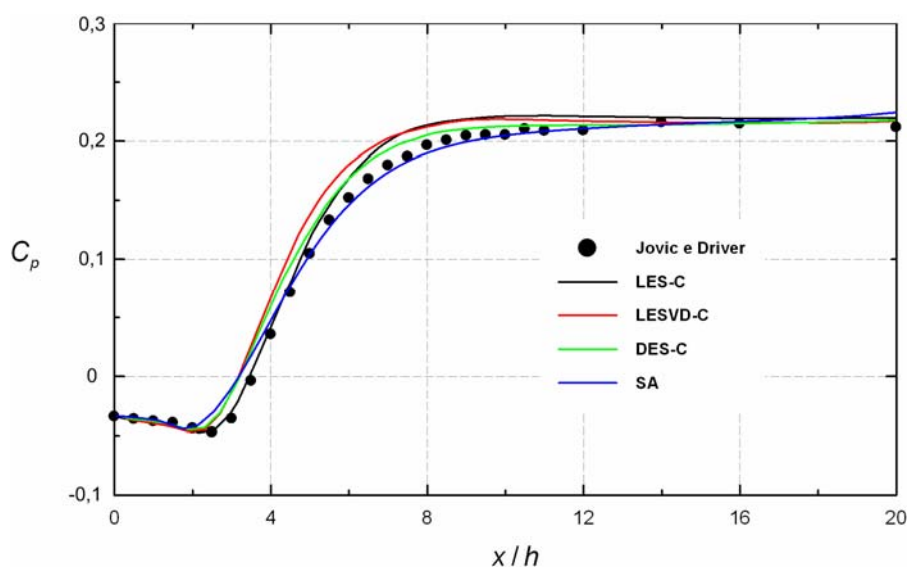


Figura 5.55. Coeficiente de pressão para as configurações finais.

O bom comprimento de recolamento previsto pelo caso LES-C assegura fidelidade aos dados experimentais para o C_p . Na Fig. 5.55 uma unicidade das soluções LES-C, LESVD-C e DES-C é observada no gradiente de pressão na região $2 < x/h < 6$, com a inclinação das curvas muito semelhantes entre si, diferindo da curva do caso SA.

Os perfis de velocidade média U da Fig. 5.56 mostram a influência do comprimento de recolamento sobre os resultados obtidos, com o perfil em $x/h = 6$ se desenvolvendo prematuramente para os casos LESVD-C e DES-C devido ao pequeno X_R previsto.

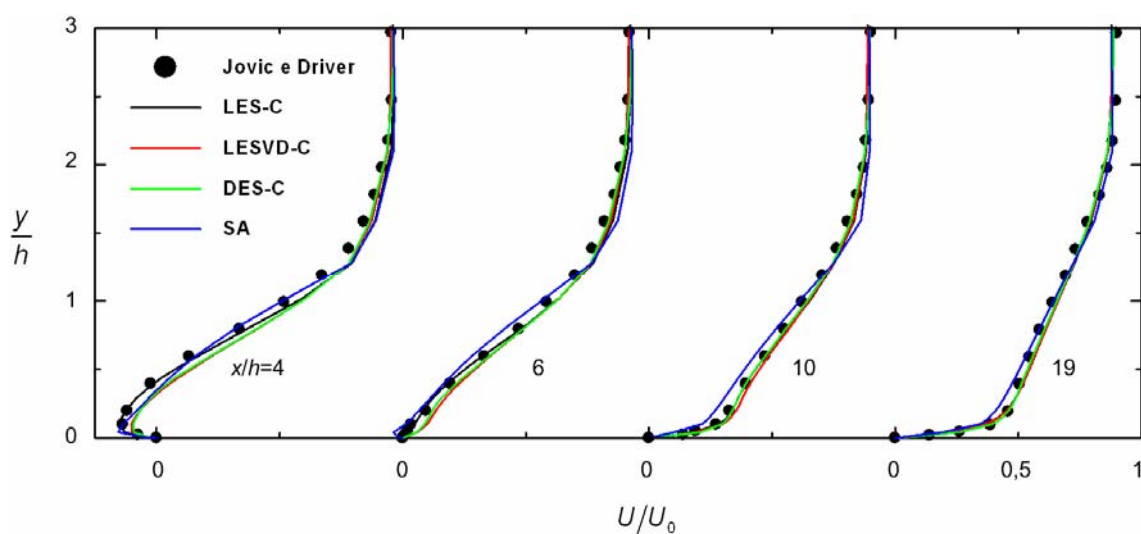


Figura 5.56. Perfis médios de u para os casos LES-C, LESVD-C, DES-C e SA.

Por fim, a Fig. 5.57 demonstra o ganho de precisão na simulação do escoamento sobre o degrau pela imposição de condições de contorno turbulentas, sendo corrigida a falta de flutuações para os perfis na região $y/h > 1,5$ observada na Fig. 5.37 (a) e (b).

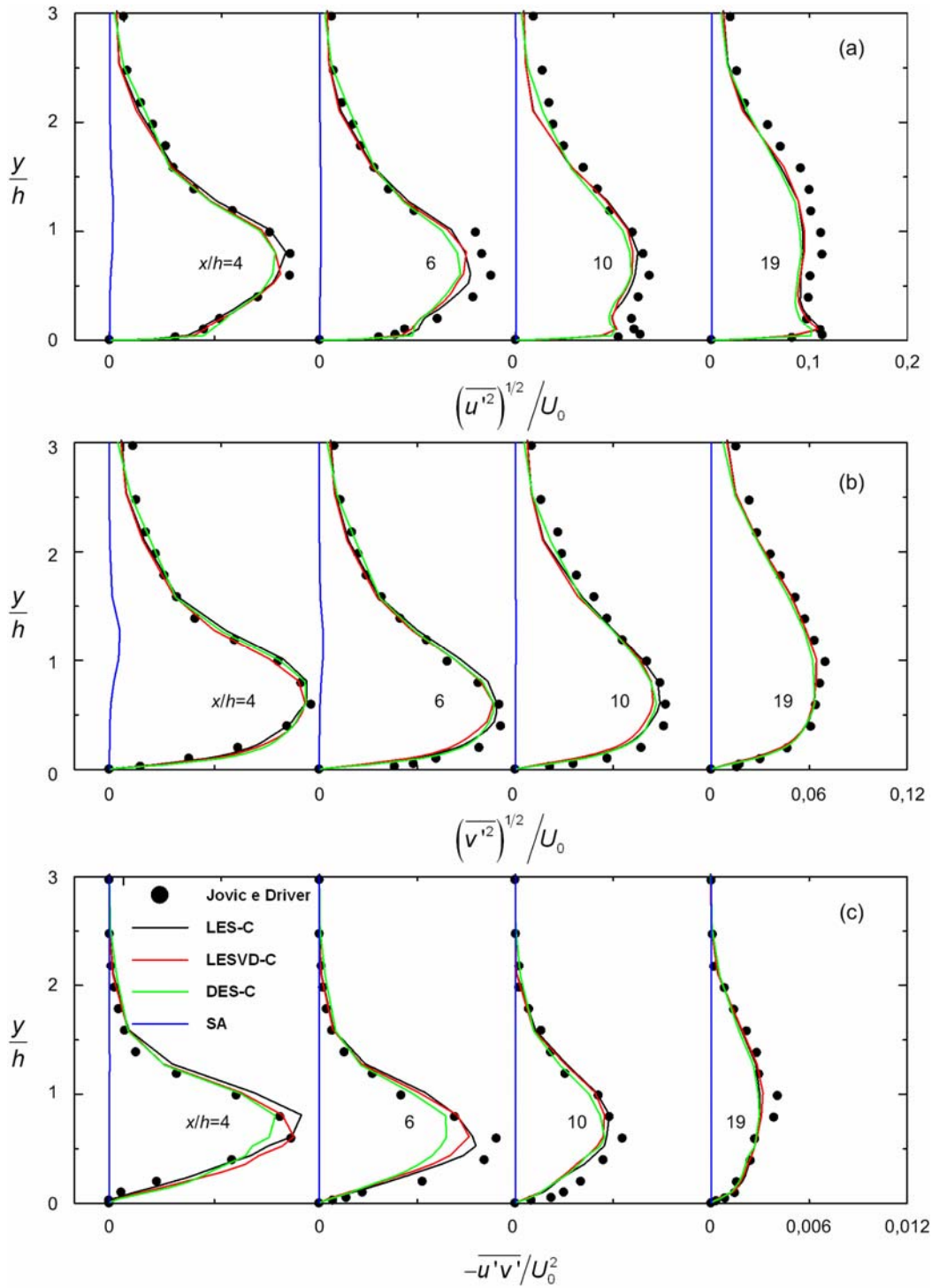


Figura 5.57. Perfis RMS de velocidade e Tensor de Reynolds. Casos LES-C, LESVD-C, DES-C e SA.

CAPÍTULO VI

Conclusões e Perspectivas

Três metodologias de modelagem da turbulência baseadas na hipótese de Boussinesq foram implementadas, testadas e confrontadas através do escoamento turbulento sobre o degrau: Simulação de Grande Escalas (LES – *Large-Eddy Simulation*), Equações Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Average Navier-Stokes Equations*) e modelagem híbrida RANS/LES.

Além da comparação entre as três metodologias, estudou-se com profundidade a importância das condições de contorno na simulação numérica de escoamentos turbulentos, implementando um método de geração de condições de contorno tridimensional transiente.

Apesar de bastante estudado numericamente e experimentalmente, o escoamento sobre o degrau continua sendo uma excelente ferramenta de avaliação de novos códigos de dinâmica dos fluidos computacional. Com sua geometria simples, o escoamento obtido envolve parcelas de escoamento do tipo camada limite, cisalhante livre, descolamento e recolamento, com fenômenos tridimensionais e transientes.

As três metodologias, LES, RANS e híbrida RANS/LES, são representadas pelos modelos de Smagorinsky, Spalart-Allmaras e DES (*Detached-Eddy Simulation*) respectivamente. O comportamento dos modelos é avaliado em três situações:

- Escoamento tridimensional sobre o degrau a $Re_h = 5000$ com condições de contorno de entrada constantes – Casos: LES, LESVD, SA e DES;
- Camada Limite Tridimensional a $Re_\theta = 610$ - Casos: LES-LWS, LESVD-LWS e DES-LWS;

- Escoamento tridimensional sobre o $Re_h = 5000$ com condições de contorno de entrada turbulentas – Casos: LES-C, LESVD-C e DES-C;

Todos os dados obtidos computacionalmente são confrontados com os dados experimentais de Jovic e Driver (1994) e em alguns pontos comparados com os dados de simulação numérica direta de Le, Moin e Kim (1997). Os modelos são comparados utilizando malhas e passos de tempo idênticos, deixando-os em igualdade de condições para caracterizar o escoamento. Especial atenção foi dada às condições de contorno, tomando-se o devido cuidado para que o experimento fosse reproduzido com fidelidade computacionalmente.

Os resultados para o degrau com condições de contorno de entrada constantes revelam que os modelos LES, LESVD e DES têm um comportamento qualitativo praticamente idêntico, com formação de estruturas tridimensionais e características transientes bastante reais. Já o modelo SA apresenta um comportamento bastante difusivo, com ausência de estruturas tridimensionais ou transientes.

O comprimento de recolamento previsto por todos os modelos é superior ao experimental, sendo a melhor previsão feita pelo modelo LESVD seguido de perto pelo modelo DES. Os casos LES e SA apresentaram comprimentos de recolamento significativamente maiores que o esperado. Além do comprimento de recolamento, os casos LESVD e DES apresentaram significativa superioridade na previsão do coeficiente de pressão e perfis médios de velocidade, flutuação e tensor de Reynolds, resultados esses já esperados tendo em vista o bom valor do comprimento de recolamento.

Conforme observado na revisão bibliográfica, um possível motivo para o comprimento de recolamento ser superestimado é a intensidade turbulenta da camada limite de entrada. Buscando representar de forma consistente essa influência, uma metodologia de geração de condições de contorno tridimensional e transiente foi implementada. O método de Lund, Wu e Squires (1998) mostrou-se eficaz na descrição da camada limite de entrada, sendo o presente trabalho possivelmente o primeiro a empregar a metodologia aliada à modelagem híbrida RANS/LES, tendo em vista a ausência de registros acadêmicos dessa combinação.

Novos casos foram então computados, utilizando agora as condições de contorno turbulentas. Os resultados mostram que o caso LES se beneficiou da utilização das condições de contorno turbulentas, passando a ter os melhores resultados, com uma descrição muito boa dos dados experimentais. O comprimento de recolamento é determinado com 1% de diferença dos resultados experimentais, a evolução longitudinal do coeficiente de pressão foi bem representada, assim como os perfis de velocidade média, flutuações e tensor de Reynolds.

Já os resultados para os modelos LESVD e DES foram menos suscetíveis à condição de contorno turbulenta, mantendo o mesmo valor do erro para o comprimento de recolamento, que mostrou-se ligeiramente inferior aos dados experimentais de Jovic e Driver (1994).

Por fim, conclui-se que a metodologia de Simulação de Grandes Escalas com o modelo clássico de Smagorinsky juntamente com as condições de contorno turbulentas produziu os melhores resultados para o escoamento sobre o degrau. Os modelos LESVD e DES também foram bastante eficazes na simulação do escoamento, sendo os resultados praticamente intercambiáveis.

O modelo SA foi o que apresentou os resultados menos precisos, mas apresentando uma descrição média muito boa para um modelo a uma equação de transporte, configurando-se como um modelo tecnicamente simples e eficaz. No entanto, nada pode ser dito para os momentos estatísticos de segunda ordem, os quais são nulos, constituindo essa a principal fragilidade da metodologia.

Os resultados indicam que a modelagem híbrida RANS/LES pode ser considerada uma ferramenta interessante na análise de escoamentos turbulentos, caracterizando estruturas tridimensionais e transientes com um comportamento muito mais próximo da metodologia de Simulação de Grandes Escalas do que o método das Equações Médias de Reynolds.

Como sugestões para trabalhos futuros ficam os seguintes tópicos:

- Investigação de métodos híbridos RANS/LES em escoamentos a altos números de Reynolds;
- Avaliar modelos sub-malha mais refinados de Grandes Escalas como o modelo Dinâmico, testando assim o que há de melhor em termos de modelos de turbulência da família de modelos LES;
- Simulação de casos com maior complexidade geométrica, com malhas mais complexas e maiores níveis de refinamento, podendo com isso verificar a possibilidade da aplicação de métodos híbridos RANS/LES em casos onde as malhas para LES seriam proibitivas;
- Dar continuidade ao estudo de influência de condições de contorno nos resultados de simulação numérica de escoamentos turbulentos, com o estudo de diferentes métodos, que sirvam para outros tipos de condição que não a de uma camada limite com gradiente de pressão nulo.

CAPÍTULO VII

Referências Bibliográficas

ABBOTT, D. E., KLINE, S. J. Experimental Investigation of Subsonic Turbulent Flow over Single and Double Backward-Facing Steps. Transaction of the ASME, **Journal of Basic Engineering**, Vol. 84D, Ser. D, pp. 317-325, 1962.

ADAMS, E. W., JOHNSTON, J. P., EATON, J. K. **Experiments on the structure of turbulent reattaching flow**. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Report MD-43, 1984.

ARMALY, B. F., DURST, F., PEREIRA, J. C. F., Schönung, B. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 127, pp. 473-496, 1983.

BACHELOR, G. K. **The theory of homogeneous turbulence**. Cambridge University Press, Cambridge, 1953.

BALDWIN, B. S., BARTH, T. J. **A One-Equation Turbulence Transport Model for High Reynolds Number Wall-Bounded Flows**. NASA TM 102847, 1990.

BALDWIN, B. S., LOMAX, H. **Thin-Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows**. AIAA Paper 78-257, 1978.

BATEN, P. GOLDBERG, U., CHAKRAVARTHY, S. **LNS – An approach towards embedded LES**, AIAA-2002-0427, 2002.

BRADSHAW, P., WONG, F. Y. F. **The Reattachment and Relaxation of a Turbulent Shear Layer**. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 52, Pt. 1, pp. 113-135, 1972.

BREDERODE, V. DE., BRADSHAW, P. **Three-Dimensional Flow in Nominally Two-Dimensional Separation Bubbles. I. Flow Behind a Rearward-Facing Step**. Imperial College, Aeronautical Report. 72-19, 1972.

BROWN, G. L., ROSHKO, A. **On density effects and large structures in turbulent mixing layers**. Journal Fluid Mechanics, Vol. 64, pp. 775-816, 1974.

CAMELLI, F. E., LÖHNER, R. Combining the Baldwin Lomax and Samgorinsky Turbulence Models to Calculate Flows with Separation Regions. In: **40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-2002-0426**, 2002.

CAMPREGHER, R. **Modelagem Matemática Tridimensional Para Problemas de Iteração Fluido-Estrutura**, 2005. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DAVIDSON, L., PENG, S-H. A Hybrid LES-RANS Model based on a one-equation SGS Model and Two-Equation $k-\omega$ model. In: **The Second Int. Symp. On Turbulence and Shear Flow Phenomena**, Vol. 2, pp. 175-180. Stockholm, 2001.

DELCAYRE, F., LESIEUR, M. Topological feature in the reattachment region of a backward facing step. **Firtst AFOSR International Conference on DNS and LES**, 1997.

DENHAM, M. K., PATRICK, M. A. Laminar flow over a downstream-facing step in two-dimensional flow channel. **Transactions Inst. Chem. Engrs**, Vol. 52, pp. 361, 1974.

DRIVER, D. M., SEEGMILLER, H. L. Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow. **AIAA Journal**, Vol. 23, N° 2pp. 163-171, February 1985,.

DRIVER, D. M., SEEGMILLER, H. L., MARVIN, J. G. Time dependent behavior of a reattaching shear layer. **AIAA Journal**, Vol. 25, N° 7, pp. 914-919, July 1987.

EATON, J. K., JOHNSTON, J. P. **Turbulent Flow Reattachment: An experimental Study of the Flow and Structure Behind a Backward-Facing Step**. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Rept. MD-39, 1980.

EATON, J. K., JOHNSTON, J. P. Low Frequency Unsteadiness of Reattaching Turbulent Shear Layer. **Proceeding of the Third International Symposium on Turbulent Shear Flows**, Davis, CA, September 1981.

EATON, J. K., JOHNSTON, J. P. A Review of Research on Subsonic Turbulent Flow Reattachment. **AIAA Journal**, Vol. 19, N° 9, pp.1093-1100 September 1981.

EATON, J. K., JOHNSTON, J. P., JEANS, A. H. Measurements in a Reattaching Turbulent Shear Layer. **Proceedings of the 2nd Symposium on Turbulent Shear Flows**, London, 1979.

FERZIGER, J. H. Numerical Simulation of Turbulence. **Colloquium of IAM-PIMS. Pacific Institute for the Mathematical Sciences**. 2001, 2001.

FERZIGER, J. E PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**, 3rd Ed. Springer Verlag, New York, USA, 2002.

FRIEDERICH, R., ARNAL, M. Analyzing turbulent backward-facing step flow with the lowpass-filtered Navier-Stokes Equations. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, Vol. 35, pp. 101-128, 1990.

GERMANO, M., PIOMELLI, U., MOIN, P., CABOT, W. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. **Physics of Fluids A**, vol. 3, pp. 1760-1765, 1991.

GOLDSTEIN, R. J., ERIKSEN, V. L., OLSON, R. M., ECKERT, E. R. G. Laminar Separation, Reattachment, and Transition of Flow over a Downstream-Facing Step. **Transaction of the ASME, Journal of Fluids Engineering**, Vol. 92D, N° 4, pp. 732-741, 1970.

HEISENBER, W. On the theory of statistical and isotropic turbulence. **Proceedings. R. Soc. London**, Ser. A 195, pp. 402-406, 1948.

ISOMOTO, K., HONAMI, S. The Effect of the Inlet Turbulence Intensity on the Reattachment Process Over a Backward-Facing Step. **Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering**, Vol. 111, pp. 87-92., 1989.

JOHNSON, D. A., KING, L. S. A Mathematically Simple Turbulence Closure Model for Attached and Separated Turbulent Boundary Layer. **AIAA Journal**, Vol. 23, No. 11, pp. 1684-1692, 1985.

JOVIC, S., DRIVER, D. **Backward-Facing Step Measurements at Low Reynolds Number, $Re_h=5000$** , NASA Technical Memorandum 108807, 1994.

KEATING, A., PIOMELLI, U., BALLARAS, E., KALTENBACH, H. J., A priori and a posteriori tests of inflow conditions for large-eddy simulation. **Physics of Fluids**, Vol. 16, n° 12, pp. 4696-4712, 2004.

KIM, J., KLINE, S. J., JOHNSTON, J. P. **Investigation of Separation and Reattachment of a Turbulent Shear Layer: Flow over a Backward-Facing Step**. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Rept. MD-37, 1978.

KLEIN, M., SADIKI, A., JANIK, J. A digital filter based generation of inflow data for spatially developing direct numerical or large eddy simulations. **Journal of Computational Physics**. Vol. 186, pp. 652-665, 2003.

KOLMOGOROV, A. N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. **Dokl. Akad. Nauk. SSSR** 30, pp. 741-773, 1941.

KOSTAS, J., SORIA, J., CHONG, M. S. Particle image velocimetry measurements of a backward-facing step flow. **Experiments in Fluids**, Vol. 33, pp. 838-853, 2002.

KUEHN, DONALD M. Effects of Adverse Pressure Gradient on the Incompressible Reattaching Flow over a Rearward-Facing Step. **AIAA Journal**, Vol. 18, pp. 343-344, 1980.

LE, H., MOIN, P., KIM, J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step. **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 330, pp. 349-374, 1997.

LEE, S., LELE, S., MOIN, P., Simulation of Spatially evolving compressible turbulence and application of Taylor hypothesis. **Physics of Fluids A**, Vol. 4, N° 7, pp. 1521-1530, 1992.

LESIEUR, M., METAIS, O., COMTE, P. **Large-Eddy Simulations of Turbulence**. Cambridge University Press, 2005.

LILLY, D. K. **On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence**. NCAR Manuscript 123, 1966.

LUND, T., WU, X., SQUIRES, K. D. Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations. **Journal of Computational Physics**, Vol. 140, pp. 233-258, 1998.

MACAGNO, E. O., HUNG, T. K. Computational and experimental study of a captive annular eddy. **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 28, pp.43, 1967.

MARCHI, C.H. Esquemas de alta ordem para a solução de escoamentos de fluidos sem dispersão numérica. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas** 15(3), 231-249, 1993.

MENTER, F., ROLAND, B., KUNTZ, M. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. In: **41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit**, Reno, NV; USA; 6-9 Jan. 2003.

MENTER, F. R., RUMSEY, C. L. **Assessment of Two-Equation Turbulent Models for Transonic Flows**, AIAA-94-2343, June 1994.

MÉTAIS, O., LESIEUR, M. Spectral large-eddy simulation of isotropic and stably stratified turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 239, pp. 157-194, 1992.

MILLIONSCHIKOV, M. Decay of homogeneous isotropic turbulence in a viscous incompressible fluid. **Dokl. Akad. Nauk. SSSR** 22, pp 236-240, 1939.

MUZAFERIJA, S., PERIC, M. Computational of free-surface flows using the Finite-Volume method and moving grids. **Numerical Heat Transfer**, Part B 32, 369-384, 1997.

NAGANO, Y., TAGAWQ, M., TSUJI, T. Effects of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer. In: **Proceedings Eighth Symposium on Turbulent Shear Flows**, Technical Universit of Munich, pp. 2-3-1-2-3-6, 1991.

NICHOLS, R. H., NELSON, C. C., Weapons Bay Acoustic Predictions Using a Multi-Scale Turbulence Model **Proceedings of the ITEA 2001 Aircraft-Stores Compatibility Symposium**, March 2001.

NICHOLS, R. H., NELSON, C. C. **Applications of Hybrid RANS/LES Turbulence Models**. AIAA-2003-0083, 2003.

OBUKOV, A. M. Energy distribution in the spectrum of a turbulent flow. **Izvestya AN SSR, Ser. Geogr. Geofiz**, N. 4-5, pp 453-466, 1941.

ÖTÜGEN, M. V. Expansion ratio effects on the separated shear layer and reattachment downstream of a backward-facing step. **Experiments in Fluids**, Vol. 10, pp. 273-280, 1991.

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 1980.

PRANDTL, L. **Bericht uber Untersuchingen zur ausgebildeten Turbulenz**. Z. and Math. Mech. 5. pp. 136-137, 1925.

RAYLEIGH, LORD. On the instability of certain fluid motions. **Proc. London Math. Soc.** **11**, 57-70, Scientific papers, Cambrige University Press, Vol. 1., pp 474-487.

REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Vol. 186, Part I, pp.122-164, 1894.

RHIE, C E CHOW, W. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA Journal**, 21(11), 1525-1532, 1983.

ROOS, F. W., KEGELMAN, J. T. Control of Coherent Structures in Reattaching Laminar and Trubulent Shear Layers. **AIAA Journal**, Vol. 24, N° 12, pp. 1956-1963, December 1986.

ROSHKO, A., LAU, J. C. Some observation on Transition and reattachment of a Free Shear Layer in Incompressible Flow. **Proceedings of 1965 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute**, Stanford University Press, pp. 157-167, 1965.

SHAANAN, S., FERZINGER, J. H. e Reynolds, W. C. **Numerical simulation of turbulence in presence of shear**. Rep. TF-6, Dept. Mechanical Engineering, Stanford University, 1975.

SCHUBAUER, G. B., SKRAMSTAD, H. K. Laminar Boundary layer oscillations and stability of laminar flow. **Journal Aeronaut. Sci.**, 14, pp. 69-79, 1947.

SCHLÜTER, J. U. **Consistent boundary conditions for integrated LES/RANS simulations: LES inflow conditions**. Annual Research Briefs 2002. Center for Turbulence Research, Stanford University, 2002.

SCHLÜTER, J. U., PITSCH, H., MOIN, P. LES inflow conditions for coupling with Reynolds averaged flow solvers. **AIAA Journal**, Vol. 42, pp. 478, 2004.

SILVEIRA NETO, A., GRAND, D., METAIS, O., LESIEUR, M. A numerical investigation of the coherent vortices in turbulence behind a backward-facing step. **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 256, pp. 1-25, 1993.

SMAGORINSKY, J. General Circulation Experiments with Primitive Equations, **Mon. Weather Rev.**, vol. 91, pp. 99-164, 1963.

SIMPSON, R. L. A model for the backflow mean profile. **AIAA Journal**, Vol. 21, pp. 142-143, 1983.

SIMPSON, R. L., AGARNAL, N. K., NAGABUSHANA, K. A., OLCMEN, S. Spectral measurements and other features of separating turbulent flows. **AIAA Journal**, Vol. 28, pp. 446-452, 1990.

SMYTH, R. Turbulent Flow over a Plane Symmetric Sudden Expansion. **Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering**, Vol. 101, N° 3, pp. 348-353, 1979.

SMITH, A. M. O. AND CEBECI, T. **Numerical Solution of the Turbulent Boundary-Layer Equations**. Douglas Aircraft Division Report DAC 33735.

SPALART, P. R. Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $Re_\theta=1410$. **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 187, pp. 61-98, 1988.

SPALART, P.R. AND ALLMARAS, S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows, ***La Recherche Aéronautique***, No. 1, pp. 5-21, 1994.

SPALART, P. R., JOU, W-H., STRELETS, M., ALLMARAS, S. R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. **First AFSOR International Conference on DNS/LES**, 4-8 August 1997, Rouston, LA, 1997.

SPILE-KOHOFF, A., KALTENBACH, H. J. Generation of turbulent inflow data with a prescribed shear-stress profile. Third AFOSR International Conference on DNS/LES Arlington, TX, 5-9 August 2001, in **DNS/LES Progress and Challenges**, edited by C. Liu, L. Sakell and T. Beutner, 2001.

SPODE, C., CAMPREGHER, R., SILVEIRA NETO, A. Simulação Numérica 3D do escoamento sobre um degrau descendente. **14° POSMEC**, 2004.

SPODE, C., CAMPREGHER, R., SILVEIRA NETO, A. Parallel simulation of turbulent flow in a backward-facing step. **COBEM 2005 – 18° International Congress of Mechanical Engineering**. Ouro Preto – Brasil, 2005.

TENNEKES, H. LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence**. 15^a ed. The MIT Press, Massachusetts, 1994.

VAN DOORMAL, J. E RAITHBY, G. Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows. **Numerical Heat Transfer**, Vol. 7, 147-163, 1984.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**, DCW Industries, California, 2000.

WILLIAMS, P. T., BAKER, A. J. Numerical Simulations of Laminar Flow Over a 3D Backward-Facing Step. **Int. J. for Num. Methods in Fluids**, Vol. 24, pp. 1159-1183, 1997.

YOSHIZAWA, A. Bridging between eddy-viscosity-type and second-order models using a two-scale DIA. In **9th Int. Symp. On Turbulent Shear Flow**, Volume 3, Kyoto, Japan, 1993.