

6

Ângulo de Incidência de $\alpha = 3^{\circ}$

O objetivo deste capítulo é estudar a influência do ângulo de incidência no escoamento sobre a mesma placa plana analisada no Capítulo 5. Neste capítulo, o ângulo de ataque vale três graus, $\alpha = 3^{\circ}$, e o número de Reynolds é mantido o mesmo, ou seja, $Re = 2,13 \times 10^5$. Com exceção do ângulo de incidência, todas as outras condições de contorno forma mantidas iguais ao caso com $\alpha = 1^{\circ}$. O escoamento é analisado, neste capítulo, empregando as mesmas duas metodologias, RANS e LES, utilizadas para investigar o escoamento para o ângulo de incidência igual a 1° .

Para as simulações com os modelos RANS (Spalart-Allmaras e SST), o domínio e malha adotados permanecem os mesmos do Capítulo 5, conforme apresentado no Apêndice B, onde garantiu-se $y^+ \leq 1$ para o primeiro ponto nodal ao longo da placa.

Com a malha proposta e com o mesmo esquema de discretização espacial (QUICK) utilizado para $\alpha = 1^{\circ}$, não foi possível obter solução convergida com o modelo RSM. Como comentado anteriormente, este modelo apresenta problemas de convergência, necessitando redução da ordem do esquema de discretização espacial, o que não foi realizado neste trabalho. Como descrito no Apêndice B.2.1, o domínio computacional e malha utilizados para prever o escoamento para $\alpha = 3^{\circ}$, através do modelo LES Dinâmico não foram os mesmos que para $\alpha = 1^{\circ}$. Neste caso, utilizou-se uma malha com 2,9M células, e o escoamento na entrada foi alinhado com a malha, sendo a placa inclinada conforme ilustrado na Figura 6.1. Assim como nos outros casos, a malha foi definida de forma a garantir o valor de $y^+ \approx 1$ para o primeiro ponto nodal ao longo da placa. Como discutido no Apêndice B, a presente malha e domínio foram propostos visando minimizar o problema da falsa difusão, uma vez, que as simulações preliminares, com o mesmo domínio que o utilizado para o caso com $\alpha = 1^{\circ}$, apresentaram resultados insatisfatórios.

Sampaio (2006) obteve com o modelo f-LES para $\alpha = 3^{\circ}$ um erro no comprimento de recolamento de 24%, através da malha com 800.000 volumes

de controle (denominada 800K). Assim como no trabalho de Sampaio (2006) atribuiu-se a falta de precisão à malha utilizada, quer seja pelo refinamento ou pelo espaçamento inadequado na região de recolamento.

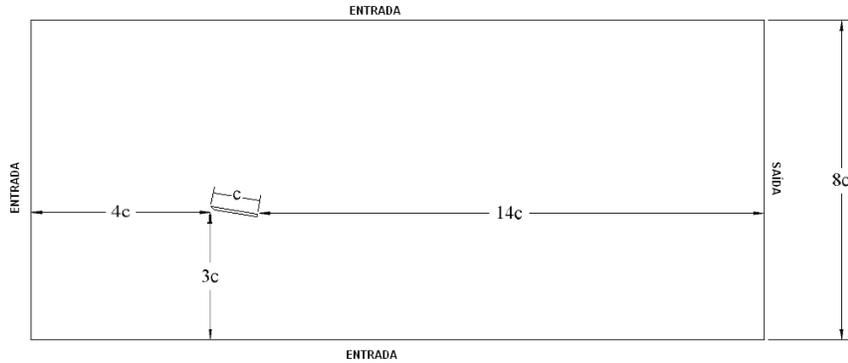


Figura 6.1 - Detalhes do domínio computacional para o caso LES Dinâmico em $\alpha = 3^\circ$.

O acompanhamento temporal da velocidade, em alguns pontos do domínio, foi realizado através de sondas colocadas próximas à superfície da placa. A partir da análise apresentada no Capítulo 5, onde sondas foram posicionadas de forma simétrica ao redor do plano central, concluiu-se ser suficiente avaliar a evolução temporal do escoamento com sondas posicionadas no plano central. A localização das sondas encontra-se ilustrada na Figura 6.2. As posições das estações encontram-se, normalizadas, na Tabela 6.1.

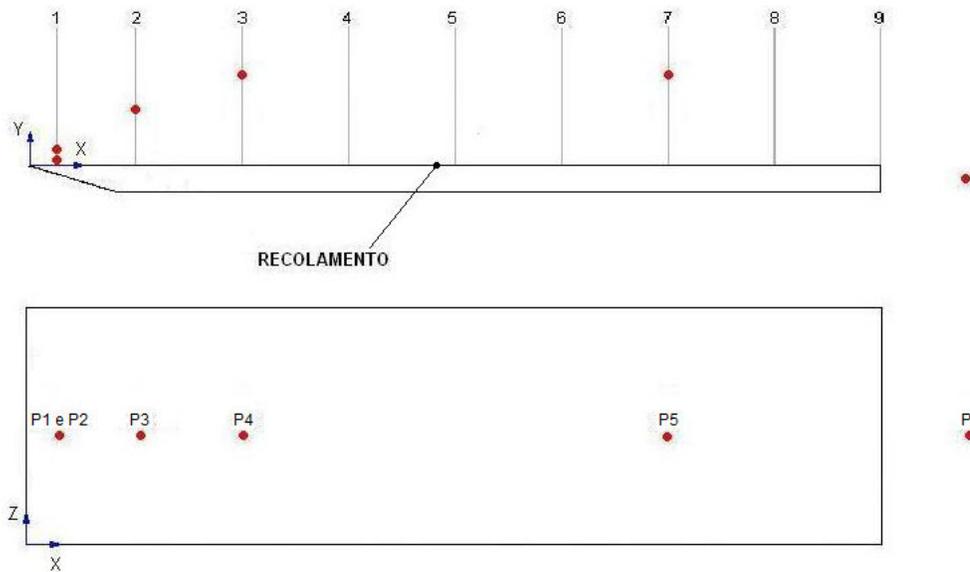


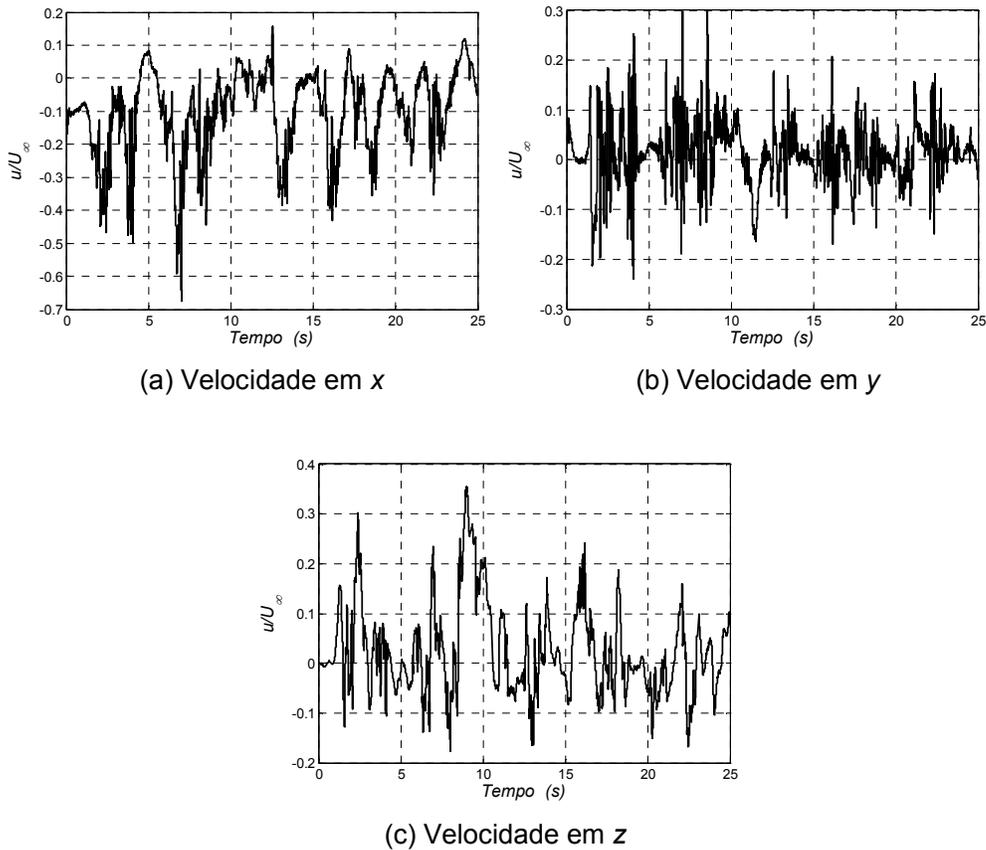
Figura 6.2 – Posição das sondas sobre a placa. $\alpha = 3^\circ$.

Tabela 6.1 – Coordenadas normalizadas das sondas sobre a placa ($\alpha = 3^\circ$).

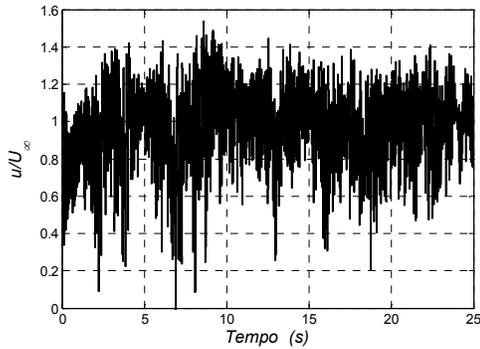
SONDA	POSIÇÃO			SONDA	POSIÇÃO		
	x/c	y/c	z/c		x/c	y/c	z/c
P1	0,031	0,01	0,125	P7	0,250	0,02	0,125
P2	0,031	0,02	0,125	P8	0,750	0,02	0,125
P3	0,125	0,04	0,125	P12	1,12	-0,018	0,125

A sonda P1 localiza-se sobre a estação 1, dentro da bolha de recirculação. As sondas P2, P3 e P4 foram posicionadas nas estações 1, 2 e 3, respectivamente. A coordenada vertical destas sondas foi definida de forma situá-las sobre a camada de mistura. Na estação 7, foi posicionada a sonda P5, a qual encontra-se numa região de desenvolvimento da turbulência. A jusante da placa, a sonda P6 visa identificar as perturbações existentes naquela região.

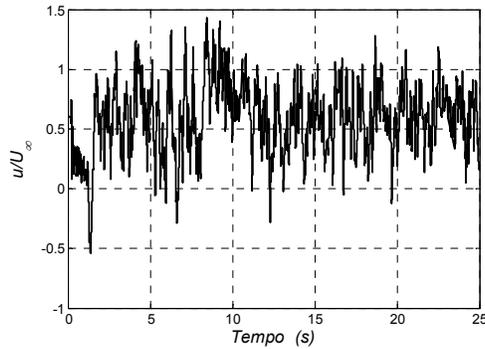
A Figura 6.3 mostra a evolução dos três componentes da velocidade no tempo com os dados medidos pela sonda P1.

Figura 6.3 – Evolução da velocidade no tempo - sonda P1. $\alpha = 3^\circ$

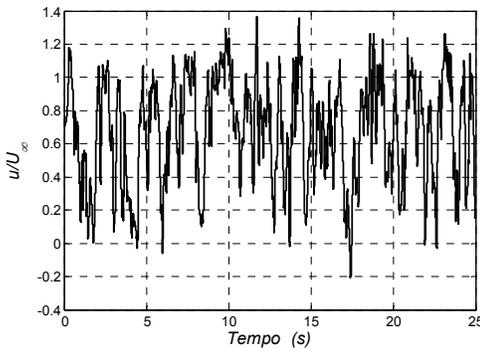
Já a Figura 6.4 apresenta a evolução temporal do componente x da velocidade obtida com as sondas P2, P3, P4, P5 e P6. Todas as sondas, por se localizarem sobre a camada cizalhante livre separada, mostraram um nível elevado de perturbação em suas leituras.



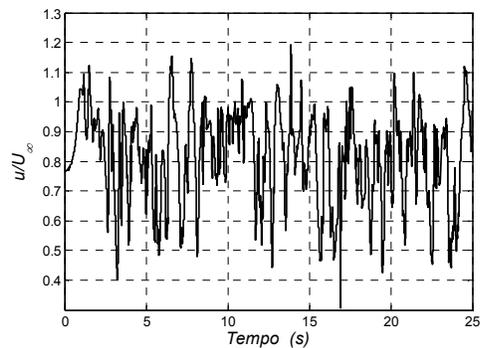
(a) Sonda P2



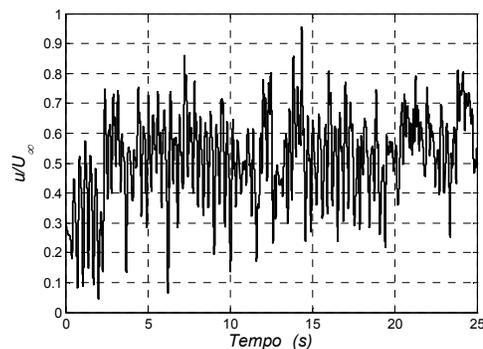
(b) Sonda P3



(c) Sonda P4



(d) Sonda P5



(e) Sonda P6

Figura 6.4 – Evolução da velocidade x no tempo. $\alpha = 3^\circ$.

Analisando as medidas obtidas pela sonda P1 na Fig. 6.3, verifica-se uma menor agitação (35% de U_∞) do que as observadas pelas medidas obtidas com

as outras sondas (Fig. 6.3), pois a sonda P1 está localizada no interior da bolha de separação e mais próximo a superfície da placa. Como esperado, o componente x é bem maior que os dois outros componentes, Neste caso, observa-se claramente a característica anisotrópica do escoamento, onde o comportamento temporal do componente y da velocidade é bem distinto do componente z .

Uma análise da Figura 6.4 permite observar que uma maior frequência das oscilações foi medida pela sonda P2, identificando que a sonda está exatamente sobre a camada cisalhante livre. As sondas P4, P4 e P5 mostram sinais da camada limite turbulenta em desenvolvimento. A sonda P6 mostra sinais provenientes da esteira turbulenta formada após a placa.

Após o desenvolvimento do escoamento, as médias temporais foram determinadas de forma a permitir analisar as características da solução no regime estatisticamente permanente. O tempo de amostragem foi aproximadamente 16 vezes o tempo de residência. As médias foram obtidas através da média temporal e espacial (na direção transversal) de acordo com as Eqs. (5.7) e (5.8).

A seguir, os resultados obtidos com os modelos RANS (modelos Spalart-Allmaras e SST) são comparados com o resultados obtidos com a Simulação de Grandes Escalas (modelo LES Smagorinsky Dinâmico.) e com os dados experimentais de Crompton (2001), quando disponíveis. Cabe ressaltar que, da mesma forma que a realizada no Capítulo 5, utilizou-se nos diversos gráficos a convenção de representar o termo de interesse sem barras sobre as variáveis do problema, por exemplo, utiliza-se u_i para representar a velocidade sem distinção entre as médias das velocidades calculadas \overline{u}_i (Eqs. (5.7) e (5.8)) pelo modelo LES Dinâmico e \overline{u}_i dos modelos RANS.

A Tabela 6.2 apresenta os comprimentos de recolamento para bolha principal (X_R) obtidos pelos modelos em análise. Pode-se observar que neste caso a previsão do ponto de recolamento obtida com todos os modelos RANS foi bem superior ao obtido para o caso anterior com $\alpha = 1^\circ$. Observa-se ainda que o modelo SST utilizado no presente trabalho apresentou o melhor resultado. Nota-se ainda, que nas simulações RANS, a utilização de malha mais fina em relação à malha utilizada no trabalho de Collie (2008), empregada teve efeito positivo com relação ao comprimento de recolamento, melhorando o resultado.

Observa-se na Tabela 6.2 que tanto a simulação realizada por Sampaio (2006) empregando o modelo f-LES, quanto a simulação realizada com o LES Dinâmico neste trabalho apresentaram elevados erros na previsão do ponto de recolamento. Em ambos os casos, a definição do domínio de cálculo, assim como as malhas empregadas foram considerados os principais responsáveis pela falha na previsão precisa do escoamento. Esta interpretação é confirmada, ao analisar o resultado obtido com a malha 2,9M alinhada com o escoamento, a qual forneceu uma melhor previsão do comprimento de recolamento pelo modelo LES Dinâmico, mostrando a importância da uniformidade da malha na região de interesse, especialmente quando se trata das Simulações de Grandes Escalas. Porém o erro de 12,6% demonstra a necessidade de um ainda maior refinamento da malha. Mesmo assim, acredita-se que a previsão correta da estrutura do escoamento foi obtida, permitindo ajudar no entendimento do fenômeno.

Somente o modelo LES Dinâmico foi capaz de prever a existência da bolha secundária, e o valor obtido para o ponto de recolamento secundário também foi incluído na Tabela 6.2, juntamente com o valor medido pro Crompton (2001).

Tabela 6.2 – Comprimentos de recolamento normalizados X_R para $\alpha = 3^\circ$.

	X_R / c_{exp}	erro	X_S / c_{exp}
Experimental (Crompton, 2000)	0,470		0,04
LES Dinâmico (Malha 2,9M)	0,411	12,60%	0,06
LES Dinâmico (Malha 2,4M)	0,338	28,00%	-
f-LES (Sampaio, 2006)	0,357	24,00%	-
SST	0,464	1,17%	-
Spalart-Allmaras	0,458	2,51%	-
$\kappa - \omega$ (Collie et al., 2008)	0,4374	6,94 %	-
SST (Collie et al., 2008)	0,5096	-8,43%	-

Como nos casos anteriores, apresentados no Capítulo 5, as estações de medição foram normalizadas pelo valor pela razão entre os valores de X_R obtidos numericamente e medido experimentalmente. Para as soluções obtidas com os modelos RANS, este fator é aproximadamente igual a um. Porém, para o modelo LES Dinâmico o fator de correção é indispensável. A presente

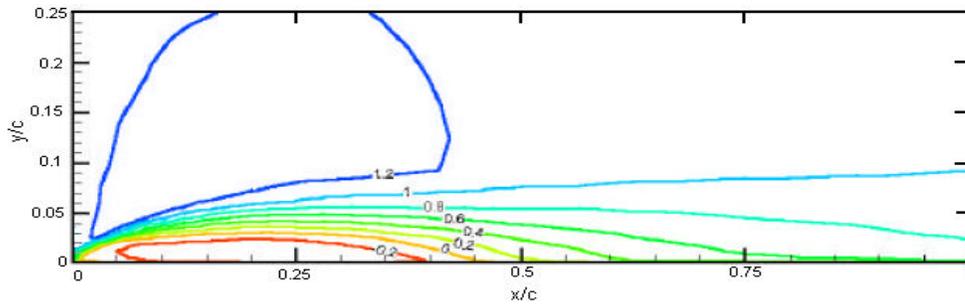
normalização permite verificar se existe similaridade entre os resultados obtidos numericamente pelo modelo e os dados experimentais, apesar do modelo não prever corretamente o ponto de recolamento.

6.1. Campo de Velocidade

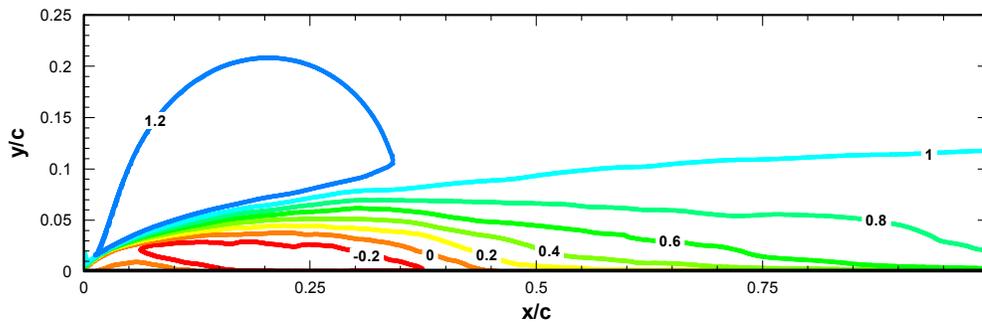
A Figura 6.5 apresenta os contornos de velocidade média u/U_∞ obtidos experimentalmente por Crompton (2001) e resultantes das simulações numéricas realizadas para $\alpha = 3^\circ$. Analisando-se os resultados, pode-se afirmar que qualitativamente, mais uma vez os modelos RANS capturaram bem o tamanho e a forma da bolha principal, mostrando boa concordância com as experiências de túnel de vento. As previsões de ambos os modelos RANS foram bem semelhantes. Nota-se claramente a superioridade da previsão obtida como o modelo LES Dinâmico, apesar deste haver previsto uma zona de recirculação menor do que a observada por Crompton.

A Figura 6.6 apresenta de forma qualitativa a evolução dos perfis de velocidade nas nove estações indicadas esquematicamente na Figura 5.2, e listadas na Tabela 5.1.

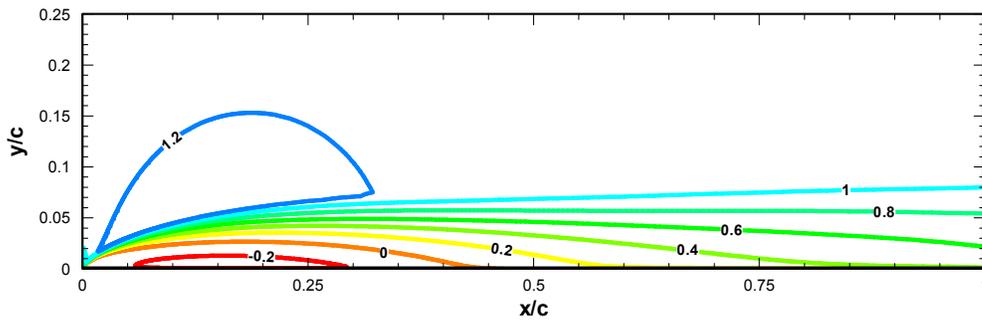
A avaliação desta evolução mostra, de uma forma geral, que as formas das curvas produzidas pelos modelos de turbulência foram semelhantes as dos dados experimentais. Nas estações localizadas antes do ponto de recolamento $X_R / c = 0,470$ nota-se uma melhor concordância do modelo LES Dinâmico, seguido pelo modelo SST e, finalmente, o modelo Spalart-Allmaras. Isto se deve ao fato que nos modelos RANS não há a captura da segunda bolha de recirculação, a qual é observada experimentalmente e prevista pela presente na simulação com LES Dinâmico. Após o ponto de recolamento os modelos apresentam o mesmo comportamento para o desenvolvimento do escoamento que o observado pelos dados experimentais. Cabe observar que apesar da forte influência da normalização nos dados obtidos com o modelo LES Dinâmico, os resultados são compatíveis, permitindo dar um primeiro passo para a análise das estruturas do escoamento, como mencionado anteriormente.



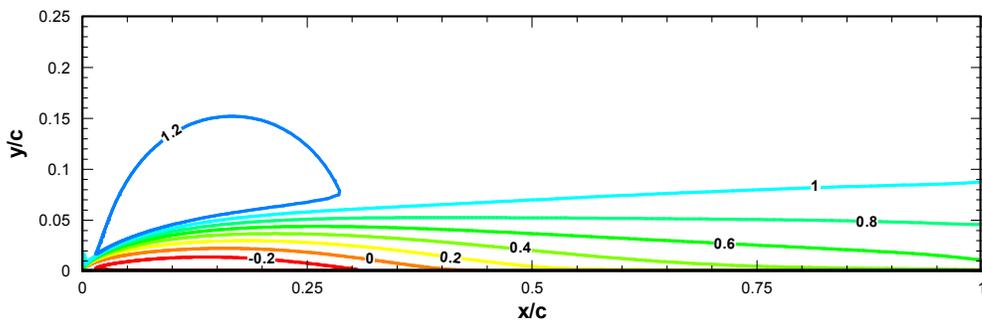
(a) Experimental (Crompton,2001).



(b) LES Dinâmico.

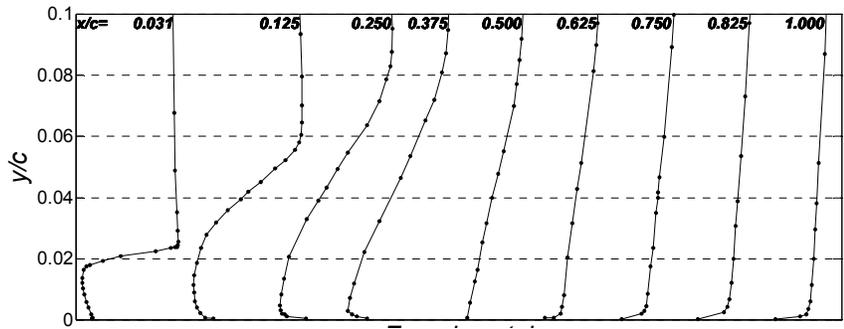


(c) Modelo SST.

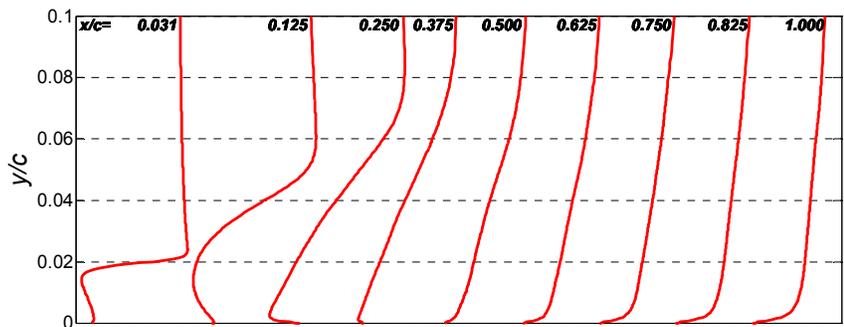


(d) Modelo Spalart-Allmaras.

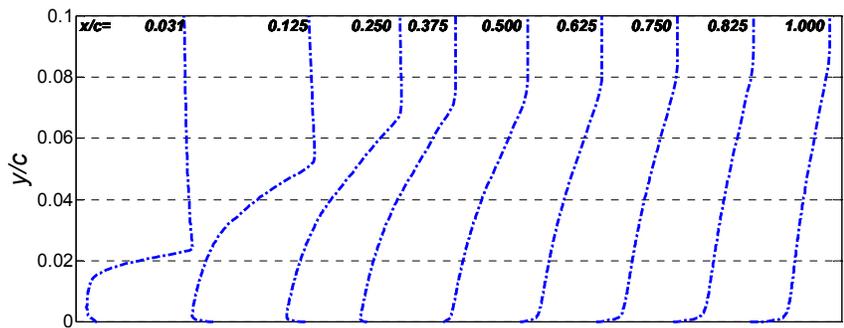
Figura 6.5 – Contornos de velocidade u/U_∞ para $\alpha = 3^\circ$. Modelos RANS e LES.



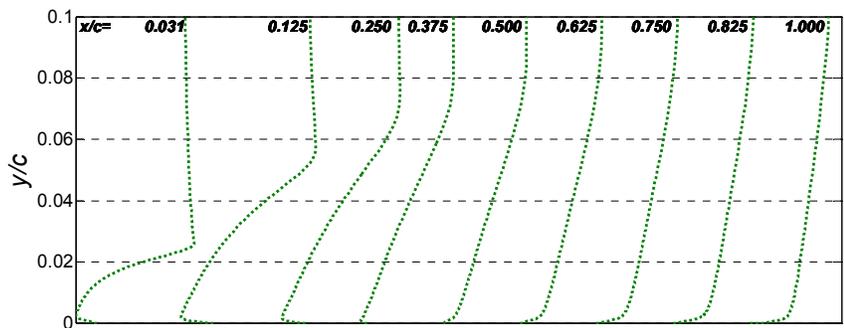
(a) Experimental



(b) LES Dinâmico



(c) SST



(d) Spalart Allmaras

Figura 6.6 – Evolução dos perfis de velocidade u/U_∞ . Modelos RANS e LES. $\alpha = 3^\circ$

A Figura 6.7 apresenta os perfis do componente de velocidade média alinhado com a placa, para as quatro primeiras estações, que estão contidas no interior do comprimento de recolamento. Analisando-se a Figura 6.7d, correspondente a estação mais próxima ao ponto de recolamento ($x/c = 0,375$), observa-se que os resultados das simulações mostram velocidades mais baixas do que os resultados experimentais. Nesta região, verifica-se que as curvaturas da camada cisalhante em direção à placa são mais amortecidas nos modelos numéricos, quando comparadas com os dados experimentais.

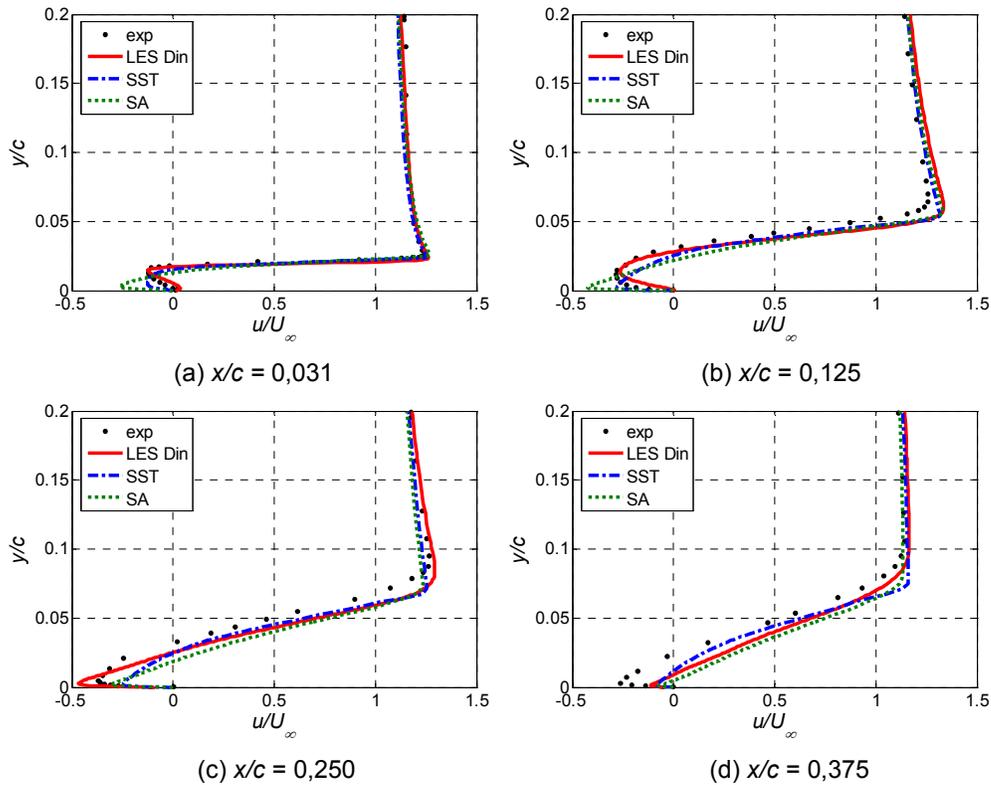


Figura 6.7 – Perfis de velocidade u/U_∞ : estações localizadas antes do recolamento.

Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$

A estação $x/c = 0,250$, Figura 6.7c, localiza-se aproximadamente no meio da bolha de recirculação. Nesta estação as velocidades atingem o máximo, tanto na extremidade externa da camada cisalhante quanto na região de escoamento reverso. A velocidade do escoamento reverso medida experimentalmente atingiu um máximo de $-0,393U_\infty$. A previsão do modelo LES Dinâmico resultou no valor de $-0,465U_\infty$, seguido de $-0,247U_\infty$ e $-0,410U_\infty$ previsto pelos modelos SST e Spalart-Allmaras, respectivamente. Verifica-se na Figura 6.7,

para os modelos RANS, que a camada de limite reversa é mais fina do que os resultados experimentais. Em $x/c = 0,031$ e $x/c = 0,125$ o modelo LES Dinâmico mostrou melhor concordância com os resultados experimentais, indicando que o modelo é capaz de captar os fenômenos existentes dentro da bolha de recirculação.

A Figura 6.8, amplia a região de visualização dos resultados referentes a estação 1 ($x/c = 0,031$), de forma a permitir apreciar a presença da segunda bolha de recirculação, a qual é observada através da análise dos dados experimentais e do modelo LES Dinâmico. Pode-se observar que apesar da curva obtida pelo LES Dinâmico não coincidir com os dados experimentais, obteve-se a mesma forma para o perfil de velocidades e o mesmo não pode ser afirmado com relação aos dados obtidos com os modelos RANS.

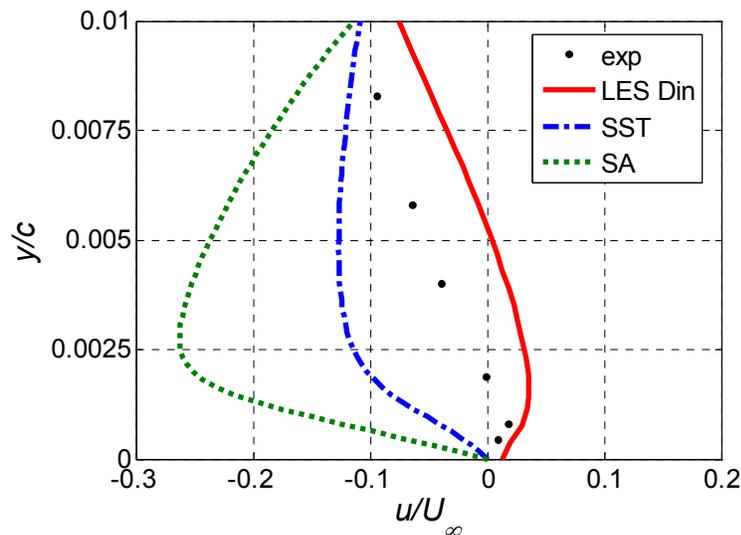
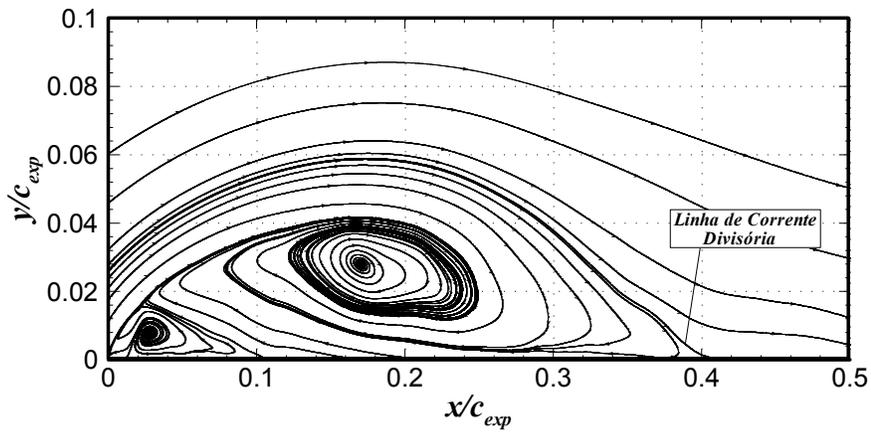


Figura 6.8 – Detalhe dos perfis de velocidade u/U_∞ para $x/c = 0,031$.

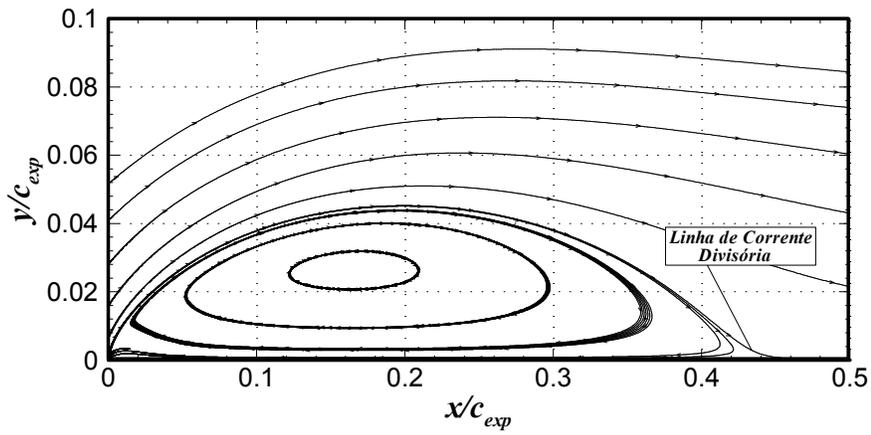
Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

As distribuições das linha de corrente do escoamento médio são apresentadas na Figura 6.9. Neste caso, não empregou-se a normalização baseada nos valores de X_R , e forma a ilustrar a visualização real do ponto de recolamento.

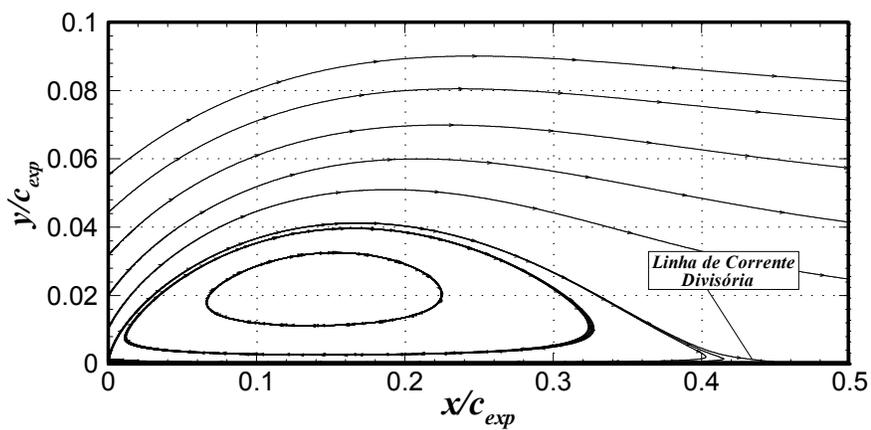
Analisando as linhas de correntes nas Figura 6.9b e 6.9c obtidas pelos modelos SST e Spalart-Almaras, nota-se que estes não conseguiram prever a segunda bolha de recirculação, assim como nas simulações realizadas para $\alpha = 1^\circ$. Esta segunda recirculação pode ser visualizada na Figura 6.9a, referente ao modelo LES Dinâmico.



(a) Modelo LES Dinâmico.



(b) Modelo SST.



(c) Modelo Spalart-Allmaras.

Figura 6.9 – Linhas de corrente. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

Observa-se na Figura 6.9 que todos os modelos de turbulência previram um amortecimento do escoamento, próximo à região de recolamento, sendo que a maior curvatura das linhas de corrente em relação à placa foi obtida pelo modelo LES Dinâmico, e, portanto, induziu a maior velocidade na estação 4, $x/c = 0,375$, da Figura 6.7d.

Um outro dado experimental relacionado a velocidade média do escoamento disponível por Crompton (2001) para $\alpha = 3^\circ$ é a velocidade na direção normal a placa. A Figura 6.10 ilustra as comparações entre os modelos RANS, LES Dinâmicos e dados experimentais para este componente. Nota-se que todos os modelos apresentaram boa concordância com a forma do perfil de velocidade do componente normal, porém, os modelos RANS apresentaram maior concordância com os dados experimentais. Nota-se Figura 6.10b que o modelo LES Dinâmico apresentou um desvio no perfil de v/U na estação 2 ($x/c = 0,125$), o qual está associado com a presença da segunda bolha de recirculação, cujo comprimento é maior que o obtido experimentalmente, levou a um máximo positivo em $y/c \cong 0,02$.

Na estação $x/c = 0,375$ (Figura 6.10d) observa-se a maior velocidade normal, no sentido da placa. Isto é esperado, pois as linhas direcionam-se para o ponto de recolamento.

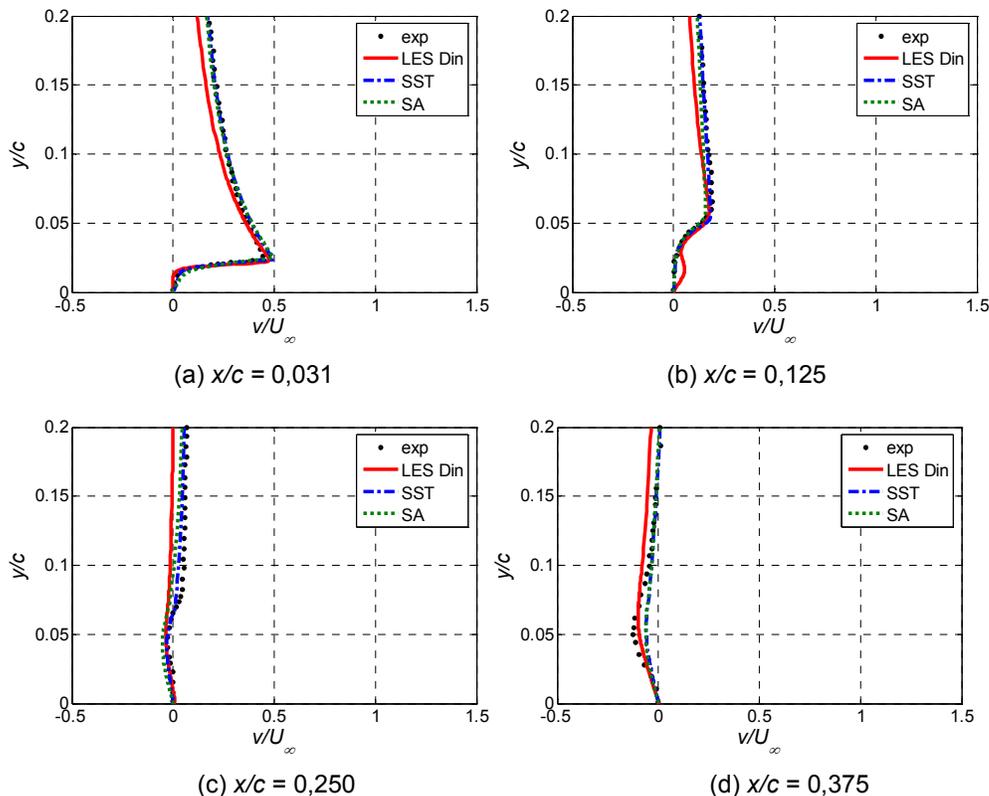


Figura 6.10 – Perfis de velocidade v/U_∞ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

6.2. Estatísticas de Segunda Ordem

As estatísticas de segunda ordem são verificadas através da energia cinética turbulenta κ , Eq. (3.14), e das tensões de Reynolds $u'u'$, $v'v'$ e $u'v'$. Crompton (2001) disponibilizou os perfis de κ , $u'u'$ e $v'v'$, os quais são utilizados para comparações. Os resultados do modelo f-LES (Sampaio, 2006) para a energia cinética turbulenta também foram incluídos nas comparações. Para a tensão cisalhante de Reynolds $u'v'$ comparou-se apenas os três modelos (SA, SST e LES Dinâmico). As Figuras 6.11 a 6.14 mostram estes resultados através dos respectivos perfis, nas quatro estações localizadas no interior da bolha de recirculação.

A Figura 6.11 corresponde aos perfis da estatística de segunda ordem alinhada com a placa, $u'u'/U_\infty^2$. Observa-se na Figura 6.11a, que em $x/c = 0,031$, o pico máximo previsto pelos modelos SST e LES Dinâmico é cerca da metade do valor do medido por Crompton, enquanto que o modelo SA prevê um valor substancialmente menor. Este resultado indica que os modelos estão prevendo mais difusão do que o real, seja porque os modelos RANS são muito difusivos, ou porque o refinamento da malha naquela região é insuficiente para o LES Dinâmico, introduzindo uma difusão numérica, impedindo os modelos de prever corretamente a rápida transição da camada de mistura para o regime turbulento.

A influência da bolha secundária prevista pelo modelo LES Dinâmico pode ser observada em todas as estações da Figura 6.11, através de um máximo local no perfil da tensão normal. Os modelos RANS não observaram este fenômeno. No perfil da estação 2 ($x/c = 0,125$), Figura 6.11b, pode-se observar desvios mais acentuados na previsão da tensão normal $u'u'/U_\infty^2$ pelo modelo LES Dinâmico, na região próxima à parede, os quais estão associados com os desvios observados nesta mesma região com relação ao componente normal da velocidade média.

Verifica-se nas Figuras 6.11c e 6.11d, nos dados experimentais que há dissipação gradativa da inflexão da curva, no escoamento reverso entre as estações $x/c = 0,250$ e $x/c = 0,375$ dos gráficos de $u'u'$, devido a relaminarização da camada limite.

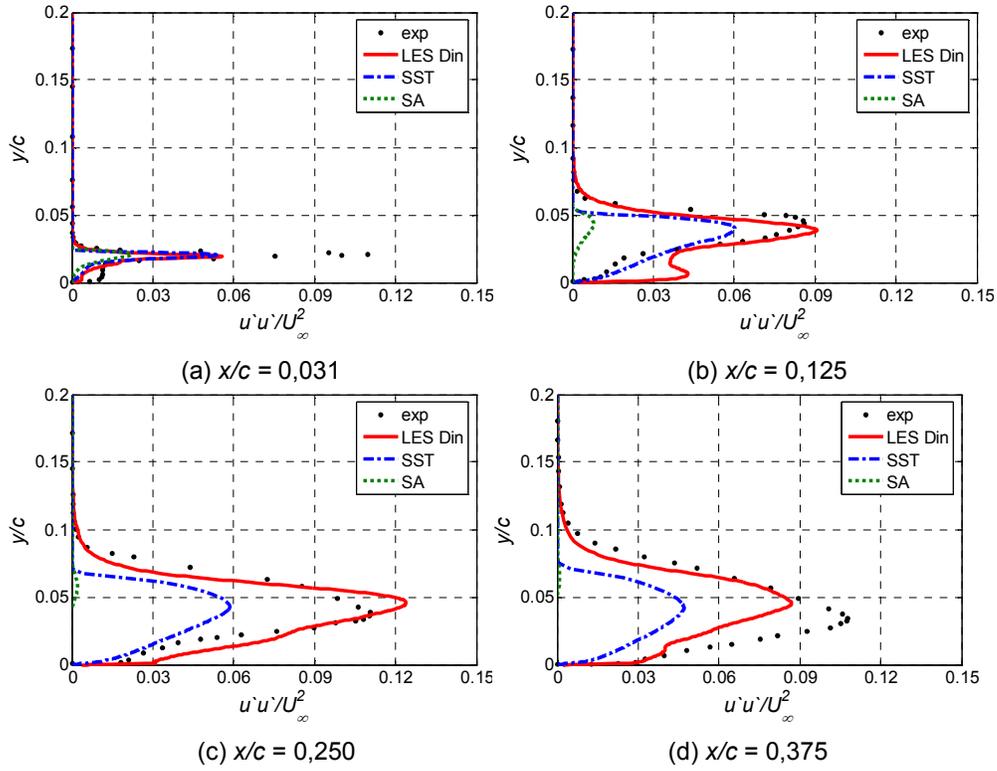


Figura 6.11 – Perfis de $u'u'/U_\infty^2$: estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

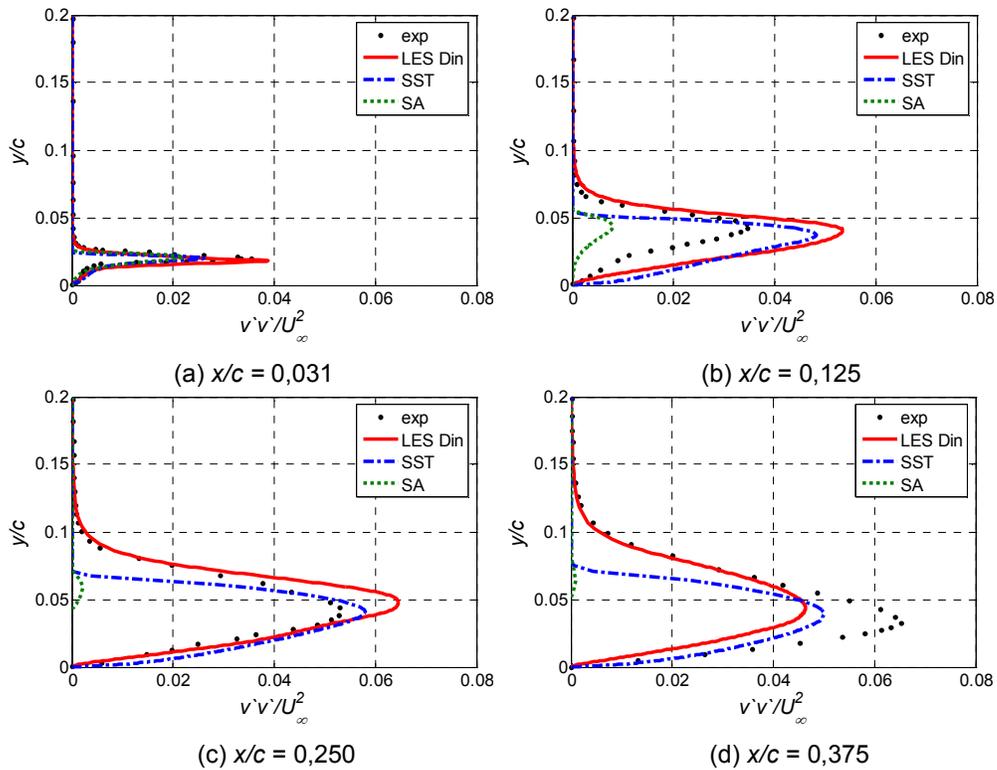


Figura 6.12 – Perfis de $v'v'/U_\infty^2$: estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

Nas Figuras 6.11 a 6.14 há a ocorrência de um máximo global, localizado na vizinhança externa da recirculação principal. A posição desses picos principais estão próximos das ordenadas dos pontos de inflexão do perfis de velocidade (Figuras 6.7 e 6.10), conforme esperado.

Analisando-se os perfis de $u'u'/U_\infty^2$ e $v'v'/U_\infty^2$ obtidos com o LES Dinâmico (Figuras 6.11 e 6.12), observa-se que os resultados estão bastante próximos dos dados experimentais. Nota-se ainda que o modelo foi capaz de prever a forte anisotropia existente no escoamento.

O modelo SST demonstrou sua aplicabilidade através dos resultados alcançados e ilustrados nas Figuras 6.11 a 6.14, pois houve uma boa concordância com os dados experimentais, para a maioria dos dados. Através da análise das Figuras 6.11 e 6.12 verifica-se a isotropia do modelo com a semelhança entre os perfis de $u'u'/U_\infty^2$ e $v'v'/U_\infty^2$.

Assim como no caso de $\alpha = 1^\circ$, observa-se nas Figuras 6.11 e 6.12 que o modelo Spalart-Allmaras é incapaz de prever adequadamente as tensões normais $u'u'/U_\infty^2$ e $v'v'/U_\infty^2$, pois as mesmas são praticamente nulas em todas as estações. O modelo apresenta forte amortecimento das tensões normais de Reynolds para $\alpha = 3^\circ$, além de também apresentar comportamento isotrópico.

A Figura 6.13 apresenta os perfis da energia cinética turbulenta nas quatro estações. Nestes gráficos os resultados obtidos com o modelo f-LES (Sampaio, 2006) também foram incluídos. Note que a energia cinética turbulenta é definida pela soma das tensões normais. Conseqüentemente, as deficiências dos modelos para prever essas grandezas, se refletem na avaliação de κ .

Adicionalmente, os modelos RANS como foram resolvidos utilizando uma formulação bi-dimensional, não incluem a contribuição de $w'w'$ na avaliação de κ , o que pode comprometer a qualidade da previsão desta grandeza por estes modelos. No entanto, note que o componente normal $u'u'/U_\infty^2$ é maior que os dois outros tensores normais, conseqüentemente a distribuição de κ é muito semelhante a observada para $u'u'/U_\infty^2$.

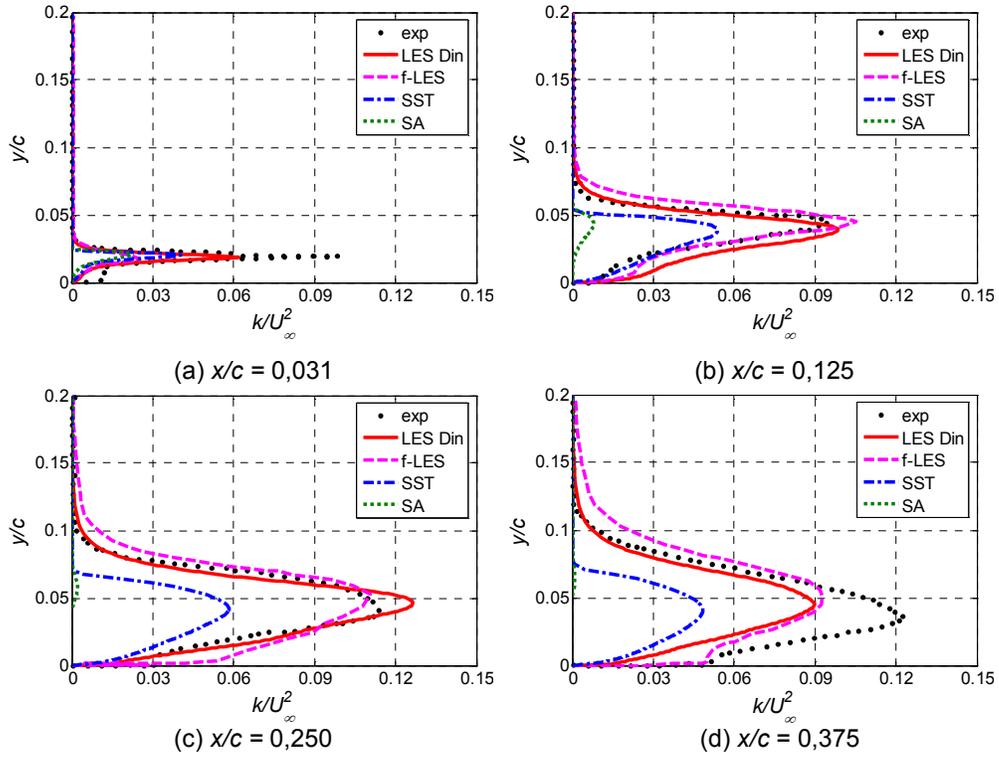


Figura 6.13 – Perfis de energia cinética turbulenta: estações no interior da bolha.

Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

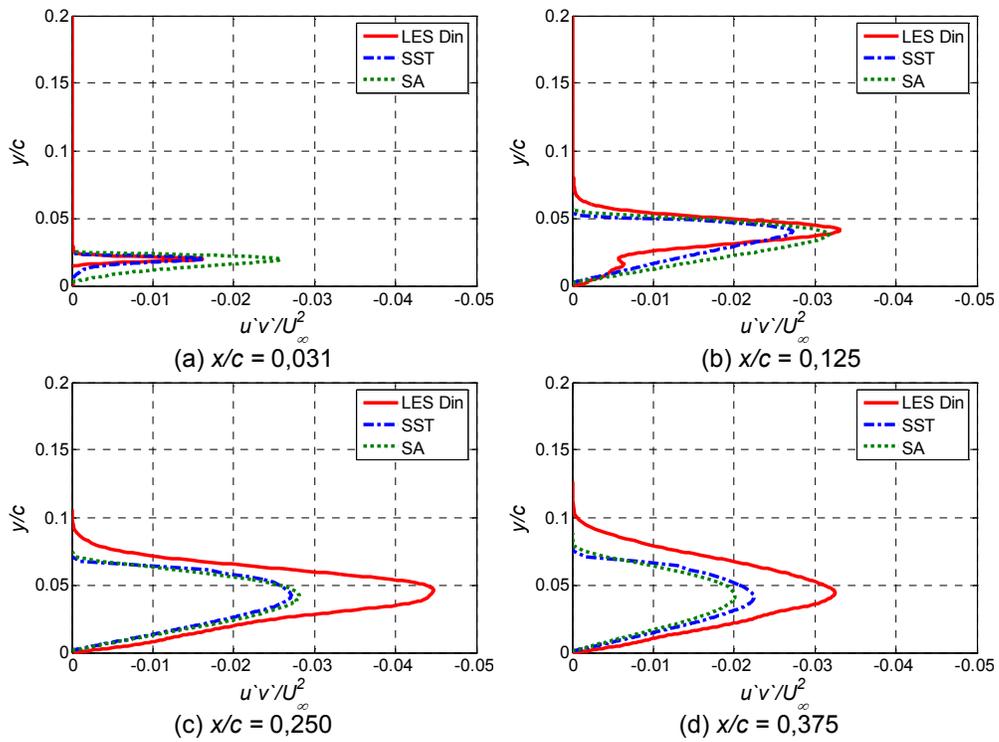


Figura 6.14 – Perfis de $u'v'/U_\infty^2$: estações localizadas antes do recolamento.

Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$.

Analisando os perfis de κ na Figura 6.13a, observa-se que os dados experimentais exibem dois picos de energia, um máximo global e um outro local, $x/c = 0,031$. A presença da segunda bolha de recirculação é responsável pelo surgimento do máximo local. Este máximo local encontra-se na fronteira externa da recirculação secundária, onde as elevadas taxas de cisalhamento geram forte produção de turbulência. Nesta primeira estação, o valor máximo da energia cinética turbulenta foi subestimado, como já comentado na análise de $u'u'/U_\infty^2$, o que pode ser atribuído em parte ao pouco refinamento da malha. Este causa também pode ser confirmada através da Figura 6.13a ($x/c = 0,031$), onde o pico da energia cinética turbulenta no modelo f-LES é o menor entre todos os modelos, devido ao pouco refinamento da malha. Nas outras estações os dois modelos LES apresentaram resultados muito próximos.

A distribuição da tensão cisalhante de Reynolds é ilustrada na Figura 6.14. Nota-se que o modelo LES Dinâmico mostrou os maiores valores nas estações $x/c = 0,125$, $x/c = 0,250$ e $x/c = 0,375$, enquanto que o modelo Spalart-Allmaras apresentou os maiores valores em $x/c = 0,031$ (Figura 6.14a). Neste caso, Crompton (2001) não disponibilizou dados experimentais para $u'v'$. A Figura 6.14 mostra concordância razoável entre os modelos RANS e LES.

As Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam os contornos das grandezas estatísticas de segunda ordem para os modelos SST, SA e LES Dinâmico, respectivamente. Estes contornos contemplam a região localizada até $0,5c$.

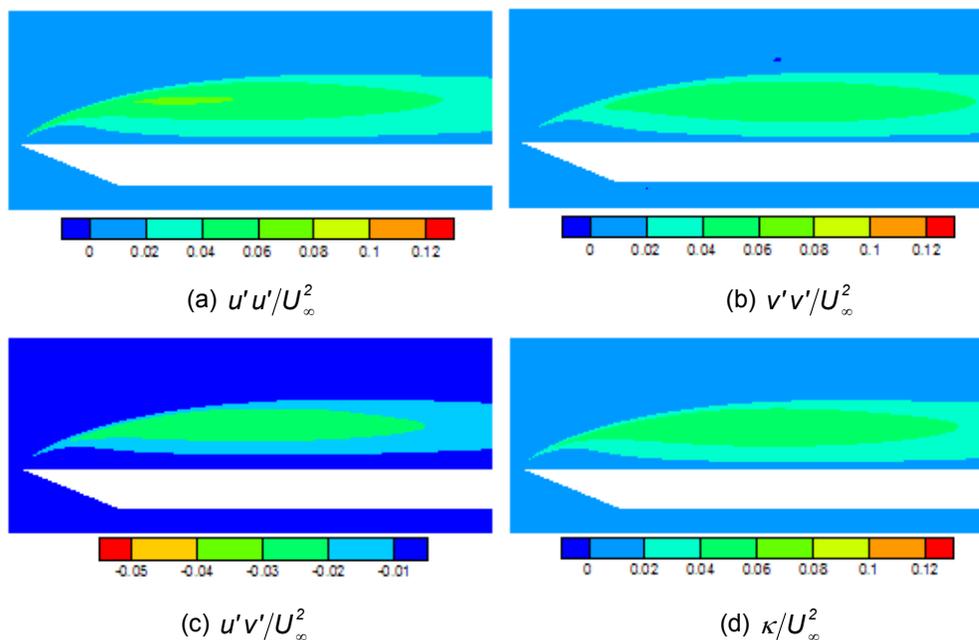


Figura 6.15 – Contornos das grandezas de segunda ordem – SST. $\alpha = 3^\circ$.

Através dos contornos dos componentes do tensor de Reynolds, fica evidente mais uma vez a isotropia dos modelos RANS através da visualização das tensões normais nas Figuras 6.15 e 6.16. Mais uma vez o modelo Spalart-Allmaras demonstrou excessivo amortecimento das tensões normais de Reynolds, o que não acontece nas tensões cisalhantes $u'v'$, da mesma forma como ocorrido em $\alpha = 1^\circ$. O modelo SST, apesar do aspecto isotrópico, proporcionou níveis mais adequados de turbulência, como pode ser constatado na Figura 6.15.

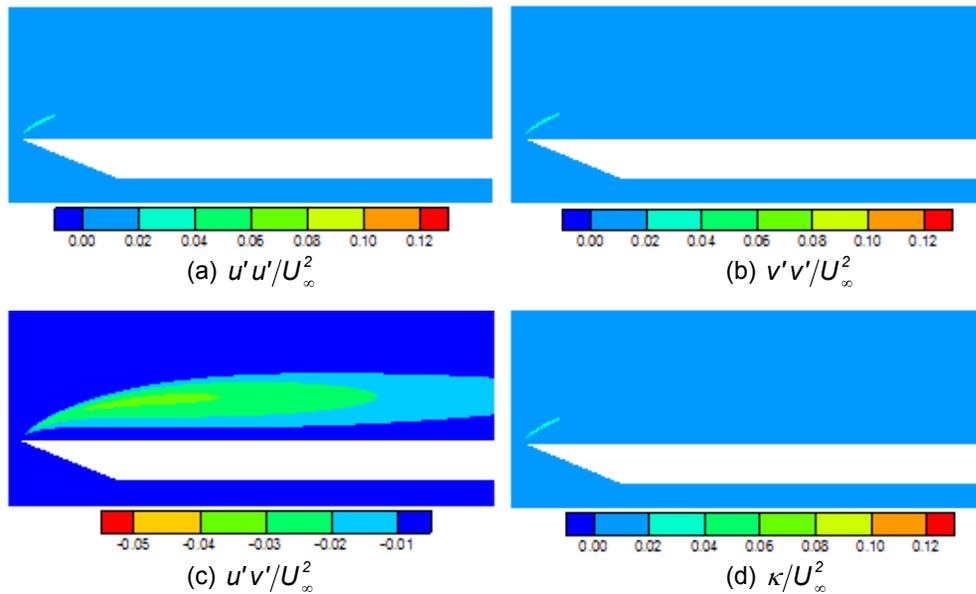


Figura 6.16 – Contornos das grandezas de segunda ordem – Spalart Allmaras. $\alpha = 3^\circ$.

A Figura 6.17 ilustra, através do modelo LES Dinâmico, as diferentes características dos componentes principais do tensor de Reynolds, que não são calculadas pelos modelos RANS. Fica claro que, dentre os três componentes normais do tensor de Reynolds, a de maior intensidade é $u'u'$.

Em todas as simulações numéricas, os contornos de $v'v'$ e $u'v'$ se anulam à medida que se aproxima da parede, devido à condição de impenetrabilidade na placa, podendo ser verificado nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17. De fato, enquanto que nos contornos de $u'u'$, $w'w'$ e κ há regiões de turbulência mais intensas próximas a parede, as regiões com maiores quantidades de $v'v'$ e $u'v'$ parecem "flutuar" sobre a placa.

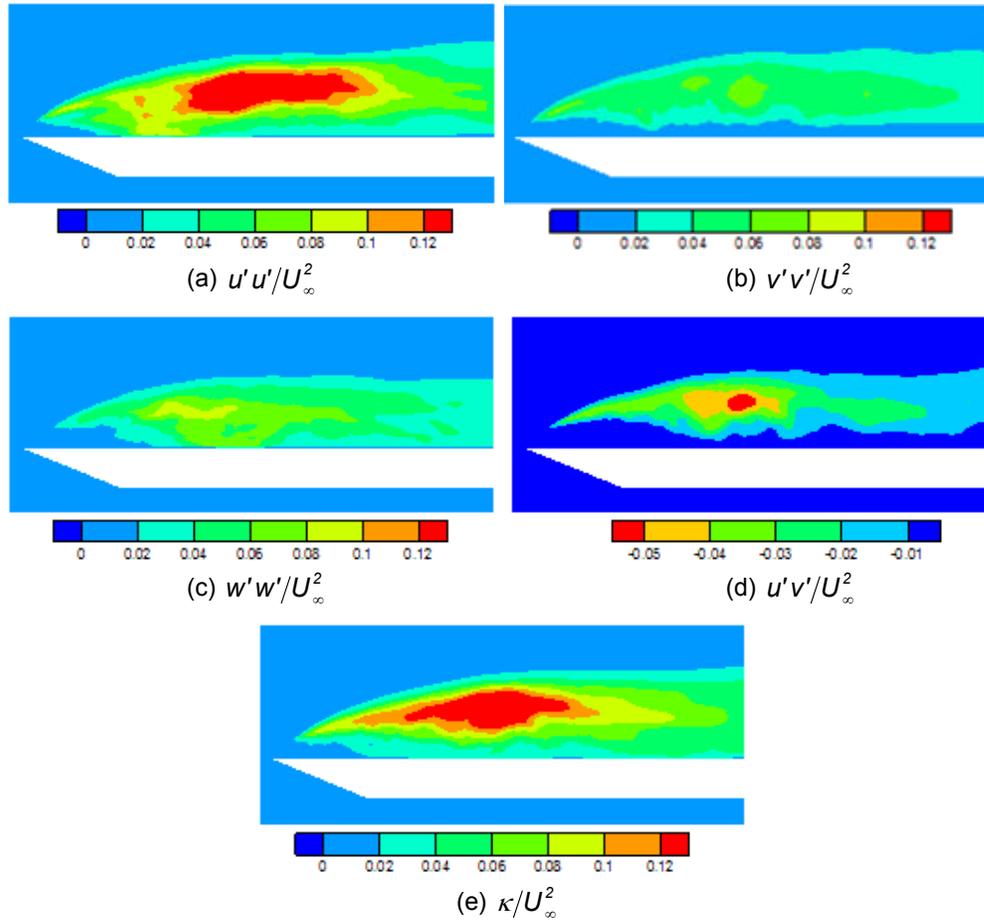


Figura 6.17 – Contornos das grandezas de segunda ordem – LES Dinâmico. $\alpha = 3^\circ$.

6.3. Coeficiente de Pressão

A Figura 6.18 apresenta a distribuição dos coeficientes de pressão obtidos com os três modelos SA, SST e LES Dinâmico sobre a placa, juntamente com os dados de Crompton (2001). Cabe ressaltar mais uma vez que o valor da abscissa do gráfico da Figura 6.18 é normalizado pelo valor de X_R , conforme explicado anteriormente.

A aceleração da baixa velocidade do fluido no interior da camada cisalhante livre requer, pela continuidade, que uma quantidade de fluido adicional seja injetado para substituí-lo. Isto é mantido através da entrada de fluido através da camada de mistura, que está presente em toda a fronteira da bolha principal. A velocidade média mais alta da região de escoamento reverso

tem o efeito de reduzir a pressão estática sob a camada de cisalhante, aumentando sua curvatura para a superfície.

Os modelos SST e Spalart-Allmaras não prevêm precisamente a taxa de mistura na camada cisalhante livre, conforme pôde ser verificado anteriormente. Desta forma, nestes modelos a velocidade média no interior da bolha principal é menor, gerando maior pressão estática nesta região, atenuando a curvatura das linhas de corrente que vão de encontro ao ponto de recolamento (Figura 6.9). Este aumento de pressão pode ser verificado nas curvas dos modelos SST e Spalart-Allmaras para C_p da Figura 6.18.

Verifica-se também na Figura 6.18 o platô existente no gráfico de C_p no dado experimental, referente à presença da segunda bolha de recirculação. Os modelos RANS não previram esta segunda recirculação e, portanto, apresentam platôs mais moderados.

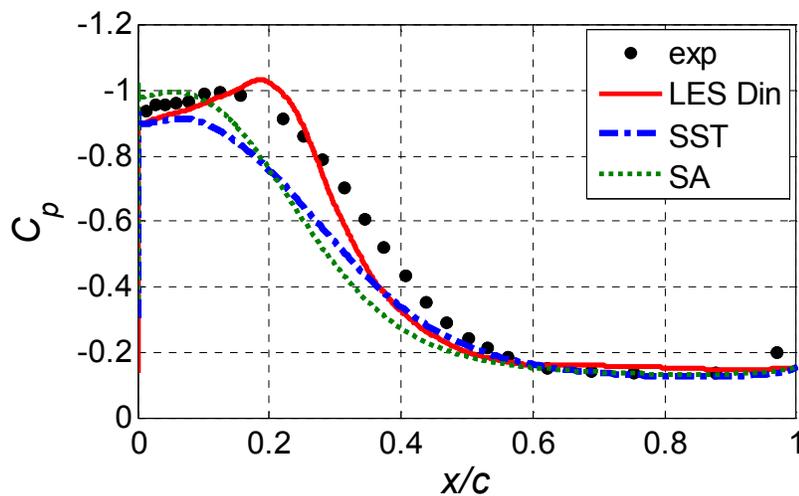


Figura 6.18 – Coeficiente de pressão - C_p . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^\circ$

Na Figura 6.18 o modelo LES Dinâmico mostra ser o mais compatível com o dado experimental. Isto porque simula melhor a turbulência na camada cisalhante e prevê a segunda bolha de recirculação. O resultado obtido na Simulação de Grandes Escalas está coerente com os calculados anteriormente.

Partindo do recolamento da bolha principal, na direção do bordo de ataque, verifica-se em $x/c = 0,375$ que a velocidade média reversa simulada é menor (Figura 6.7) que a experimental, sendo que a atividade turbulenta segue o mesmo padrão (Figura 6.18), assim a pressão estática nesta região é maior,

tornando a curvatura das linhas de corrente mais atenuada que no caso experimental.

Em $x/c = 0,250$ há um aumento da taxa de mistura, que pode ser verificado pelo acréscimo na intensidade turbulenta nesta região (Figura 6.13), maior que o dado experimental. Desta forma, o fluxo reverso é acelerado e obtém uma velocidade média maior (Figura 6.7), diminuindo a pressão estática (pico mostrado na Figura 6.18). Acredita-se que uma malha mais refinada traga melhores previsões desta região entre o recolamento da bolha secundária e principal.

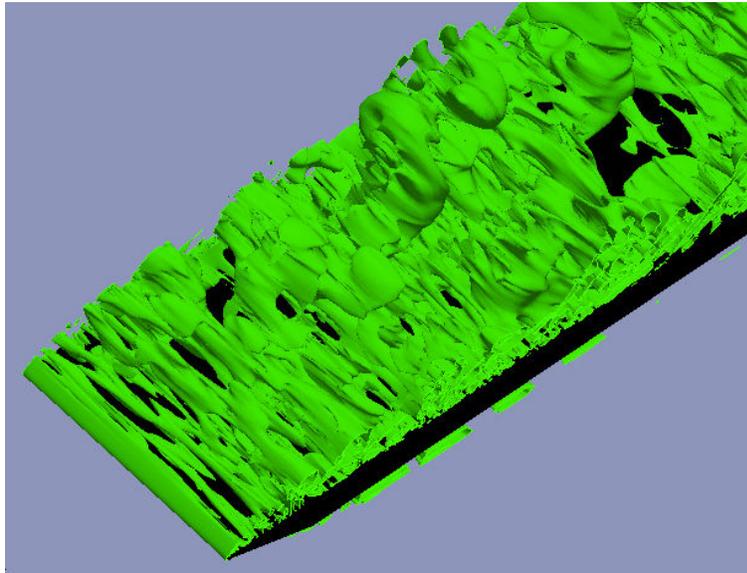
Esta necessidade de melhoria da malha é tão clara que apesar da bolha principal ter sido prevista pelo modelo LES Dinâmico com um comprimento menor, o comprimento da bolha secundária foi de 0,06, cerca de 1,5 vezes maior que o valor experimental.

6.4 Estruturas Coerentes

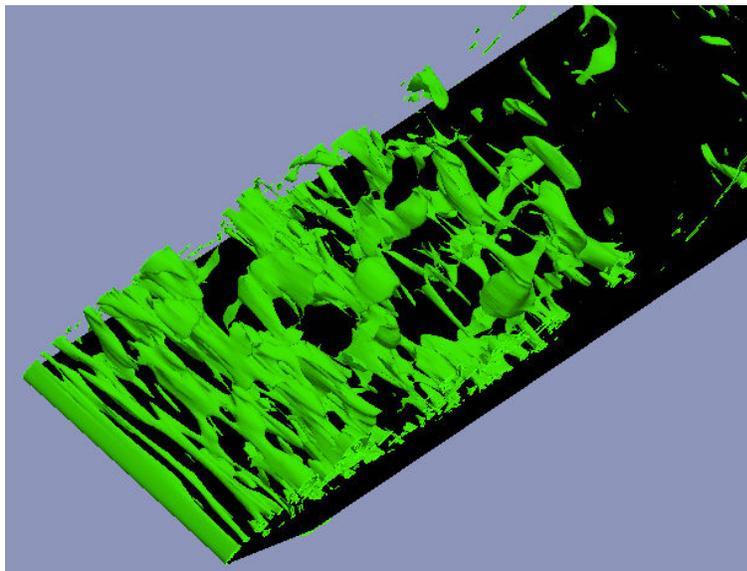
A Figura 6.19 avalia as estruturas coerentes correspondentes ao escoamento sobre a placa com um ângulo de incidência $\alpha = 3^\circ$, através do critério Q , descrito anteriormente. O critério Q do segundo invariante do gradiente de velocidade é uma condição necessária para a existência de tubos pequenos, convexos de baixa pressão.

Dois níveis de Q normalizados são apresentados na Figura 6.19. As iso-superfícies para o valor $Q c/U_\infty = 160$ (Figura 6.19b) se concentram na região da bolha principal e para $Q c/U_\infty = 0$ em toda placa. Observa-se através dos contornos de Q , correspondentes aos dois valores apresentados na Figura 6.19, que a camada cisalhante livre, desenvolvida desde a separação da camada limite no bordo de ataque, continua laminar por certa distância (*vortex sheet*). A partir daí, as estruturas coerentes retilíneas começam a se desprender, e à medida que vão caminhando na direção a jusante da placa vão se entortando e quebrando (*vortex breakdown*), gerando estruturas com direção preferencial mais indefinidas e alongamento menor. Cabe ressaltar que as estruturas são menores e mais bem definidas para o valor de Q normalizado

igual a 160. As estruturas com o valor zero envolvem as de valor 160, tornando a visualização das estruturas coerentes menos perceptíveis.



(a) Critério Q . Valor normalizado: $Q c / U_\infty = 0$



(b) Critério Q . Valor normalizado: $Q c / U_\infty = 160$

Figura 6.19 – Estruturas coerentes analisadas através do critério Q . $\alpha = 3^\circ$

A Figura 6.20 apresenta a vista lateral da placa com as estruturas coerentes coloridas pela intensidade do módulo da vorticidade normalizados. Pode-se observar que os níveis mais elevados da vorticidade estão associados

às estruturas localizadas próximo ao bordo da placa, na região da bolha de recirculação.

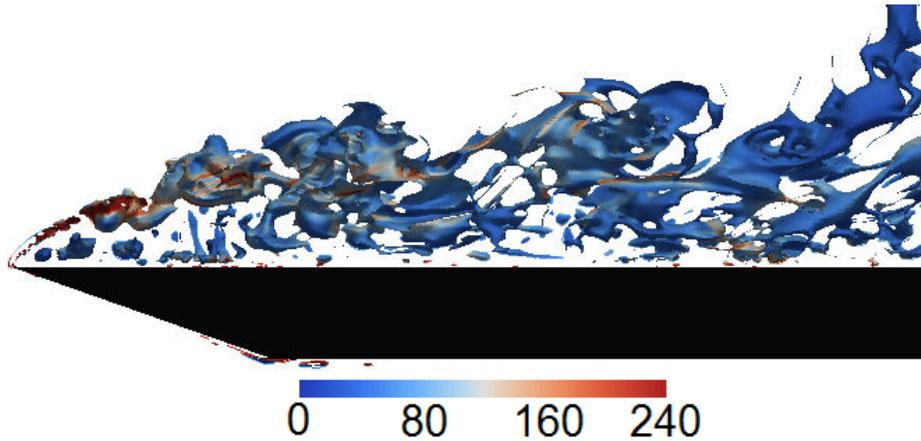


Figura 6.20 – Estruturas coerentes através do critério Q ($Qc/U_\infty = 160$) coloridas pela intensidade da magnitude da vorticidade ($|\omega|c/U_\infty$). $\alpha = 3^\circ$

Os outros dois critérios de avaliação das estruturas coerentes se situam nas regiões que possuem alto módulo de vorticidade e com baixa pressão total. Nas Figuras 6.21 e 6.22 são apresentadas as iso-superfícies relativas a cada um deste critérios.

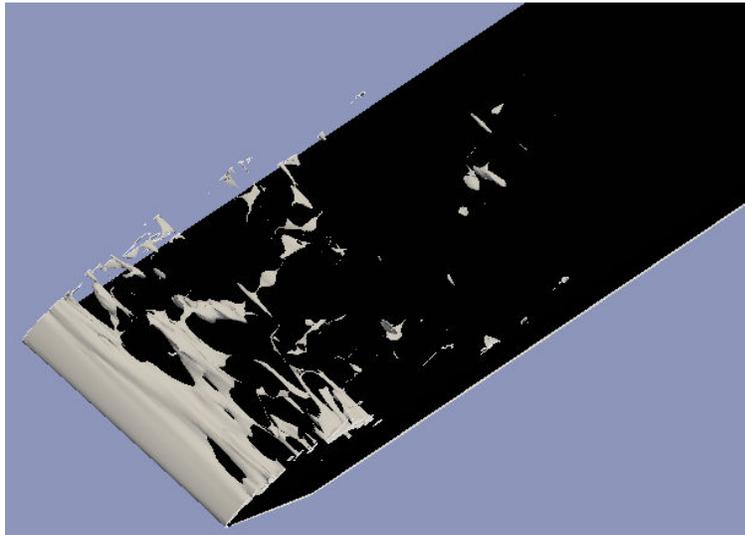


Figura 6.21 – Estruturas coerentes sob o critério da região de alto módulo da vorticidade.

$$\text{Valor normalizado: } |\omega|c/U_\infty = 160. \alpha = 3^\circ$$

Nas duas iso-superfícies há presença do *vortex sheet*, como nos contornos de Q (Figura 6.20). Na Figura 6.22, correspondente a distribuição de isobáricas

observa-se, mais uma vez, a quebra das estruturas retilíneas em outras grandes e largas do tipo Λ vórtices (Lesieur et al., 2005).

Através da comparação desses contornos, verifica-se de forma análoga ao apresentado para $\alpha = 1^\circ$ que a região com *vortex sheet* aumentou, demonstrando maior estabilidade das estruturas coerentes. Isto era esperado, pois os níveis de energia turbulenta nesta região para $\alpha = 1^\circ$ são maiores que para $\alpha = 3^\circ$, favorecendo o *vortex breakdown* mais antecipadamente.

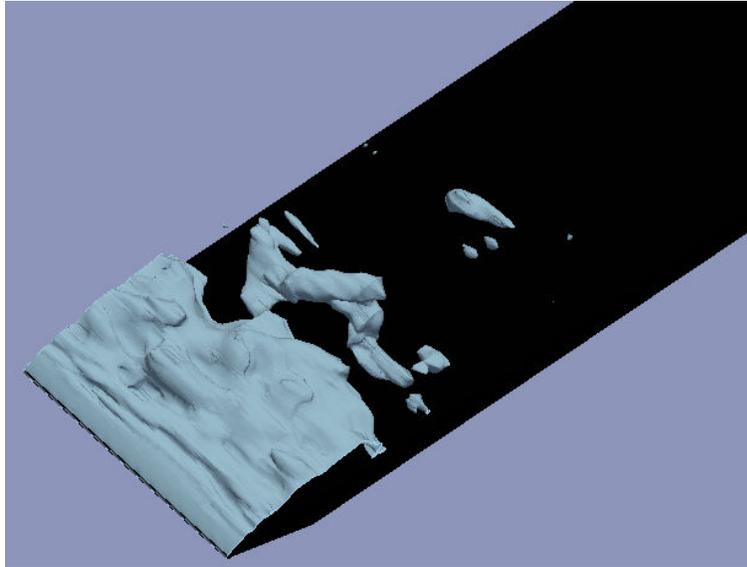


Figura 6.22 – Estruturas coerentes sob o critério da região de baixa pressão total.

$$\text{Valor normalizado: } P/(\rho U_\infty^2) = -0,38. \alpha = 3^\circ$$