

5 Resultados e discussão

Neste capítulo são descritos os resultados das simulações numéricas referentes à entrada *NACA* convencional, ao gerador de vórtices, assim como às diferentes configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre e entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro. Inicialmente são analisados os resultados obtidos para a configuração de entrada *NACA* convencional. São avaliadas as influências da escolha do modelo de turbulência e da pressão estática, imposta na saída do duto, sobre a estrutura do escoamento e sobre os parâmetros de desempenho calculados. Em seguida, os resultados das simulações do gerador de vórtices isolado são analisados. Estes resultados são utilizados para se posicionar o gerador de vórtices em relação à entrada *NACA*. Finalmente, os resultados das diferentes configurações simuladas de *NACA* com gerador de vórtices livre e *NACA* com gerador de vórtices e mastro são apresentados e discutidos. Para as diferentes configurações estudadas é apresentado um estudo da sensibilidade do resultado obtido ao nível de refinamento da malha computacional.

As simulações foram inicializadas a partir das condições de escoamento não perturbado listadas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1. Condições de escoamento não perturbado.

Pressão (p)	(Pa)	72.428
Temperatura (T)	(K)	270,3
Número de Mach (M)	-----	0,31
Viscosidade Turbulenta Modificada ($\tilde{\nu}$)	(m^2/s)	0,001
Intensidade da turbulência (I)	(%)	0,1
Razão de viscosidade turbulenta (μ_t / μ_l)	-----	5

A Tabela 5-2 sumariza os casos simulados correspondentes às diferentes configurações de entrada *NACA* convencional, entrada *NACA* com gerador de vórtices livre e entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro. Nesta tabela, p_s representa a pressão estática imposta na seção de saída do duto da entrada *NACA*, DH é a distância horizontal entre o bordo de fuga do gerador de vórtices e o início da rampa inclinada, α é o ângulo de ataque do gerador de vórtices e β representa o

ângulo de derrapagem do mastro. A área do gerador de vórtices padrão é $A = 2706 \text{ mm}^2$. No tocante aos modelos de turbulência, S-A, $k-\varepsilon$ RSWF e $k-\varepsilon$ RNEWF indicam, respectivamente, o modelo de Spalart-Allmaras, o modelo $k-\varepsilon$ realizável com funções de parede “padrão” (*standard wall functions*) e o modelo $k-\varepsilon$ realizável com funções de parede “não-equilíbrio” (*non-equilibrium wall functions*). Por simplicidade, os resultados que serão mostrados neste capítulo serão referenciados a seus respectivos códigos indicados na Tabela 5-2. As razões que levaram a estas variações paramétricas serão detalhadas oportunamente.

Tabela 5-2. Sumário dos casos e configurações estudadas.

Caso	Modelo de Turbulência	ρ_s (Pa)	Refinamento adaptativo	DH (mm)	α (°)	Área do GV	β (°)
N1A-1	S-A	71.200	----	----	----	----	----
N1A-2	S-A	69.750	----	----	----	----	----
N1B	S-A	71.200	Gradientes de velocidade eixo x	----	----	----	----
N1C	S-A	71.200	Gradientes de pressão estática	----	----	----	----
N2A	$k-\varepsilon$ RSWF	71.200	----	----	----	----	----
N2B-1	$k-\varepsilon$ RNEWF	71.200	----	----	----	----	----
N2B-2	$k-\varepsilon$ RNEWF	69.750	----	----	----	----	----
NGVA	S-A	71.200	----	700	15	A	----
NGVA-1	S-A	71.200	Gradientes de vorticidade, eixos x e z	700	15	A	----
NGVB	S-A	71.200	----	500	15	A	----
NGVC	S-A	71.200	----	300	15	A	----
NGVA-25	S-A	71.200	----	700	25	A	----
NGVA-35	S-A	71.200	----	700	35	A	----
NGVA-1,5A	S-A	71.200	----	700	15	1,5A	----
NGVA-2,0A	S-A	71.200	----	700	15	2,0A	----
NGVAM-0	S-A	71.200	----	700	15	A	0
NGVAM-5	S-A	71.200	----	700	15	A	5
NGVAM-10	S-A	71.200	----	700	15	A	10

No que se refere ao critério de convergência dos casos simulados neste trabalho, é importante ressaltar que em todos os cálculos realizados esperou-se a completa estabilização dos resíduos de todas as variáveis antes de interromper-se a execução do programa de cálculo. Os níveis dos resíduos de todas as variáveis após a estabilização foram da ordem de 10^{-4} ou menores, exceto para o caso da conservação de massa, no qual os resíduos foram, aproximadamente, da ordem de 10^{-2} . O número aproximado de iterações necessário para atingir a estabilização dos resíduos foi de 6.000, 10.000 e 25.000 para as configurações de entrada *NACA*

convencional, entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, e entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, respectivamente. As curvas de convergência de todos os casos estudados neste trabalho são apresentadas no Apêndice A.

5.1

Entrada *NACA* convencional

Os resultados referentes à entrada *NACA* convencional são apresentados nesta seção. Inicialmente, a estrutura do escoamento na entrada *NACA* convencional é detalhada. São analisadas as influências da escolha do modelo de turbulência, do valor da pressão estática na saída do duto e do nível de refinamento da malha computacional sobre a camada limite que se desenvolve a montante da entrada *NACA*, seus parâmetros de desempenho e a estrutura do escoamento resultante.

5.1.1

Estrutura do escoamento

A estrutura do escoamento correspondente à entrada *NACA* convencional é apresentada nesta seção. A descrição é feita para o caso N1A-1 a partir do comportamento observado das linhas de corrente, da velocidade e da vorticidade, e da distribuição do coeficiente de pressão na entrada *NACA*.

Linhas de corrente coloridas pela componente longitudinal da velocidade são mostradas na Figura 5-1, e com um maior detalhe na Figura 5-2, para a entrada *NACA* convencional, caso N1A-1. Estas linhas de corrente correspondem a partículas de fluido que poderiam intersectar a seção reta do duto de saída da entrada *NACA*. O movimento rotacional do fluido causado pela parede lateral da entrada pode ser claramente visto nestas figuras. Outro aspecto importante que é possível distinguir nestas figuras diz respeito à velocidade das partículas de fluido que ingressam na entrada *NACA*. Lembrando que a velocidade do escoamento não perturbado é igual a 102 m/s, pode ser claramente visto na Figura 5-1 e na Figura 5-2 que as partículas de fluido que ingressam na entrada *NACA* convencional provém principalmente da camada limite. Estas figuras também permitem verificar que a velocidade do escoamento diminui na parte final da rampa da entrada, para em seguida aumentar uma vez que o ar ingressa no duto. Como será

visto mais adiante, estas mudanças de velocidade do escoamento estão relacionadas às variações da pressão na entrada de ar.

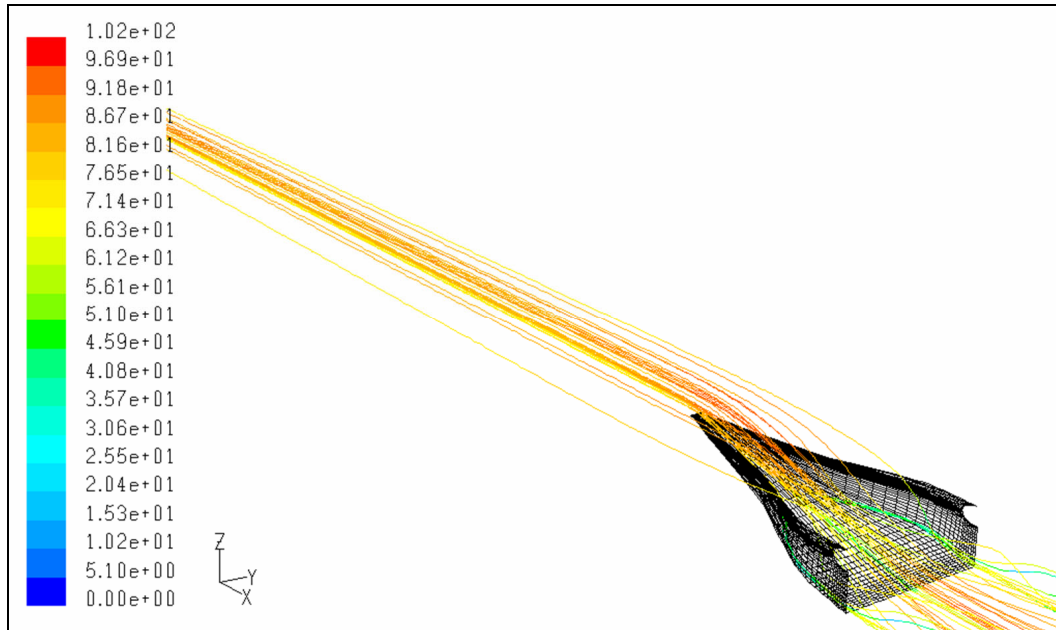


Figura 5-1. Linhas de corrente coloridas pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1.

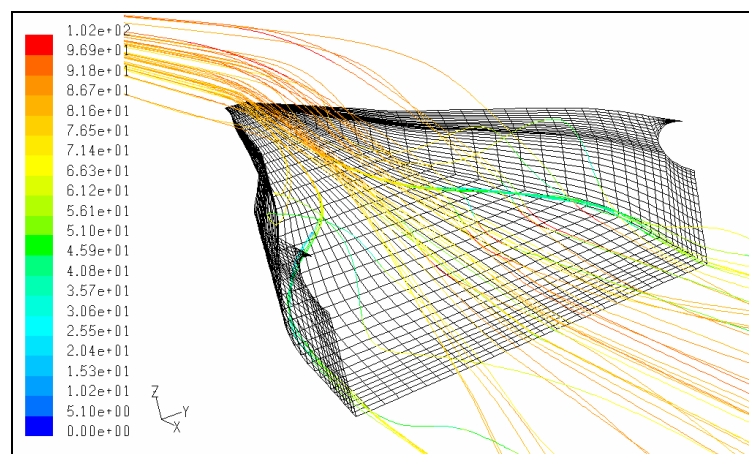


Figura 5-2. Detalhe da Figura 5 1 – Caso N1A-1.

A Figura 5-3 mostra os contornos da componente longitudinal da velocidade, a qual é coincidente com a direção do escoamento não perturbado, em planos transversais à direção do escoamento externo, espaçados 0,1m entre si, para o caso da entrada *NACA* convencional, caso N1A-1. A importância de se examinar o desenvolvimento da camada limite a montante da entrada *NACA*, fundamenta-se no fato de que a espessura da camada limite é um parâmetro determinante na eficiência deste tipo de entrada. Quanto maior a espessura da

camada limite, menor a eficiência da entrada de ar. Esta figura permite verificar que a altura da garganta da entrada *NACA*, 30 mm, e a espessura da camada limite no início da rampa inclinada, 50 mm, são da mesma ordem de grandeza. Isto pode ser verificado com maior detalhe na Figura 5-4, na qual são mostrados os contornos da velocidade no plano de simetria na entrada *NACA*.

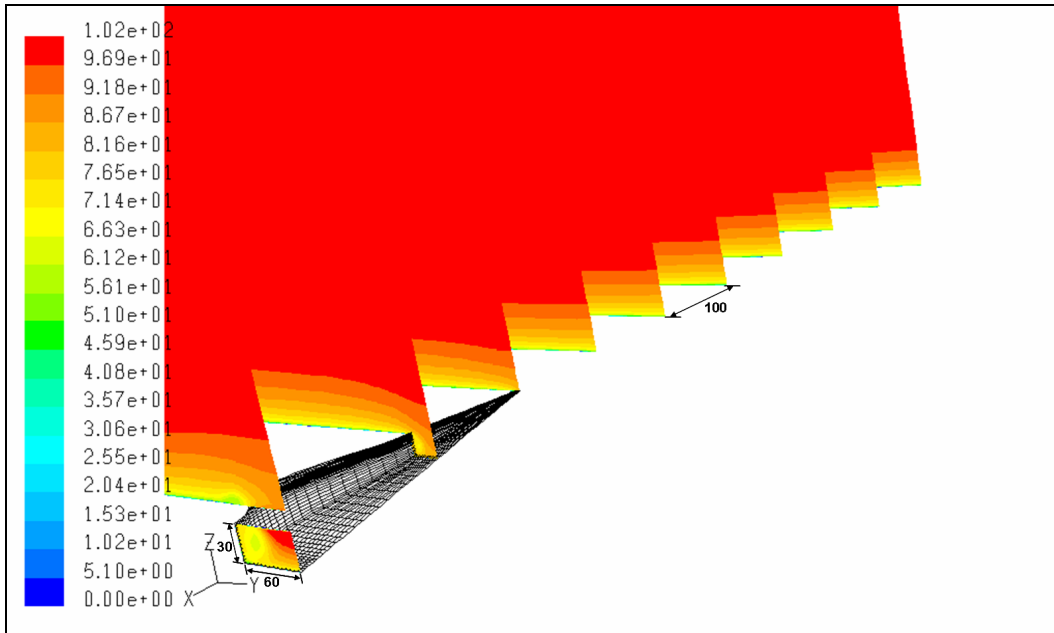


Figura 5-3. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1 (dimensões em mm).

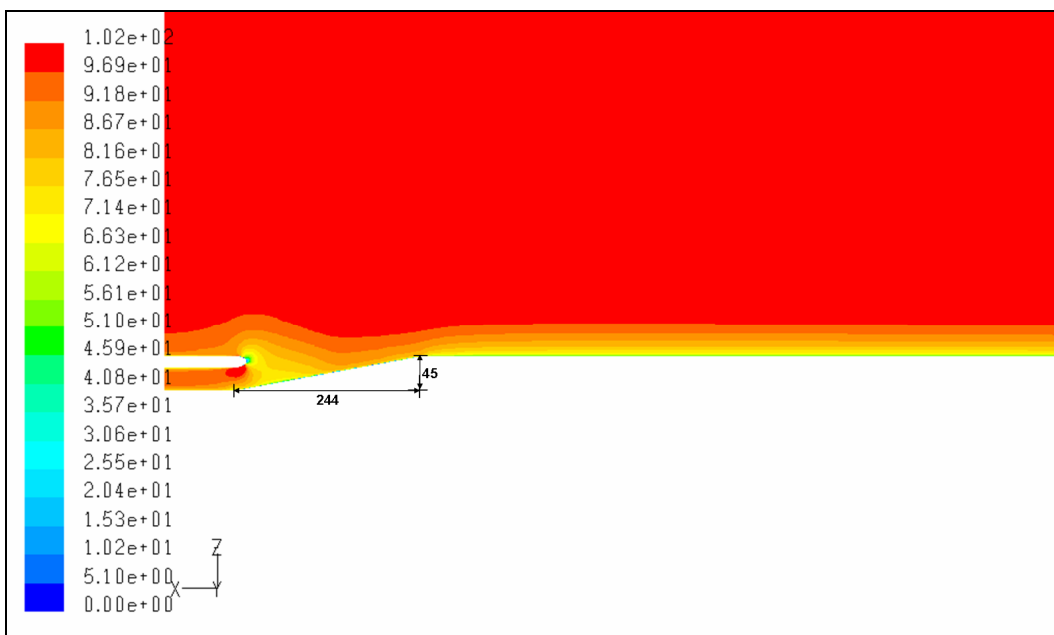


Figura 5-4. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso N1A-1, plano de simetria (dimensões em mm).

A Figura 5-5 mostra a evolução do componente longitudinal da vorticidade para o caso da entrada *NACA* convencional, nos mesmos planos transversais à direção do escoamento externo. Nesta figura é possível observar claramente os altos níveis de vorticidade originados nas regiões próximas às paredes laterais da rampa da entrada *NACA*. Note-se que o funcionamento deste tipo de entrada de ar baseia-se na geração de vórtices nas paredes da rampa, como consequência da sua geometria particular. Consequentemente o escoamento na garganta da entrada *NACA* é fortemente tridimensional e, possivelmente, anisotrópico, no que diz respeito à estrutura da turbulência.

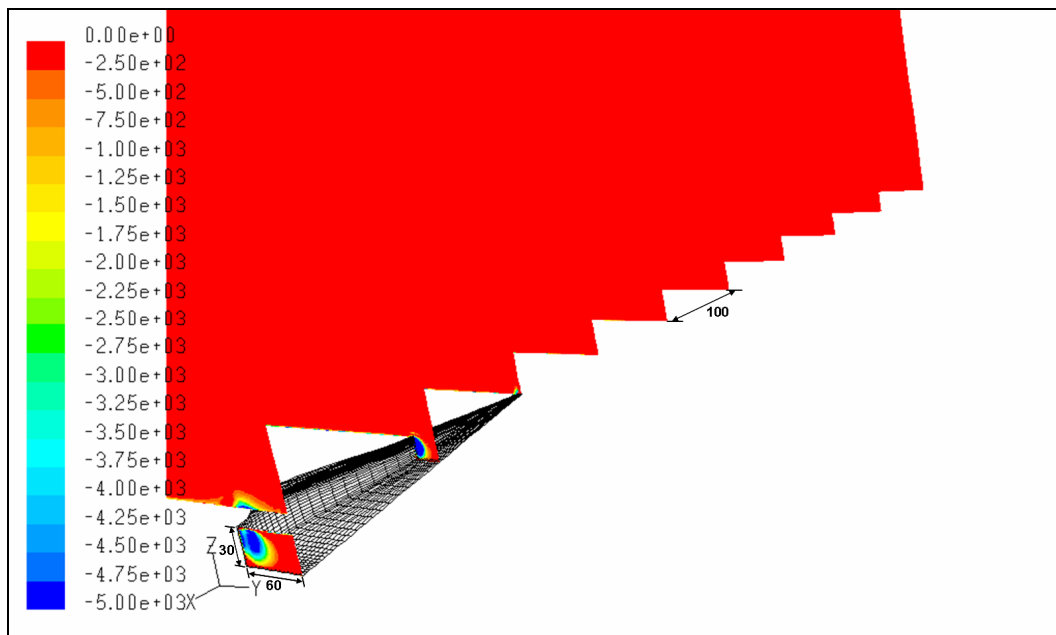


Figura 5-5. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso N1A-1 (dimensões em mm).

O comportamento do coeficiente de pressão ao longo o plano de simetria da entrada *NACA* convencional é mostrado na Figura 5-6. Nesta figura é possível verificar que a presença da entrada *NACA* dá origem a gradientes de pressão consideráveis na sua vizinhança. Também, pode-se notar nesta figura que os maiores gradientes de pressão ocorrem no bordo de ataque da entrada onde existe uma região de estagnação.

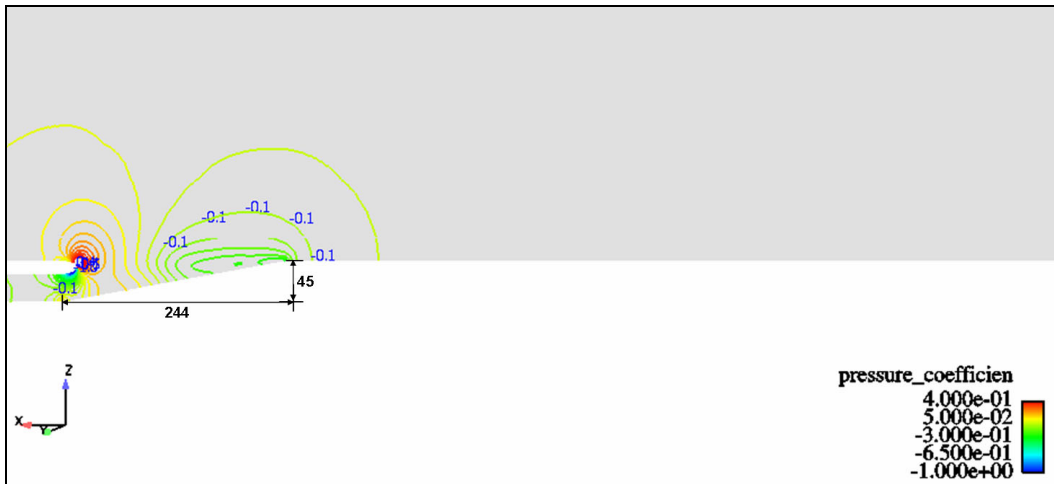


Figura 5-6. Coeficiente de pressão, C_p - Caso N1A-1, plano de simetria (dimensões em mm).

A distorção do escoamento na garganta da entrada de ar também pode ser apreciada examinando-se a distribuição do coeficiente de pressão, a qual é mostrada na Figura 5-7. Esta figura mostra claramente que o coeficiente de pressão aumenta em concordância com a diminuição da velocidade, o que é esperado.

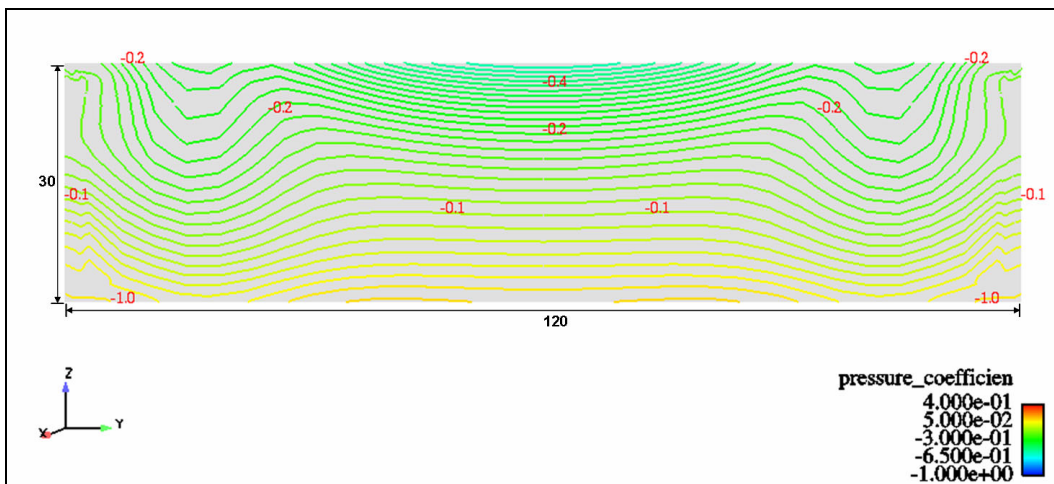


Figura 5-7. Coeficiente de pressão, C_p - Caso N1A-1, plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

5.1.2

Influência do modelo de turbulência sobre a camada limite

O principal modelo de turbulência utilizado no presente trabalho é o modelo de Spalart-Allmaras. Porém, uma vez que não se dispõe de resultados

experimentais detalhados para fins de validação deste estudo numérico, foi avaliada a sensibilidade dos resultados obtidos à escolha do modelo de turbulência. Esta sensibilidade foi avaliada a partir da influência sobre a estrutura do escoamento e sobre os valores calculados dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA* da escolha do modelo de turbulência. As diferenças encontradas podem ser atribuídas seja às hipóteses a partir das quais cada modelo de turbulência foi desenvolvido, seja à forma particular de implementação do modelo no *Fluent*, o que, evidentemente, é uma restrição que “a priori” não pode ser eliminada. Em relação ao primeiro ponto, a forma como cada modelo de turbulência responde à presença de gradientes de pressão e o tratamento que cada modelo utiliza para a região de parede são possivelmente as diferenças mais significativas a serem levadas em conta.

O comportamento do escoamento na região da parede foi investigado usando a representação clássica interna da velocidade na camada limite, $u^+(y^+)$.^{28,29} Foram comparados os diferentes modelos de turbulência testados, i.e., o modelo de turbulência Spalart-Allmaras, o modelo $k-\varepsilon$ realizável com funções de parede “padrão”, e o modelo $k-\varepsilon$ realizável com funções de parede “não-equilíbrio”, os quais, segundo a Tabela 5-2, correspondem aos casos N1A-1, N2A e N2B-1, respectivamente. Esta análise foi feita em duas posições a montante da entrada *NACA*. A primeira situa-se a 1m a montante do início da rampa inclinada e a segunda exatamente no início da rampa inclinada da entrada *NACA*.

A fim de analisar a estrutura do escoamento na região da parede e as condições de similaridade do escoamento, a evolução da camada limite 1m a montante da entrada *NACA* foi investigada. Nesta posição, situada a 4m a jusante do bordo de ataque da placa plana, espera-se que o escoamento possua um comportamento auto-similar, uma vez que a influência da presença da entrada *NACA* não é sentida.

A Figura 5-8 mostra a evolução da velocidade adimensional com a coordenada normal à placa plana, u^+ vs. y^+ , para os casos N1A-1, N2A e N2B-1. Nestas figuras também são mostradas as evoluções segundo as leis da parede clássicas e de van Driest para camadas limites. Esta figura mostra claramente que (i) o comportamento logarítmico é observado para valores de y^+ maiores que 60 aproximadamente e (ii) as simulações usando o modelo de turbulência Spalart-Allmaras reproduzem corretamente as leis de parede clássicas. Isto é esperado,

uma vez que estas leis são incluídas de forma explícita quando da derivação deste modelo. Por sua vez, o modelo $k-\varepsilon$ *realizável*, tanto com funções de parede “padrão” como com funções “não-equilíbrio”, apresenta uma discrepância em relação ao modelo Spalart-Allmaras, em particular no que diz respeito ao déficit de velocidade.

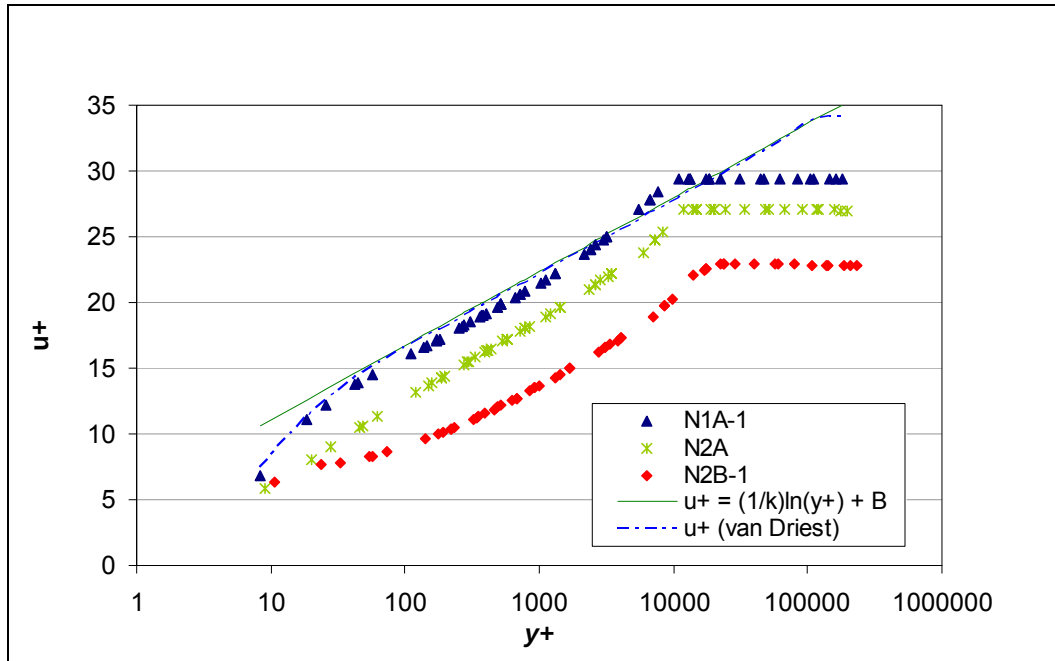


Figura 5-8. Evolução da camada limite - 1m a montante do início da rampa inclinada, coordenadas internas.

Cada um dos modelos utilizados leva a diferentes valores do déficit da quantidade de movimento, característico da camada limite, como pode ser constatado na Figura 5-9, onde a evolução transversal da velocidade longitudinal é mostrada em coordenadas dimensionais. Esta figura mostra que o modelo de Spalart-Allmaras leva a um menor déficit de quantidade de movimento, enquanto que o modelo $k-\varepsilon$ *realizável* com funções de parede “não-equilíbrio” resulta no maior déficit de quantidade de movimento. É de se esperar que esta discrepância influencie os valores calculados dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

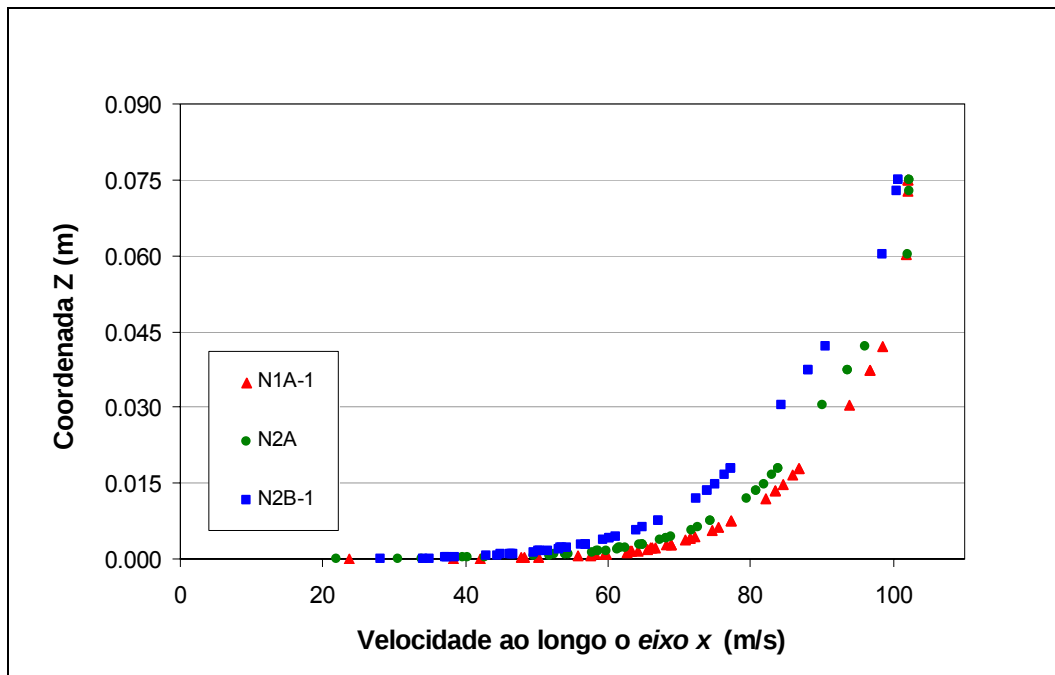


Figura 5-9. Evolução da componente longitudinal da velocidade na camada limite - 1m a montante do início da rampa inclinada.

Se a camada limite 1m a montante da entrada, onde o efeito do gradiente de pressão não é importante, segue um comportamento logarítmico, um importante afastamento da condição de similaridade é observado no início da rampa inclinada. Isto pode ser verificado na Figura 5-10, aonde é mostrada a evolução da velocidade com distância normal à placa plana em coordenadas internas, para os casos N1A-1, N2A e N2B-1. Esta figura mostra que os três modelos de turbulência utilizados apresentam discrepâncias significativas em relação ao comportamento clássico. Esta discrepância é atribuída principalmente ao efeito do gradiente de pressão sobre a camada limite, o qual é importante nesta região, conforme o mostrado na Figura 5-6. Note-se que os resultados obtidos com os modelos de Spalart-Allmaras e o modelo *k-ε realizável* com funções de parede “padrão” são bastante semelhantes, em particular na região externa da camada limite.

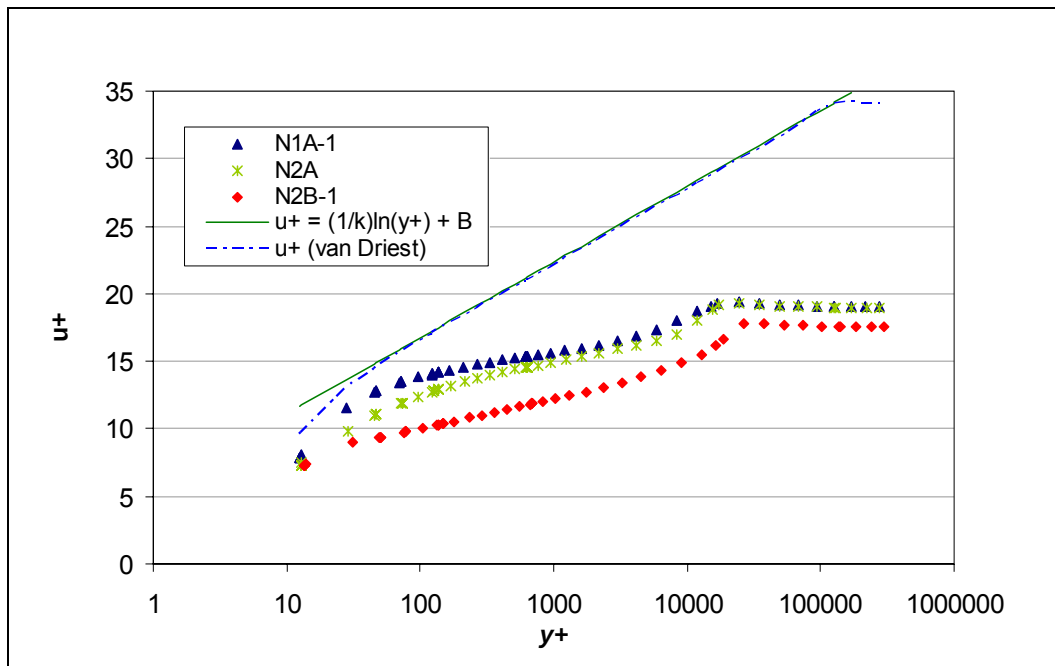


Figura 5-10. Evolução da camada limite - Início da rampa inclinada, coordenadas internas.

A evolução transversal da componente longitudinal da velocidade é mostrada na Figura 5-11 no início da rampa inclinada. Esta figura mostra que é mantida a hierarquia dos modelos de turbulência no tocante ao déficit da quantidade de movimento, já observada na Figura 5-9. Porém, o modelo $k-\varepsilon$ realizável com funções de parede “não-equilíbrio” é mais sensível ao gradiente de pressão favorável presente a montante da entrada de ar (Figura 5-6), o que se manifesta por um importante aumento da velocidade na camada limite. As causas exatas desta sensibilidade, que pode ser atribuída à capacidade da função de parede “não-equilíbrio” de levar em conta os efeitos do gradiente de pressão, não foram investigadas.

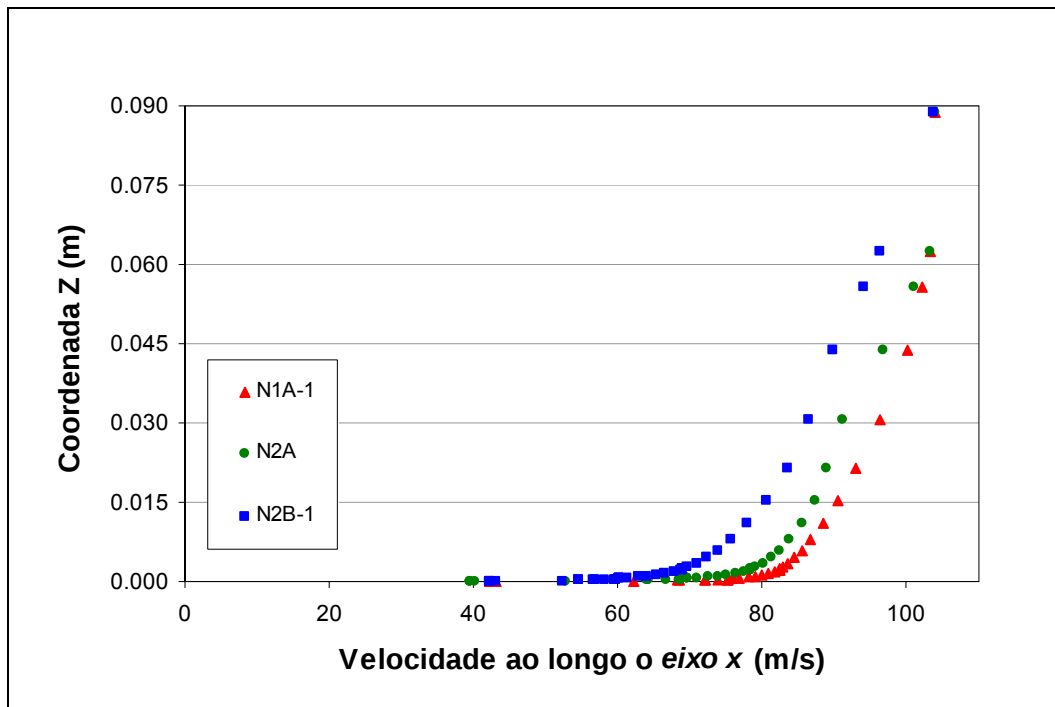


Figura 5-11. Evolução da componente longitudinal da velocidade na camada limite - Início da rampa inclinada.

Uma vez que o modelo de Spalart-Allmaras leva a um menor déficit da quantidade de movimento na camada limite, é de se esperar que o valor da eficiência de recuperação de pressão dinâmica da entrada *NACA* calculada com este modelo seja superior à obtida com os demais modelos.

Este último aspecto pode ser melhor compreendido observando-se os valores dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*, mostrados na Tabela 5-3. Nesta tabela o cálculo do arrasto de pressão da entrada *NACA* foi realizado seguindo a metodologia indicada pelo ESDU 86002.¹⁸ O arrasto viscoso foi calculado como a integral da tensão de cisalhamento da entrada *NACA*, para o qual não foi considerada nem a placa plana nem o duto de saída da entrada *NACA*. Assim, o coeficiente de arrasto total é calculado como a razão entre o arrasto total e o produto entre a pressão dinâmica do escoamento não perturbado e a área da garganta da entrada *NACA*. A vazão mássica foi diretamente obtida do *Fluent* por integração na seção de saída do duto. Os outros parâmetros que aparecem na Tabela 5-5 foram calculados segundo as equações indicadas na seção 2.4.

As comparações dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA* para os diferentes modelos de turbulência, mostrados na Tabela 5-3, mostram que o uso do modelo Spalart-Allmaras leva aos melhores resultados, em termos de vazão

mássica e eficiência de recuperação de pressão dinâmica. Isto pode ser compreendido à luz dos resultados mostrados na Figura 5-9 e na Figura 5-11. O uso do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ *realizável*, seja com funções de parede “padrão” ou “não-equilíbrio”, resulta em camadas limites mais espessas quando comparadas à camada limite originada pelo uso do modelo Spalart-Allmaras. Esta maior espessura da camada limite leva, naturalmente, a menores valores de vazão mássica e eficiência de recuperação de pressão dinâmica.

Tabela 5-3. Parâmetros de desempenho – Influência da escolha do modelo de turbulência.

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	N2B-1	N2A
Eficiência	0,600	0,513	0,340	0,439
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,211	0,241
Razão de vazões mássicas	----	0,76	0,62	0,70
Arrasto total - (N)	----	18,54	13,48	16,78
Arrasto de pressão - (N)	----	18,07	12,75	16,13
NACA	----	18,07	12,75	16,13
GV	----	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	----	0,47	0,73	0,65
NACA	----	0,47	0,73	0,65
GV	----	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de arrasto	0,85	1,06	0,77	0,96

É importante salientar, também, que uma decisão bem fundamentada de que modelo de turbulência é mais adequado para simular o escoamento na entrada *NACA*, só pode ser tomada a partir de comparações com resultados experimentais, os quais não estão disponíveis. Considerando que (i) o modelo Spalart-Allmaras levou aos melhores resultados, em termos de vazão mássica e eficiência de recuperação de pressão dinâmica, como pode ser verificado Tabela 5-3, e (ii) este modelo foi especificamente desenvolvido para aplicações aerodinâmicas, decidiu-se usar somente este modelo nas demais simulações apresentadas neste trabalho. Portanto, todos os resultados que serão mostrados referentes ao gerador de vórtices isolado, e às diferentes configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre e à entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, correspondem a simulações realizadas usando, como modelo de turbulência, o modelo de Spalart-Allmaras.

5.1.3

Influência da pressão estática na saída do duto

Nesta seção é apresentado o resultado de uma análise da influência do valor prescrito de pressão estática na saída do duto da entrada *NACA* sobre a camada limite que se desenvolve a montante da entrada *NACA*. Para uma dada configuração de entrada de ar e uma condição de operação da aeronave, este valor é um “parâmetro livre” que pode influenciar o resultado obtido. São considerados dois modelos de turbulência, o modelo Spalart-Allmaras (casos N1A-1 e N1A-2), e o modelo *k-ε realizável* com funções de parede “não-equilíbrio” (casos N2B-1 e N2B-2). Os valores de pressão estática na saída do duto foram escolhidos de forma a permitir que a vazão mássica de projeto da entrada *NACA* seja obtida para cada modelo de turbulência. Estes valores são 71.200 Pa para o modelo Spalart-Allmaras, e 69.750 Pa para o modelo *k-ε realizável* com funções de parede “não-equilíbrio”. Para fins de avaliação, foram utilizadas as mesmas posições longitudinais consideradas anteriormente, i.e., 1m do início da rampa inclinada, e no início da rampa inclinada da entrada *NACA*.

A Figura 5-12 e a Figura 5-13 mostram a evolução da velocidade adimensional com a coordenada interna normal à placa plana, para os casos N1A-1, N1A-2, N2B-1 e N2B-2. Estas figuras correspondem, respectivamente, à posição 1m a montante do início e ao início da rampa inclinada da entrada *NACA*. Nestas figuras pode ser observado que as variações de pressão estática na saída do duto, tanto quando se usa o modelo Spalart-Allmaras, como o modelo *k-ε realizável*, praticamente não influenciam a evolução da camada limite, pelo menos para a variação de cerca de 2% do valor de p_s adotada. A influência da variação da pressão estática na saída do duto é negligenciável quando comparada àquela que resulta da escolha de diferentes modelos de turbulência.

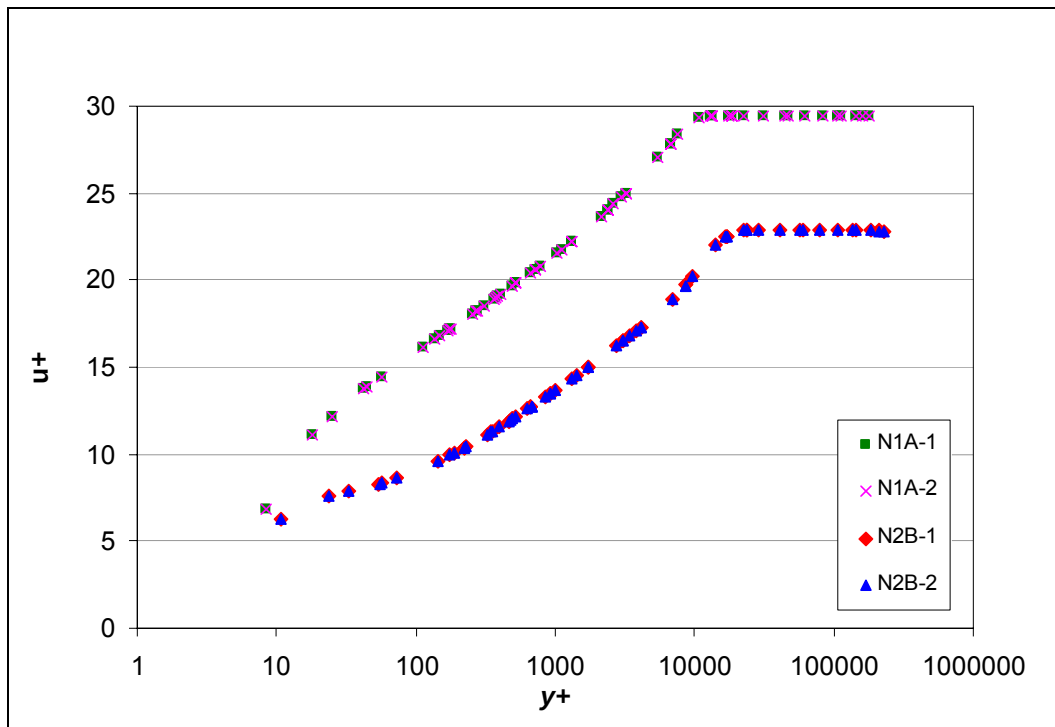


Figura 5-12. Evolução da camada limite - 1m a montante do início da rampa inclinada, coordenadas internas.

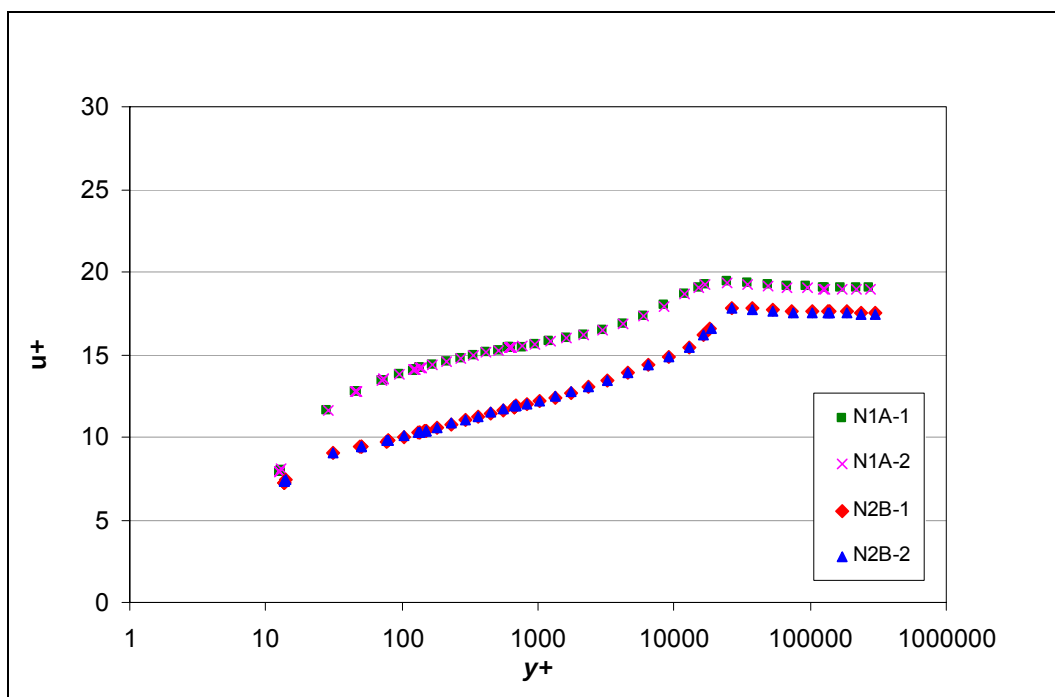


Figura 5-13. Evolução da camada limite - Início da rampa inclinada, coordenadas internas.

Esta pequena influência da pressão estática na saída do duto sobre a evolução da velocidade, observada na Figura 5-12 e na Figura 5-13, é refletida no

valor da eficiência da entrada *NACA*, a qual é mostrada na Tabela 5-4. Nesta tabela é possível verificar que a variação do valor da pressão estática na saída do duto da entrada *NACA* origina variações da ordem de 1% nos valores calculados da eficiência de recuperação de pressão dinâmica da entrada *NACA*. Por outro lado, a vazão mássica apresenta uma maior sensibilidade à escolha da pressão estática; variações de até 24% foram obtidas.

Tabela 5-4. Parâmetros de desempenho – Influência da pressão estática na saída do duto.

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	N2B-1	N1A-2	N2B-2
Eficiência	0,600	0,513	0,340	0,509	0,336
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,211	0,304	0,260
Razão de vazões mássicas	----	0,76	0,62	0,89	0,76
Arrasto total - (N)	----	18,54	13,48	21,84	16,65
Arrasto de pressão - (N)	----	18,07	12,75	21,32	15,81
NACA	----	18,07	12,75	21,32	15,81
GV	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	----	0,47	0,73	0,53	0,84
NACA	----	0,47	0,73	0,53	0,84
GV	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Coefficiente de arrasto	0,85	1,06	0,77	1,25	0,95

Os demais resultados apresentados neste trabalho foram obtidos para um valor da pressão estática na seção de saída do duto da entrada, p_s , igual a 71.200 Pa, pois este valor é o valor que permite obter a vazão nominal de projeto através da entrada de ar, quando o modelo de turbulência de Spalart-Allmaras é utilizado.

5.1.4

Influência do nível de refinamento da malha computacional utilizada

Nesta seção será descrita a influência do nível de refinamento da malha computacional sobre os parâmetros de desempenho calculados da entrada *NACA* convencional.

Primeiramente, foi estudada a influência do nível de refinamento da malha computacional sobre os resultados obtidos. Para isto, a malha foi refinada usando um dos procedimentos de refinamento adaptativo disponíveis no *Fluent*. O procedimento de refinamento adaptativo utilizado baseia-se no uso de uma função de adaptação por gradientes, a qual é definida como sendo função do volume dos

elementos e do laplaciano não dividido da variável solução selecionada. Através do uso desta função de adaptação por gradientes assume-se que os maiores erros numéricos ocorrem nas regiões que apresentam os maiores gradientes. Estes processos de refinamento adaptativo utilizados requerem (i) a escolha de uma medida do erro da solução numérica, i.e., a variável solução a partir da qual a função de adaptação por gradientes será construída, e (ii) para a medida escolhida, o limiar da função de adaptação a partir do qual a malha será refinada por subdivisão de seus elementos. As medidas de erro escolhidas neste trabalho são mostradas na Tabela 5-2. Assim, o primeiro refinamento adaptativo foi realizado tendo como medida de erro o valor do componente longitudinal da velocidade, i.e., velocidade ao longo o *eixo x*, caso N1B. Neste caso, o limiar de refinamento da função de adaptação foi especificado como sendo igual a 5, i.e., elementos com valores da função de adaptação maiores do que este valor são refinados. O segundo processo de refinamento adaptativo considerou a pressão estática, caso N1C, sendo que o limiar de refinamento é igual a 10. Note-se que não foram feitas modificações destes limiares de refinamento a fim de avaliar sua influência sobre os resultados obtidos.

O número de elementos da malha após o refinamento adaptativo baseado na componente longitudinal da velocidade é de aproximadamente 998.000 elementos, e de 770.000 elementos após do refinamento adaptativo baseado na pressão estática. A Figura 5-14, a Figura 5-15 e a Figura 5-16 mostram a malha, no plano de simetria da entrada *NACA*, para os três casos, isto é, para o caso sem nenhum refinamento, caso N1A-1, e para os dois casos com refinamento adaptativo, casos N1B e N1C.

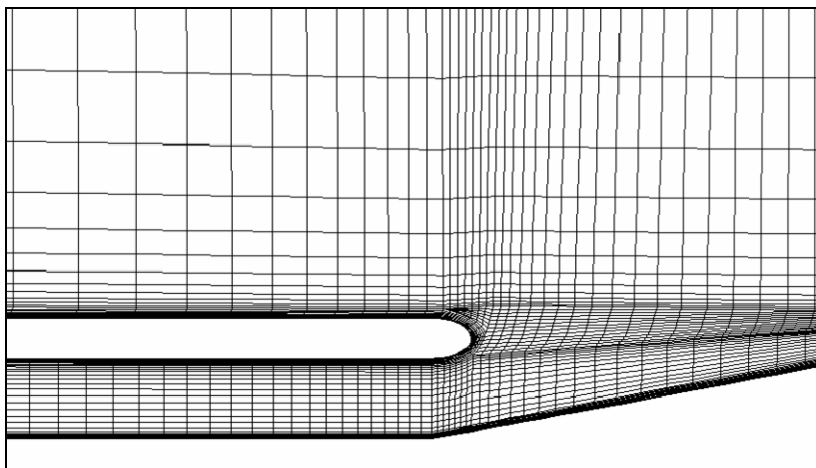


Figura 5-14. Malha no plano de simetria – Caso N1A-1

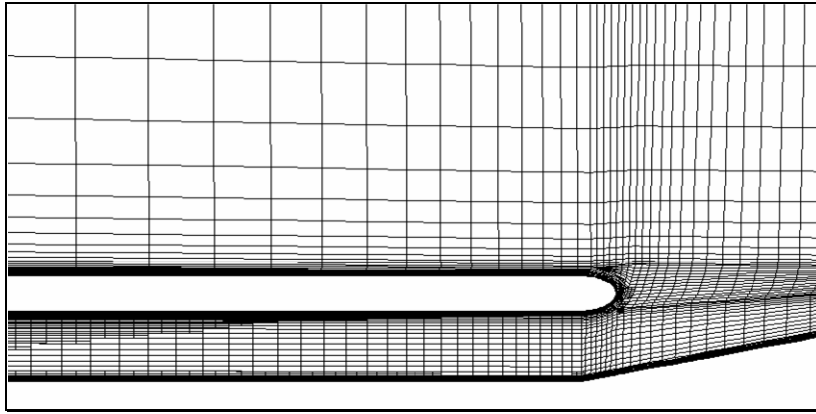


Figura 5-15. Malha no plano de simetria – Caso N1B.

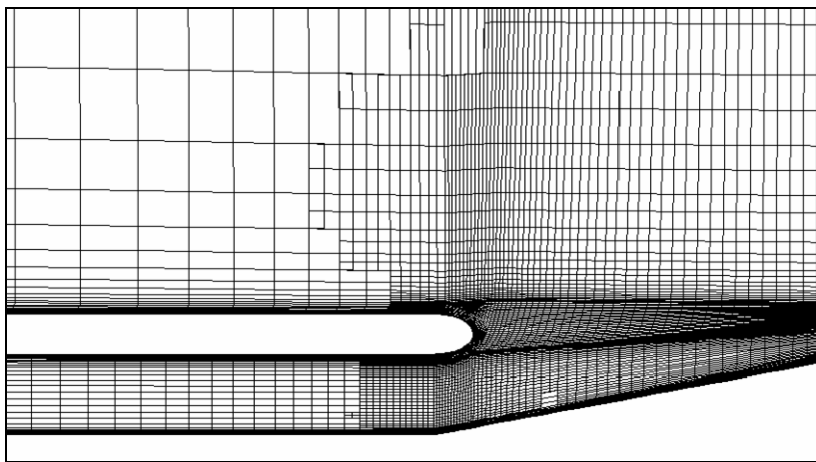


Figura 5-16. Malha no plano de simetria – Caso N1C.

Comparando-se a Figura 5-14 com a Figura 5-15 é possível verificar que o número de elementos da malha aumenta, conforme esperado, nas regiões próximas às paredes sólidas, em particular no duto da entrada *NACA*. Uma situação similar pode ser observada na Figura 5-16, com a diferença que o refinamento ocorre nas regiões onde a pressão varia rapidamente, i.e., no bordo de ataque e na rampa inclinada da entrada *NACA*.

Com o objetivo de analisar a influência do nível de refinamento da malha computacional sobre a distribuição do coeficiente de pressão na entrada *NACA*, a Figura 5-17 e a Figura 5-18 mostram a distribuição do coeficiente de pressão, C_p , no plano da garganta da entrada *NACA*, para os dois casos com refinamento adaptativo, casos N1B e N1C.

Comparando-se estas figuras com a Figura 5-7, correspondente à distribuição do coeficiente de pressão no plano da garganta da entrada *NACA* convencional sem refinamento de malha, é possível notar que a malha original

leva a uma representação adequada do escoamento. Como pode ser visto na Figura 5-18, a malha refinada baseada na pressão estática é aquela cujos resultados obtidos são apenas ligeiramente diferentes dos originais, podendo ser observada uma melhor definição dos contornos de C_p na região central próxima à parede lateral da garganta da entrada.

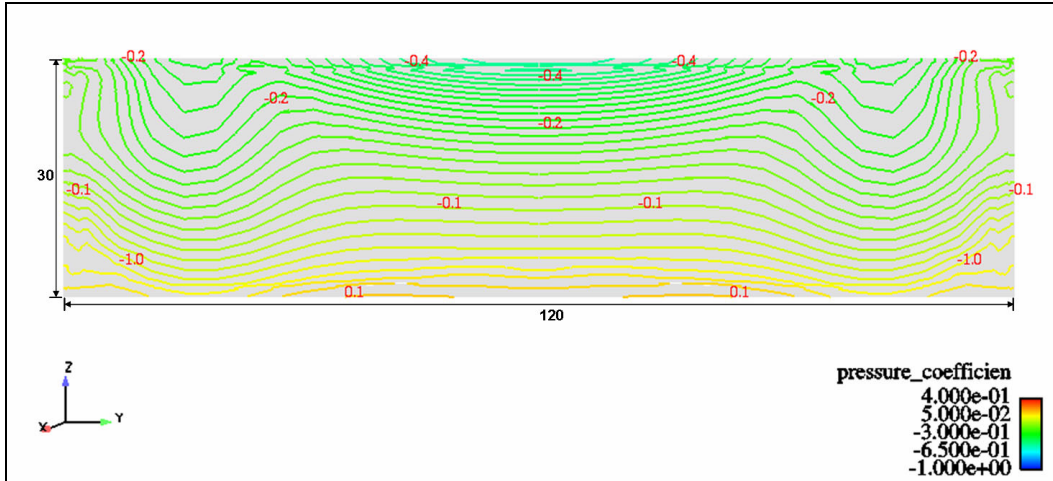


Figura 5-17. Coeficiente de pressão, C_p – Caso N1B, Plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

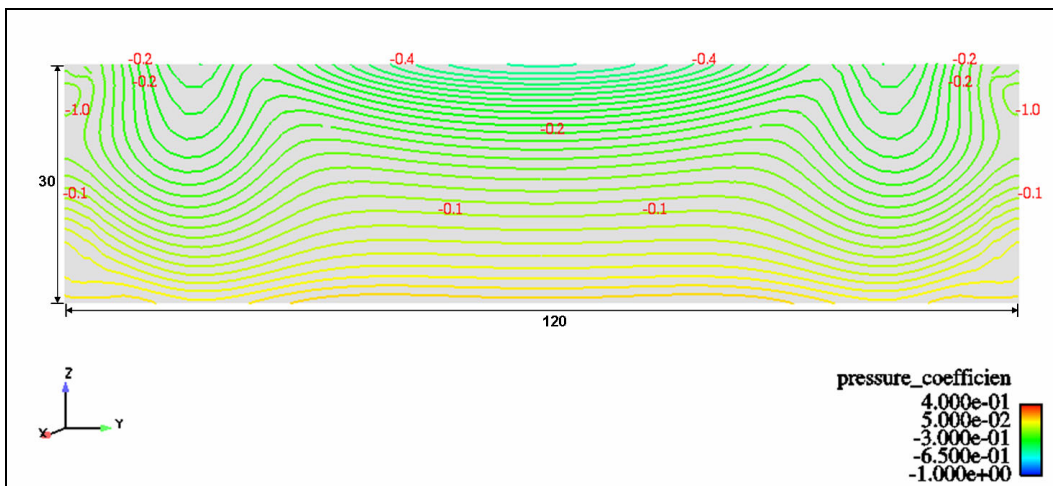
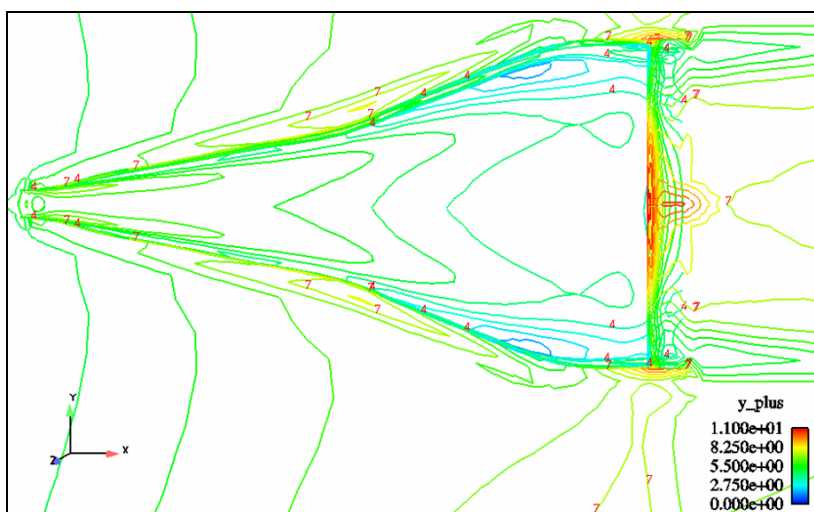
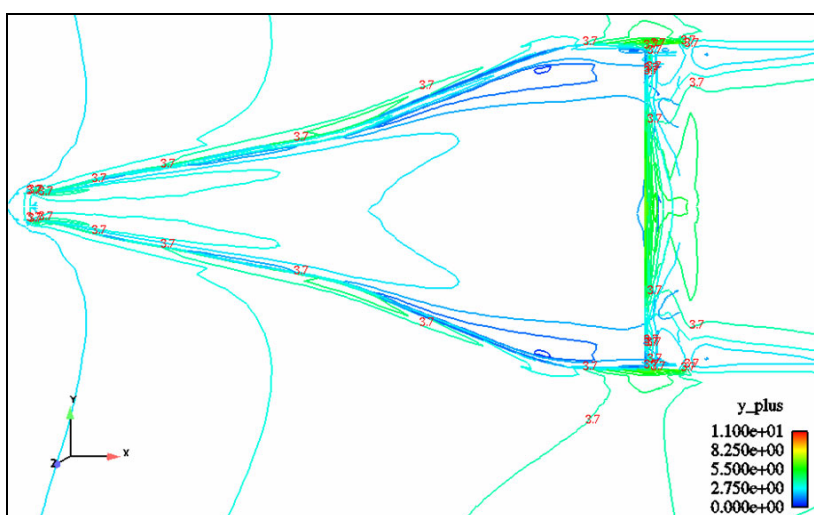
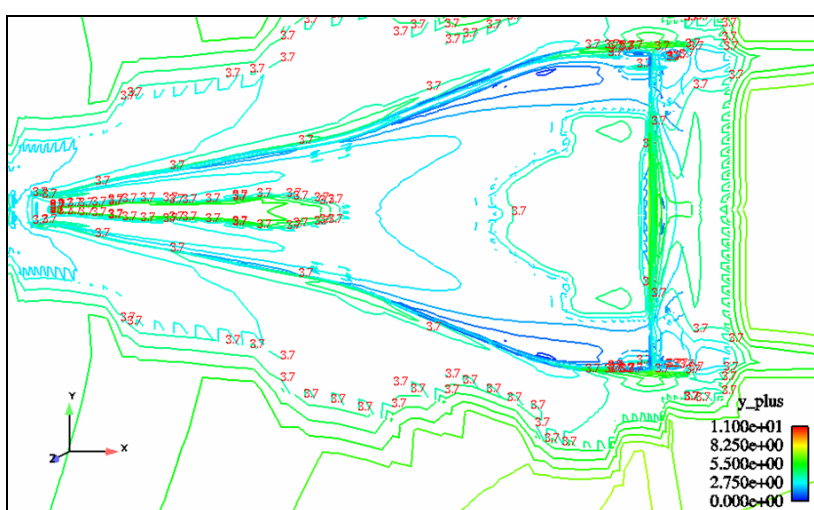


Figura 5-18. Coeficiente de pressão, C_p – Caso N1C, Plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

A fim de se avaliar a qualidade da malha nas regiões próximas às paredes, valores de y^+ nas paredes laterais e no chão da rampa inclinada, placa plana e bordo de ataque da entrada NACA, são mostrados na Figura 5-19, na Figura 5-20 e na Figura 5-21 para os três casos analisados, i.e., N1A-1, N1B e N1C.

Figura 5-19. Valor de y^+ - Caso N1A-1.Figura 5-20. Valor de y^+ - Caso N1B.Figura 5-21. Valor de y^+ - Caso N1C.

Estas figuras mostram que os processos de refinamento adaptativo levam a importantes modificações da distribuição de y^+ , em contraste com os resultados obtidos para o coeficiente de pressão. Estas modificações podem ser atribuídas à grande quantidade de volumes computacionais presentes nas regiões onde existem os maiores gradientes de pressão e velocidade. Quando comparado ao processo de adaptação baseado na pressão, o processo de refinamento adaptativo baseado na componente longitudinal da velocidade leva a uma distribuição mais suave de y^+ , o que é esperado, uma vez que o valor de y^+ está relacionado aos gradientes de velocidade através da tensão de cisalhamento. Note-se que quando o modelo Spallart-Allmaras é usado, recomenda-se que o valor do y^+ seja da ordem de um ($y^+ \approx 1$), o que é adequadamente alcançado nas simulações.

A Tabela 5-5 mostra os valores dos parâmetros de desempenho da entrada de ar para os três casos estudados, i.e., N1A-1, N1B e N1C. Os valores de projeto da entrada *NACA* são também mostrados nesta tabela.

Tabela 5-5. Parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	N1B	N1C
Eficiência	0,600	0,513	0,511	0,519
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,259	0,261
Razão de vazões mássicas	----	0,76	0,76	0,76
Arrasto total - (N)	----	18,54	18,36	18,51
Arrasto de pressão - (N)	----	18,07	17,88	18,04
NACA	----	18,07	17,88	18,04
GV	----	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	----	0,47	0,48	0,47
NACA	----	0,47	0,48	0,47
GV	----	0,00	0,00	0,00
Mastro	----	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de arrasto	0,85	1,06	1,05	1,06

Os resultados reportados nesta tabela mostram que o nível de refinamento da malha original usada para simular a entrada, i.e. a malha sem nenhum tipo de refinamento, já é suficiente para descrever o comportamento do escoamento na entrada *NACA*, pois as variações da eficiência, do arrasto e da vazão mássica na entrada *NACA* são apenas da ordem de 1%. Outro aspecto importante que pode ser verificado nesta tabela é a proximidade entre os valores calculados e os dados de projeto, os quais foram fornecidos pela EMBRAER.

5.2

Gerador de vórtices (GV) isolado

Nesta seção será analisado o escoamento em torno do gerador de vórtices isolado em diferentes situações. Esta análise tem por finalidade permitir o anteprojeto do conjunto gerador de vórtices e entrada *NACA*. Para tanto, foram realizadas simulações com ângulos de ataque (α) do gerador de vórtices na faixa de 0° a 30° . Este último valor do ângulo de ataque corresponde à situação de pré-descolamento (*stall*), quando o valor coeficiente de sustentação é próximo ao seu valor máximo. O número de Reynolds baseado na corda máxima é de 7×10^5 . O detalhe das condições de cálculo é dado na seção 4.1.2.

Através da Figura 5-22, da Figura 5-23 e da Figura 5-24 é possível examinar a distribuição do coeficiente de pressão, C_p , sobre o extradorso do gerador de vórtices para três ângulos de ataque, $\alpha = 0^\circ$, 15° , e 30° , respectivamente. Nestas figuras pode ser visto claramente que os valores mais baixos de C_p ocorrem quando o ângulo de ataque é igual a 30° . Além disto, o traço dos contornos de C_p permite identificar a região sobre a qual os vórtices são formados no extradorso do gerador de vórtices.

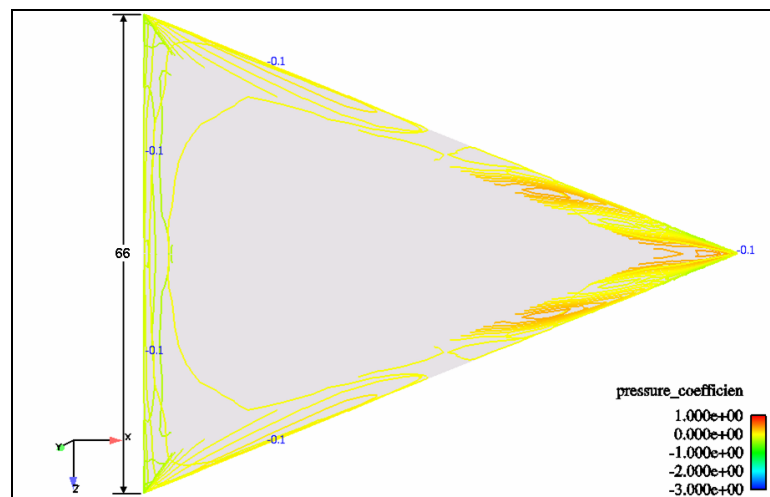


Figura 5-22. Coeficiente de pressão, C_p – GV com ângulo de ataque de 0° (dimensões em mm).

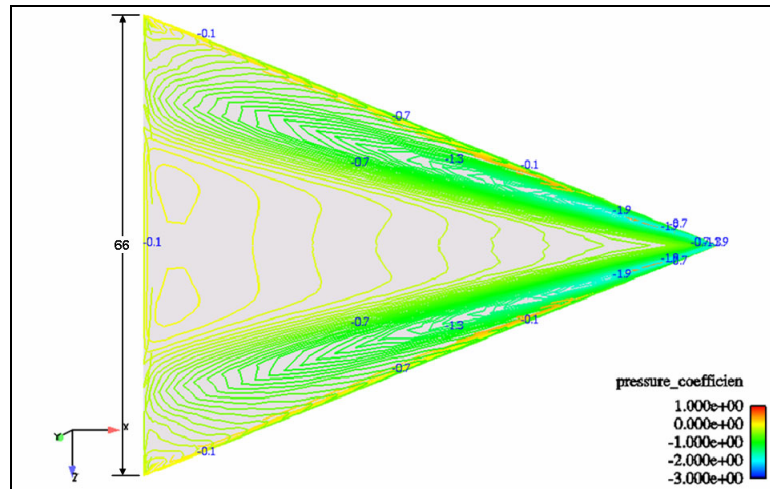


Figura 5-23. Coeficiente de pressão, C_p – GV com ângulo de ataque de 15° (dimensões em mm).

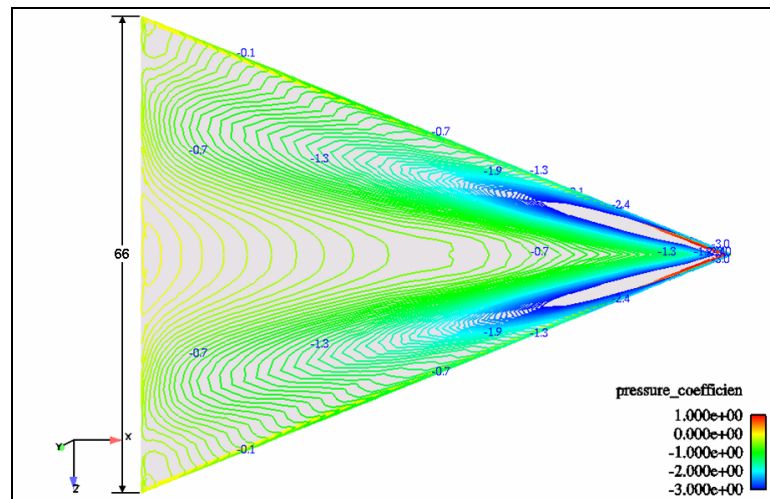


Figura 5-24. Coeficiente de pressão, C_p – GV com ângulo de ataque de 30° (dimensões em mm).

O fato de que a intensidade dos vórtices aumenta quando o ângulo de ataque do gerador de vórtices é incrementado também pode ser verificado na Figura 5-25, onde são mostradas as linhas de corrente ao redor o gerador de vórtices para os ângulos de ataque de 0° , 15° , e 30° . Esta faixa de ângulos de ataque foi escolhida, pois situa-se dentro da região de *pré-stall* do gerador de vórtices. Os resultados experimentais³¹ mostram que o valor máximo do coeficiente de sustentação para uma asa delta com este valor do alongamento é obtido para $\alpha = 37^\circ$. É importante salientar que a presença de vórtices visíveis nesta figura também para $\alpha = 0^\circ$ é justificada, posto que o gerador de vórtices não é simétrico.

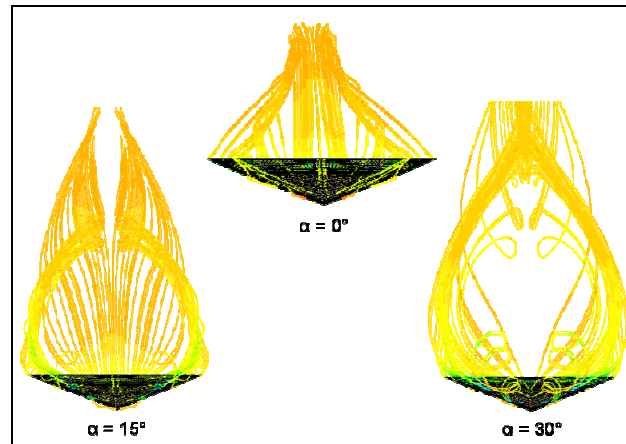


Figura 5-25. Intensidade dos vórtices em função do ângulo de ataque do GV.

O coeficiente de sustentação, C_L , o qual é calculado como sendo a razão entre a força exercida sobre o gerador de vórtices normal à direção do escoamento e a pressão dinâmica do escoamento não perturbado multiplicada pela área do gerador de vórtices, é mostrado na Figura 5-26. Nesta figura também é mostrado o resultado experimental obtido em túnel de vento, para o mesmo valor do número de Reynolds, para uma asa delta com o mesmo alongamento, porém usando um perfil *NACA* 0012.³¹ O C_L calculado neste trabalho apresenta boa concordância com os valores experimentais apresentados por Schlichting e Truckenbrodt,³¹ embora os perfis considerados das seções do gerador de vórtices sejam consideravelmente diferentes. Este resultado ressalta a importância dos vórtices existentes no extradorso sobre a sustentação total da asa. Note-se que o valor negativo do C_L calculado para $\alpha = 0^\circ$ é devido ao chanfro existente no intradorso do gerador de vórtices, o qual origina um escoamento ascendente neste valor de ângulo de ataque.

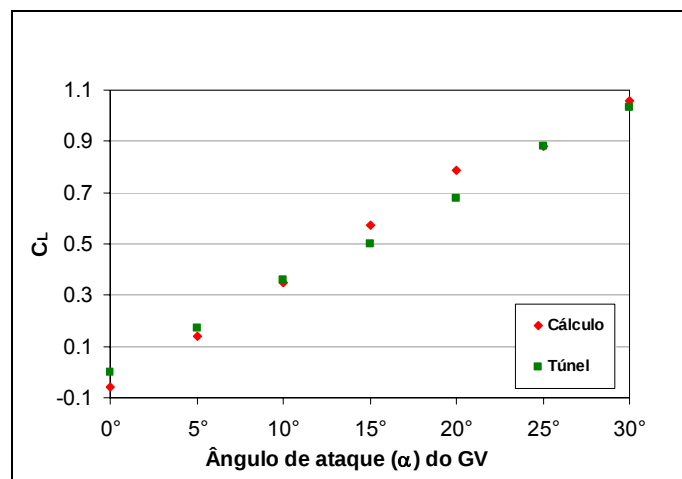


Figura 5-26. Coeficiente de sustentação, C_L , do gerador de vórtices.

A Figura 5-27 mostra a polar de arrasto obtida numericamente, i.e., a variação do coeficiente de arrasto em função do coeficiente de sustentação. Esta figura mostra claramente a penalidade resultante quando o gerador de vórtices opera com altos valores de coeficiente de sustentação. Portanto, uma avaliação dos benefícios e das penalidades do uso de geradores de vórtices em relação ao ganho proporcionado no desempenho da entrada *NACA* deve ser realizada antes de tomar uma decisão final de projeto.

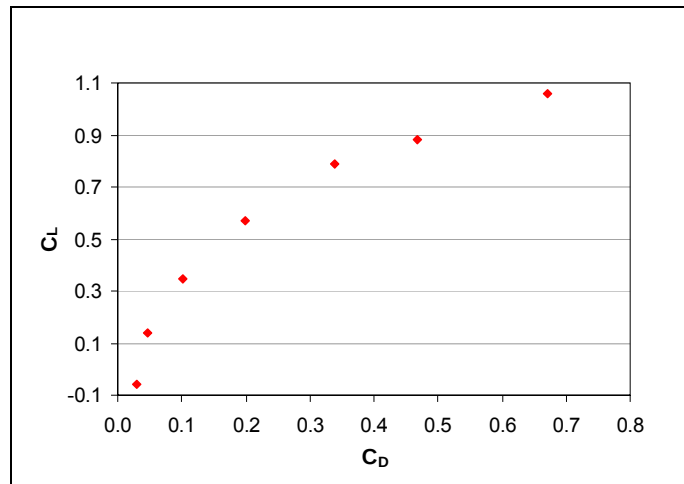


Figura 5-27. Polar de arrasto do GV, C_L vs. C_D .

5.3

Anteprojeto do conjunto entrada *NACA* e gerador de vórtices

A configuração do conjunto entrada *NACA* e gerador de vórtices, aqui chamada de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, foi construída usando a configuração da entrada *NACA* convencional, mostrada na Figura 4-1, e a do gerador de vórtices isolado, Figura 4-5. Nesta seção as considerações utilizadas para o posicionamento do gerador de vórtices em relação à entrada *NACA* são detalhadas.

Foi inicialmente escolhido o ângulo de ataque de 15° para o gerador de vórtices por se situar aproximadamente no meio da faixa de sustentação. A partir dos resultados obtidos das simulações da entrada *NACA* convencional, mostrados na seção 5.1, foi determinado que a camada limite estendia-se até uma altura de aproximadamente 50 mm acima da placa plana. Portanto, a fim de capturar e misturar ar externo proveniente da corrente livre à camada limite, o bordo de fuga

do gerador de vórtices encontra-se posicionado a uma distância vertical de 50 mm da placa plana. Esta distância será mantida constante em todos os resultados aqui mostrados.

A posição horizontal do gerador de vórtices em relação à entrada *NACA* foi determinada com a ajuda de gráficos de iso-superfícies de vorticidade. A Figura 5-28 mostra uma iso-superfície da componente longitudinal da vorticidade a jusante do gerador de vórtices isolado, cujo ângulo de ataque é de 15° . Nesta figura é possível verificar que a inclinação do núcleo dos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices é de aproximadamente 5° . Espera-se que ângulo de inclinação do núcleo dos vórtices gerados seja representativo da região do escoamento onde a influência dos vórtices gerados pelo gerador de vórtices é intensa. Além disto, a Figura 5-28 também mostra que a expansão lateral do núcleo dos vórtices é pequena, isto é, as regiões com vorticidade intensa praticamente não ocorrem a uma distância do gerador de vórtices superior à sua envergadura.

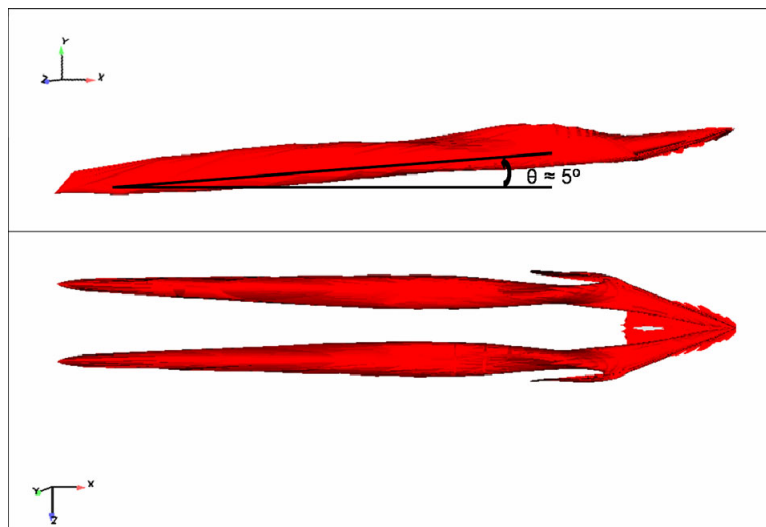


Figura 5-28. Iso-superfície da componente longitudinal da vorticidade – GV com $\alpha = 15^\circ$.

Com base neste resultado foi presumido um modelo, ainda grosseiro, da interação entre o escoamento oriundo do gerador de vórtices e a entrada *NACA*. Neste modelo a trajetória dos vórtices não é influenciada pela camada limite, e assim o ponto de intersecção entre os vórtices e a placa plana é facilmente determinado. Também não foi considerada neste modelo a redução da intensidade dos vórtices devido à dissipação viscosa, a qual poderia também influenciar a escolha da posição do gerador de vórtices em relação à entrada *NACA*.

Cabe notar que simulações do escoamento em que o gerador de vórtices é colocado sobre uma placa plana poderiam trazer informações relevantes para a melhoria deste modelo. Estas simulações não foram realizadas neste trabalho por possuírem um custo computacional praticamente equivalente aos cálculos em que a entrada *NACA* é incluída.

Assim, no intuito de avaliar a posição horizontal do gerador de vórtices sobre a entrada *NACA*, três situações elementares são consideradas:

- i. Quando a interseção hipotética entre o núcleo dos vórtices e a placa plana ocorre a montante da entrada *NACA*, caso NGVA,
- ii. Quando o núcleo dos vórtices intercepta a rampa da entrada *NACA*, caso NGVB, e,
- iii. Quando a interseção entre o núcleo dos vórtices e a placa plana ocorre a jusante da entrada *NACA*, caso NGVC.

Estas posições correspondem a uma distância horizontal de 700, 500 e 300 mm entre o bordo de fuga do gerador de vórtices e início da rampa inclinada. Nestas três posições, o bordo de fuga do gerador de vórtices encontra-se a uma distância vertical de 50 mm da placa plana, e o ângulo de ataque do gerador de vórtices é de $\alpha = 15^\circ$.

Uma vez realizado o estudo da influência da posição horizontal do gerador de vórtices, serão variados seu ângulo de ataque e sua área, de modo a avaliar o efeito destes parâmetros sobre a estrutura do escoamento resultante e a eficiência do conjunto.

5.4

NACA com gerador de vórtices livre

5.4.1

Estrutura do escoamento

A descrição da estrutura do escoamento correspondente à entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA, é apresentada nesta seção. Esta descrição pretende ilustrar como o escoamento na entrada *NACA* é influenciado pela presença do gerador de vórtices livre. Serão mostradas as linhas de corrente, os contornos da componente longitudinal da velocidade e da vorticidade, bem

como os contornos da distribuição de coeficiente de pressão no plano de simetria e na garganta da entrada *NACA*.

Linhas de correntes coloridas pela componente longitudinal da velocidade são mostradas na Figura 5-29 para a configuração de *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA. Estas linhas de corrente correspondem a partículas de fluido que poderiam intersectar a seção reta do duto de saída da entrada *NACA*.

O aspecto mais importante mostrado nesta figura é relativo à velocidade das partículas de fluido que ingressam na entrada *NACA*. Lembrando que a velocidade do escoamento não perturbado é igual a 102 m/s, pode ser claramente visto na Figura 5-29 que as partículas de fluido que ingressam à entrada *NACA* com gerador de vórtices livre provêm principalmente das regiões externas à camada limite. Este resultado é diferente daquele obtido no caso da entrada *NACA* convencional, Figura 5-1, no qual as partículas de fluido que ingressam na entrada são principalmente oriundas da camada limite. Portanto, espera-se que a pressão dinâmica na entrada *NACA* aumente quando o gerador de vórtices é utilizado. O movimento rotacional do fluido a montante da entrada causado pelo gerador de vórtices também pode ser notado na Figura 5-29.

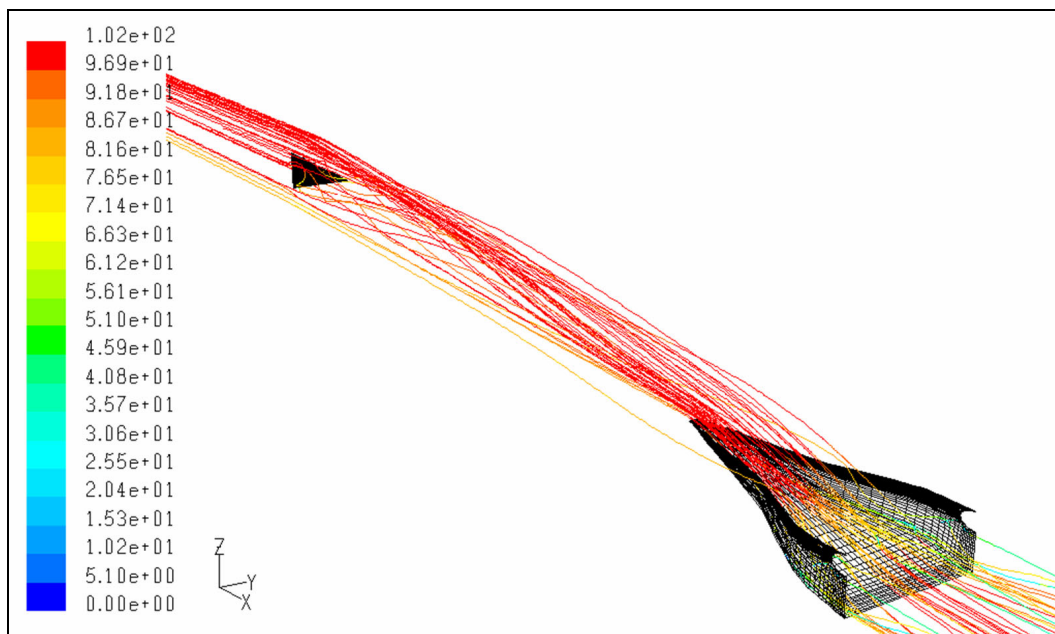


Figura 5-29. Linhas de correntes coloridas pelo valor da componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA.

A Figura 5-30 mostra seções, em planos transversais à direção do escoamento externo, os quais correspondem aos mesmos planos que foram usados

na Figura 5-3, dos contornos da componente longitudinal da velocidade para a entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA. Comparando-se esta figura com a Figura 5-3, é possível verificar que a presença do gerador de vórtices a montante da entrada *NACA* reduz substancialmente a espessura da camada limite. Esta redução ocorre principalmente na região central da placa plana e a montante da entrada *NACA*. Uma imediata consequência da redução da espessura da camada limite é a maior quantidade de ar externo ingerido pela entrada *NACA*, o qual, como será mostrado mais adiante, reflete-se em um incremento da eficiência de recuperação de pressão dinâmica e a vazão mássica capturada pela entrada.

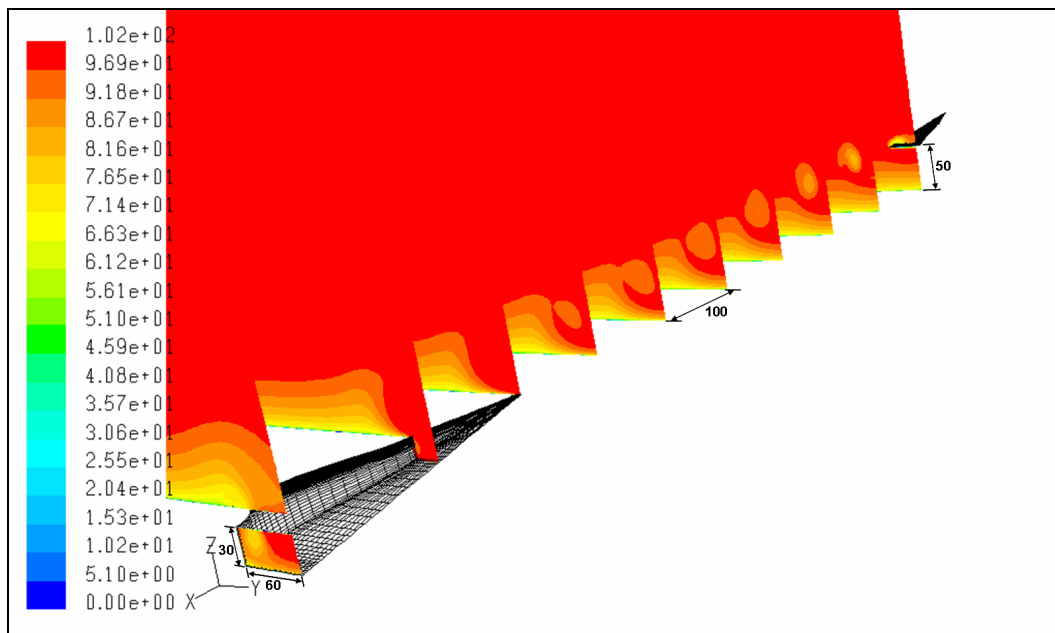


Figura 5-30. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA (dimensões em mm).

A Figura 5-31, a qual mostra a componente longitudinal da velocidade no plano de simetria da configuração entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA, permite verificar, por comparação com a Figura 5-4, que a presença do gerador de vórtices a montante da entrada reduz consideravelmente a espessura da camada limite.

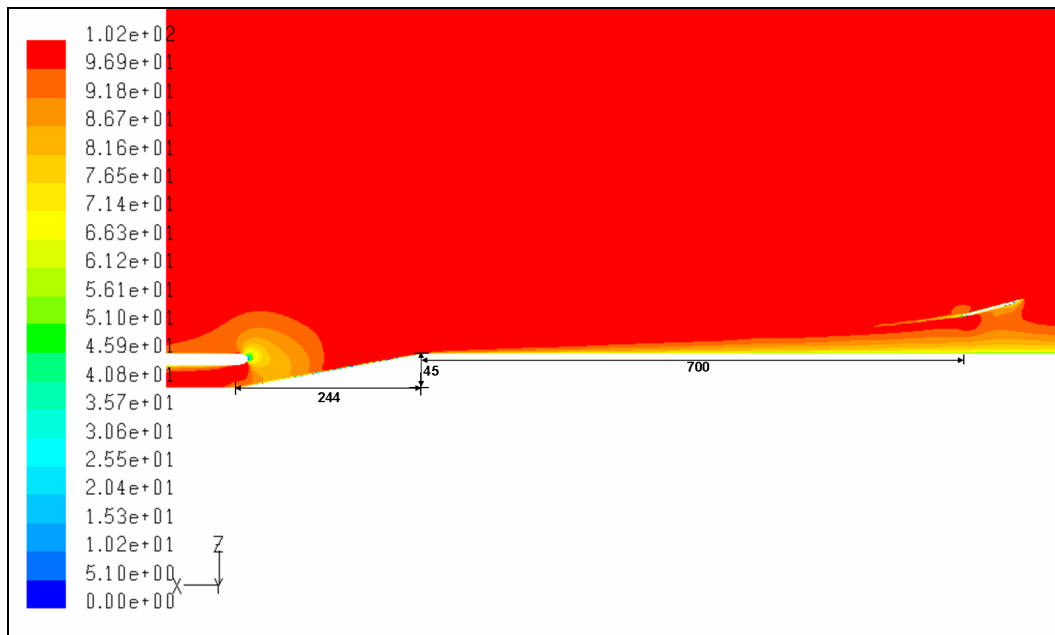


Figura 5-31. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVA, plano de simetria (dimensões em mm).

O componente longitudinal da vorticidade, correspondente à configuração de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA, é mostrada na Figura 5-32 nos mesmos planos transversais à direção do escoamento externo. Nesta figura é possível ver claramente o desenvolvimento dos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices, bem como os altos níveis de vorticidade associados a eles. Por comparação com os resultados mostrados na Figura 5-5 para a entrada *NACA* convencional, esta figura mostra que a presença do gerador de vórtices origina, na garganta da entrada *NACA*, uma maior região afetada pela vorticidade; porém, os maiores níveis de vorticidade alcançados nesta região parecem estar ligados à forma divergente das paredes da rampa da entrada *NACA*.

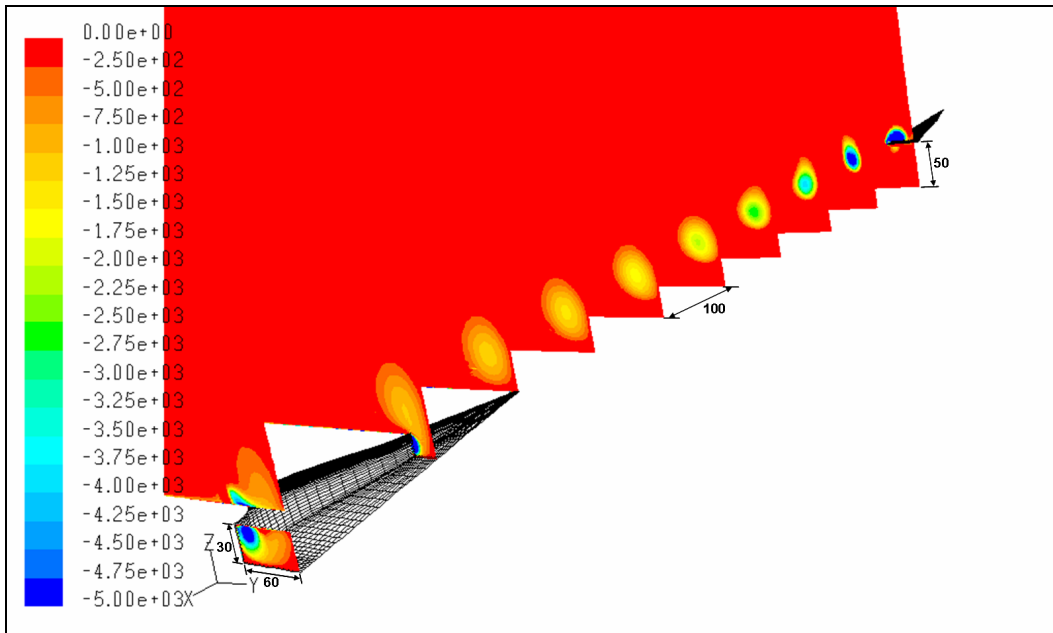


Figura 5-32. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA (dimensões em mm).

A Figura 5-33 mostra o comportamento do coeficiente de pressão ao longo do plano de simetria da configuração de *NACA* com gerador de vórtices livre, caso NGVA. Comparando-se esta figura com a Figura 5-6, pode ser observado que a presença do gerador de vórtices resulta em modificações substanciais do gradiente de pressão, principalmente nas regiões próximas ao mesmo. Os vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices também modificam o campo de pressão a jusante do mesmo, como pode ser observado na Figura 5-33. Porém, sua influência sobre a distribuição de pressão na entrada de ar é pequena.

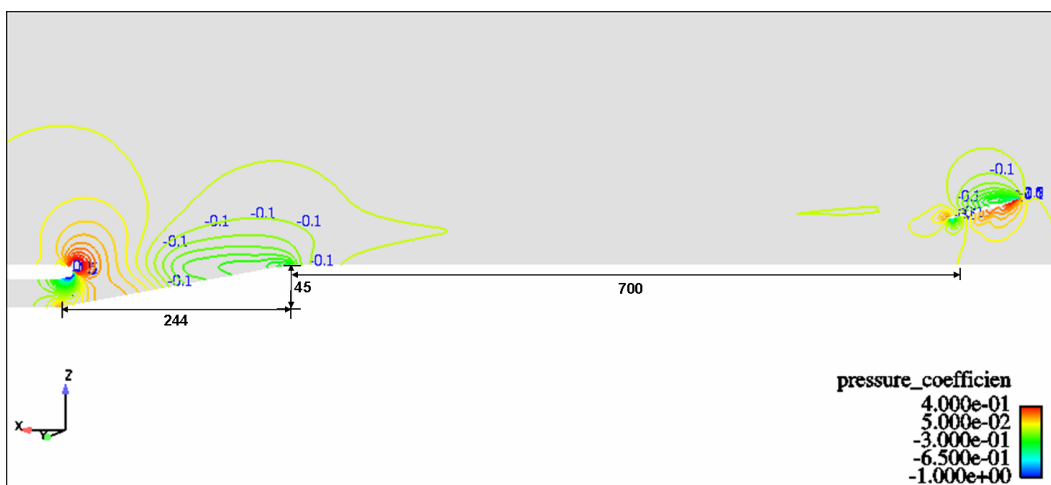


Figura 5-33. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA, plano de simetria (dimensões em mm).

A distribuição do coeficiente de pressão no plano da garganta da entrada *NACA* é mostrada na Figura 5-34. Comparações entre esta figura e a Figura 5-7 permitem constatar que a presença do gerador de vórtices (i) incrementa o coeficiente de pressão nas regiões inferiores do plano da garganta da entrada *NACA* e (ii) produz um escoamento mais uniforme na garganta da entrada *NACA*. Será mostrada que esta diminuição na distorção do escoamento é acompanhada por uma melhoria dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

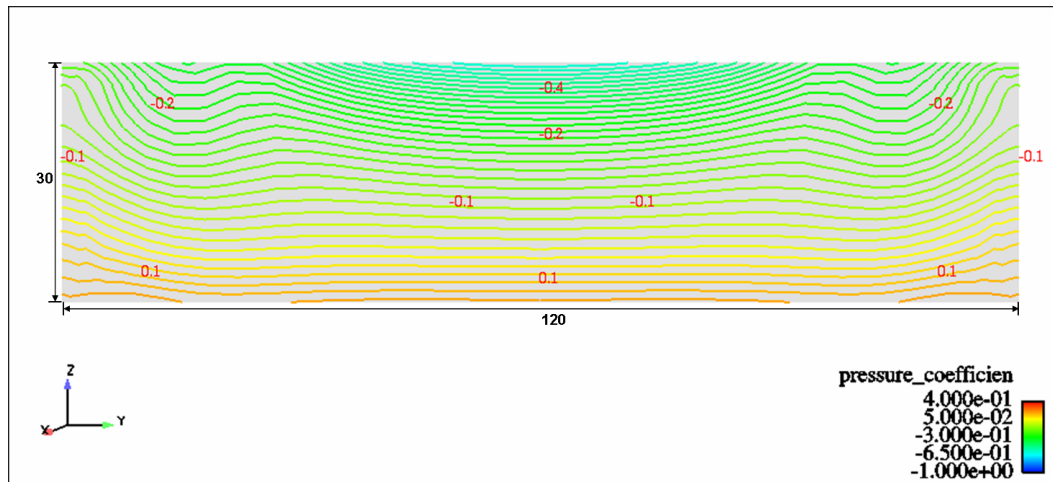


Figura 5-34. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA, plano da garganta (dimensões em mm).

5.4.2

Influência do nível de refinamento da malha computacional utilizada

Nesta seção é apresentado o resultado de um estudo da influência do nível de refinamento da malha computacional na região a jusante do gerador de vórtices e a montante da entrada *NACA*, sobre o desenvolvimento dos vórtices gerados pela presença do gerador de vórtices, na configuração de entrada *NACA* e gerador de vórtices livre.

O processo de refinamento adaptativo foi realizado através de uma função de adaptação por gradientes híbrida. O uso desta função de adaptação por gradientes híbrida foi motivado pelo desejo de confinar o processo de adaptação, especificamente, à região a jusante do gerador de vórtices, onde os gradientes de vorticidade apresentam os mais altos níveis de intensidade. Primeiramente, registros iniciais de adaptação, i.e., elementos marcados para refinamento, foram criados usando como medida de erro, ou variável solução sobre a qual a função de

adaptação por gradientes é construída, a vorticidade ao longo os eixos x e z . Em seguida, estes registros foram combinados a fim de criar a função de adaptação híbrida desejada.

No caso do uso da vorticidade ao longo o eixo x , o limiar de refinamento da função de adaptação por gradientes foi especificado como sendo igual a 50, i.e., elementos com valores maiores da função de adaptação a este valor foram refinados. O segundo grupo de registros foi criado utilizando-se a vorticidade ao longo o eixo z , e o limiar de refinamento foi especificado como sendo igual a 100.

A malha original, isto é, a malha antes do processo de refinamento adaptativo, é composta por aproximadamente 1.100.000 elementos, e depois do refinamento, a malha atingiu um número aproximado de elementos de 3.000.000.

A Figura 5-35 mostra a comparação da estrutura da malha no caso sem e com o refinamento adaptativo, caso NGVA, e caso NGVA-1, respectivamente, em um plano perpendicular à placa plana localizado a 0,5 m a montante do início da rampa da entrada *NACA*, i.e., 0,2 m a jusante do gerador de vórtices. Nesta figura a região onde o processo de refinamento ocorre pode ser claramente vista.

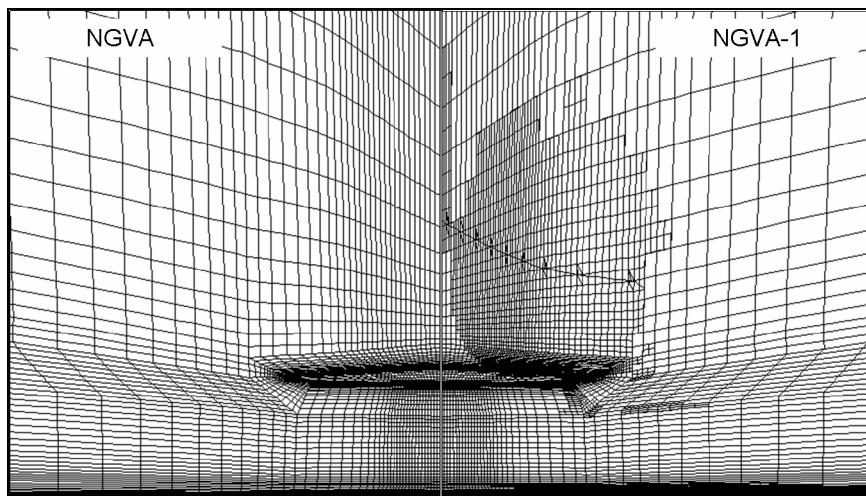


Figura 5-35. Comparação de malha - Casos NGVA e NGVA-1, plano situado a 0,2 m a jusante do GV.

A Figura 5-36 e a Figura 5-37, as quais foram geradas em planos perpendiculares à placa plana e a montante da entrada *NACA*, ilustram com maior detalhe as regiões onde o processo de refinamento ocorre. Nestas figuras, onde é mostrada a distribuição de volume dos elementos, é possível verificar que o processo de refinamento ocorre principalmente, conforme o desejado, na região de

desenvolvimento dos vórtices principais originados no extradorso do gerador de vórtices.

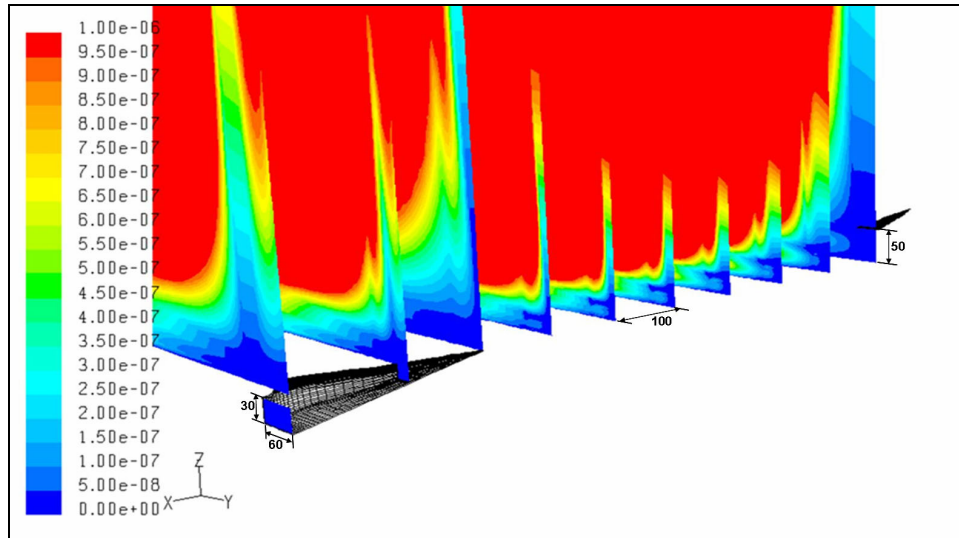


Figura 5-36. Contornos de volume de elementos (m^3) - Caso NGVA (dimensões em mm).

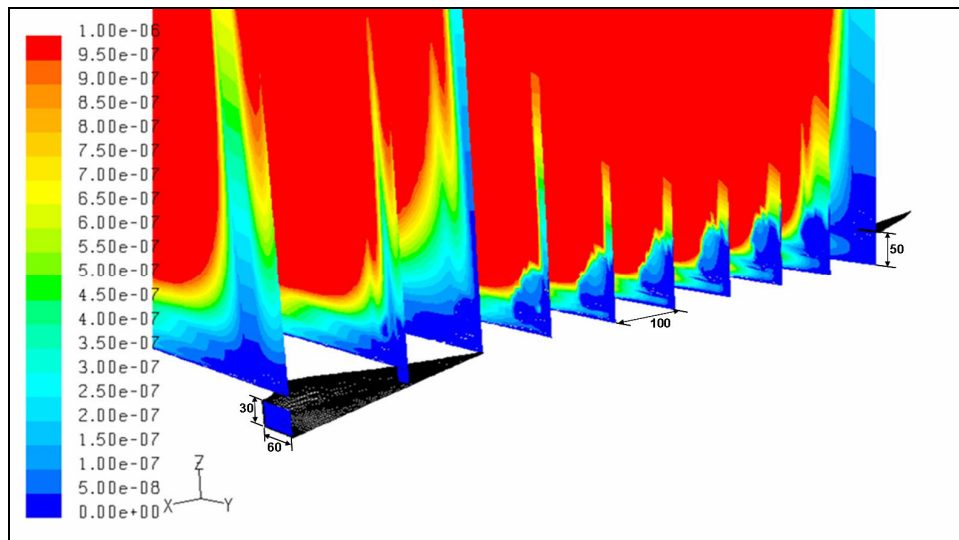


Figura 5-37. Contornos de volume de elementos (m^3) - Caso NGVA-1 (dimensões em mm).

Na Figura 5-38, que compara os contornos da componente longitudinal da vorticidade em um plano perpendicular à placa plana situado a 0,2 m a jusante do gerador de vórtices, é possível observar que o processo de refinamento afeta levemente o desenvolvimento dos vórtices produzidos pela presença do gerador de vórtices. Embora não se tenha realizado uma análise mais profunda, a fim de se quantificar as diferenças observadas, nesta figura é possível notar somente

pequenas discrepâncias entre os resultados obtidos sem e com refinamento adaptativo.

Estas pequenas diferenças são também observadas nos valores dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*. Comparações entre os parâmetros de desempenho da configuração de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, sem e com refinamento, casos NGVA e NGVA-1, mostram diferenças de apenas 1%. Devido a estas pequenas diferenças, análises adicionais relacionadas ao processo de refinamento não serão feitas neste trabalho, pois considera-se que a configuração básica é suficientemente refinada.

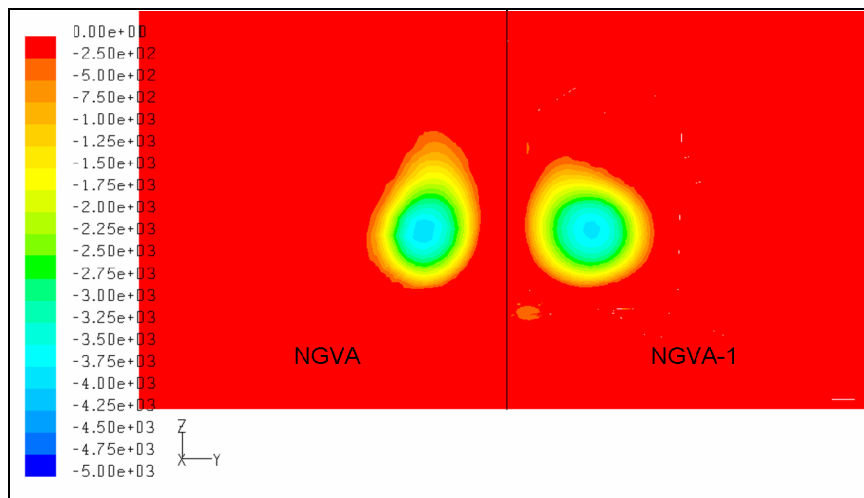


Figura 5-38. Comparação dos contornos de vorticidade (1/s) – Casos NGVA e NGVA-1, plano situado a 0,5 m a montante da entrada *NACA*.

5.4.3

Influência da posição longitudinal do gerador de vórtices

Nesta seção são apresentados os resultados do estudo da influência da posição horizontal do gerador de vórtices em relação à entrada *NACA* sobre a estrutura do escoamento e sobre os parâmetros de desempenho. Como mencionado na seção 5.3, foram consideradas três posições longitudinais do gerador de vórtices, nas quais o bordo de fuga do gerador de vórtices situa-se a uma distância longitudinal de 700, 500 e 300 mm do início da rampa, casos NGVA, NGVB e NGVC, respectivamente. O gerador de vórtices encontra-se a montante da entrada *NACA*, seu bordo de fuga situa-se a uma distância vertical de 50 mm da placa plana, e seu ângulo de ataque é $\alpha = 15^\circ$.

Linhas de correntes coloridas pela componente longitudinal da velocidade são mostradas na Figura 5-39 e na Figura 5-40 para duas configurações de *NACA* com gerador de vórtices livre, casos NGVB e NGVC, respectivamente. Estas linhas de corrente correspondem a partículas de fluido que poderiam intersectar a seção reta do duto de saída da entrada *NACA*. Nestas figuras é possível observar o movimento rotacional do fluido causado pela entrada de ar. Note-se também, que as partículas de fluido ingressando na entrada são principalmente oriundas de regiões externas à camada limite. Portanto, espera-se que a pressão dinâmica na entrada *NACA* aumente quando o gerador de vórtices é utilizado nestas duas posições longitudinais.

Por outro lado, comparando-se a Figura 5-39 e a Figura 5-40 com a Figura 5-29, correspondente ao caso NGVA, pode ser observado que a quantidade de fluido externo ingerido pela entrada *NACA* parece diminuir quando o gerador de vórtices é aproximado à entrada *NACA*.

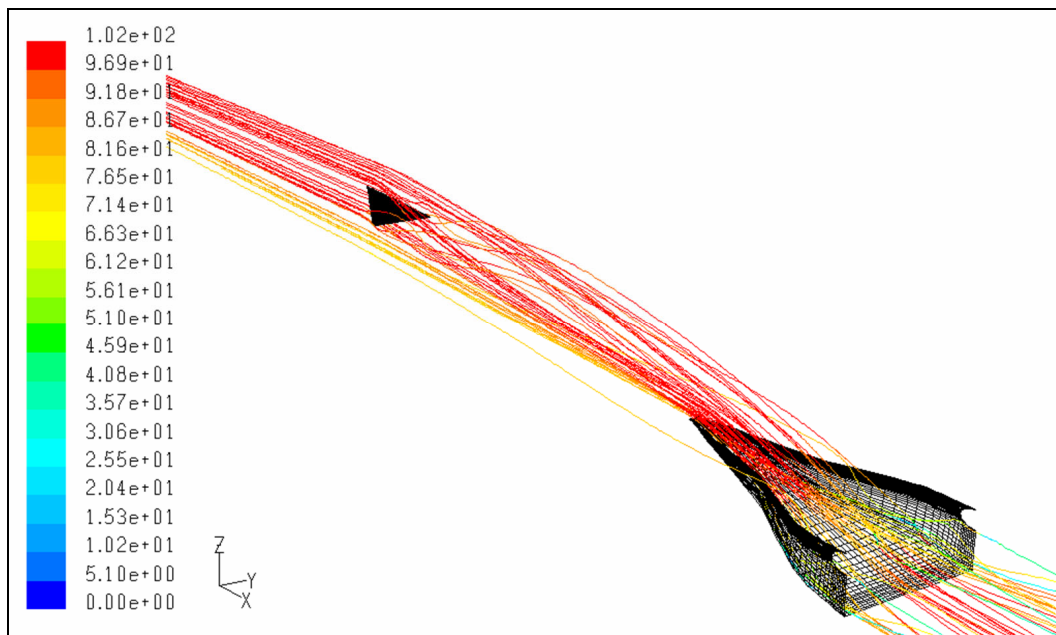


Figura 5-39. Linhas de correntes pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVB.

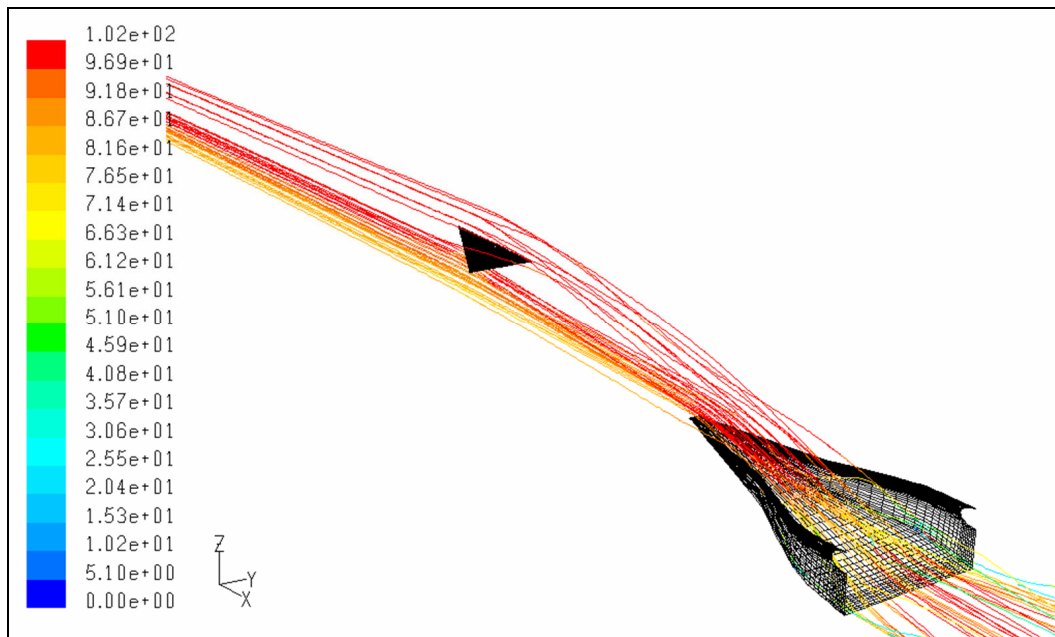


Figura 5-40. Linhas de correntes pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVC.

A influência da posição longitudinal do gerador de vórtices sobre o desenvolvimento da camada limite a montante da entrada *NACA* pode ser avaliada na Figura 5-41 e na Figura 5-42. Estas figuras mostram seções, em planos transversais à direção do escoamento externo, equidistantes entre si de 0,1 m, da componente longitudinal da velocidade para configurações NGVB e NGVC, respectivamente. Estas figuras permitem verificar que a presença do gerador de vórtices nestas posições longitudinais reduz substancialmente a espessura da camada limite a montante da entrada *NACA* e na região central da placa plana. Uma consequência imediata da redução da espessura da camada limite é a maior quantidade de ar externo ingerido pela entrada *NACA*, o que, como será mostrado mais adiante, reflete-se num incremento da eficiência de recuperação de pressão dinâmica e da vazão mássica capturada pela entrada.

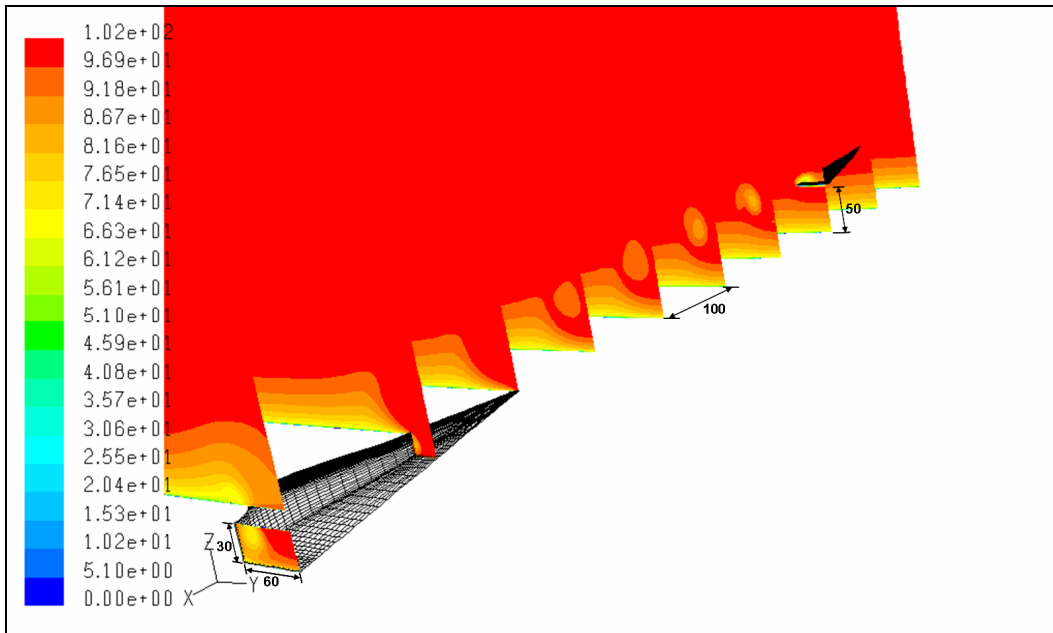


Figura 5-41. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVB (dimensões em mm).

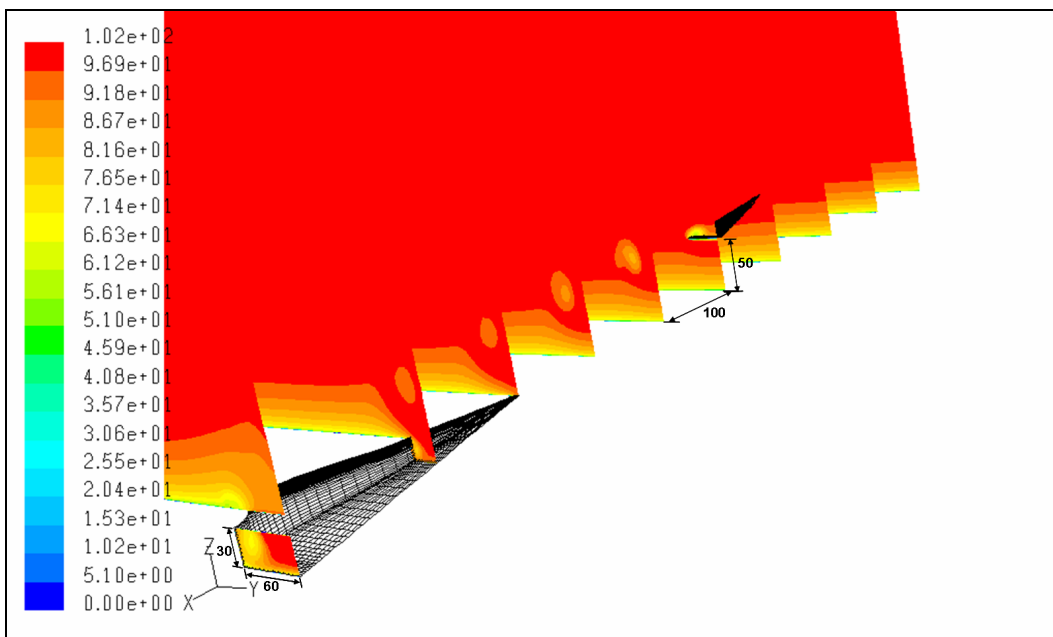


Figura 5-42. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVC (dimensões em mm).

A redução da camada limite também pode ser observada em maior detalhe na Figura 5-43 e na Figura 5-44, as quais mostram os contornos da componente longitudinal da velocidade no plano de simetria das duas configurações de *NACA* com gerador de vórtices ora analisadas. Comparações destas figuras com a Figura 5-31, correspondente ao caso NGVA, mostram que a redução da espessura da

camada limite diminui quando o gerador de vórtices é aproximado à entrada *NACA*. Entretanto, a redução da espessura que resulta da presença do gerador de vórtices é considerável em todas as posições estudadas.

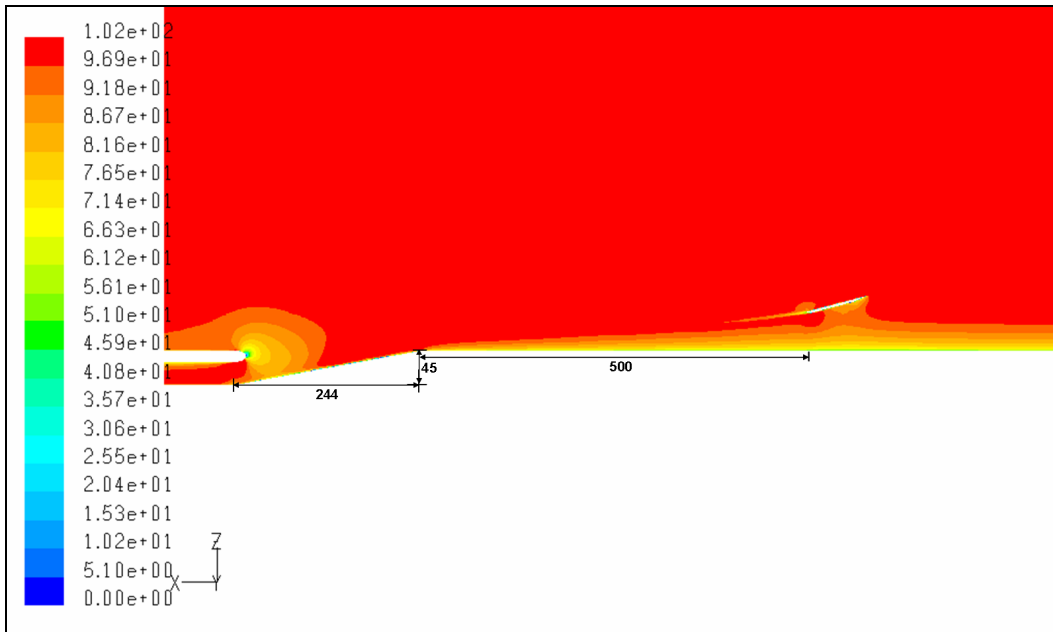


Figura 5-43. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVB, plano de simetria (dimensões em mm).

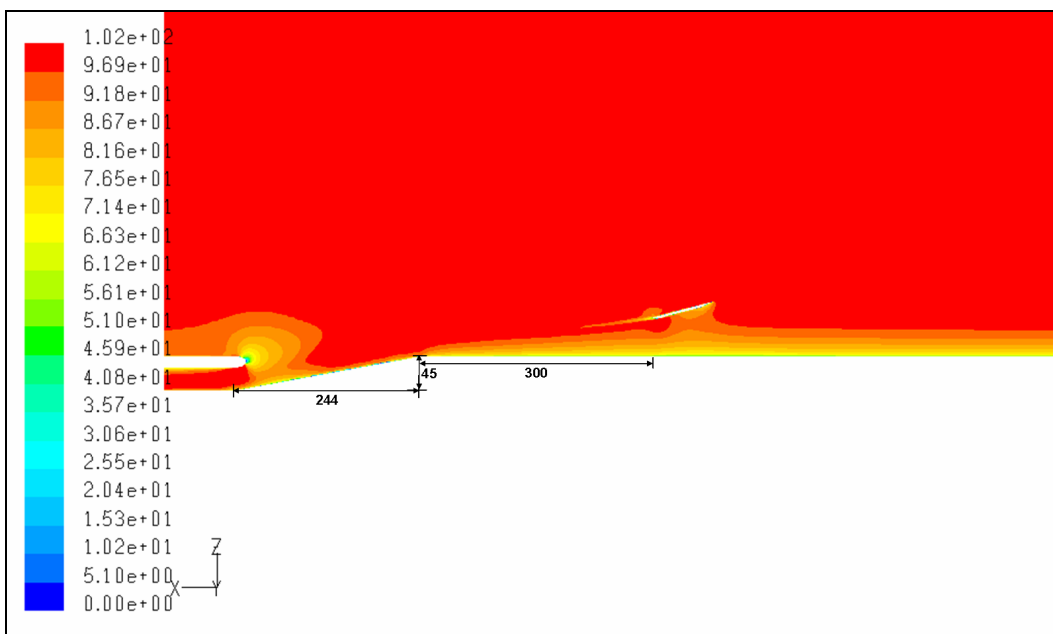


Figura 5-44. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVC, plano de simetria (dimensões em mm).

A Figura 5-45 e a Figura 5-46 mostram seções, em planos transversais à direção do escoamento externo, da componente longitudinal da vorticidade para as

configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre NGVB e NGVC. Através destas figuras, pode-se notar que, certamente, a posição longitudinal do gerador de vórtices está diretamente relacionada ao o ponto de interseção do núcleo de vórtices com a entrada *NACA*. Na Figura 5-45, observa-se que o ponto de interseção do núcleo de vórtices com a entrada *NACA*, cuja localização inicialmente foi considerada na rampa da entrada, aparentemente, está localizado no bordo de ataque da entrada *NACA*, e na Figura 5-46 pode-se ver que este ponto de interseção ocorre a jusante da entrada. Em geral, observando-se a Figura 5-32, caso NGVA, a Figura 5-45 e a Figura 5-46, percebe-se que a camada limite influencia a trajetória dos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices; pois os pontos de interseção do núcleo de vórtices com a entrada *NACA* não correspondem aos considerados inicialmente, i.e., quando foi realizado o anteprojeto do conjunto entrada *NACA* e gerador de vórtices.

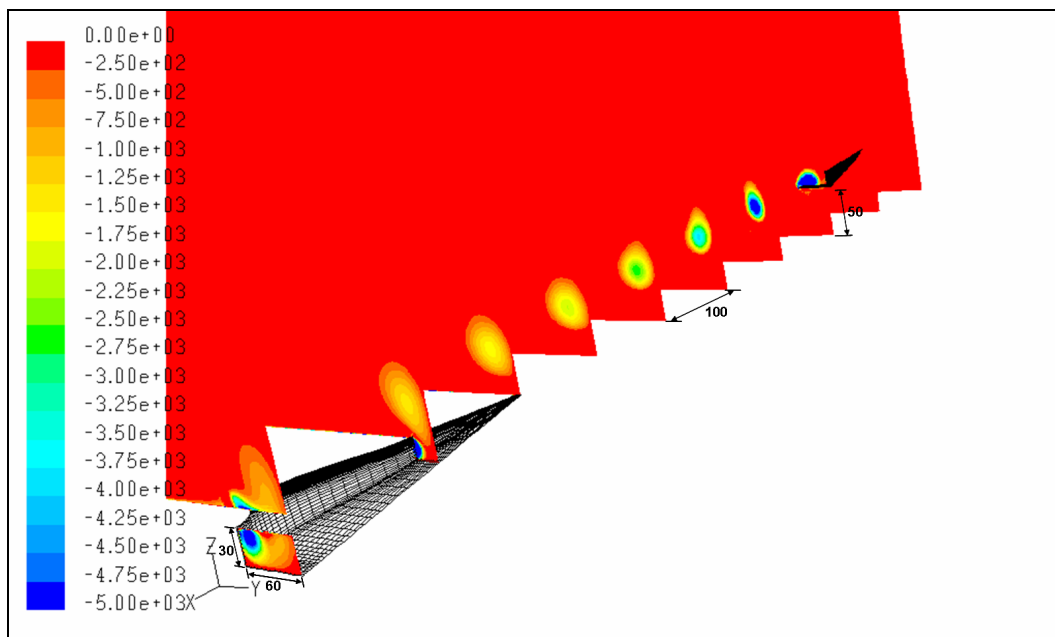


Figura 5-45. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVB (dimensões em mm).

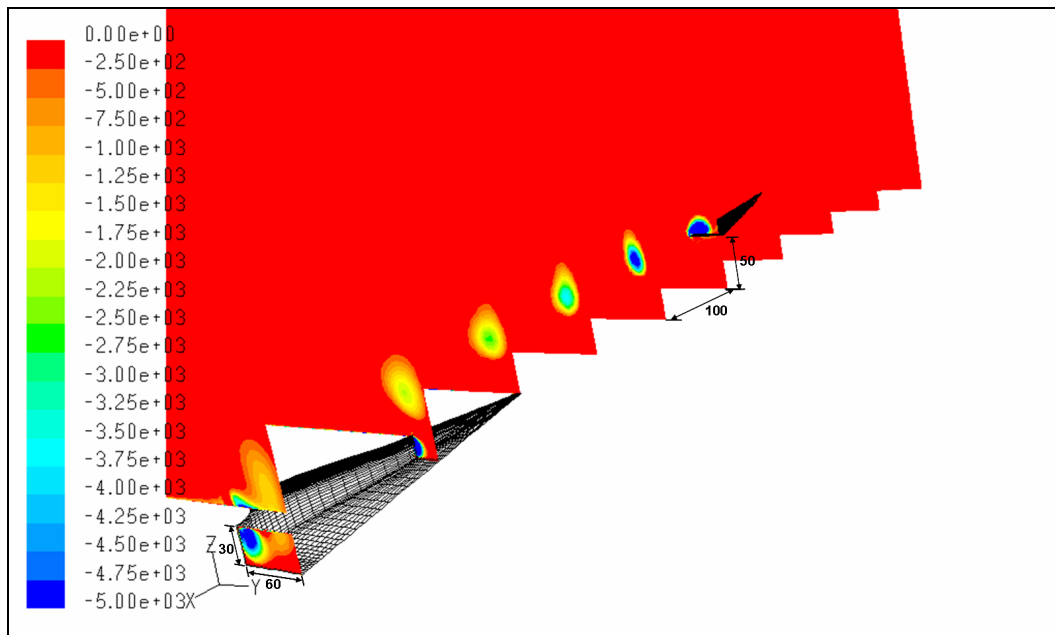


Figura 5-46. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVC (dimensões em mm).

As distribuições do coeficiente de pressão, mostradas na Figura 5-47 e na Figura 5-48, permitem avaliar a influência da posição horizontal do gerador de vórtices sobre a distorção do escoamento ingerido pela entrada de ar.

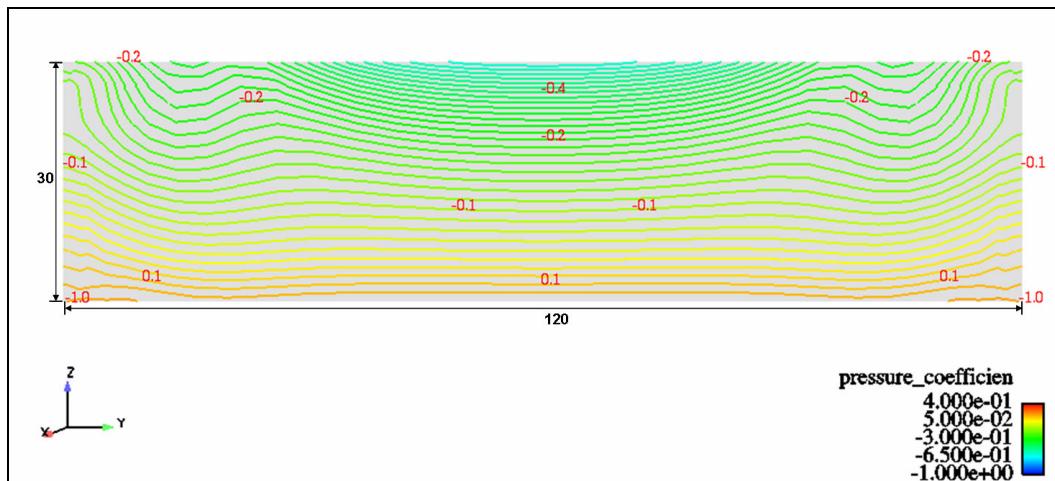


Figura 5-47. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVB, plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

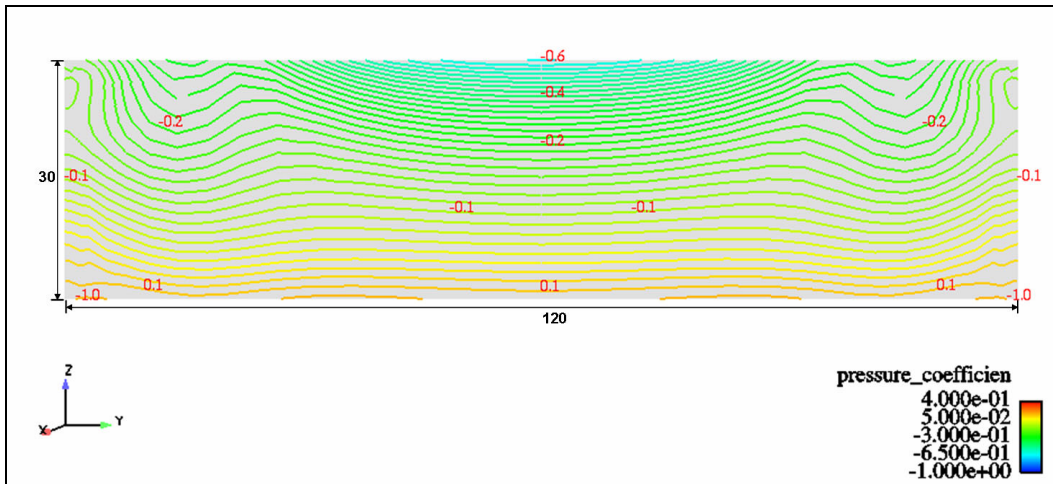


Figura 5-48. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVC, plano da garganta da *NACA* (dimensões em mm).

Estas figuras mostram que a presença do gerador de vórtices, nestas duas posições longitudinais, aumenta o coeficiente de pressão nas regiões inferiores do plano da garganta da entrada *NACA*, quando comparado ao caso N1A-1, sem gerador de vórtices. Comparando-se estas figuras com a Figura 5-34, correspondente ao caso NGVA, pode-se notar que a presença do gerador de vórtices certamente produz um escoamento mais uniforme na garganta da entrada *NACA*, e que esta diminuição na distorção do escoamento é menor quanto maior a proximidade entre o gerador de vórtices e a entrada *NACA*. Por outro lado, é de se esperar que a medida que o gerador de vórtices é deslocado a montante da entrada de ar, sua influência sobre o escoamento nesta também diminua.

A Tabela 5-6 mostra os valores dos parâmetros de desempenho das três configurações de *NACA* com gerador de vórtices livre, casos NGVA, NGVB e NGVC, as quais diferem entre si na posição longitudinal do gerador de vórtices. O procedimento de cálculo destes parâmetros é exatamente o mesmo que foi indicado na seção 5.1.2, com a única exceção que, para o cálculo de coeficiente de arrasto, considera-se também a contribuição do arrasto de pressão e do arrasto viscoso originado pela presença do gerador de vórtices. Nesta tabela os incrementos percentuais, indicados entre parênteses, são calculados em relação aos valores dos parâmetros da entrada *NACA* convencional. A área de referência utilizada no cálculo do coeficiente de arrasto total neste caso, é a mesma que empregada no caso da entrada *NACA* convencional.

Tabela 5-6. Parâmetros de desempenho – Influência da posição longitudinal do GV

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	NGVA	NGVB	NGVC
Eficiência	0,600	0,513	0,741 (44,4 %)	0,713 (39 %)	0,647 (26,2 %)
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,302 (16 %)	0,297 (14,2 %)	0,294 (12,9 %)
Razão de vazões mássicas	---	0,76	0,88 (16 %)	0,87 (14,2 %)	0,86 (12,9 %)
Arrasto total - (N)	---	18,54	32,43 (75 %)	31,48 (69,8 %)	29,08 (56,9 %)
Arrasto de pressão - (N)	---	18,07	31,69 (75,4 %)	30,77 (70,3 %)	28,41 (57,2 %)
NACA	---	18,07	29,68 (64,2 %)	28,79 (59,3 %)	26,43 (46,2 %)
GV	---	0,00	2,01	1,98	1,98
Mastro	---	0,00	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	---	0,47	0,74 (60 %)	0,71 (53,3 %)	0,67 (43,4 %)
NACA	---	0,47	0,59 (26,5 %)	0,56 (19,8 %)	0,51 (9,5 %)
GV	---	0,00	0,16	0,16	0,16
Mastro	---	0,00	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de arrasto	0,85	1,06	1,86 (75 %)	1,8 (69,8 %)	1,66 (56,9 %)

Esta tabela mostra claramente que as três posições longitudinais do gerador de vórtices escolhidas levam a ganhos significativos dos valores calculados de vazão mássica e eficiência da entrada *NACA*. Os maiores incrementos dos parâmetros de desempenho são obtidos quando o gerador de vórtices é posicionado a uma distância longitudinal de 700 mm a montante do início da rampa da entrada *NACA*, caso NGVA. Quando o gerador de vórtices é aproximado da entrada, os ganhos diminuem, porém permanecem significativos.

É importante enfatizar que os valores da eficiência de recuperação de pressão dinâmica são aqueles que exibem as maiores melhoras. Isto se deve ao ingresso de fluido externo à camada limite na entrada *NACA*, sob a influência do gerador de vórtices. Outra consequência da ingestão de ar externo é o aumento da vazão mássica através da entrada.

Na Tabela 5-6 também pode ser verificado que os valores do coeficiente de arrasto exibem um aumento significativo com a presença do gerador de vórtices. Isto é uma consequência direta do incremento da vazão mássica e da diminuição da espessura da camada limite. Assim, este aumento é inevitável quando a eficiência aumenta. Note-se que a contribuição do gerador de vórtices, em termos de arrasto, é inferior a 5% do arrasto total do conjunto *NACA* e gerador de vórtices livre.

5.4.4

Influência do ângulo de ataque do gerador de vórtices

Como resultado da análise desenvolvida da seção anterior, conclui-se que a posição do gerador de vórtices correspondente ao caso NGVA leva aos melhores resultados, em termos de melhoria dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*. Por esta razão, foi decidido utilizar o caso NGVA como base para variações de dois parâmetros geométricos do gerador de vórtices, a fim de determinar a influência destes sobre os parâmetros de desempenho da entrada *NACA*. Os dois parâmetros geométricos escolhidos foram: (i) o ângulo de ataque e (ii) a área do gerador de vórtices. Nesta seção descreve-se a influência do ângulo de ataque do gerador de vórtices sobre a estrutura do escoamento e sobre os parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

Em relação ao ângulo de ataque, foi decidido analisar dois ângulos de ataque do gerador de vórtices, 25° e 35°. Nesta seção serão discutidos os resultados de duas configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, variantes do caso NGVA:

- i. Caso NGVA e ângulo de ataque do gerador de vórtices de 25°, NGVA-25, e
- ii. Caso NGVA e ângulo de ataque do gerador de vórtices de 35°, NGVA-35.

Note-se que o bordo de fuga do gerador de vórtices está posicionado a uma distância longitudinal de 700 mm a montante do início da rampa inclinada e a uma distância vertical de 50 mm da placa plana.

A componente longitudinal da velocidade, em planos normais ao escoamento não perturbado, é mostrada na Figura 5-49 e na Figura 5-50, para os casos NGVA-25 e NGVA-35, respectivamente. De maneira análoga ao observado anteriormente, estas figuras permitem verificar que a presença do gerador de vórtices reduz substancialmente a espessura da camada limite. Nestas figuras também é possível observar uma forte interação entre os vórtices contra-rotativos originados no extradorso do gerador de vórtices. Esta interação parece ser mais pronunciada a medida em que o ângulo de ataque do gerador de vórtices aumenta.

Comparando-se a Figura 5-49 e a Figura 5-50 com a Figura 5-30, obtida para o caso NGVA, percebe-se que o desenvolvimento da camada limite a

montante da entrada *NACA* e a jusante do gerador de vórtices é influenciada pelo aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices. Entretanto, no início da rampa inclinada da entrada *NACA*, a espessura da camada limite é aproximadamente a mesma nos casos NGVA, NGVA-25 e NGVA-35.

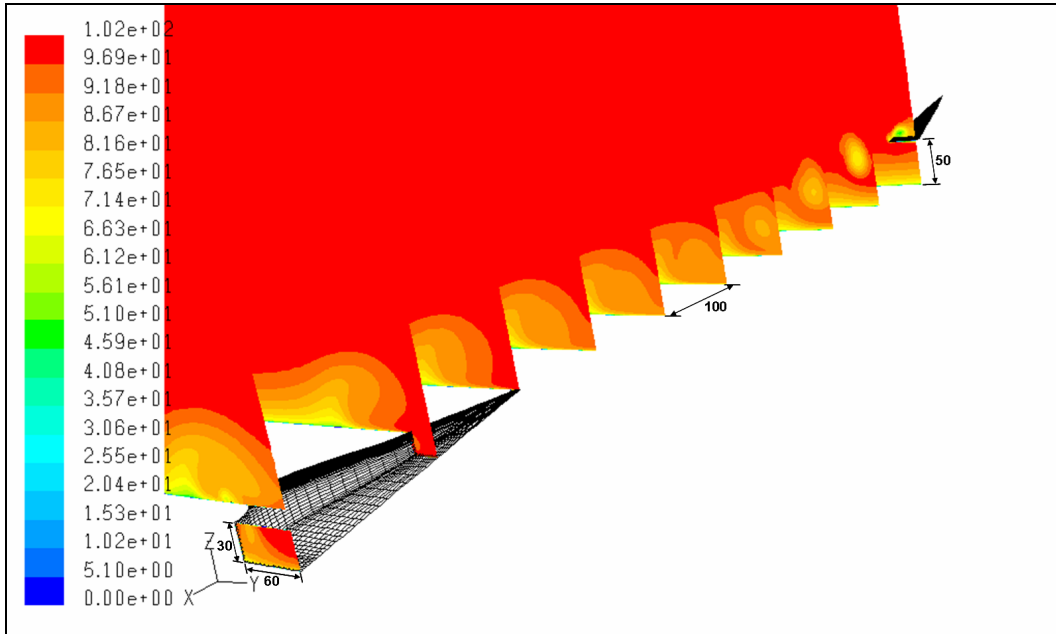


Figura 5-49. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-25 (dimensões em mm).

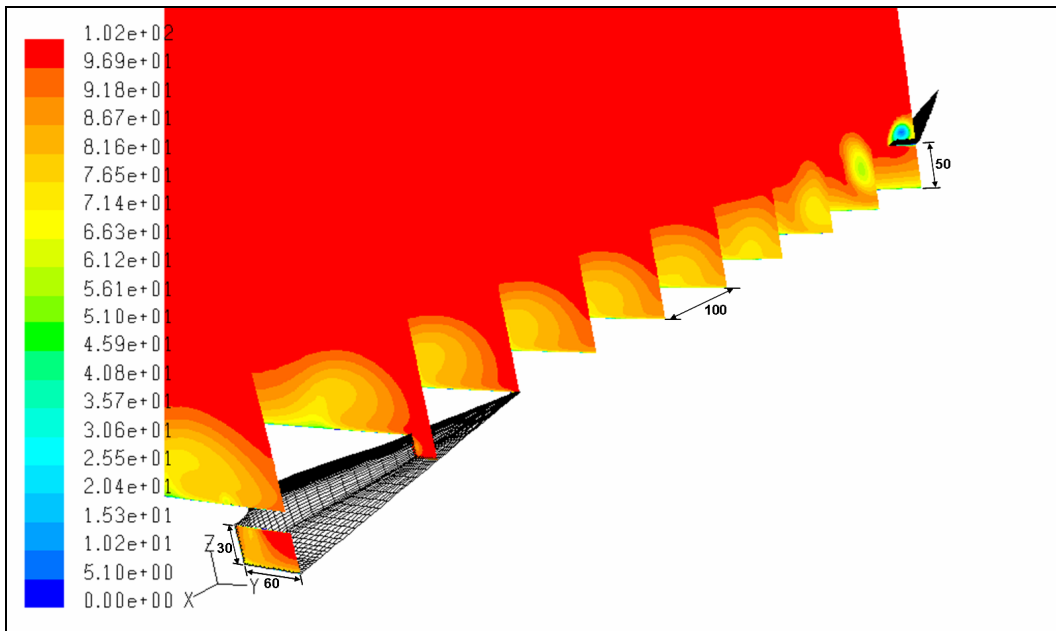


Figura 5-50. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-35 (dimensões em mm).

Este aspecto é ilustrado em maior detalhe na Figura 5-51 e na Figura 5-52, as quais mostram a componente longitudinal da velocidade, no plano de simetria da entrada *NACA*, para os casos NGVA-25 e NGVA-35, respectivamente. A comparação entre estas figuras e a Figura 5-31, obtida para o caso NGVA, mostra que a presença do gerador de vórtices reduz, em todos os casos, a espessura da camada limite no plano de simetria da entrada *NACA*. Porém, para valores do ângulo de ataque do gerador de vórtices superiores a 15° , a esteira turbilhonar do gerador de vórtices acarreta regiões de baixa velocidade na região central da placa plana. Estes resultados sugerem a existência de valores ótimos do ângulo de ataque que maximizem os parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

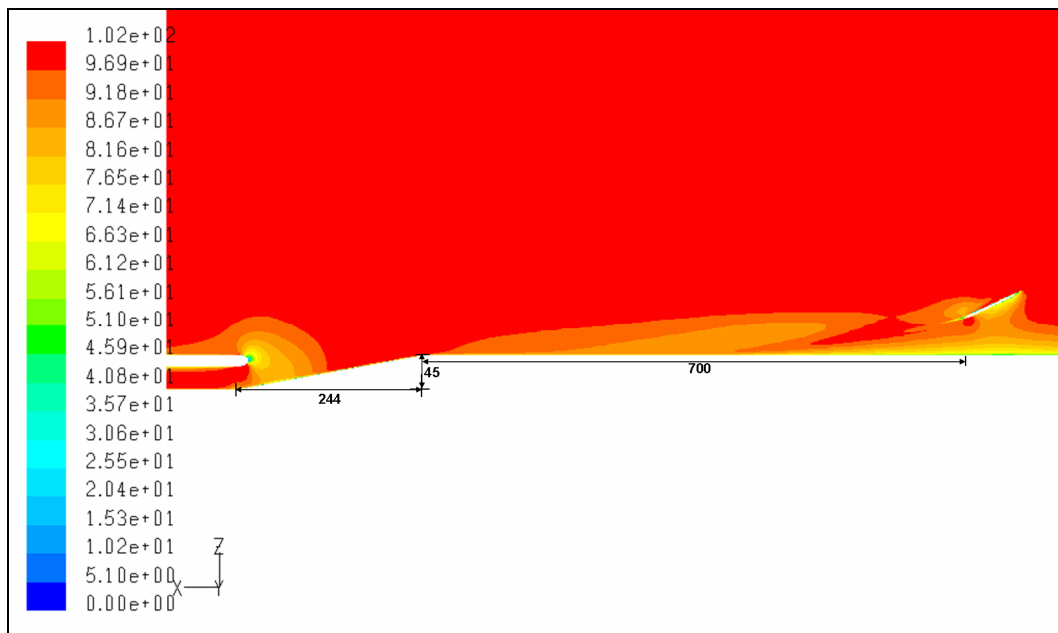


Figura 5-51. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-25, plano de simetria (dimensões em mm).

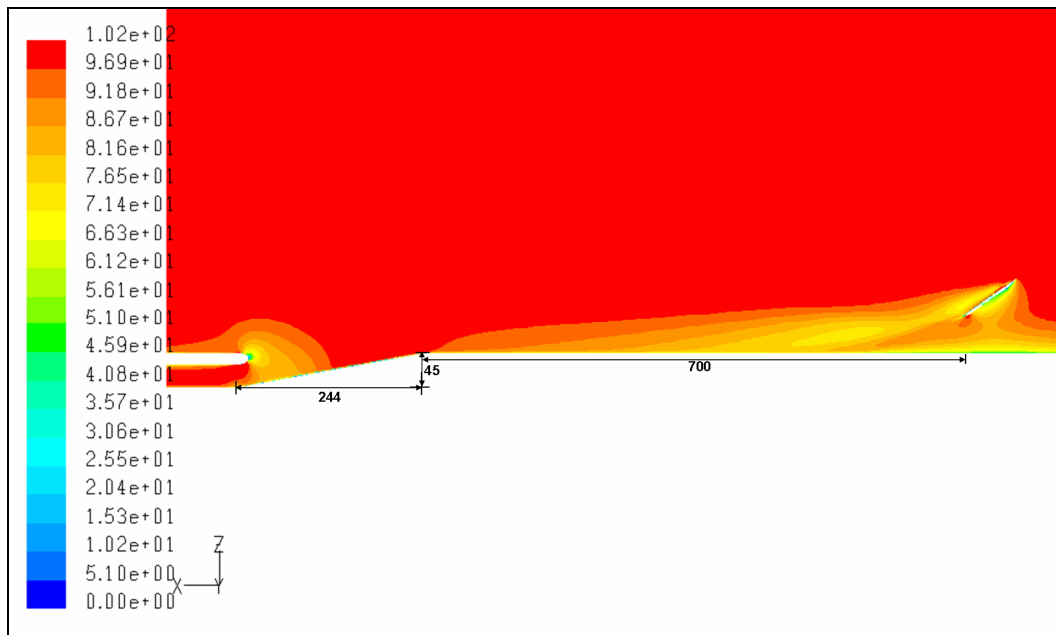


Figura 5-52. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-35, plano de simetria (dimensões em mm).

A Figura 5-53 e a Figura 5-54 mostram os contornos da componente longitudinal da vorticidade, correspondentes a seções, em planos transversais à direção do escoamento não perturbado, das configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre em análise, i.e., NGVA-25 e NGVA-35. Comparando-se estas figuras com a Figura 5-32, correspondente ao caso NGVA, pode-se verificar que (i) a intensidade dos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices e das interações destes vórtices contra-rotativos aumenta com o aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices; e (ii) a interseção do núcleo de vórtices com a placa plana a montante da entrada, originada pelo aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices, leva a um maior espalhamento destes vórtices.

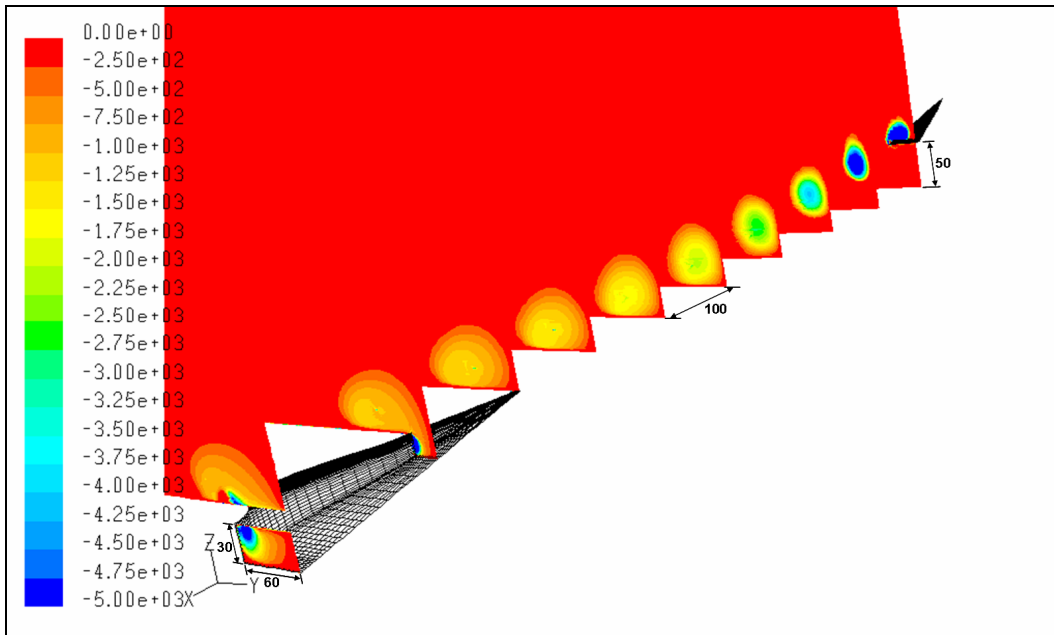


Figura 5-53. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-25 (dimensões em mm).

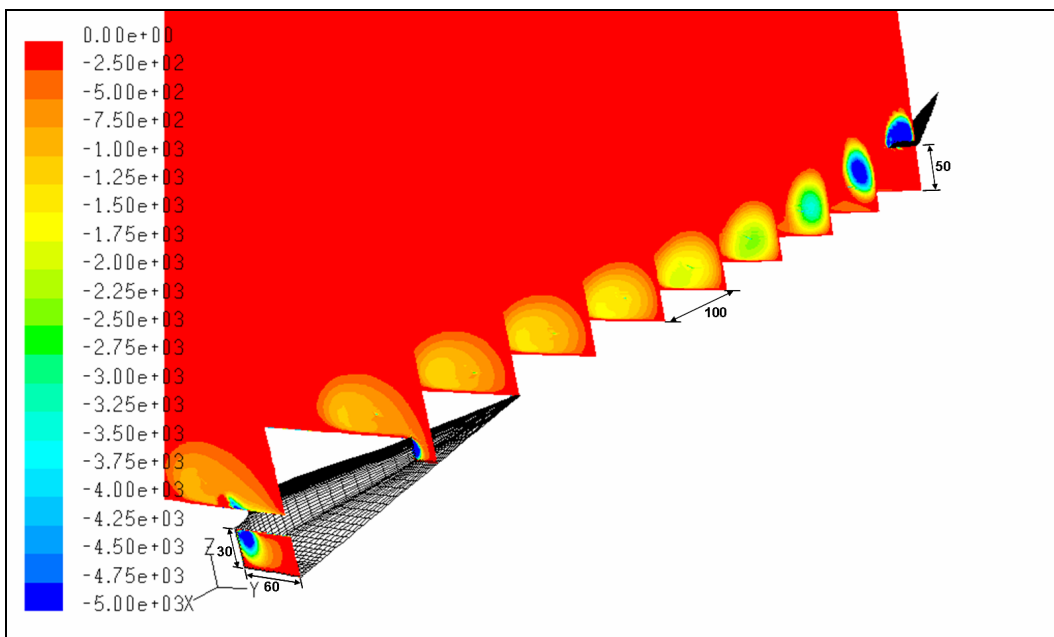


Figura 5-54. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-35 (dimensões em mm).

A Figura 5-55 e a Figura 5-56 mostram o comportamento do coeficiente de pressão ao longo do plano de simetria das configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices, chamadas de casos NGVA-25 e NGVA-35, respectivamente. Comparando-se estas duas figuras com a Figura 5-33, na qual são apresentados resultados obtidos para o caso NGVA, pode ser claramente constatado que o

aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices influencia substancialmente a distribuição do coeficiente de pressão. Com o aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices, as regiões de baixa pressão sobre o extradorso e a jusante do gerador de vórtices são progressivamente mais intensas. A extensão longitudinal destas regiões de baixa pressão, i.e., a esteira do gerador de vórtices, também aumenta com o ângulo de ataque. Entretanto, nesta posição longitudinal do gerador de vórtices, em nenhum dos casos a esteira do gerador de vórtices parece modificar a distribuição do C_p no plano de simetria da entrada *NACA*.

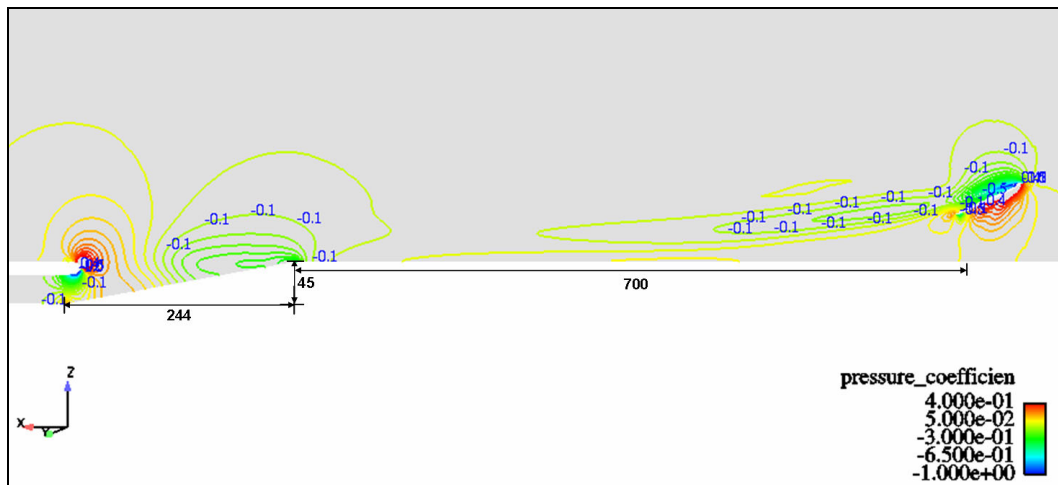


Figura 5-55. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-25, plano de simetria (dimensões em mm).

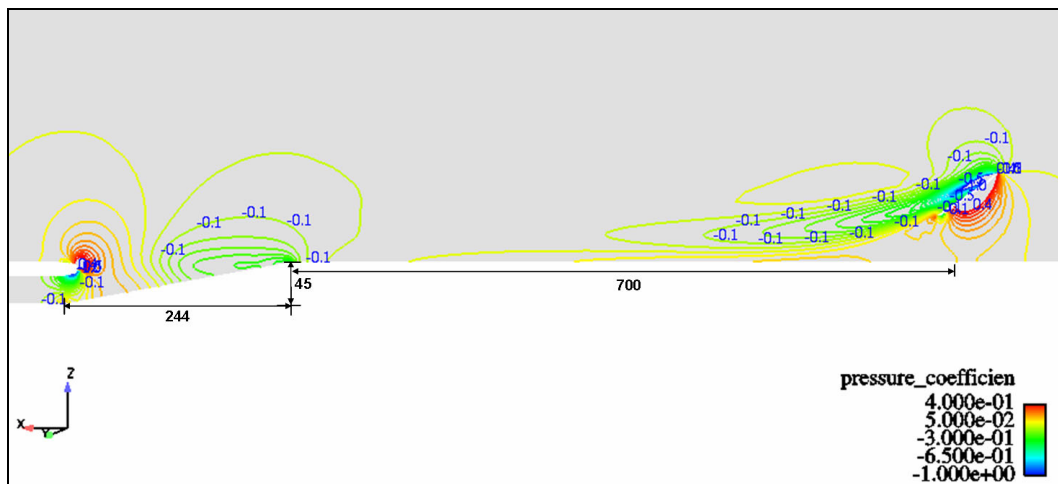


Figura 5-56. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-35, plano de simetria (dimensões em mm).

A distribuição do coeficiente de pressão no plano da garganta da entrada *NACA* é mostrada na Figura 5-57 e na Figura 5-58 para os casos NGVA-25 e

NGVA-35, respectivamente. Quando comparadas estas figuras à Figura 5-34, obtida para o caso NGVA, permitem constatar que o aumento de ângulo de ataque origina, primeiro, uma diminuição e, em seguida, um aumento do nível de distorção no escoamento na garganta da entrada de ar. Esta deterioração da uniformidade do escoamento da garganta, obtida para altos ângulos de ataque do gerador de vórtices, é concomitante ao acréscimo da vorticidade gerada a montante da entrada de ar.

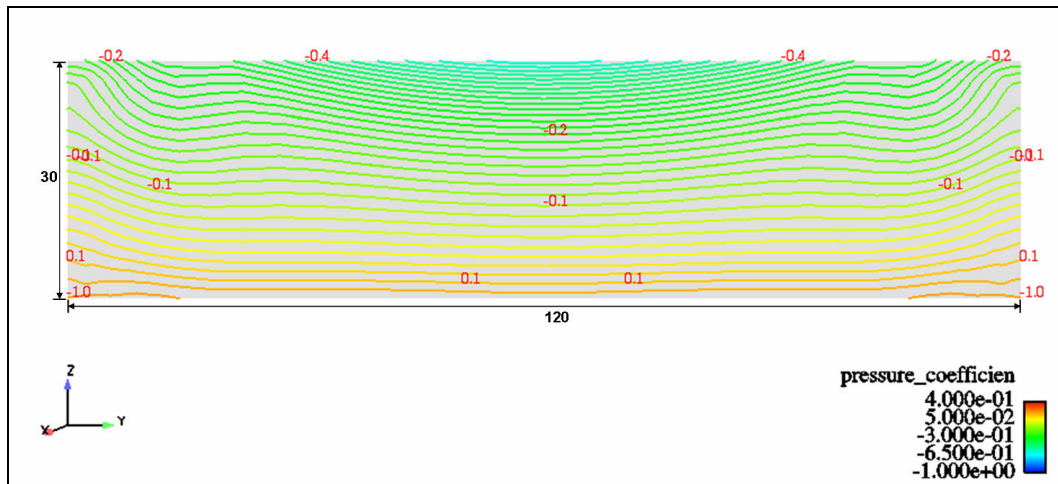


Figura 5-57. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-25, plano da garganta (dimensões em mm).

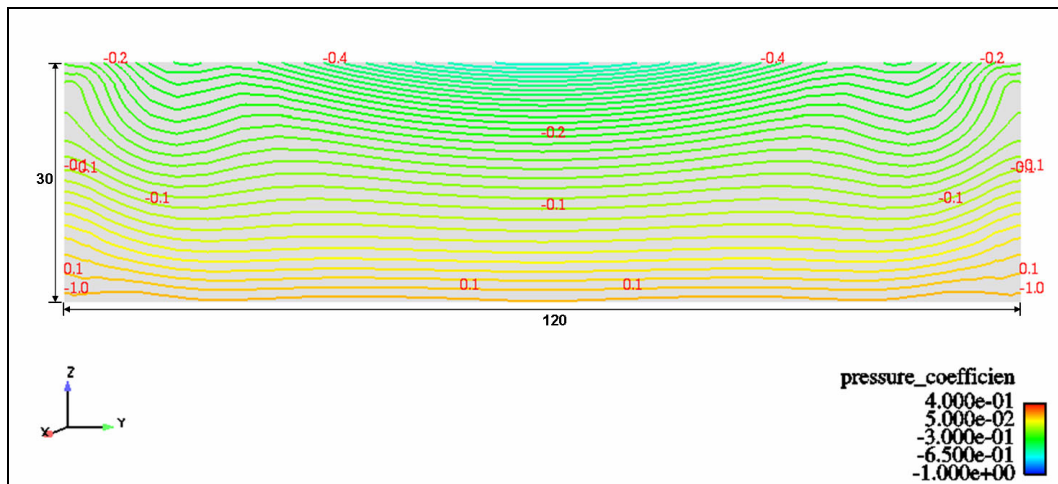


Figura 5-58. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-35, plano da garganta (dimensões em mm).

A Tabela 5-7 mostra os valores dos parâmetros de desempenho das duas novas configurações de *NACA* com gerador de vórtices livre analisadas, i.e., NGVA-25 e NGVA-35, além dos valores obtidos para a entrada *NACA*

convencional (N1A-1) e para o caso NGVA. Nesta tabela são indicados entre parênteses os incrementos percentuais calculados em relação aos valores dos parâmetros correspondentes à entrada *NACA* convencional.

Tabela 5-7. Parâmetros de desempenho – Influência do ângulo de ataque do GV.

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	NGVA	NGVA-25	NGVA-35
Eficiência	0,600	0,513	0,741 (44,4 %)	0,754 (46,9 %)	0,717 (39,7 %)
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,302 (16 %)	0,304 (16,9 %)	0,298 (14,6 %)
Razão de vazões mássicas	----	0,76	0,88 (16 %)	0,89 (16,9 %)	0,87 (14,6 %)
Arrasto total - (N)	----	18,54	32,43 (75 %)	36,65 (97,7 %)	40,4 (117,9 %)
Arrasto de pressão - (N)	----	18,07	31,69 (75,4 %)	35,93 (98,8 %)	39,71 (119,8 %)
NACA	----	18,07	29,68 (64,2 %)	30,01 (66,1 %)	29,32 (62,3 %)
GV	----	0,00	2,01	5,92	10,38
Mastro	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	----	0,47	0,74 (60 %)	0,72 (54,2 %)	0,69 (47,9 %)
NACA	----	0,47	0,59 (26,5 %)	0,57 (23,5 %)	0,56 (19,8 %)
GV	----	0,00	0,16	0,14	0,13
Mastro	----	0,00	0,00	0,00	0,00
Coefficiente de arrasto	0,85	1,06	1,86 (75 %)	2,1 (97,7 %)	2,31 (117,9 %)

A Tabela 5-7 mostra que ambas as configurações NGVA-25 e NGVA-35 exibem melhoras significativas dos valores calculados de eficiência e vazão mássica em relação à entrada sem o gerador de vórtices. Porém, quando o ângulo de ataque do gerador de vórtices passa de 25° para 35° há uma redução relativa dos parâmetros de desempenho. Este comportamento, o qual pode ser atribuído à maior interação dos vórtices contra-rotativos originados no extradorso do gerador de vórtices, sugere a existência de um valor ótimo para o ângulo de ataque do gerador de vórtices.

De maneira análoga aos resultados obtidos quando da variação da posição longitudinal do gerador de vórtices, os valores da eficiência de recuperação de pressão dinâmica são aqueles que exibem as maiores melhoras. Isto está relacionado à ingestão de fluido externo à camada limite pela entrada *NACA*.

Na Tabela 5-7 também pode ser observado que os valores do coeficiente de arrasto exibem um incremento considerável a medida que o ângulo de ataque do gerador de vórtices aumenta. Isto é uma consequência direta do aumento da vazão mássica que acompanha à diminuição da espessura da camada limite a montante da entrada. Quando o ângulo de ataque do gerador de vórtices é aumentado de 15° a 35°, a contribuição devido ao gerador de vórtices para o arrasto total do conjunto *NACA* e gerador de vórtices passa de 1/15 a 1/4.

5.4.5 Influência da área do gerador de vórtices

Nesta seção descreve-se a influência da área do gerador de vórtices, último parâmetro variado neste estudo, sobre a estrutura do escoamento e os parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

Duas modificações da área inicial do gerador de vórtices foram consideradas, a primeira incrementando a área do gerador de vórtices em 50% e a segunda, em 100%. É importante salientar que o alongamento do gerador de vórtices, 1,61, é mantido constante quando são realizadas as modificações na área do gerador de vórtices.

Portanto, nesta seção serão analisados os resultados de duas configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, variantes do caso NGVA:

- i. Caso NGVA e incremento da área do gerador de vórtices de 50%, i.e., $S = 80,8$ mm e $C = 100,4$ mm, NGVA-1,5A, e,
- ii. Caso NGVA e incremento da área do gerador de vórtices de 100%, i.e., $S = 93,3$ mm e $C = 115,9$ mm, NGVA-2,0A.

Cabe ressaltar que nestes casos o bordo de fuga do gerador de vórtices está posicionado a uma distância longitudinal de 700 mm a montante do início da rampa inclinada e a uma distância vertical de 50 mm da placa plana, e o ângulo de ataque do gerador de vórtices é $\alpha = 15^\circ$.

A Figura 5-59 e a Figura 5-60 mostram os contornos da componente longitudinal da velocidade, em planos transversais à direção do escoamento não perturbado, para os casos NGVA-1,5A e NGVA-2,0A, respectivamente. De maneira análoga às demais configurações estudadas, pode ser claramente observado que a presença do gerador de vórtices a montante da entrada *NACA* reduz substancialmente a espessura da camada limite.

Comparando-se estas figuras com a Figura 5-30, que apresenta os resultados para o caso NGVA, pode-se notar que o desenvolvimento da camada limite a montante da entrada *NACA* e a jusante do gerador de vórtices é influenciada pelo aumento da área do mesmo; em particular, a extensão transversal afetada pelo escoamento oriundo do gerador de vórtices aumenta quando a área do gerador de vórtices aumenta. Como consequência, a montante da entrada *NACA*, a largura da região de destruição da camada limite aumenta em 50%, quando se comparam os

casos NGVA e NVGA-2,0A. Por outro lado, a região central entre a entrada *NACA* e o gerador de vórtices praticamente não é afetada pelo aumento da área do gerador de vórtices.

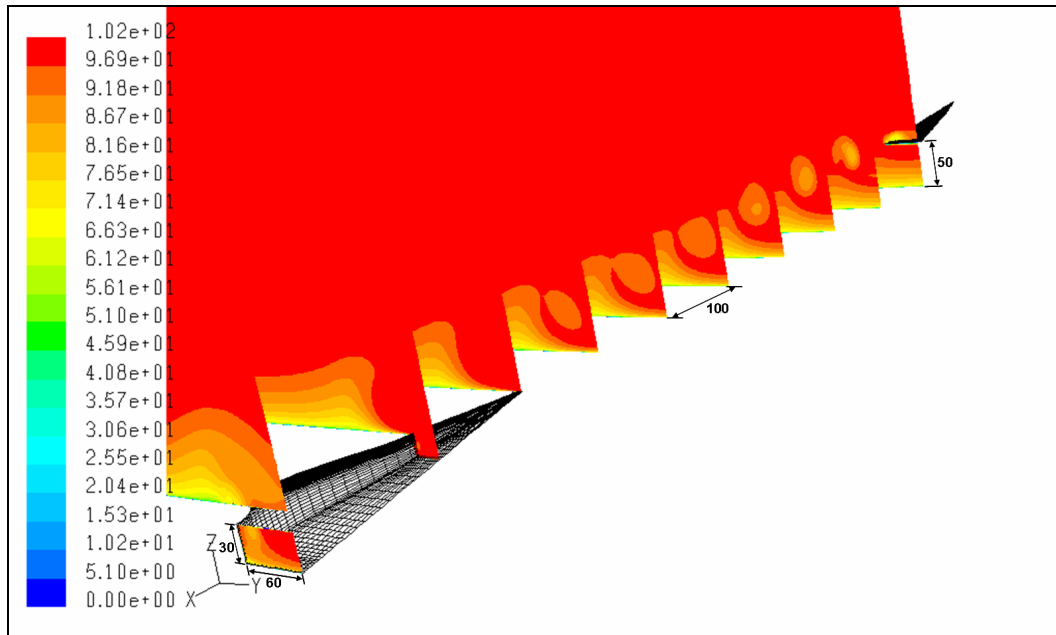


Figura 5-59. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-1,5A (dimensões em mm).

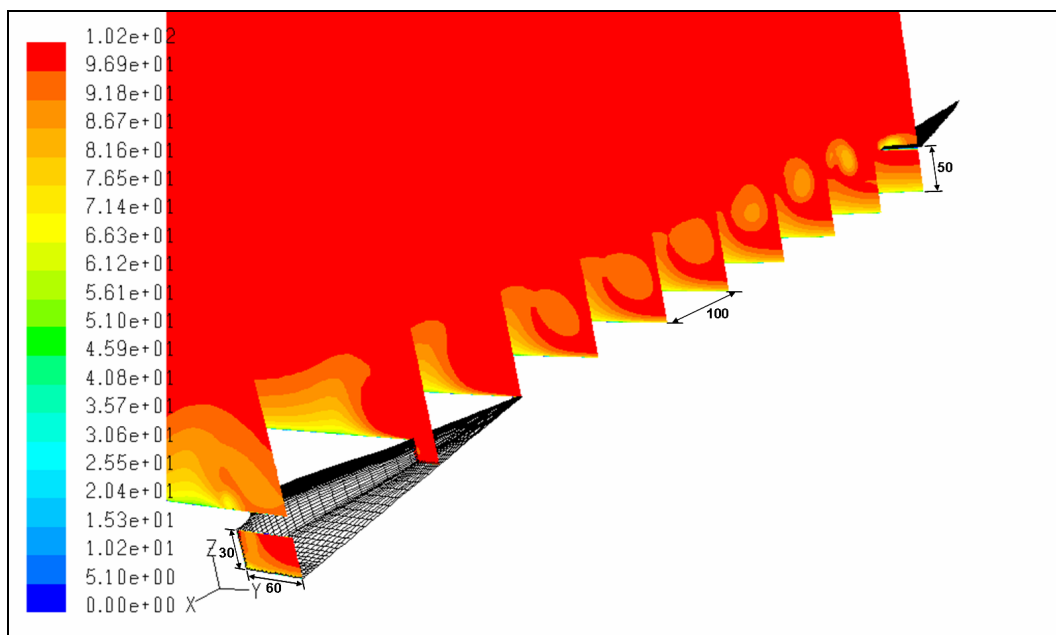


Figura 5-60. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-2,0A (dimensões em mm).

Isto pode ser verificado na Figura 5-31, na Figura 5-61 e na Figura 5-62, as quais mostram os contornos de velocidade, no plano de simetria da entrada *NACA*, para os casos NGVA, NGVA-1,5A e NGVA-2,0A, respectivamente. Diminuindo-se a área do gerador de vórtices para valores inferiores ao do caso NVGA, espera-se que a espessura da camada limite na região central aumente progressivamente.

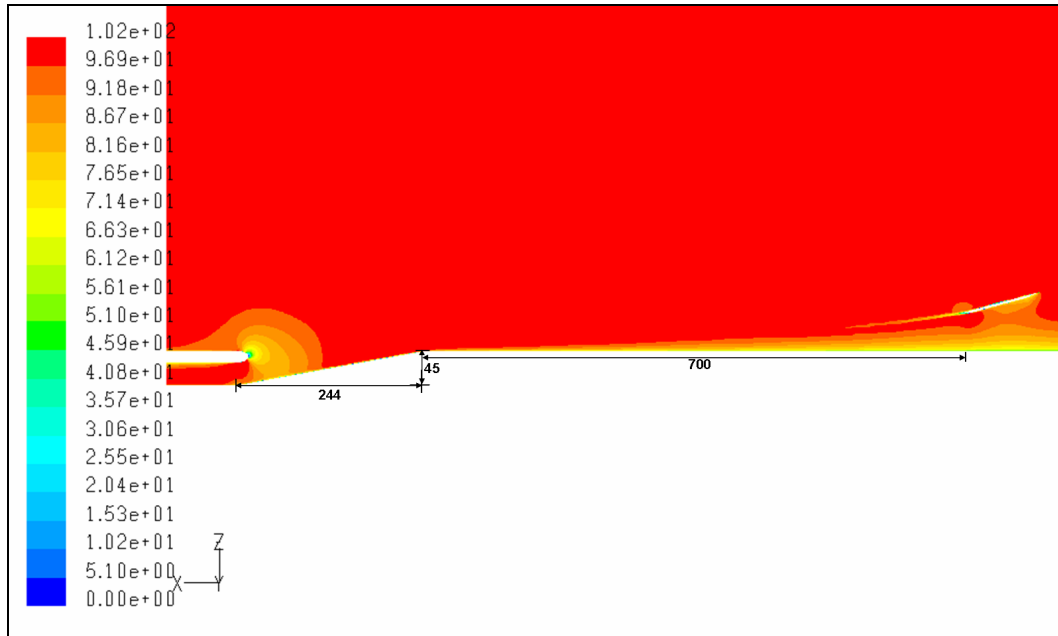


Figura 5-61. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-1,5A, plano de simetria (dimensões em mm).

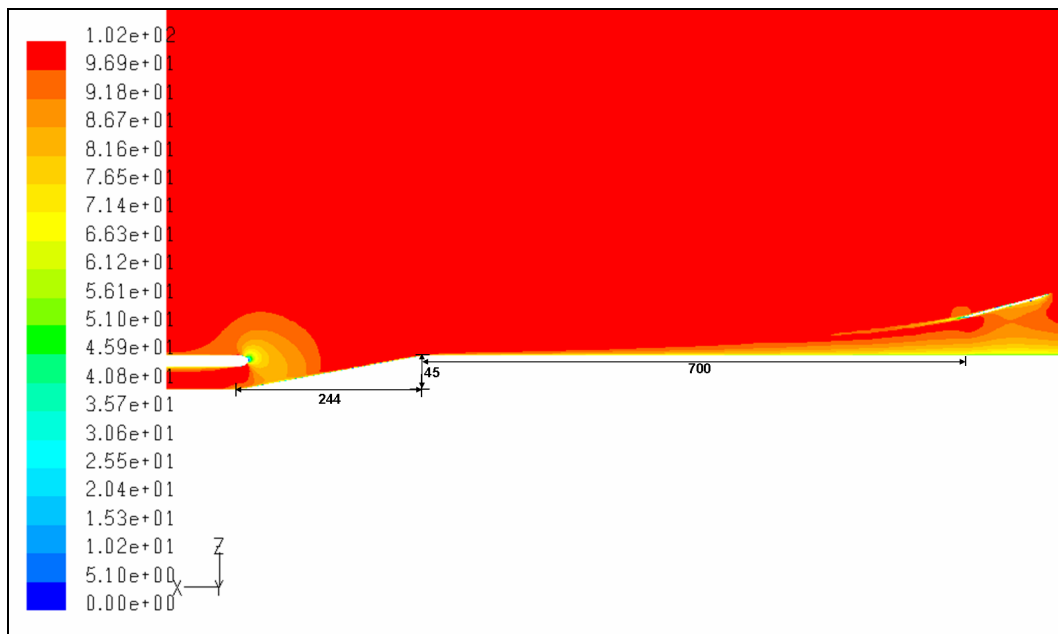


Figura 5-62. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVA-2,0A, plano de simetria (dimensões em mm).

A Figura 5-63 e a Figura 5-64 mostram os contornos da componente longitudinal da vorticidade, nos mesmos planos transversais nos quais foram mostrados os contornos da componente longitudinal da velocidade, para as duas configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre analisadas, i.e., caso NGVA-1,5A e caso NGVA-2,0A. Em geral, comparando-se estas figuras com a Figura 5-32, correspondente ao caso NGVA, pode-se notar que o aumento da área do gerador de vórtices influencia levemente a geração e o desenvolvimento dos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices. O aspecto mais importante a salientar é o deslocamento axial do núcleo de vórtices, o qual leva, como indicado anteriormente, a um aumento da largura da região de destruição da camada limite, e consequentemente, a um melhor desempenho da entrada *NACA*.

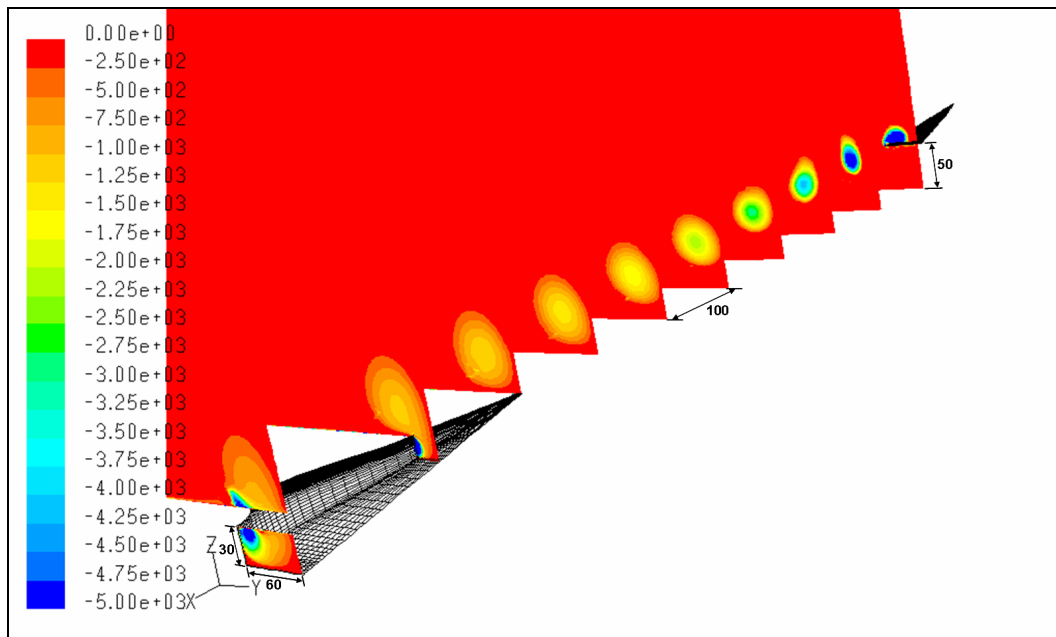


Figura 5-63. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-1,5A (dimensões em mm).

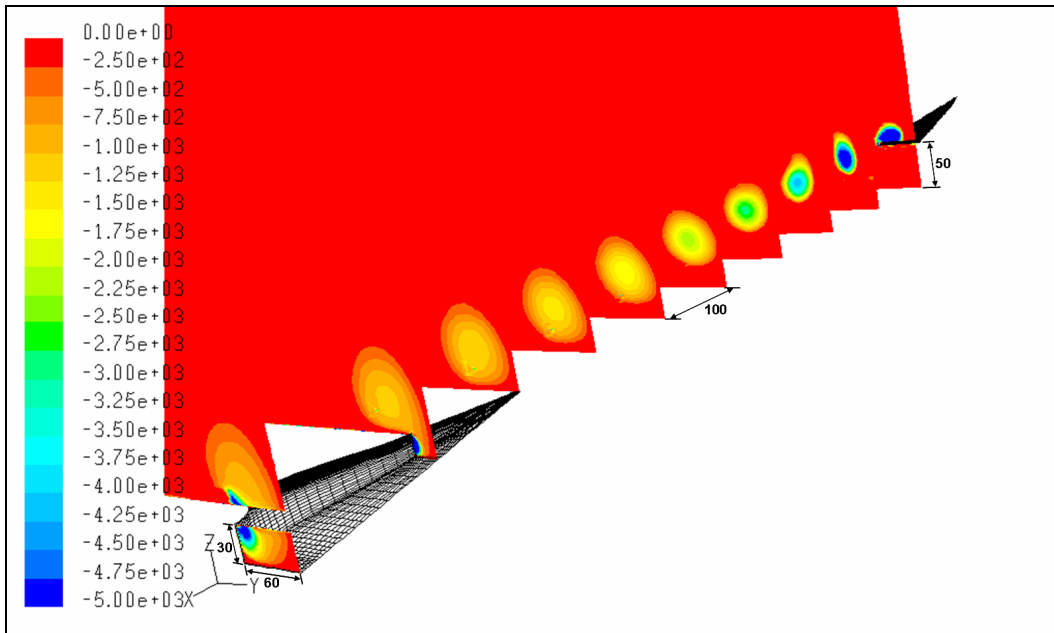


Figura 5-64. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVA-2,0A (dimensões em mm).

De maneira análoga à distribuição de velocidades, a distribuição de pressão no plano de simetria não é afetada pelo aumento da área considerado. Assim, os resultados correspondentes não serão mostrados. Em compensação, o aumento da área do gerador de vórtices modifica consideravelmente a distribuição de pressão no plano da garganta da entrada *NACA*.

Isto pode ser constatado na Figura 5-34, na Figura 5-65 e na Figura 5-66, que foram traçadas a partir dos resultados obtidos para os casos NGVA, NGVA-1,5A e NGVA-2,0A, respectivamente.

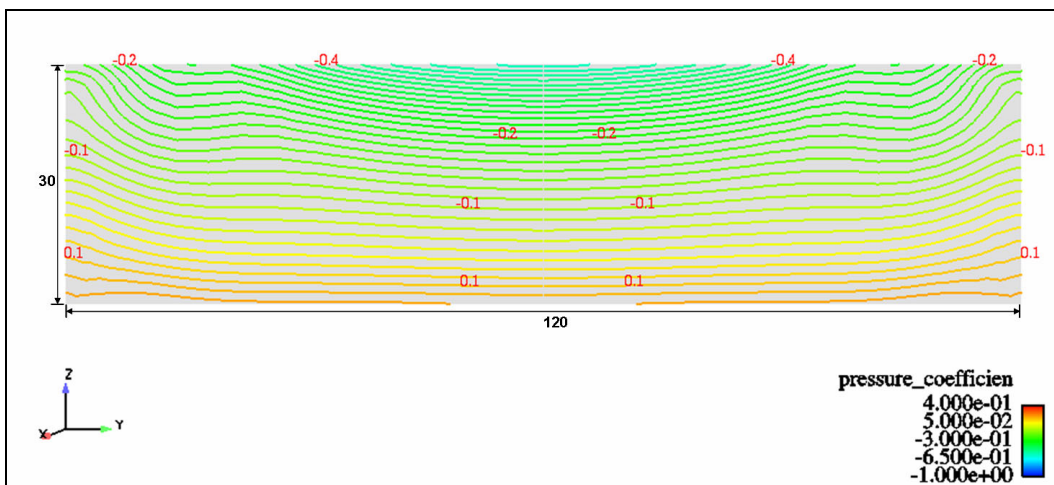


Figura 5-65. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-1,5A, plano da garganta (dimensões em mm).

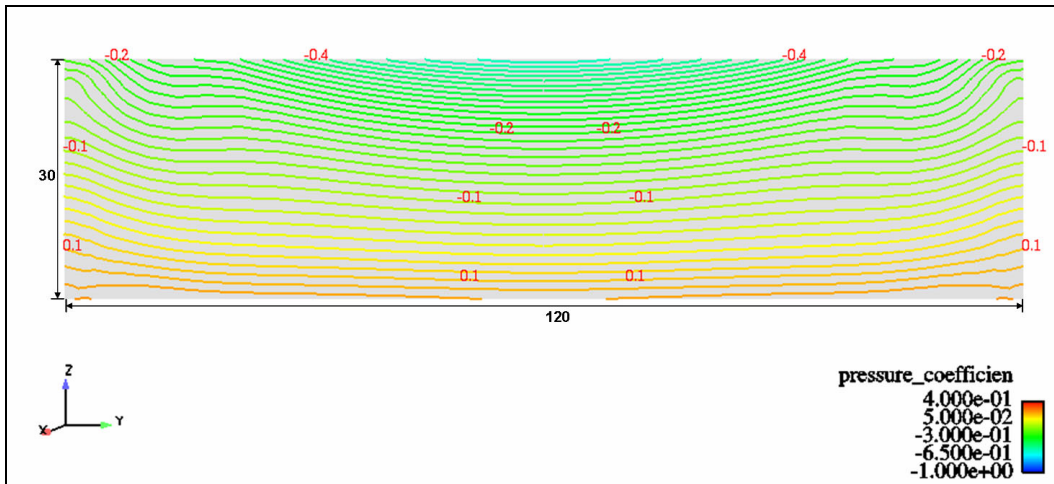


Figura 5-66. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVA-2,0A, plano da garganta (dimensões em mm).

Uma comparação destas figuras permite verificar que o aumento da área do gerador de vórtices produz um escoamento progressivamente mais uniforme na garganta da entrada *NACA*. Esta diminuição do nível de distorção do escoamento parece estar relacionada ao aumento da extensão transversal de destruição da camada limite à jusante do gerador de vórtices e à montante da entrada *NACA*.

A Tabela 5-8 mostra os valores dos parâmetros de desempenho das configurações de *NACA* com gerador de vórtices NGVA-1,5A e NGVA-2,0A, e sua comparação com os casos N1A-1 e NGVA. Nesta tabela os incrementos percentuais calculados, em relação aos valores dos parâmetros correspondentes à entrada *NACA* convencional, são indicados entre parêntesis.

Tabela 5-8. Parâmetros de desempenho – Influência da área do GV.

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	NGVA	NGVA-1,5A	NGVA-2,0A
Eficiência	0,600	0,513	0,741 (44,4 %)	0,79 (54 %)	0,808 (57,5 %)
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,302 (16 %)	0,31 (19,3 %)	0,313 (20,5 %)
Razão de vazões mássicas	---	0,76	0,88 (16 %)	0,91 (19,3 %)	0,91 (20,5 %)
Arrasto total - (N)	---	18,54	32,43 (75 %)	34,5 (86,1 %)	36,02 (94,3 %)
Arrasto de pressão - (N)	---	18,07	31,69 (75,4 %)	33,69 (86,5 %)	35,15 (94,5 %)
NACA	---	18,07	29,68 (64,2 %)	30,59 (69,3 %)	30,9 (71 %)
GV	---	0,00	2,01	3,10	4,25
Mastro	---	0,00	0,00	0,00	0,00
Arrasto viscoso - (N)	---	0,47	0,74 (60 %)	0,81 (73,4 %)	0,87 (86,5 %)
NACA	---	0,47	0,59 (26,5 %)	0,6 (28 %)	0,6 (29,4 %)
GV	---	0,00	0,16	0,21	0,27
Mastro	---	0,00	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de arrasto	0,85	1,06	1,86 (75 %)	1,97 (86,1 %)	2,06 (94,3 %)

A Tabela 5-8 mostra que o aumento da área do gerador de vórtices acarreta melhoras significativas dos valores calculados de eficiência e vazão mássica. Assim, quando a área do gerador de vórtices é incrementada em 50%, a eficiência e a vazão mássica aumentam 54% e 19,3%, respectivamente; e, quando a área do gerador de vórtices é incrementada em 100%, os aumentos respectivos são 57,5% e 20,5%. Isto parece apontar para um efeito de saturação nos ganhos obtidos à medida que a área aumenta. Adicionalmente, na Tabela 5-8 pode também ser verificado que os valores do coeficiente de arrasto exibem um incremento significativo nas configurações NGVA-1,5A e NGVA-2,0A. Isto é uma consequência do incremento da vazão mássica que acompanha a diminuição da espessura da camada limite. Ainda assim, a contribuição para o arrasto devido ao gerador de vórtices é de aproximadamente 10% no caso em que área do gerador de vórtices é incrementada em 100%.

Comparando-se a Tabela 5-8 com a Tabela 5-7, pode-se notar que maiores ganhos nos parâmetros de desempenho da entrada *NACA* são obtidos quando a área do gerador de vórtices é aumentada do que quando o ângulo de ataque do gerador de vórtices aumenta. Além disto, a penalidade em termos de coeficiente de arrasto é menor, em ambos os casos, do que na melhor situação referida à variação do ângulo de ataque do gerador de vórtices, 25°, ver Tabela 5-7. Isto pode indicar um rumo para uma otimização dos parâmetros de desempenho das entradas *NACA*.

5.5

Anteprojeto do conjunto entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro

Até este ponto, todos os resultados apresentados de entrada *NACA* com gerador de vórtices, seção 5.4, foram realizados usando um gerador de vórtices livre, i.e., em nenhuma das situações foi utilizado um mastro ou suporte para fixar o gerador de vórtices em relação à entrada *NACA*.

Como é compreensível, esta situação é factível de se modelar e simular numericamente; porém, na prática é necessário instalar o gerador de vórtices sobre a placa plana utilizando algum tipo de suporte. Por esta razão, o seguinte passo no desenvolvimento de nosso estudo foi projetar o mastro de suporte do gerador de

vórtices, o qual é destinado a manter o gerador de vórtices na posição relativa desejada com respeito à entrada *NACA*.

Para o projeto do mastro do gerador de vórtices, foram utilizadas duas considerações básicas: (i) o mastro deve, se possível, contribuir à redução da espessura da camada limite a montante da entrada *NACA* e a jusante do gerador de vórtices, e (ii) a configuração geométrica do mastro deve ser a mais simples possível.

No tocante à primeira consideração, o que se pretende é que a esteira gerada pelo mastro possa contribuir favoravelmente ao efeito dos vórtices contrarotativos gerados no extradorso do gerador de vórtices no que diz respeito à influência destes sobre a redução da espessura da camada limite. No mínimo, se não é possível contribuir favoravelmente a esta redução, deseja-se que a presença do mastro não acarrete efeitos nefastos sobre o desenvolvimento da camada limite. Considerando-se que a redução da camada limite ocorre principalmente na região central da placa plana, foi decidido usar um par de mastros alares, como mostrado na Figura 5-67. Uma outra escolha considerada foi a utilização de um mastro ventral. Entretanto, a esteira do mastro ventral poderia influenciar negativamente o processo de redução da espessura na parte central da camada limite, e também poderia ser ingerida pela entrada *NACA*, degradando assim seus parâmetros de desempenho uma vez que a pressão total é menor na região da esteira.

Em relação à configuração geométrica do mastro, foi decidido que esta seja a mais simples possível, porém representativa de um mastro que possa ser construído na prática. Esta escolha visa preservar a natureza genérica dos resultados obtidos. A otimização dos parâmetros de desempenho com base em sutilezas geométricas será objeto de trabalhos futuros.

Utilizou-se a configuração de entrada *NACA* com gerador de vórtices livre, NGVA, como a configuração para a qual o mastro é projetado. O mastro projetado foi obtido como resultado da extrusão de um perfil aerodinâmico *NACA* 0012 perpendicularmente à placa plana. A corda do perfil é de 25 mm, o que corresponde a uma espessura máxima de 3 mm. A distância, na direção lateral, entre o bordo de ataque e o plano de simetria é de 21 mm.

Definindo-se como ângulo de derrapagem o ângulo formado pela linha de arqueamento do mastro e o plano de simetria do gerador de vórtices, foi decidido

utilizar três valores para este parâmetro, 0° , 5° e 10° . A Figura 5-68 mostra, à esquerda, um caso com derrapagem nula, e, à direita, um caso de derrapagem positiva, 5° . Note-se que o eixo de rotação do mastro é aquele que passa pelo bordo de ataque geométrico do perfil, conforme ilustrado na Figura 5-68. Assim, somente quando a derrapagem é nula, o bordo de fuga do mastro e do gerador de vórtices são coincidentes. Enfim, cabe ressaltar que o ângulo de derrapagem geométrico escolhido não corresponde à derrapagem aerodinâmica efetiva, a qual é função das características do escoamento no intradorso do gerador de vórtices e de sua distância à placa plana.

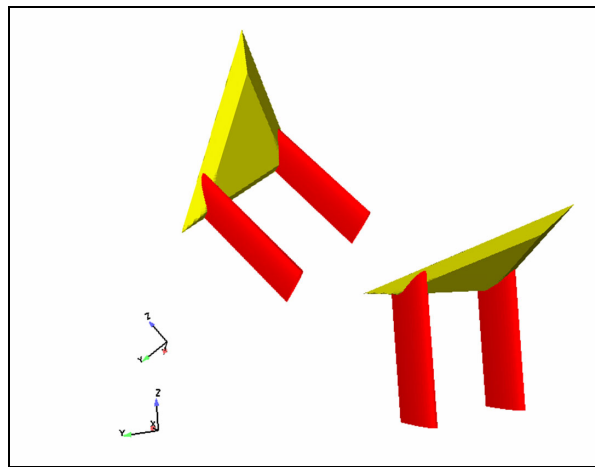


Figura 5-67. Vista em três dimensões do mastro.

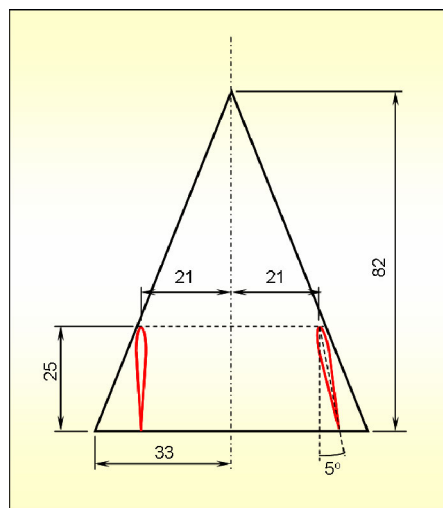


Figura 5-68. Características geométricas do mastro (dimensões em mm).

O mastro projetado foi acoplado ao conjunto formado pela entrada *NACA* e pelo gerador de vórtices livre, caso NGVA. A configuração base de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro com ângulo de derrapagem nulo corresponde ao

caso NGVAM-0. O bordo de fuga do gerador de vórtices está posicionado a uma distância horizontal de 700 mm a montante do início da rampa inclinada e a uma distância vertical de 50 mm da placa plana, e o um ângulo de ataque do gerador de vórtices é de $\alpha = 15^\circ$.

5.6

NACA com gerador de vórtices e mastro

Os resultados e a análise das simulações correspondentes ao conjunto entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro serão apresentados nesta seção. Primeiramente será avaliada a influência da inclusão do mastro sobre a estrutura do escoamento, e em seguida, o efeito do ângulo de derrapagem do mastro sobre os parâmetros de desempenho da entrada *NACA*.

5.6.1

Estrutura do escoamento

A Figura 5-69 mostra as linhas de corrente coloridas pela componente longitudinal da velocidade para o caso NGVAM-0, configuração base de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro. Estas linhas de corrente correspondem a partículas de fluido que poderiam intersectar a seção reta do duto de saída da entrada *NACA*. De maneira análoga aos demais resultados apresentados, o movimento rotacional do fluido causado pela geometria da entrada pode ser claramente observado nestas figuras. Pode-se notar na Figura 5-29, correspondente ao caso NGVA, que algumas partículas de fluido que ingressam na entrada *NACA* provêm da camada limite. Conforme mostrado na Figura 5-69, com o uso do mastro, este número de partículas de fluido de baixa velocidade parece diminuir. Assim, espera-se que a pressão dinâmica na entrada *NACA* aumente quando o gerador de vórtices com mastro é utilizado.

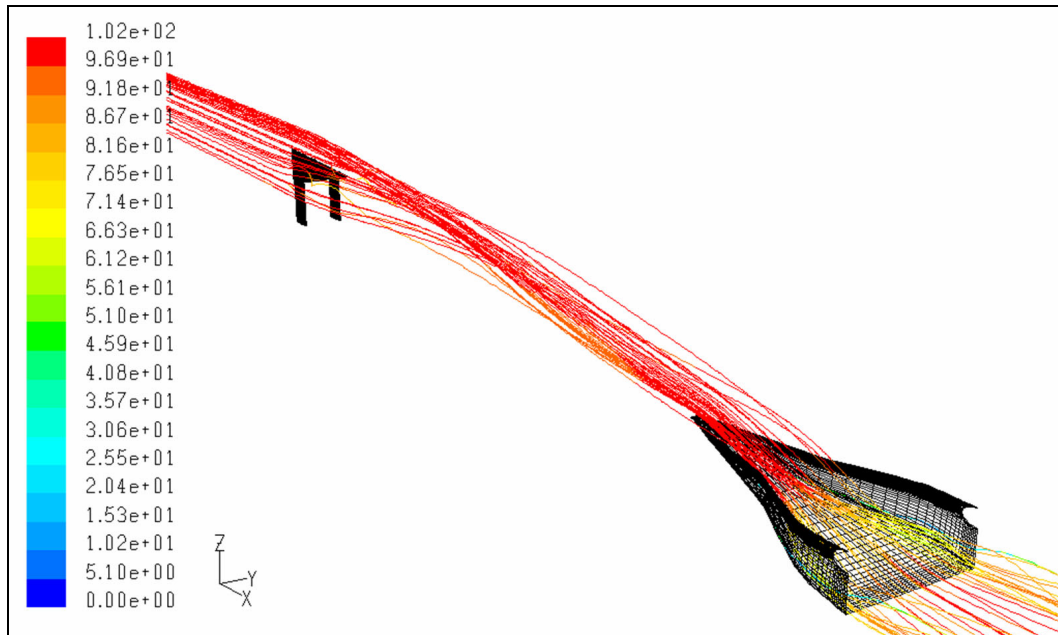


Figura 5-69. Linhas de correntes coloridas pela componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0.

A componente longitudinal da velocidade é mostrada na Figura 5-70, em diferentes planos transversais à direção do escoamento não perturbado, para a configuração NGVAM-0. Comparando-se a Figura 5-70 com a Figura 5-30, a qual mostra os resultados obtidos para o caso NGVA, percebe-se que o desenvolvimento da camada limite a montante da entrada *NACA* e a jusante do gerador de vórtices é levemente influenciado pelo uso do mastro. Esta influência parece restrita aos primeiros 20 cm a jusante do gerador de vórtices, onde ocorre um decréscimo da velocidade devido à esteira do mastro. Mais a jusante, a espessura da camada limite não apresenta variações significativas originadas pela presença do mastro.

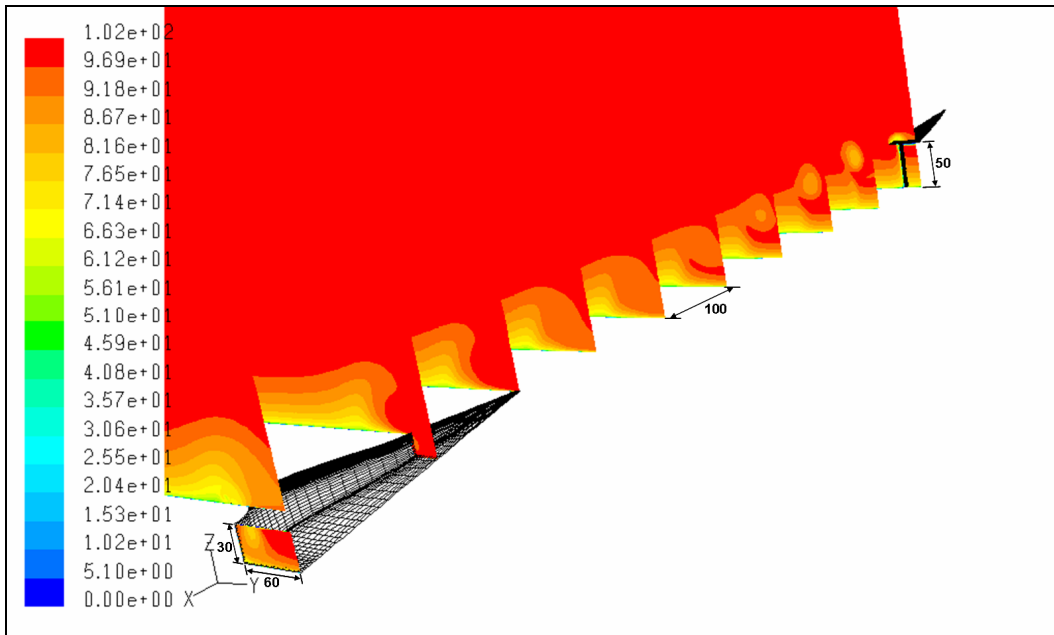


Figura 5-70. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0 (dimensões em mm).

Assim, o uso do gerador de vórtices com mastro provoca uma redução substancial da espessura da camada limite, em particular na região central da placa plana. Este aspecto é ilustrado em maior detalhe na Figura 5-71, a qual mostra a componente longitudinal da velocidade, no plano de simetria da entrada, para a configuração de entrada *NACA* com gerador de vórtices com mastro, caso NGVAM-0.

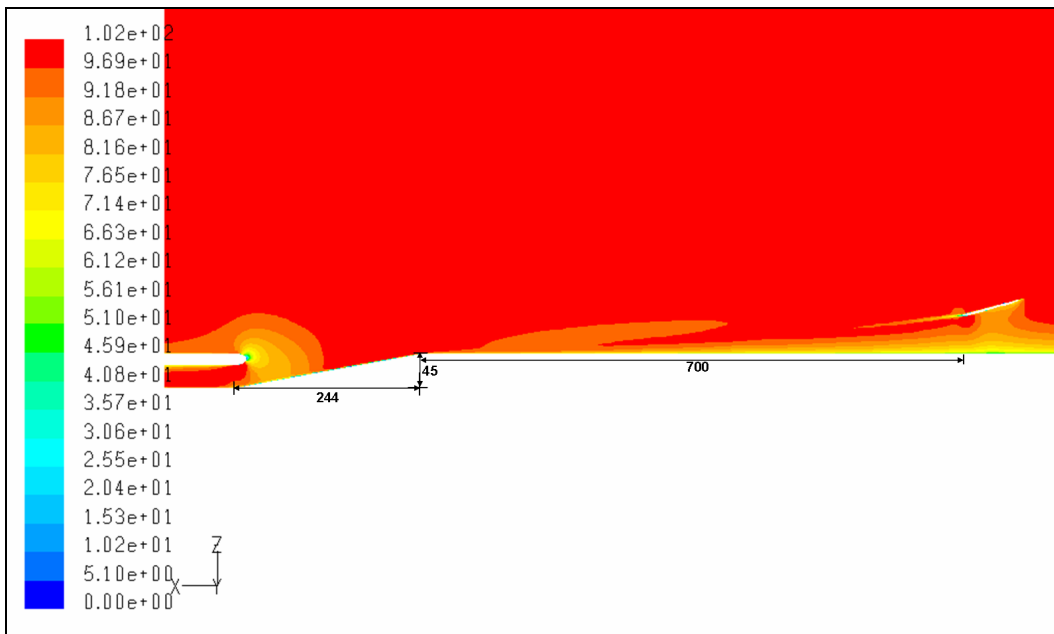


Figura 5-71. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-0, plano de simetria (dimensões em mm).

A fim de analisar o comportamento da esteira de vórtices gerada pelo mastro, a componente longitudinal da vorticidade é mostrada na Figura 5-72. Nesta figura podem ser vistas seções retas em planos transversais à direção do escoamento não perturbado, e equidistantes entre si de 100 mm, para o caso NGVM-0. Esta figura mostra claramente que a esteira gerada pelo mastro é de pequena intensidade quando comparada aos vórtices gerados no extradorso do gerador de vórtices. Nesta figura, percebe-se também que esta esteira é dissipada muito antes de atingir o início da rampa inclinada.

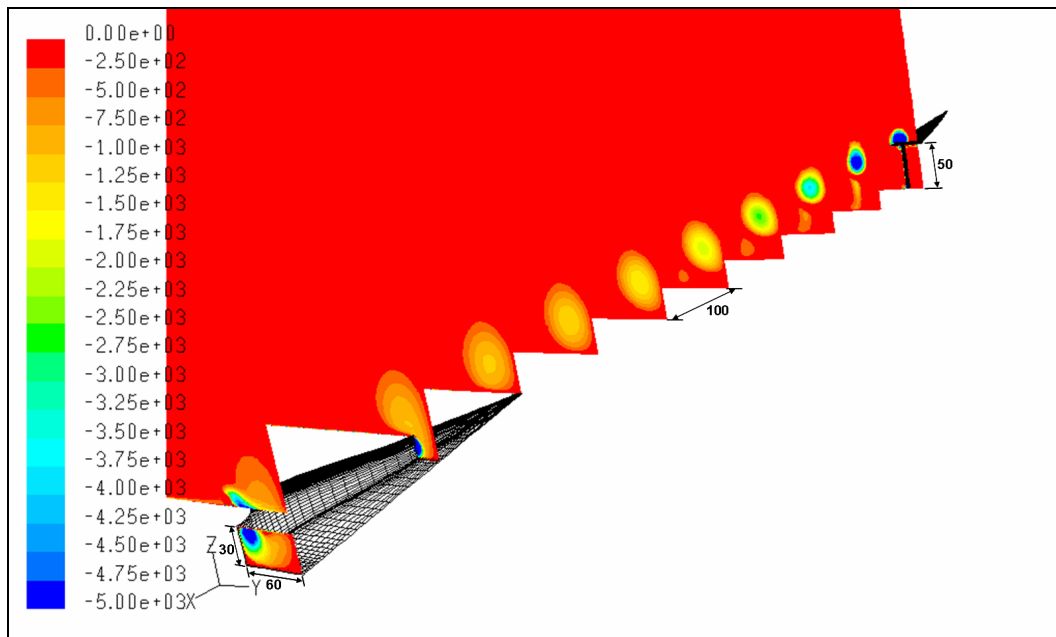


Figura 5-72. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVM-0 (dimensões em mm).

A distribuição do coeficiente de pressão, C_p , ao longo o plano de simetria da entrada *NACA* é traçada na Figura 5-73 para a configuração de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, caso NGVM-0. Comparando-se esta figura com a Figura 5-33, a qual foi obtida para o caso NGVA, pode-se observar que a presença do mastro influencia apenas levemente a distribuição do coeficiente de pressão neste plano de simetria. Esta influência resulta em um ligeiro aumento na uniformidade da distribuição de C_p entre o gerador de vórtices e a entrada de ar.

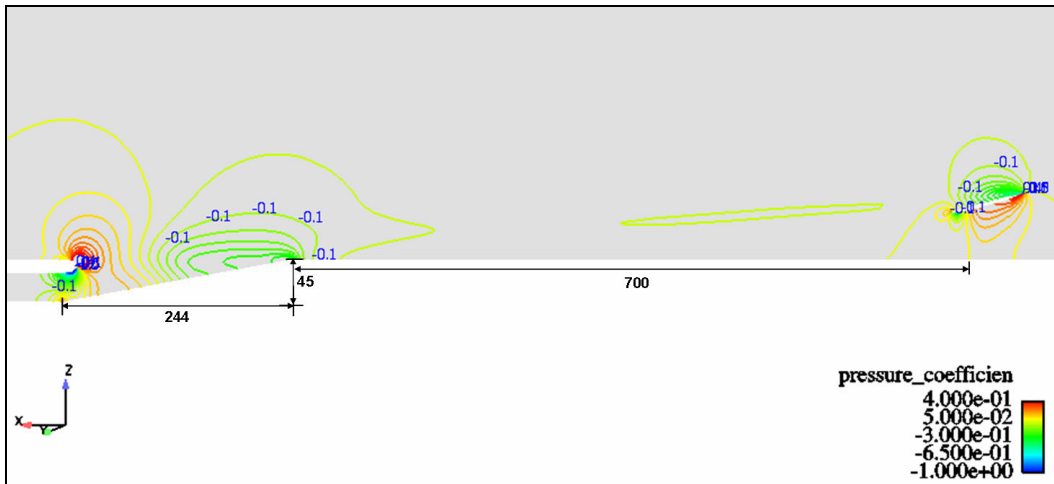


Figura 5-73. Coeficiente de pressão, C_p – Caso NGVAM-0, plano de simetria (dimensões em mm).

A distribuição do coeficiente de pressão no plano da garganta da entrada *NACA* é traçada na Figura 5-74 para o caso NGVAM-0. Comparando-se os resultados mostrados nesta figura com aqueles obtidos para o caso NGVA e reportados na Figura 5-34, verifica-se que a presença do mastro leva a um escoamento ligeiramente mais uniforme na garganta da entrada *NACA*. Esta diminuição da distorção do escoamento é acompanhada por um incremento nos parâmetros de desempenho da entrada, tal como será mostrado mais adiante.

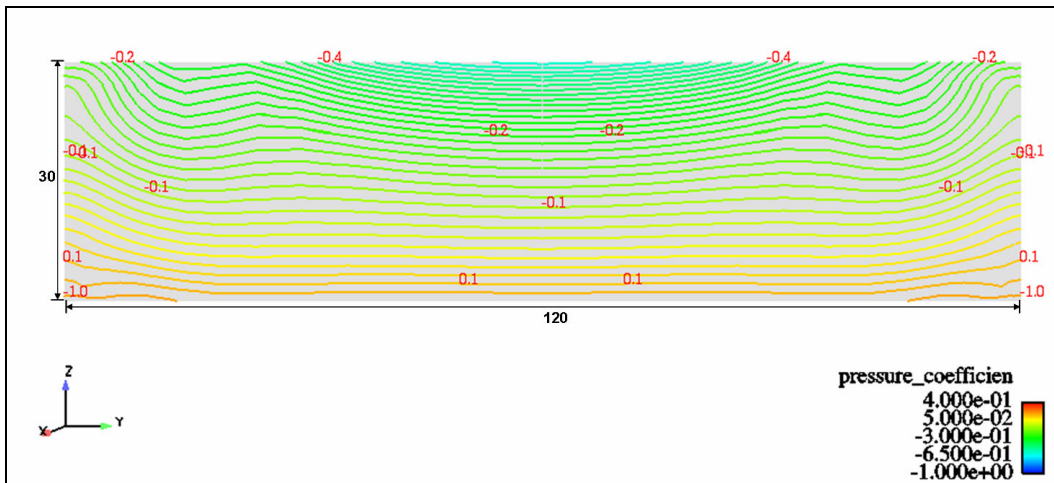


Figura 5-74. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVAM-0, plano da garganta da *NACA* (dimensões em mm).

5.6.2

Influência do ângulo de derrapagem do mastro

Com o objetivo de avaliar a influência do ângulo de derrapagem do mastro sobre o desempenho da entrada *NACA*, são estudadas duas variações do ângulo de derrapagem do mastro, a partir da configuração base de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, caso NGVAM-0. Estas duas configurações, cujos resultados serão apresentados nesta seção, são:

- i. Ângulo de derrapagem do mastro de 5° , caso NGVAM-5, e;
- ii. Ângulo de derrapagem do mastro de 10° , caso NGVAM-10.

Cabe lembrar que na configuração base de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro sem derrapagem, caso NGVAM-0, o bordo de fuga do gerador de vórtices está posicionado a uma distância horizontal de 700 mm a montante do início da rampa inclinada e a uma distância vertical de 50 mm da placa plana. O ângulo de ataque do gerador de vórtices nesta configuração é de $\alpha = 15^\circ$.

Quando do estudo das modificações da estrutura do escoamento devido às mudanças do ângulo de ataque, da posição longitudinal ou da área do gerador de vórtices, foram observadas alterações nas linhas de corrente que ingressam na entrada de ar. Porém, quando o ângulo de derrapagem do mastro é modificado, as alterações induzidas sobre as linhas de corrente são imperceptíveis. Por esta razão, as figuras correspondentes a este resultado não serão mostradas.

A influência da modificação do ângulo de derrapagem do mastro sobre o desenvolvimento da camada limite a montante da entrada *NACA* é ilustrada através dos contornos da componente longitudinal da velocidade mostrados na Figura 5-70, na Figura 5-75 e na Figura 5-76, nas quais são traçados planos transversais à direção do escoamento não perturbado para os casos NGVA, NGVAM-5 e NGVAM-10, respectivamente.

Nestas figuras pode-se perceber que, para os dois valores não nulos do ângulo de derrapagem do mastro, a redução da espessura da camada limite permanece praticamente inalterada, principalmente na região central da placa plana. Além disto, é possível verificar nestas figuras que ocorre uma pequena interação entre os vórtices contra-rotativos originados no extradorso do gerador de vórtices, a qual parece diminuir com o aumento do ângulo de derrapagem do mastro.

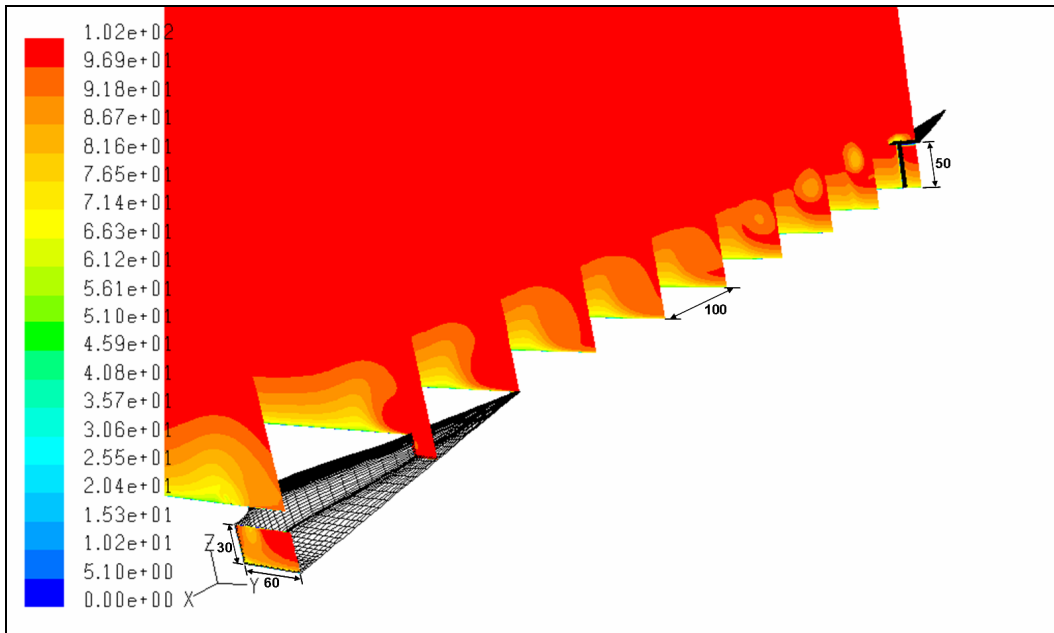


Figura 5-75. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-5 (dimensões em mm).

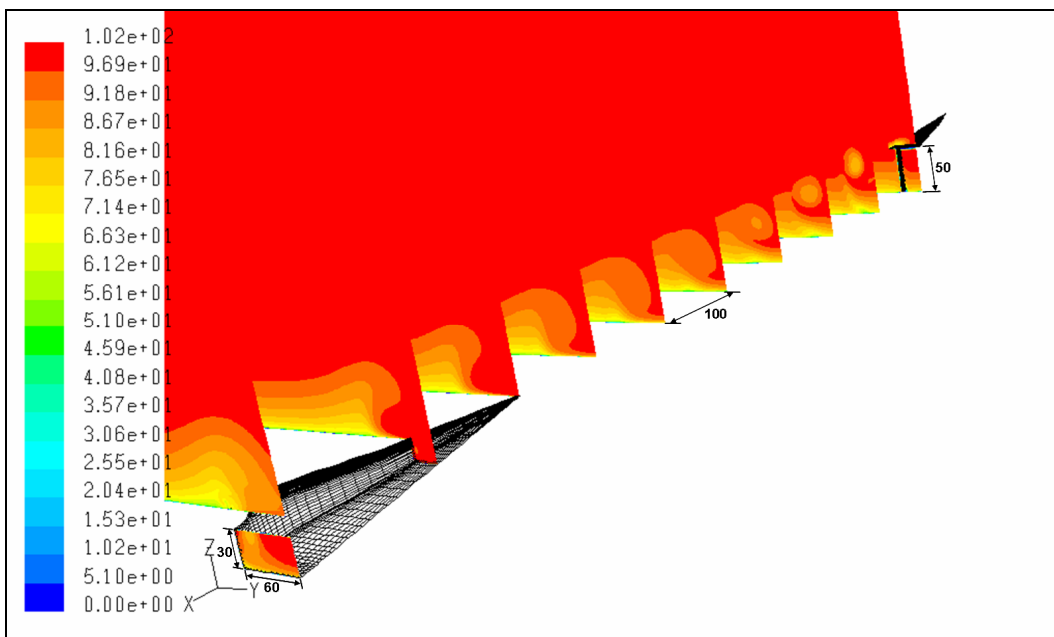


Figura 5-76. Componente longitudinal da velocidade (m/s) – Caso NGVAM-10 (dimensões em mm).

A componente longitudinal da velocidade no plano de simetria é mostrada na Figura 5-77 e na Figura 5-78, para as configurações NGVAM-5 e NGVAM-10. Estas figuras mostram que, para pequenos valores do ângulo de derrapagem do mastro (0° e 5°), as interações entre as esteiras oriundas do mastro e do gerador de vórtices dão origem a regiões de baixa velocidade na região central da placa

plana. No entanto, quando o ângulo de derrapagem do mastro é aumentado para 10° , esta região desaparece, o que sugere a existência de um valor ótimo para o ângulo de derrapagem do mastro, uma vez que espera-se que, para valores do ângulo de derrapagem aerodinâmico superiores ao ângulo de *stall* do perfil *NACA* 0012 utilizado, o desempenho do conjunto diminua.

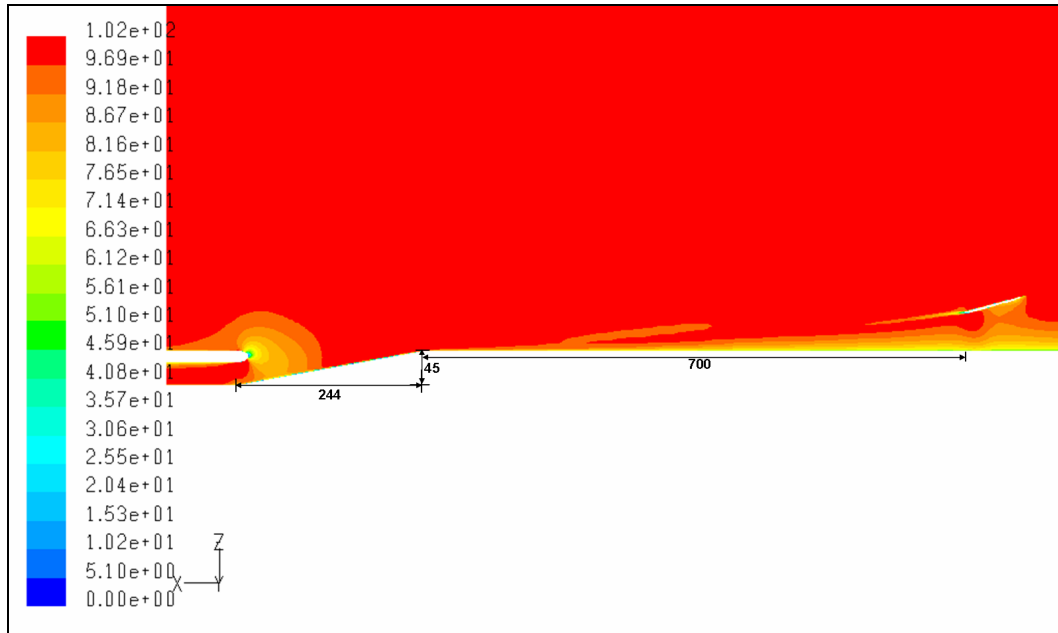


Figura 5-77. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVAM-5, plano de simetria (dimensões em mm).

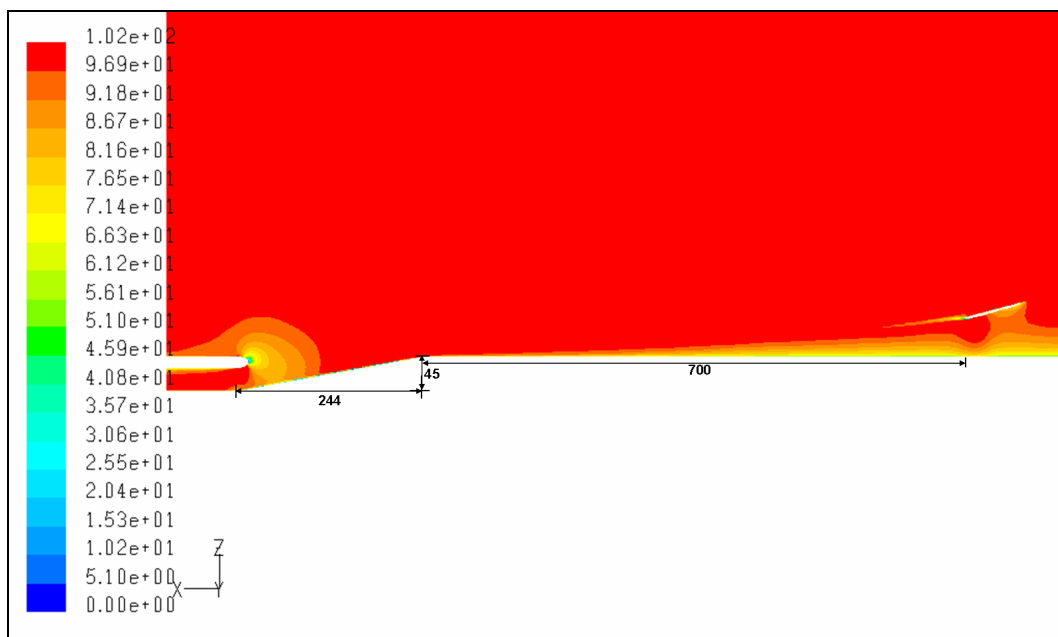


Figura 5-78. Componente longitudinal da velocidade (m/s) - Caso NGVAM-10, plano de simetria (dimensões em mm).

Contornos da componente longitudinal da vorticidade, que mostram o comportamento da esteira de vórtices gerada pelo mastro a montante da entrada *NACA*, são traçados na Figura 5-79 e na Figura 5-80, nas seções dos mesmos planos transversais à direção do escoamento utilizados anteriormente, para as duas configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro analisadas.

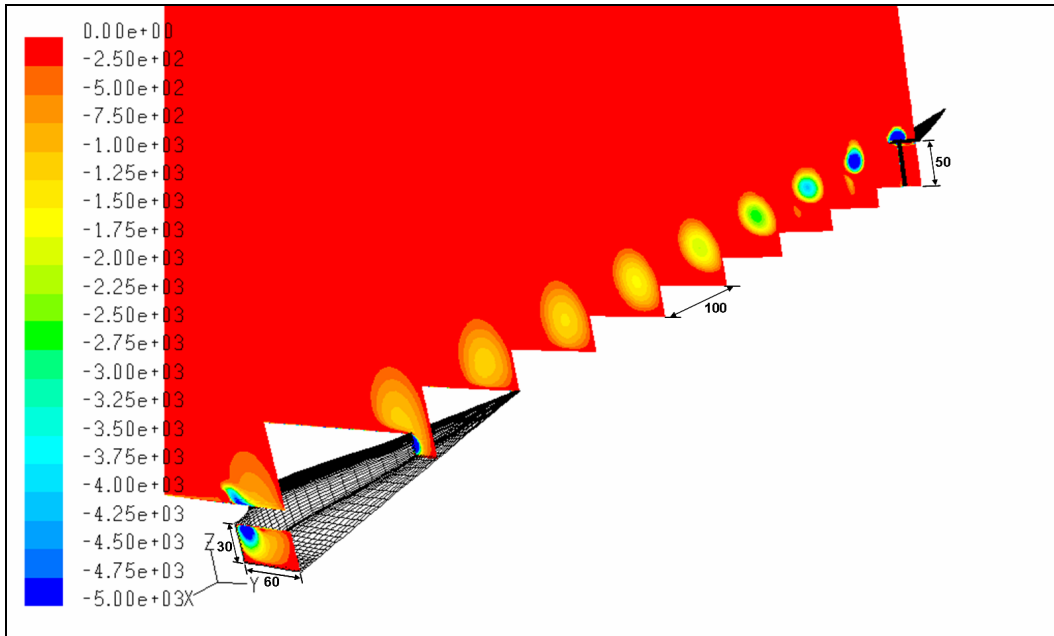


Figura 5-79. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVAM-5 (dimensões em mm).

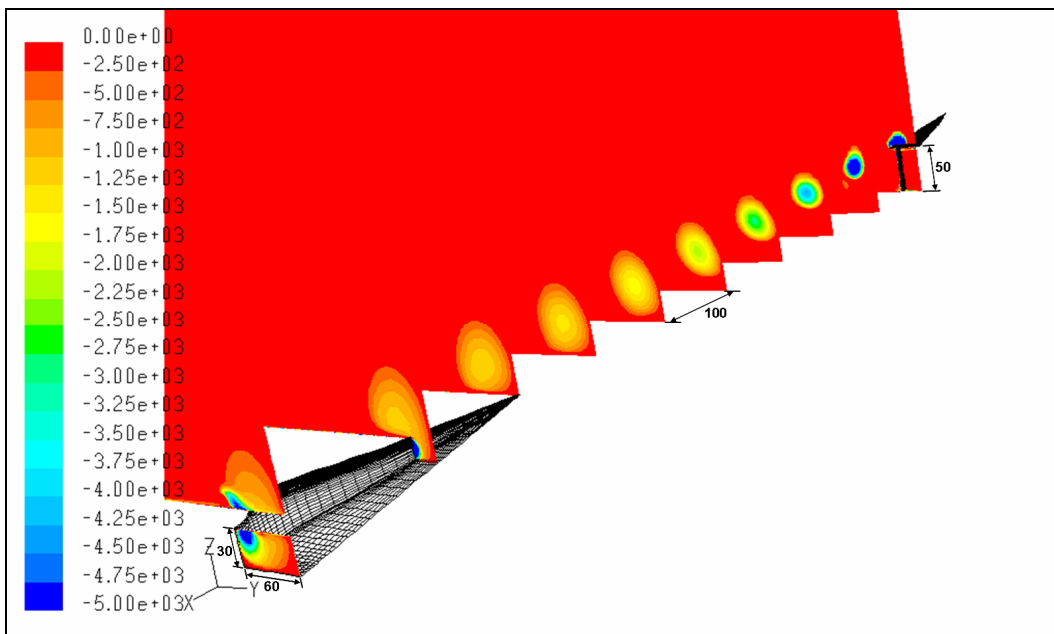


Figura 5-80. Componente longitudinal da vorticidade (1/s) – Caso NGVAM-10 (dimensões em mm).

Na Figura 5-79 e Figura 5-80 é possível constatar que a componente longitudinal da vorticidade gerada pelo mastro praticamente desaparece com o aumento do seu ângulo de derrapagem do mastro para $\beta = 10^\circ$. Este resultado atende as especificações de projeto que estabeleciam que o mastro deveria contribuir para a redução da espessura da camada limite, e que seus efeitos negativos sobre os parâmetros de desempenho da entrada de ar deveriam ser os menores possíveis.

A Figura 5-74, a Figura 5-81 e a Figura 5-82 mostram a distribuição do coeficiente de pressão no plano da garganta da entrada de ar, para os casos NGVAM-0, NGVAM-5 e NGVAM-10, respectivamente.

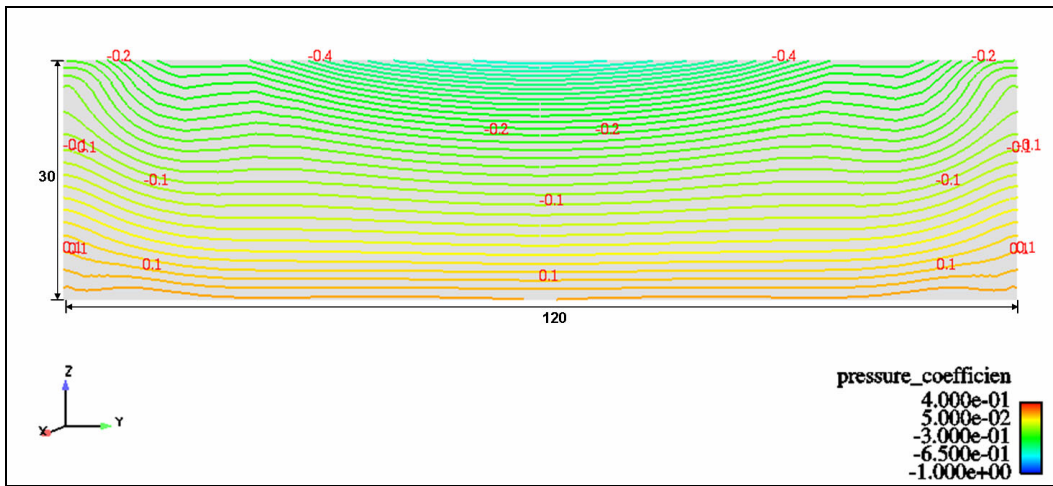


Figura 5-81. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVAM-5, plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

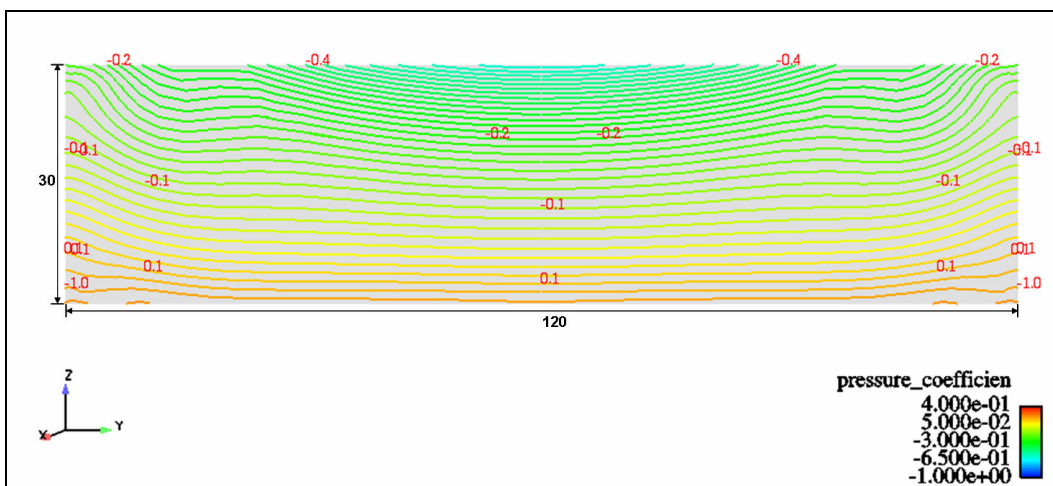


Figura 5-82. Coeficiente de pressão, C_p - Caso NGVAM-10, plano da garganta da NACA (dimensões em mm).

Nestas figuras é possível verificar que (i) o uso do mastro produz um escoamento mais uniforme na garganta da entrada *NACA* do que aquele obtido sem o uso do mastro, caso NGVA, e que (ii) o nível de distorção do escoamento diminui com o aumento do ângulo de derrapagem do mastro.

A diminuição observada na distorção do escoamento é acompanhada por um incremento nos parâmetros de desempenho da entrada de ar, tal como pode ser verificado na Tabela 5-9, a qual mostra os valores dos parâmetros de desempenho das configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, casos NGVAM-0, NGVAM-5 e NGVAM-10. O procedimento de cálculo destes parâmetros é o mesmo que foi descrito anteriormente. Para a determinação do coeficiente de arrasto, são considerados também o arrasto de pressão e o arrasto viscoso devido à presença do mastro. Nesta tabela os incrementos percentuais relativos aos valores dos parâmetros correspondentes à entrada *NACA* convencional são indicados entre parêntesis.

Tabela 5-9. Parâmetros de desempenho – Influência do ângulo de derrapagem do mastro

Parâmetros	Dados de projeto	N1A-1	NGVA	NGVAM-0	NGVAM-5	NGVAM-10
Eficiência	0,600	0,513	0,741 (44,4 %)	0,749 (46 %)	0,774 (50,9 %)	0,787 (53,3 %)
Vazão mássica (kg/s)	0,260	0,260	0,302 (16 %)	0,303 (16,5 %)	0,307 (18,1 %)	0,309 (18,9 %)
Razão de vazões mássicas	----	0,76	0,88 (16 %)	0,88 (16,5 %)	0,9 (18,1 %)	0,9 (18,9 %)
Arrasto total - (N)	----	18,54	32,43 (75 %)	33,18 (79 %)	33,67 (81,6 %)	34,31 (85,1 %)
Arrasto de pressão - (N)	----	18,07	31,69 (75,4 %)	32,34 (79 %)	32,8 (81,5 %)	33,45 (85,1 %)
NACA	----	18,07	29,68 (64,2 %)	29,81 (65 %)	30,22 (67,3 %)	30,43 (68,4 %)
GV	----	0,00	2,01	2,35	2,21	2,09
Mastro	----	0,00	0,00	0,18	0,37	0,93
Arrasto viscoso - (N)	----	0,47	0,74 (60 %)	0,84 (80,1 %)	0,86 (85,8 %)	0,87 (86 %)
NACA	----	0,47	0,59 (26,5 %)	0,58 (24,2 %)	0,59 (26,8 %)	0,6 (29,2 %)
GV	----	0,00	0,16	0,15	0,15	0,15
Mastro	----	0,00	0,00	0,11	0,13	0,11
Coeficiente de arrasto	0,85	1,06	1,86 (75 %)	1,9 (79 %)	1,93 (81,6 %)	1,96 (85,1 %)

Nesta tabela é possível constatar que as três configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro exibem melhoras significativas dos valores calculados de eficiência e da vazão mássica. Os maiores ganhos nos parâmetros de desempenho da entrada *NACA* são obtidos para um ângulo de derrapagem do mastro igual a 10°. Em nenhum dos casos a presença do mastro afeta negativamente o valor dos parâmetros de desempenho da entrada *NACA*, e contribui sempre para seu aumento. Isto poderia parecer a priori surpreendente se

não for considerada a discussão desenvolvida sobre as modificações observadas na estrutura do escoamento. A eficiência de recuperação de pressão dinâmica é o parâmetro de desempenho que exibe a maior melhora.

Adicionalmente, na Tabela 5-9 pode também ser verificado que, nas três configurações de entrada *NACA* com gerador de vórtices e mastro, os valores do coeficiente de arrasto exibem um aumento relativamente pequeno quando comparado ao coeficiente de arrasto correspondente ao caso NGVA. No entanto, quando comparados ao coeficiente de arrasto da entrada *NACA* convencional, os incrementos obtidos são consideráveis, o que é consequência do incremento da vazão mássica que acompanha a diminuição da espessura da camada limite. O gerador de vórtices possui uma contribuição reduzida, em termos de arrasto do conjunto, inferior a 7%, o que leva a uma contribuição de 10% do arrasto total, sendo que 7% corresponde ao gerador de vórtices e 3% ao mastro.

Antes de finalizar esta seção, é importante ressaltar que comparações das distribuições do coeficiente de pressão, C_p , no plano de simetria da entrada de ar obtidas para os casos NGVAM-5 e NGVAM-10 com aquele oriundo do caso NGVAM-0, não mostraram diferenças perceptíveis. Por esta razão, as distribuições do coeficiente de pressão, C_p , no plano de simetria da entrada de ar, correspondentes aos casos NGVAM-5 e NGVAM-10, não foram reproduzidas aqui.

5.7

Sumário dos resultados apresentados

Com o objetivo de sumarizar os resultados mostrados neste capítulo, curvas que descrevem a influência da posição horizontal, do ângulo de ataque e da área do gerador de vórtices, como também do ângulo de derrapagem do mastro, sobre os principais parâmetros de desempenho da entrada *NACA*, são apresentadas nesta seção.

A Figura 5-83 mostra a influência da posição horizontal do gerador de vórtices sobre a eficiência da entrada de ar, o coeficiente de arrasto, e a razão de vazões mássicas, MFR (*Mass Flow Rate*). Nesta figura pode ser observado claramente que a vazão mássica e a eficiência de recuperação de pressão dinâmica aumenta a medida que o gerador de vórtices é afastado da entrada de ar. O

coeficiente de arrasto apresenta um comportamento similar, o que é devido, principalmente, ao aumento de arrasto de pressão originado pela maior quantidade de ar externo ingerido. É de se esperar que, a medida que o gerador de vórtices é afastado da entrada de ar, sua influencia diminua progressivamente.

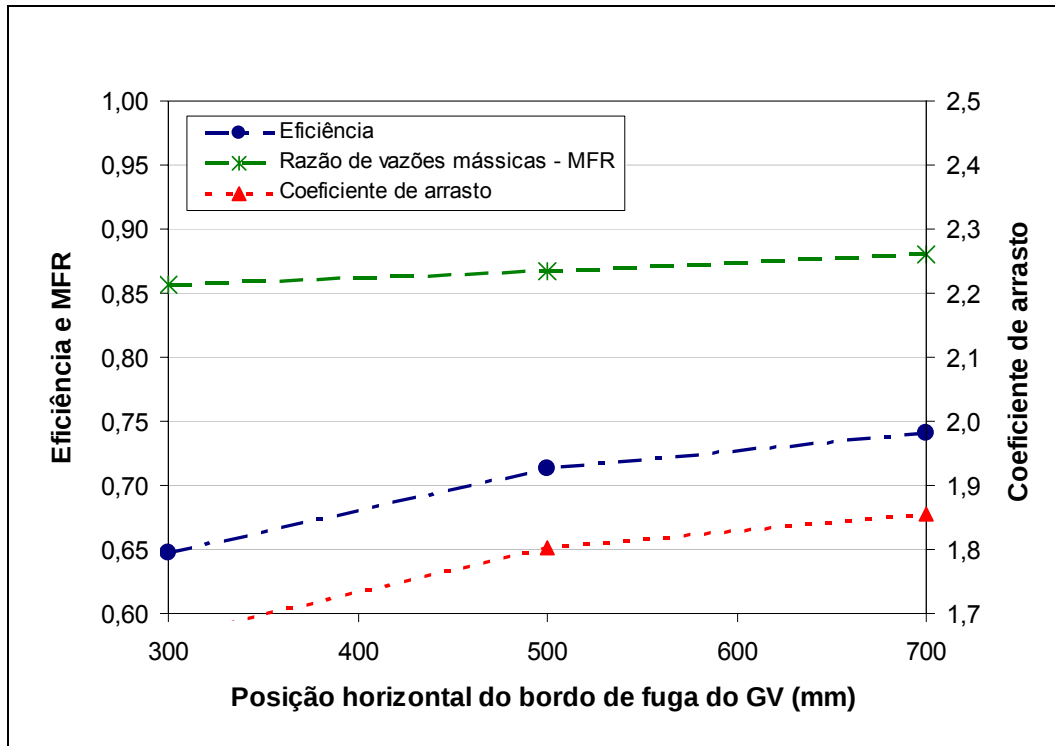


Figura 5-83. Influência da posição horizontal do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada NACA.

O comportamento destes mesmos parâmetros, i.e. eficiência, coeficiente de arrasto e MFR, em função do ângulo de ataque do gerador de vórtices é mostrado na Figura 5-84. Pode-se notar nesta figura que tanto a eficiência como a razão de vazões mássicas exibem um comportamento não monotômico com o ângulo de ataque do gerador de vórtices. O coeficiente de arrasto possui um comportamento diferente com o ângulo de ataque, α . Este parâmetro sempre aumenta com o aumento do ângulo de ataque do gerador de vórtices, o que é devido, basicamente, ao aumento da contribuição do gerador de vórtices para o arrasto total.

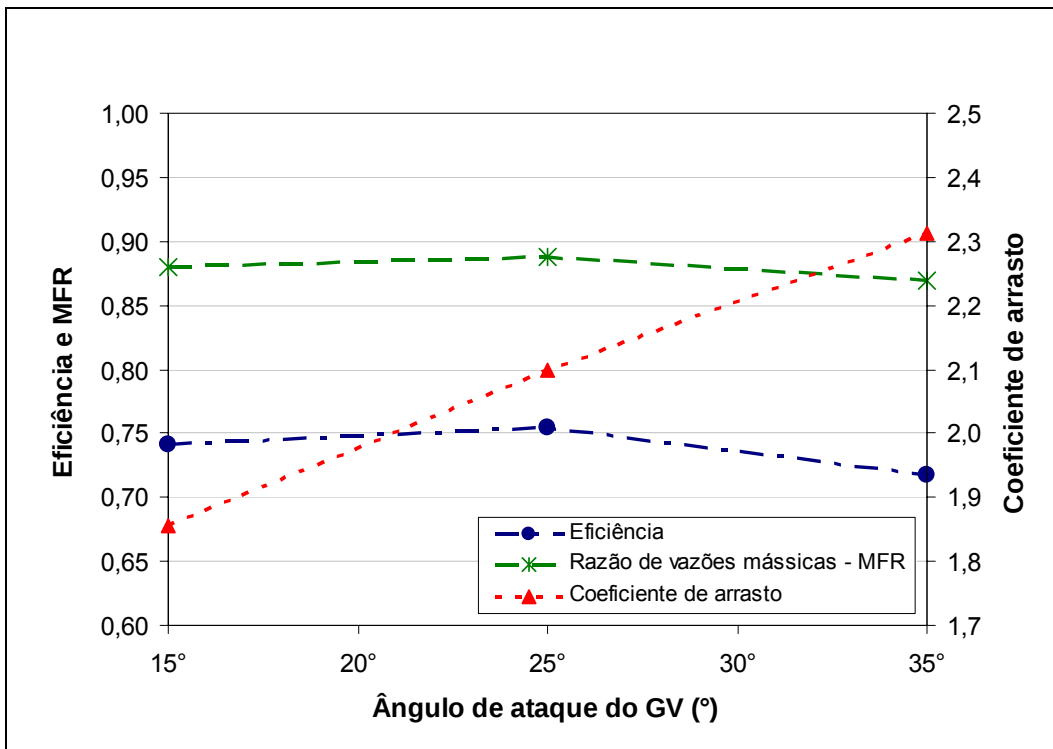


Figura 5-84. Influência do ângulo de ataque (α) do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada NACA.

A influência do aumento da área do gerador de vórtices sobre a eficiência, o coeficiente de arrasto e a razão de vazões mássicas é mostrada na Figura 5-85. Esta figura mostra que a eficiência e razão de vazões mássicas aumentam com o aumento da área do gerador de vórtices. O coeficiente de arrasto possui um comportamento similar ao da eficiência e das vazões mássicas. O aumento da vazão mássica ingerida pela entrada de ar, como consequência do aumento da área do gerador de vórtices, é o principal responsável pelo comportamento apresentado pelo coeficiente de arrasto.

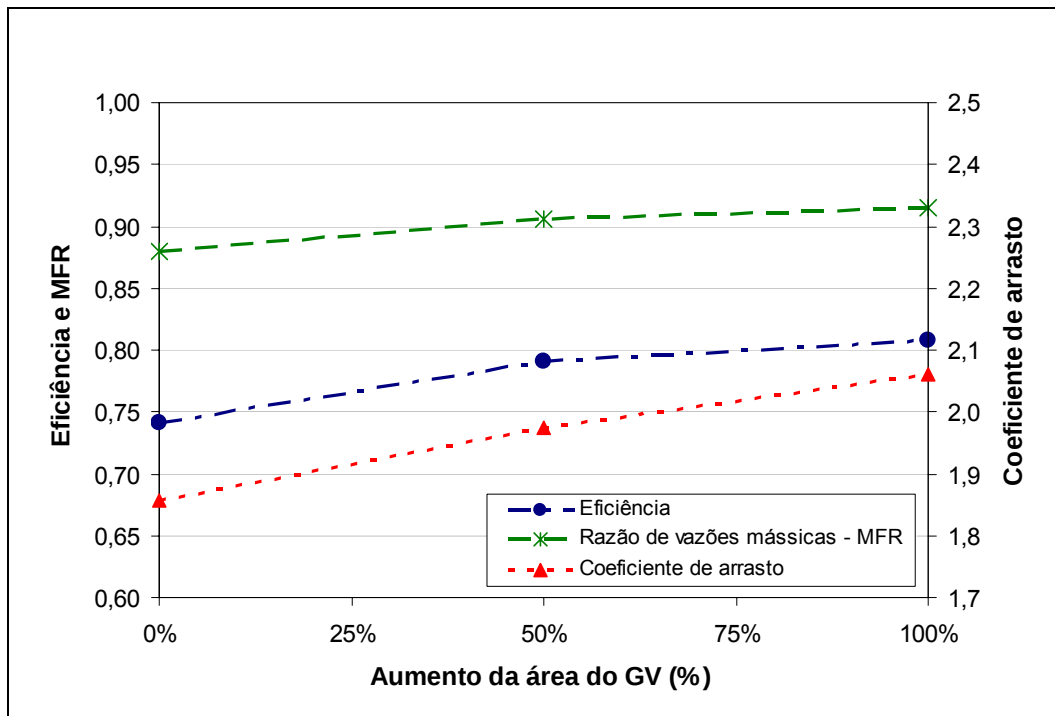


Figura 5-85. Influência da área do GV sobre os parâmetros de desempenho da entrada NACA.

Finalmente, a Figura 5-86 ilustra o comportamento dos três parâmetros de desempenho da entrada de ar que estão sendo analisados, i.e. eficiência, coeficiente de arrasto e MFR, quando o ângulo de derrapagem do mastro é aumentado. Nesta figura observa-se que o aumento do ângulo de derrapagem do mastro influencia apenas levemente estes três parâmetros de desempenho, a qual se manifesta por um aumento destes parâmetros a medida que o ângulo de derrapagem do mastro aumenta.

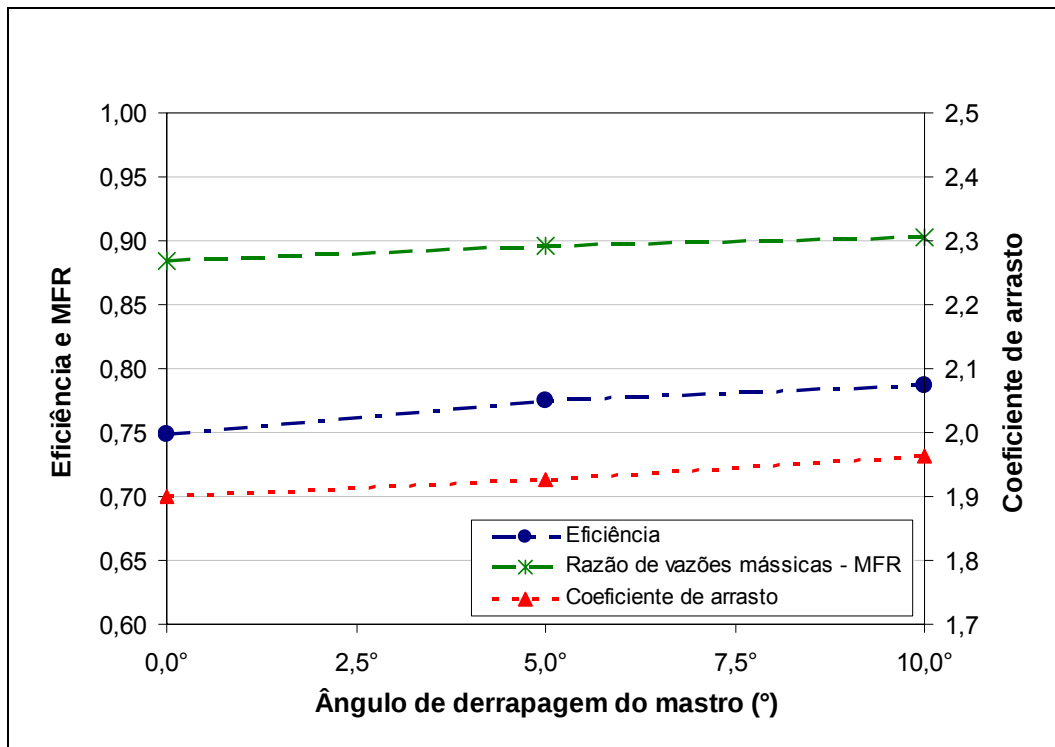


Figura 5-86. Influência do ângulo de derrapagem do mastro sobre os parâmetros de desempenho da entrada NACA.