

MODIFICAÇÕES NA ESTEIRA DE UM MODELO DE ÔNIBUS ATRAVÉS DO USO DE ELEMENTOS DE INTERFERÊNCIA

Luís Carlos Pires Videira

Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170, 12.227-901, São José dos Campos, SP, Brasil.
Email: luiz.videira@embraer.com.br

Roberto da Mota Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, 12.200-900, São José dos Campos, SP.
Email: girardi@aer.ita.cta.br

***Resumo.** O presente trabalho é parte de uma ampla pesquisa sobre o escoamento em veículos terrestres, mais especificamente ônibus. Os resultados obtidos indicam que o escoamento da esteira pode ser influenciado por elementos de interferência. Em corpos rombudos bidimensionais, o uso da placa divisória tem mostrado eficiente no aumento do coeficiente de pressão na base, resultando numa redução no coeficiente de arrasto. Os veículos terrestres podem ser considerados como corpos rombudos por apresentarem uma ampla esteira que interage com o solo. O objetivo do presente trabalho é verificar a influência dos elementos de interferência na topologia da esteira e no coeficiente de pressão na superfície traseira do modelo. As técnicas experimentais usadas neste trabalho foram: mapeamento da esteira usando a anemometria de fio quente fixado em sistema de posicionamento de 3 eixos para as medidas das velocidades média e fluante e um manômetro para a obtenção das pressões na superfície traseira do modelo. O sistema de aquisição de dados foi usado para realizar os experimentos e o mapeamento do escoamento (campos de velocidades) analisado junto com os resultados obtidos para os coeficientes de pressão para que se pudessem encontrar correlações entre a topologia da esteira à distribuição de pressão na base. Foram verificadas mudanças na topologia da esteira quando se aumentou o comprimento da placa divisória, resultando num aumento de 30% na pressão na base do modelo, que está associado ao arrasto de base do ônibus.*

***Palavras chave:** Aerodinâmica de veículos, Corpo rombudo, Métodos Experimentais e Esteira de Ônibus.*

1. Introdução

A atual necessidade de se reduzir o consumo de combustível dos veículos terrestres, vem de encontro ao interesse deste trabalho em entender melhor o escoamento tridimensional formado atrás de um veículo, visando uma melhoria aerodinâmica, que possa resultar na redução do arrasto e do consumo de combustível.

A esteira formada atrás de um veículo, em especial um ônibus rodoviário, é bem ampla e tem dimensões da ordem de grandeza da altura do veículo, caracterizando-o como um corpo rombudo.

Para corpos rombudos bidimensionais, a presença dos vórtices alternados na esteira próximos ao modelo (“near wake”) acarretam um valor de coeficiente de pressão na base (C_{pb}) negativo, resultando em um coeficiente de arrasto (C_D) elevado, quando se compara com corpos aerodinâmicos, como no caso de um perfil ou asa.

Kovazsnay (1949) verificou que na esteira próxima à superfície traseira de um corpo rombudo, a relação V/V_∞ é praticamente nula, sendo V_∞ a velocidade do escoamento não perturbado e V a velocidade do escoamento na esteira. Nesta região o coeficiente de pressão (C_p) apresenta um valor negativo. Um valor do coeficiente de pressão negativo implica num arrasto de base elevado influenciado pela esteira do corpo. A região próxima à superfície traseira do modelo onde o C_p apresenta um valor negativo é conhecida como região de água morta.

Roshko (1954) observou que a região de formação tem grande importância na configuração do escoamento formado atrás do modelo. A colocação de placas divisórias (“splitter-plates”) modificou o escoamento na região de formação (L_F) e conseqüentemente o coeficiente de pressão na base e o coeficiente de arrasto. Em seu trabalho, Roshko (1954) usou uma placa divisória com pequena dimensão a qual podia se deslocar na direção do eixo longitudinal da esteira. A medida que tal elemento de interferência foi sendo afastado da base do corpo (cilindro circular) houve um incremento da distância entre a base e a posição onde os vórtices se destacam, a qual pode ser correlacionada com um aumento da pressão na base e, como conseqüência, a redução do coeficiente de arrasto.

Em outra pesquisa similar, foi utilizado um corpo rombudo com forma de uma semi-elipse estendida. No plano de simetria da esteira deste corpo foram instaladas diferentes placas divisórias, com comprimentos diferentes. Utilizando anemometria de fio quente e visualização do escoamento, Bearman (1965) verificou que a o aumento do comprimento da placa divisória acarreta incremento do comprimento da região de formação, o qual está associado ao coeficiente de pressão na base. O afastamento do núcleo do vórtice da superfície traseira do modelo provoca o aumento no coeficiente de pressão na base, diminuindo o valor no (C_D).

Na pesquisa realizada por Moreira Jr & Girardi (1996) foram feitas medidas de velocidade média e fluuante na esteira de um modelo de ônibus, assim como da pressão na superfície traseira do modelo. Observou-se que na parte inferior da base do ônibus ocorrem os valores mais negativos para o coeficiente de pressão. Este resultado foi correlacionado com a posição dos vórtices gerados pelo escoamento que passa pelo canal formado entre a parte inferior do veículo e o solo. Este vórtice encontra-se mais próximo da base que os demais vórtices, originados nas três outras arestas da superfície traseira.

O objetivo do presente trabalho é interferir no escoamento na esteira de um ônibus e verificar como a pressão na superfície traseira e o arrasto são alterados. Para tanto, utilizam-se elementos de interferência (placa plana) com três comprimentos diferentes, de maneira similar ao feito por Bearman (1965). No entanto, considerando-se os resultados obtidos por Moreira Jr & Girardi (1996), descritos no parágrafo anterior, as placas divisórias são instaladas na aresta inferior do modelo de ônibus. Deve-se deixar claro que a instalação de elementos de interferência na esteira de um veículo terrestre tem como único objetivo a melhor compreensão do escoamento. Não é possível utilizar uma solução deste tipo na prática, devido a problemas de segurança. No entanto, existem outras maneiras de produzir interferência na esteira, como no caso de se utilizar sopramento na base de um corpo rombudo, como implementado por Bearman (196), que obteve resultados semelhantes aos produzidos pela colocação de placas divisórias. No presente trabalho utiliza-se o mesmo modelo usado anteriormente por Moreira Jr & Girardi (1996), o qual é instalado na seção de saída de um túnel de vento. Usando-se anemometria de fio quente são medidos os campos de velocidade média e de flutuação (valor “rms”) ao longo da esteira e com base nos resultados de velocidade de flutuação pode-se definir o comprimento da região de formação, sendo este um parâmetro muito importante, o qual é alterado pela presença dos elementos de interferência, como constatado inicialmente por Bearman (1965). Além disto, medidas de pressão na superfície traseira são realizadas, para se buscar uma correlação das mesmas com alterações na topologia da esteira.

2. Aparato e Procedimento Experimental

Para a realização deste trabalho foi utilizado um túnel de vento do laboratório FENG do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), sendo este do tipo soprador e circuito aberto onde a faixa de operação é de 6 a 30 m/s. As dimensões da seção de testes são 460 x 460x 1200 mm e a área da seção transversal, descontada dos cantos da seção de ensaio do túnel, é aproximadamente 0,203 m². Com relação ao nível de turbulência (NT), este apresenta um valor de aproximadamente 0,5%, para a máxima velocidade.

O modelo utilizado nos ensaios de distribuição de pressão e anemometria de fio quente foi confeccionado em madeira e tem semelhança geométrica com o ônibus modelo Mercedes-Benz O 400 RSD. As dimensões do modelo (Tabela 1) foram escolhidas para que se pudesse ter uma razão de bloqueio inferior a 5%, de maneira a minimizar as interferências provocadas pela fronteira do fluxo de ar proveniente do túnel de vento, uma vez que os ensaios são feitos no jato proveniente da seção de saída do túnel de vento.

O modelo foi fixado sobre uma mesa automobilística, que foi posicionada aproximadamente a 60mm da superfície inferior da saída do túnel de vento, como pode ser visto na Fig. 1. Com isto, a camada limite proveniente da superfície inferior do túnel de vento, a qual é relativamente espessa, é filtrada e substituída pela camada limite fina que tem origem no bordo de ataque da mesa automobilística e passa pela inferior do modelo. Com isto, pode-se minimizar a influência da presença desta camada limite, a qual não existe na situação real de um veículo trafegando sobre uma estrada de rodagem.



Figura 1. Modelo sobre a mesa automobilística, posicionado na seção de saída do túnel de vento.

O procedimento adotado para realizar os ensaios foi o seguinte:

- (i) Para os ensaios de anemometria de fio quente, fez-se inicialmente um alinhamento do modelo com relação ao eixo longitudinal da seção de testes do túnel de vento, com o auxílio de um teodolito e em seguida ajustou-se a pressão dinâmica do túnel de vento. O posicionamento da ponta de prova na região da esteira foi feita com o posicionador de 3 eixos DANTEC onde a menor divisão é 0,1 mm. Em todos os ensaios foi verificado o alinhamento do sistema de posicionamento em relação ao escoamento.

- (ii) Para o ensaio de distribuição de pressão, foram realizadas medidas com um multimanômetro inclinado (Fig. 1) para a obtenção das pressões na superfície traseira do modelo, somente no plano de simetria vertical como visto na Fig. 3.
- (iii) Em todos os ensaios foram verificados constantemente o alinhamento, a pressão ambiente e a temperatura onde o objetivo destas duas últimas era calcular a densidade do ar.
- (iv) Os ensaios foram realizados com ângulo de guinada (β) nulo.
- (v) Para os ensaios com as placas divisórias, estas foram fixadas na superfície inferior traseira do modelo como pode ser vista na Fig. 2.

A relação utilizada para se determinar o coeficiente de pressão na base é apresentada na equação 1 abaixo:

$$CP = \frac{P_i - P_o}{q_\infty} \quad (1)$$

onde P_1 é a pressão lida diretamente no multimanômetro, P_o é a pressão estática e q_∞ é a pressão dinâmica do túnel de vento.

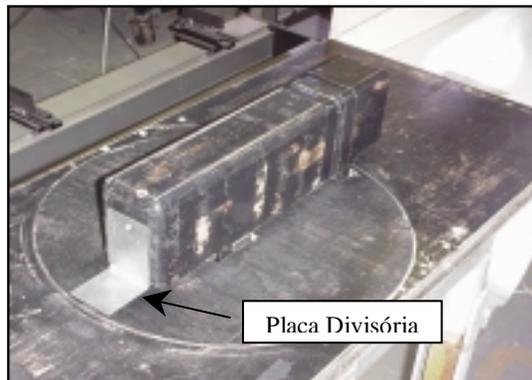


Figura 2. Placa divisória fixada na aresta inferior da superfície traseira do modelo.

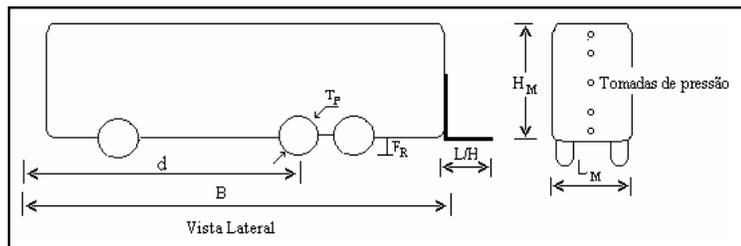


Figura 3. Esquema do modelo, mostrando suas dimensões principais e as posições das tomadas de pressão na superfície traseira.

O parâmetro adimensional Reynolds (Re), foi calculado para os ensaios de anemometria de fio quente e distribuição de pressão. Para o ensaio de anemometria de fio quente, foi obtida a pressão dinâmica através de um transdutor de pressão cujo sinal é amplificado, filtrado e, em seguida, transmitido para o sistema de aquisição de dados. Este sistema era constituído por um micro computador, placa de aquisição da *National Instruments* e pelo programa *LabView*, que controlava o processo de medida e executava o pós processamento dos dados. Com a pressão dinâmica, obteve-se a velocidade do escoamento não perturbado (V_∞), a qual foi usada para calcular as velocidades adimensionais média (V_M) e de flutuação (V_{RMS}). O comprimento característico adotado neste trabalho é a altura do modelo ($H_M = 105,7\text{mm}$), conforme pode ser visto na Fig. 3.

Com relação aos ensaios de distribuição de pressão, foi utilizado um manômetro Betz para a obtenção da pressão dinâmica (q_∞) e um multimanômetro para a medida das pressões na superfície traseira do modelo, nas tomadas mostradas na Fig. 3. Os ensaios para medida de pressão e para a determinação do campo de velocidades foram realizados com aproximadamente o mesmo valor de pressão dinâmica, de maneira a se obter o mesmo Reynolds, permitindo assim a correlação dos resultados.

A placa divisória foi confeccionada em 3 comprimentos diferentes em função do comprimento da região de formação (L_F). Os valores das placas divisórias são apresentados na tabela 2.

Por fim, deve-se mencionar que a análise das incertezas dos resultados apresentados neste trabalho, foi tratada segundo a metodologia apresentada por Kline & McClintock (1953).

Tabela 1. Dimensões do modelo.

Dimensão	Valores (mm)
Largura (L_M)	72,6
Altura (H_M)	105,7
Comprimento (B_M)	392,4
Vão ao solo (F_R)	10,0
Espessura do pneu (S_{PM})	10,5
Diâmetro do pneu (T_P)	21,0
Raio de arredondamento das arestas do modelo básico	10,0
Distância da superfície frontal ao ponto de fixação na balança (d)	262,4

Tabela 2. Dimensões da placa divisória.

Placa divisória	Valores (mm)
Placa divisória $L = H/3$	35,23
Placa divisória $L = H/2$	52,85
Placa divisória $L = H$	105,7

3. Resultados

Nos ensaios de anemometria de fio quente foram realizadas medidas no plano de simetria vertical para detectar as mudanças na estrutura da esteira, isto é, entre os vórtices emitidos nas superfícies superior, inferior e laterais do modelo.

As variáveis que se referem à posição da sonda são apresentadas na forma adimensional utilizando como fator de adimensionalização a altura do modelo, isto é, $H_M = 105,7\text{mm}$. Deve-se ressaltar que as velocidades média e fluante são adimensionalizadas pela velocidade do escoamento proveniente do túnel de vento (V_∞).

No escoamento sobre corpos rombudos bidimensionais (Bearman, 1965), verificou-se que no final da região de formação a velocidade de flutuação (valor "rms") alcança seu máximo valor. Este parâmetro foi correlacionado com a posição onde o vórtice, gerado pelo enrolamento das camadas de cisalhamento, alcança o valor máximo de circulação antes de ser liberado para formar a chamada esteira de vórtices de von Kármán. No trabalho realizado por Moreira Jr & Girardi (1996) este conceito foi generalizado para o escoamento tridimensional que ocorre na esteira de um veículo terrestre. No entanto, foi verificado que parecem existir pelo menos dois valores para o comprimento da região de formação. Um valor para o vórtice liberado da aresta inferior da traseira do veículo e outro para os vórtices que se originam nas três demais arestas, sendo isto um efeito causado pela presença do solo, que acarreta uma assimetria no escoamento.

Com relação ao mapeamento da velocidade média realizado com o modelo sem placa divisória (Fig. 4), observou-se um aumento da velocidade média na região da esteira compreendida entre $0,3 \leq x/H \leq 0,5$, isto é, na região interna a linha de velocidade média $V_M = 0,31$. Este aumento tem como causa provável a interação entre os vórtices superior e inferior do modelo. Verificou-se também que para $x/H > 3,5$ o escoamento apresentou um incremento na velocidade média tendendo para a velocidade do escoamento não perturbado.

Também pode ser vista a camada de cisalhamento livre proveniente da superfície superior do modelo, que tem sua espessura aumentada à medida que se afastava da base do modelo. Isto ocorreu em parte devido ao fenômeno da difusão e em parte devido à flutuação da camada de cisalhamento, ocasionada pela emissão de vórtices.

Baseado no mapeamento vertical da velocidade de flutuação do modelo (Fig. 5), verificou-se, que o final da região de formação está localizado em $x/H = 0,67$. Comparando os resultados do modelo obtidos anteriormente por Moreira Jr & Girardi (1996) nota-se que o ponto onde houve um maior gradiente de velocidade de flutuação, localizou-se na posição $x/H = 1,5$. Ressalta-se que o critério utilizado nos ensaios de anemometria de fio quente foi o mesmo para ambos os trabalhos. Esta diferença nos resultados experimentais provavelmente se deve a um melhor refinamento da malha, discretizando melhor a esteira, e também devido à precisão nos valores das velocidades, conseguida através do uso de um sistema de aquisição de dados, ambos presentes neste trabalho.

Em $y/H = 0,5$, isto é, no nível da superfície superior do modelo, observou-se valores relativamente elevados de V_{RMS} , os quais estão relacionados com a presença da camada de cisalhamento que se desprende da referida superfície. Como em corpos rombudos bidimensionais, deve ocorrer enrolamento desta camada de cisalhamento e a formação de uma grande estrutura vortical.

Ao longo da camada de cisalhamento que sai da parte inferior do modelo (isto é, para $y/H < -0,5$), observou-se um aumento do nível de turbulência até alcançar um máximo próximo de $y/H = -0,6$. Este resultado é semelhante ao relatado

no parágrafo anterior, porém, com intensidade de turbulência menor. Isto ocorreu devido aos menores valores de velocidade média (Fig. 4) do escoamento na região abaixo do modelo e devido ao fato que a velocidade fluante é adimensionalizada através do V_{∞} .

Com relação a posição onde se encontra o pico de velocidade de flutuação (RMS) para o modelo, foi em $x/H=0,67$ para o vórtice emitido na superfície superior e 0,48 para o emitido na superfície inferior.

Na região bem próxima à superfície traseira do modelo (Fig. 5), verificaram-se baixos níveis de turbulência, característicos de corpos rombudos, conhecida por “região de água morta”. Esta região também é caracterizada por níveis baixos de velocidade média, como pode ser visto na Fig. 4.

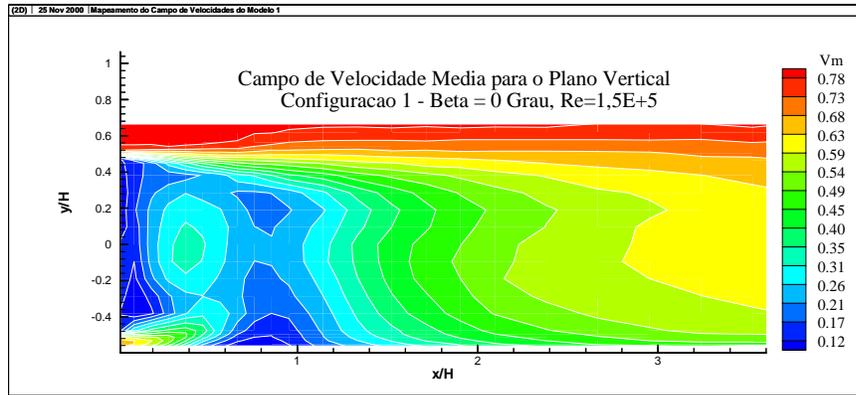


Figura 4. Mapeamento no plano de simetria vertical da velocidade média para o modelo com ângulo $\beta= 0^\circ$, sem elemento de interferência.

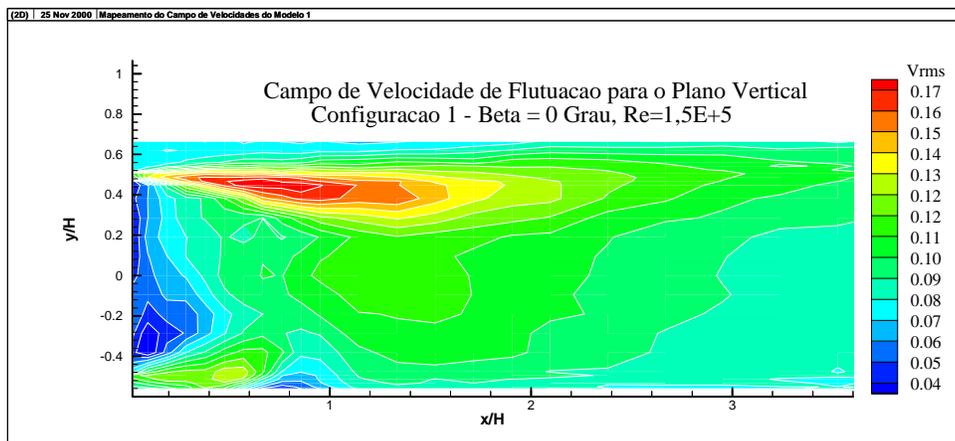


Figura 5. Mapeamento no plano de simetria vertical da velocidade de flutuação para o modelo com ângulo $\beta= 0^\circ$, sem elemento de interferência.

Ao contrário de corpos rombudos bidimensionais, a velocidade média ao longo do eixo X é caracterizada por um aumento inicial, seguido de um decréscimo e novamente um acréscimo, até que a mesmo alcance V_{∞} , bem longe da base do corpo. Moreira Jr & Girardi (1996) verificou que a presença desta região estava relacionada com o vórtice localizado na parte inferior da esteira, decorrente do enrolamento da camada de cisalhamento livre gerada na superfície inferior do modelo. Este vórtice seria responsável por direcionar o escoamento para o interior da esteira, provocando assim, um incremento de velocidade na região mencionada.

Os resultados para o campo de velocidade média, relativos ao ensaio com placa divisória com comprimento $L=H/3$, mostraram que a região interna a linha de velocidade média adimensional $V_M=0,35$, onde se observa o incremento de velocidade mencionada no parágrafo anterior, não apresentou alterações significativas na sua posição. Com isto, este resultado mostrou que a explicação apresentada por Moreira Jr & Girardi (1996) não está correta e, talvez, os responsáveis pelo incremento de velocidade média sejam os vórtices emitidos nas superfícies laterais do modelo (Fig. 8).

Com relação ao mapeamento da velocidade de flutuação para a placa $L=H/3$ (Fig. 7), obteve-se uma flutuação elevada devido a um problema de adimensionalização com o V_{∞} detectado somente após a redução dos valores durante o ensaio de anemometria de fio quente. Apesar dos valores numéricos de velocidades média e fluante não se apresentarem satisfatórios quantitativamente, a razão pelas quais estes foram incluídos no trabalho é que qualitativamente, estes valores apresentaram uma estrutura da esteira semelhante aos demais mapeamentos.

Ainda observando a Fig. 7, verifica-se que a posição inicial da sonda próxima a placa divisória $L=H/3$ foi $x/H=0,50$.

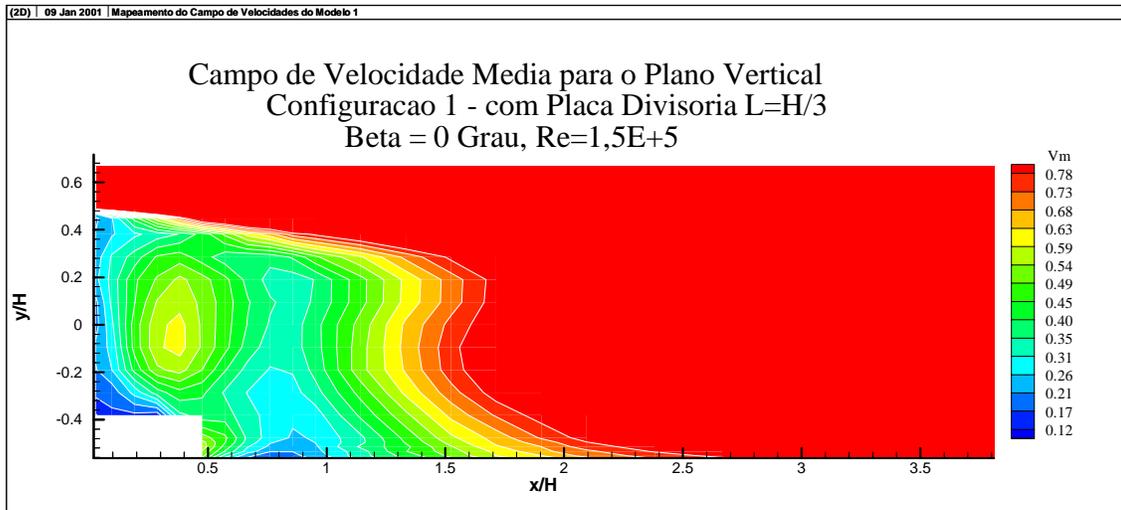


Figura 6. Mapeamento vertical da velocidade média para o modelo com placa divisória $L = H/3$.

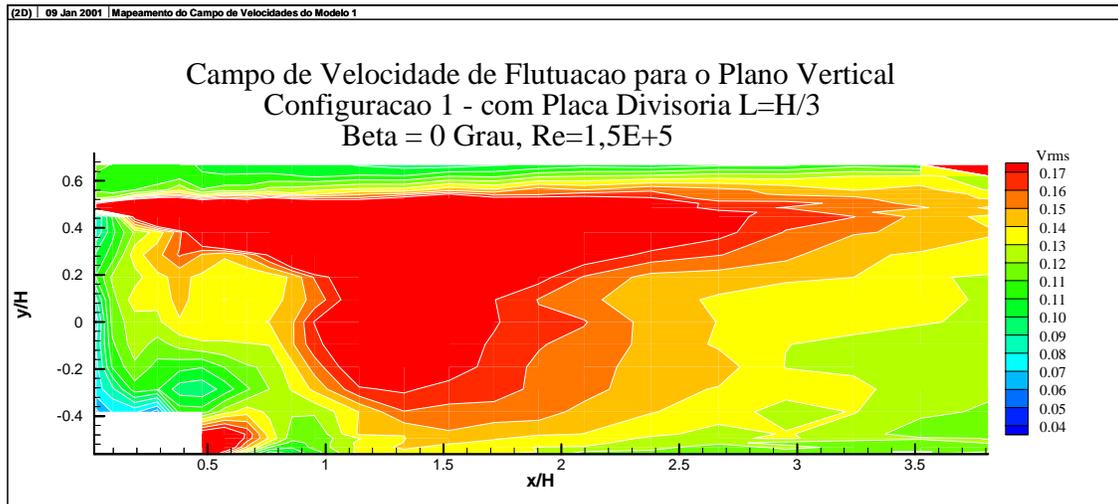


Figura 7. Mapeamento vertical da velocidade de flutuação para o modelo com placa divisória $L = H/3$.

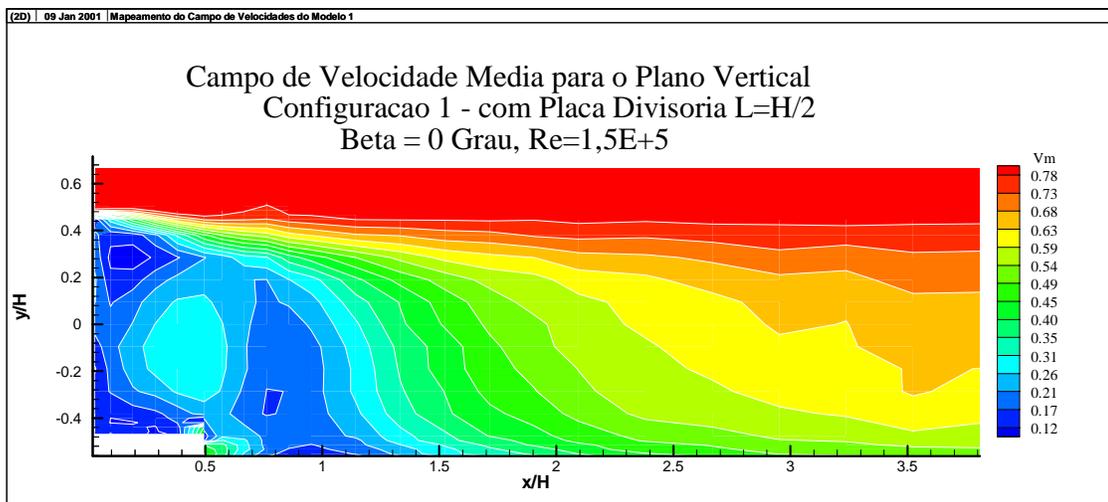


Figura 8. Mapeamento vertical da velocidade média para o modelo com placa divisória $L = H/2$.

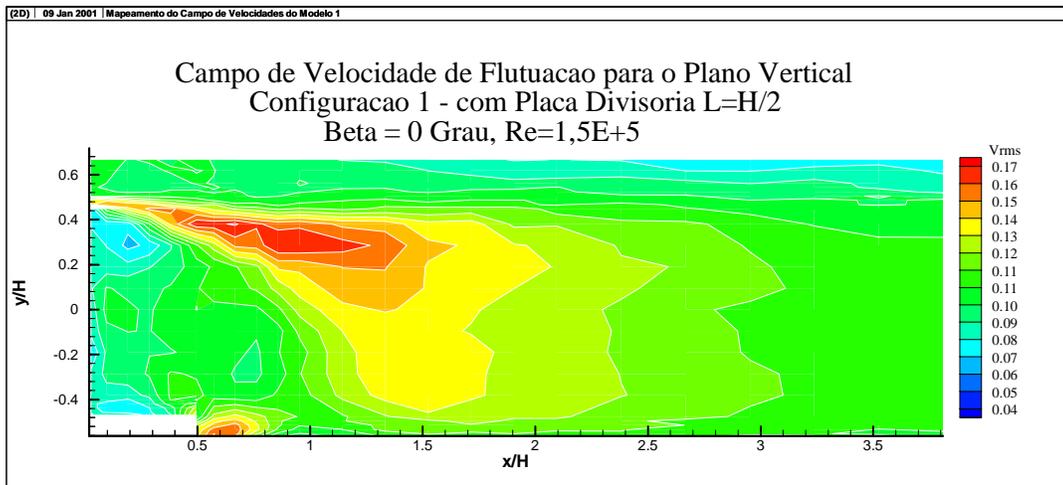


Figura 9. Mapeamento vertical da velocidade de flutuação para o modelo com placa divisória $L = H/2$.

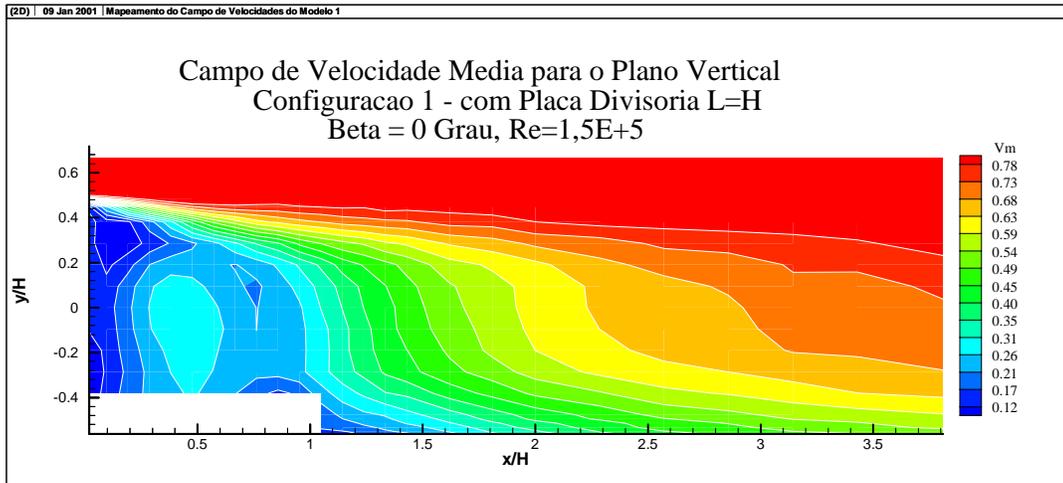


Figura 10. Mapeamento vertical da velocidade média para o modelo com placa divisória $L = H$.

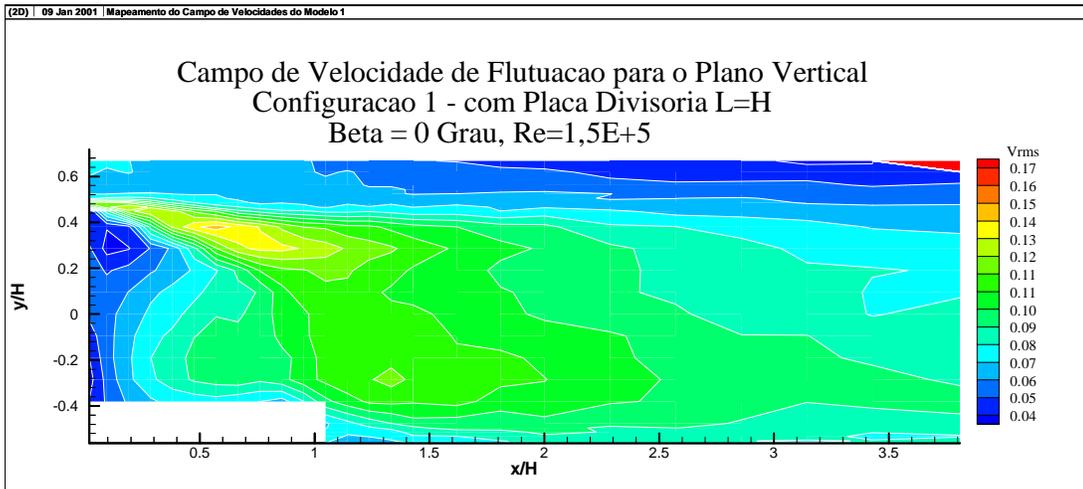


Figura 11. Mapeamento vertical da velocidade de flutuação para o modelo com placa divisória $L = H$.

Comparando com o modelo sem a fixação da placa divisória (Figs. 4 e 5) com os modelos onde foram instaladas as placas divisórias (Figs. 6, 7, 8, 9, 10, 11), observa-se que:

- para $L=H/2$ e $L=H$ houve um incremento da região de “água morta” devido à uma menor influência do vórtice inferior;
- a camada de cisalhamento livre superior apresentou-se mais inclinada para baixo, isto é, na direção da mesa;
- na Fig. 5 há uma região localizada no intervalo $0,2 \leq X \leq 0,6$ e $-0,28 \leq Y \leq 0,26$, com velocidades flutuantes (RMS) mais elevadas. Esta região parece ter se deslocado para baixo, como pode ser visto na Fig. 8 ($0,25 \leq X \leq 0,6$ e $-0,32 \leq Y \leq 0,12$). Possivelmente esta região está associada aos vórtices que se originam nas superfícies laterais do modelo.
- o pico de velocidade flutuante (valor RMS) aparentemente não se alterou em termos da distância em relação à base do modelo (x/H). Por outro lado, a posição y/H foi reduzida.

Através da Fig. 12 nota-se que o aumento no comprimento da placa divisória provoca o afastamento do ponto de flutuação máximo para o escoamento proveniente do vão entre a superfície inferior do modelo e a mesa automobilística. No entanto, ocorre uma aproximação do ponto máximo de flutuação para o escoamento que se origina na superfície superior do modelo.

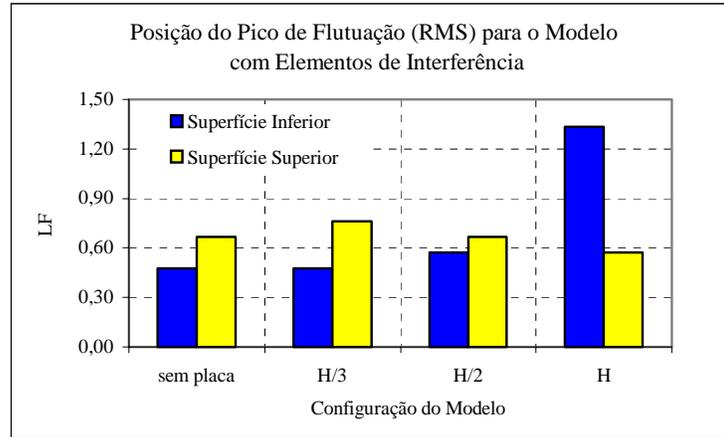


Figura 12. Posição do pico de velocidade de flutuação para as diversas configurações do modelo.

Pela teoria de corpos rombudos, a proximidade do núcleo do vórtice emitido na região inferior provoca uma redução no coeficiente de pressão na base, resultando conseqüentemente num aumento no coeficiente de arrasto. Quando fixado um elemento de interferência como uma placa divisória, verifica-se que esta provoca um afastamento do núcleo do vórtice (Fig. 12) e como conseqüência, a redução do coeficiente de arrasto do modelo. Na Fig. 13 é esquematizado como o escoamento deve se comportar quando a placa é fixada à traseira do modelo.

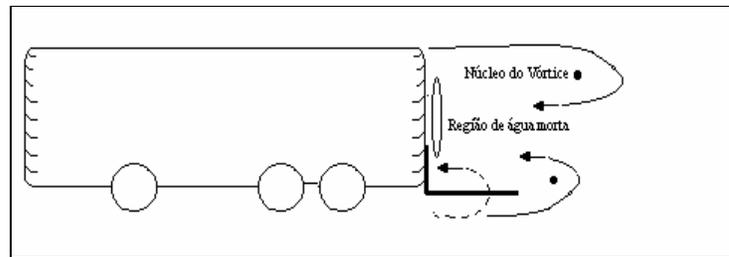


Figura 13. Esquema do escoamento após a colocação da placa divisória.

Tabela 3. Coeficiente de C_{pb} médio na base para as diferentes configurações do modelo.

Configuração	C_p	Redução (%)	δC_p
Modelo sem placa divisória	-0,113	-	0,009
Modelo com placa divisória $L=H/3$	-0,094	20	0,009
Modelo com placa divisória $L=H/2$	-0,087	30	0,009
Modelo com placa divisória $L=H$	-0,094	20	0,009

Na tabela 3 são apresentados os valores do coeficiente de pressão na base (C_{pb}) médio na superfície traseira do modelo para as diferentes configurações. Observa-se um incremento de C_{pb} (isto é, valores menos negativos) a medida que o comprimento do elemento de interferência (L) é incrementado, na faixa entre 0 e $H/2$, indicando que este tipo de dispositivo pode acarretar diminuição do coeficiente de arrasto. Na terceira coluna da Tab. 3 são apresentados os

valores de redução do C_{pb} para se ter uma idéia da ordem de grandeza da diminuição do arrasto de base. Na faixa entre $H/2$ e H observa-se um aumento do C_{pb} , indicando a ocorrência de modificações no comportamento da esteira.

Na figura 14 pode-se observar a evolução do perfil do coeficiente de pressão ao longo do eixo vertical, para os diferentes comprimentos da placa divisória. Verifica-se um valor menor de C_p na parte inferior da superfície traseira o qual parece estar correlacionado com a maior proximidade do vórtice inferior, como pode ser visto na Fig. 12. A medida que o comprimento da placa divisória é aumentado, ocorre um afastamento do vórtice inferior e um incremento da pressão na parte inferior. Por outro lado, verifica-se que o C_p na parte superior sofre uma redução (valores mais negativos), a qual esta correlacionada com a aproximação do vórtice que tem origem na aresta superior da traseira do veículo. Este comportamento é muito interessante, pois a introdução da placa divisória na parte inferior da superfície traseira acarretou uma mudança significativa na topologia da esteira e um estudo mais detalhado pode fornecer informações importantes relativas ao vínculo que existe entre os vórtices liberados de cada uma das arestas da traseira do veículo.

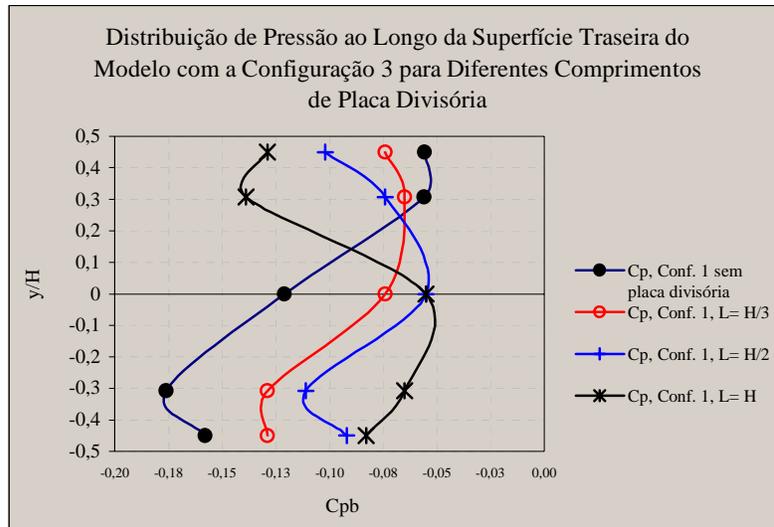


Figura 14. Distribuição de pressão na superfície traseira do modelo, para diferentes comprimentos das placas divisórias.

Na última configuração ensaiada neste trabalho, foi instalada uma chapa na superfície traseira, no plano vertical, que tampou totalmente o vão entre a superfície inferior do modelo e mesa automobilística. Esta chapa teve como finalidade obstruir totalmente a passagem do escoamento pelo vão mencionado acima, de tal maneira que se pudesse verificar o impacto que o vórtice emitido na superfície inferior apresentava na esteira do modelo.

Através do mapeamento do campo de velocidade média (Fig. 15) verificou-se a presença de uma grande região de baixas velocidades próxima à superfície traseira do modelo (região de água morta). Observa-se, também, que a camada de cisalhamento livre na parte superior da esteira possui uma inclinação acentuada para baixo, semelhante à configuração do escoamento para o caso da placa divisória com maior comprimento (Fig. 10). Um aspecto interessante é o desaparecimento da região onde a velocidade média alcança um máximo, como nos demais casos estudados (por exemplo, na Fig. 10, a região cujo centro está localizado aproximadamente em $x/H=0,5$ e $y/H=0$).

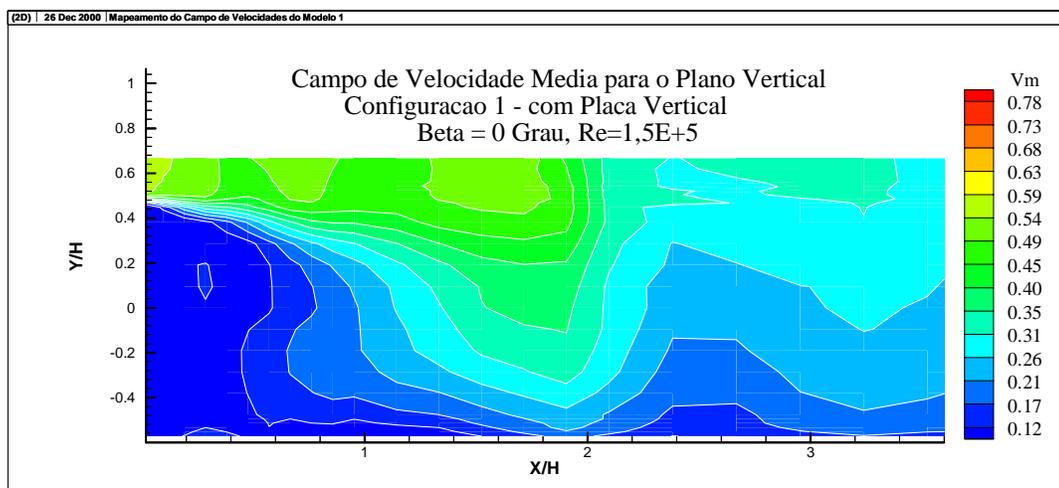


Figura 15. Mapeamento vertical da velocidade média para o modelo 1 com placa vertical no vão do modelo.

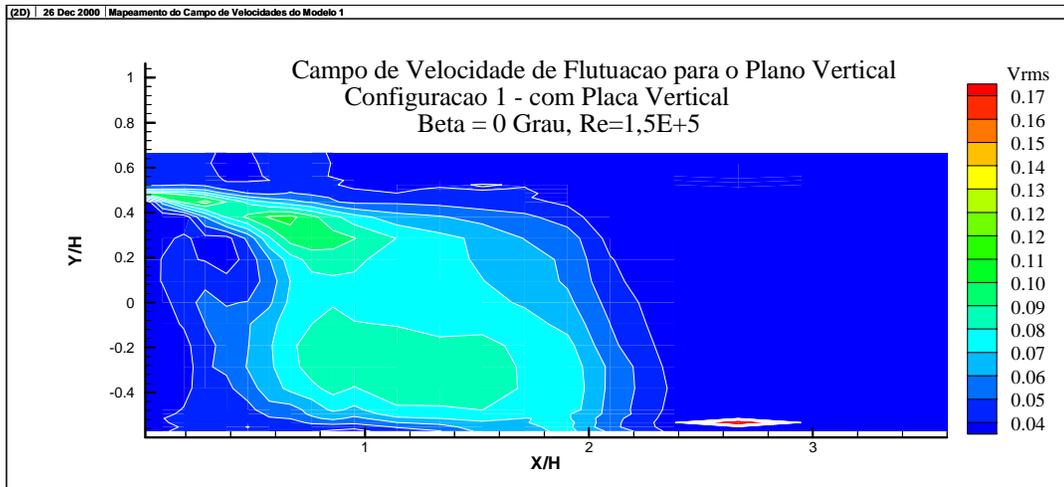


Figura 16. Mapeamento vertical da velocidade de flutuação para o modelo com placa vertical no vão do modelo.

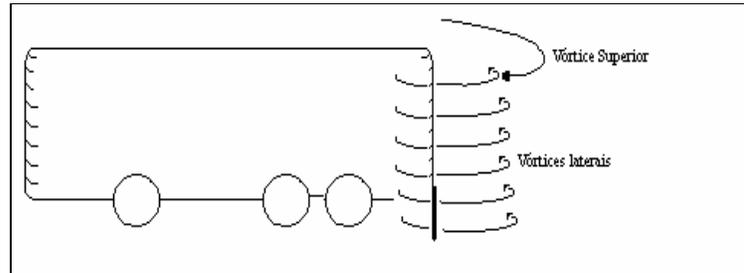


Figura 17. Esquema do escoamento na esteira com a placa vertical no vão do modelo.

O campo de velocidade de flutuação é apresentado na Fig. 16. Neste, pode-se observar que o pico de flutuação ocorre para x/H aproximadamente igual a 0,6, sendo este valor muito próximo daquele encontrado para o caso do modelo com placa divisória maior. Na parte inferior da esteira observa-se uma ampla região ($0,7 < x/H < 1,7$), com valores mais elevados, que indicam, provavelmente o posicionamento dos vórtices que se originam nas superfícies laterais do modelo, como mostrado na Fig. 17. Com isto, verifica-se que o vórtice localizado na região superior da esteira está mais próximo da superfície traseira do modelo, como no caso da configuração com placa divisória de maior comprimento.

4. Conclusões

A aerodinâmica de um veículo terrestre é um assunto relativamente complexo devido ao escoamento tridimensional que ocorre na esteira do veículo. Este escoamento é caracterizado pela liberação de vorticidade das superfícies laterais, superior e inferior do veículo, para formar camadas de cisalhamento livre que se enrolam e se desprendem para formar a esteira. Devido a assimetria causada pela presença do solo, observa-se que o vórtice que tem origem na superfície inferior se desprende de uma posição diferente daqueles que se originam nas demais superfícies, estando este fato correlacionado com a distribuição de pressão na superfície traseira do veículo e, como consequência, ao valor do chamado arrasto de base.

Neste trabalho foram usados elementos de interferência com o objetivo de alterar o escoamento na esteira e verificar a influência na distribuição de pressão na superfície traseira. Como elementos de interferência foram usadas três chapas com a largura do modelo e comprimento variável, as quais foram fixadas à aresta inferior da superfície traseira e posicionadas paralelas ao solo. Além disto, foi utilizada uma chapa fixada a mesma aresta, porém, posicionada na vertical, de maneira a obstruir o vão entre a superfície inferior do modelo e a mesa automobilística, que simula o solo.

Para verificar as alterações causadas por cada um destes elementos de interferência foi feito o mapeamento dos campos de velocidade média e de flutuação, utilizando-se anemometria de fio quente e a distribuição de pressão na superfície traseira do modelo. Os resultados experimentais mostraram que os elementos de interferência causaram

modificações significativas da topologia da esteira, acarretando aumento da distância entre o vórtice inferior e a traseira do veículo a medida que o comprimento do elemento de interferência é incrementado. Ao mesmo tempo, o coeficiente de pressão na parte inferior da superfície traseira sofreu um aumento, mostrando que existe uma correlação entre a posição do vórtice na esteira e o arrasto de base de um veículo terrestre.

Um resultado importante, que deve ser enfatizado, é o fato do vórtice, que se origina na superfície superior do veículo, ter se aproximado da superfície traseira a medida que o vórtice inferior se afastou, por causa do incremento do comprimento da placa divisória. Além disto, observou-se uma diminuição do coeficiente de pressão (valores mais negativos) na parte superior da superfície traseira. Este resultado está correlacionado com a aproximação do vórtice superior, de maneira análoga à correlação que existe entre o coeficiente de pressão inferior da superfície traseira e a posição do vórtice inferior.

Por fim, deve-se mencionar que o mérito deste trabalho está no fato da esteira de um veículo terrestre ter sido alterada de forma significativa, através do uso de elementos de interferência, tendo-se alcançado uma redução de 30% no coeficiente de pressão médio na superfície da traseira do veículo. O coeficiente de arrasto de base deve ter uma redução semelhante, acarretando diminuição do coeficiente de arrasto total e do consumo de combustível. Como mencionado anteriormente, este tipo de solução não pode ser aplicado na prática, porém, a interferência na esteira pode ser realizada através do sopramento na traseira do veículo e esta solução poderia ser implementada.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos recursos disponibilizados para a aquisição de equipamentos usados nesta pesquisa (processo 95/05569-1) e a Coordenadoria de Apoio a Pesquisa de Nível Superior (CAPES) pelo suporte do primeiro autor, na forma de bolsa de estudo.

À EMBRAER pelo apoio e motivação dada durante a confecção deste trabalho.

6. Referências

- Bearman, P.W., 1965, "Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates", *Journal Fluid Mechanics*, vol 21, part 2, pp 241-255.
- Girardi R. M., e Videira, L. C. P., "Influência do ângulo de derrapagem sobre a esteira de modelos de ônibus", Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 2001.
- Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, "Describing uncertainties in single-sample experiments", *Mechanical Engineering*.
- Kovazsnay, L. S. G., 1949, Hot wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers, *Proc. Roy. Soc. London A*, vol 19, pp174-190.
- Moreira Jr, O. e Girardi R. M., 1996, "Estudo experimental da inclinação da superfície frontal em modelos de ônibus", VI Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas, ENCIT 96.
- Roshko, A. 1954, "On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies", NACA TN 3169.

MODIFICATIONS IN A BUS MODEL WAKE DUE TO INTERFERENCE ELEMENTS

Luís Carlos Pires Videira

Empresa Brasileira de Aeronáutica (EMBRAER), Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170, 12.227-901, São José dos Campos, SP, Brasil.

Email: luiz.videira@embraer.com.br

Roberto da Mota Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, 12.200-900, São José dos Campos, SP.

Email: girardi@aer.ita.cta.br

Abstract: *The present work is part of a wide research concerned to the flow on ground vehicles, more specifically buses. The results obtained indicate that the wake flow can be influenced by interference elements. In the 2D bluff bodies, the use of splitter plates has shown efficient in the increase in the base pressure coefficient, resulting a drag coefficient decrement. Ground vehicles are bluff bodies with a wide wake that interacts with the floor. The present work goal is to verify interference elements influence on the wake topology and on the pressure coefficient at a bus model rear surface. The experimental techniques used in the study were: flow mapping by using a hot wire anemometer fixed at a three axis traversing system for measurements of the average and fluctuations velocities and a manometer used to obtain the pressures in the rear surface. A data acquisitions system was used to perform the experiments and the flow mapping (velocity fields) and pressures results are analyzed together, in order to find correlations between wake topology and the base pressure distribution. Great changes in the wake topology were obtained when the interference element length was increased, resulting in 30% increment of the average base pressure, which is associated to the bus base drag.*

Keywords. *Vehicles Aerodynamics, Bluff Body, Experimental Methods, Bus Wake.*