

INFLUÊNCIA DA PARTE FRONTAL DE UM MODELO DE ÔNIBUS SOBRE OS SEUS COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Luís Carlos Pires Videira

Roberto da Mota Girardi

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Divisão de Engenharia Aeronáutica, 12.228-901, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: luis@aer.ita.cta.br e girardi@aer.ita.cta.br

Resumo

Pesquisas em túneis de vento mostram a alta influência da forma aerodinâmica dos veículos terrestres na redução do coeficiente de arrasto e como consequência, a diminuição no consumo de combustível. O objetivo do presente trabalho é determinar experimentalmente os coeficientes de arrasto, força lateral e momento de guinada de um modelo de ônibus cuja parte frontal pode ser modificada. Os ensaios foram realizados para ângulos de guinada na faixa de -15° e 12° utilizando para estes ensaios de uma balança de 3 componentes especialmente projetada para obter os esforços aerodinâmicos. Foram testados cinco modelos de maneira a se determinar a influência das inclinações das superfícies lateral e superior. Os resultados são apresentados na forma de coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de guinada. Observou-se uma variação acentuada do C_D com as alterações na parte frontal do veículo. Os coeficientes de momento de guinada e de força lateral praticamente não sofreram modificação.

Palavras-chave: Aerodinâmica de ônibus, Corpo rombudo, Coeficientes aerodinâmicos

1. INTRODUÇÃO

Segundo Wong (1978) a importância da economia de combustível vem aumentando o interesse no desenvolvimento de novos conceitos em aerodinâmica de veículos. Um coeficiente de arrasto elevado provoca um consumo excessivo de combustível, e como consequência direta desta, tem-se uma grande emissão de poluentes no ar atmosférico, tornando-se assim um importante item para a elaboração de um projeto. O custo para se reduzir o arrasto através de um melhor projeto aerodinâmico é relativamente baixo, comparado ao custo do desenvolvimento de motores com melhores rendimentos e menores consumos. Como exemplo, Hucho (1986), cita que um modelo de ônibus com a parte frontal com os cantos sem arredondamento, apresentou um $C_D=0,88$, enquanto que um modelo com a mesma frente mas com os cantos arredondados apresentou um $C_D=0,36$. Um terceiro modelo com um ângulo de inclinação frontal e arredondamento da frente do modelo apresentou um $C_D=0,34$. Portanto, pequenas alterações na forma do modelo podem provocar reduções significativas no coeficiente de arrasto.

Câmara (1993) foi o primeiro a trabalhar com o presente modelo obtendo uma redução expressiva do coeficiente de arrasto com o arredondamento das arestas do modelo. Este mesmo modelo foi usado como configuração básica na pesquisa desenvolvida por Moreira (1996), na qual foram realizados ensaios para diferentes ângulos de guinada (β) e duas modificações na superfície frontal do modelo foram testadas. Nestas modificações foram alterados o ângulo da superfície frontal com relação ao plano horizontal.

O presente trabalho é uma continuação da pesquisa realizada por Moreira(1996). Quatro modificações da configuração básica do modelo foram consideradas: duas para estudar o efeito da inclinação da superfície frontal com relação ao plano de simetria vertical do modelo e outras duas para verificar o impacto causado por modificações simultâneas com relação aos planos horizontal e vertical.

2. APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Segundo Gorecki (1989), num laboratório de ensaios aerodinâmicos, o túnel de vento é o principal equipamento para se realizar experimentos relacionados com a aerodinâmica. O túnel utilizado neste trabalho é do tipo soprador e circuito aberto. Este túnel aerodinâmico subsônico opera na faixa de 6 a 30 m/s, possui seção de ensaio com dimensões 460 x 460x 1200 mm, sendo que a área real de ensaio, isto é a área descontada dos cantos da seção do túnel é aproximadamente $0,2027\text{m}^2$ e o nível de turbulência (NT) apresenta um valor de aproximadamente 0,5%, para a máxima velocidade.

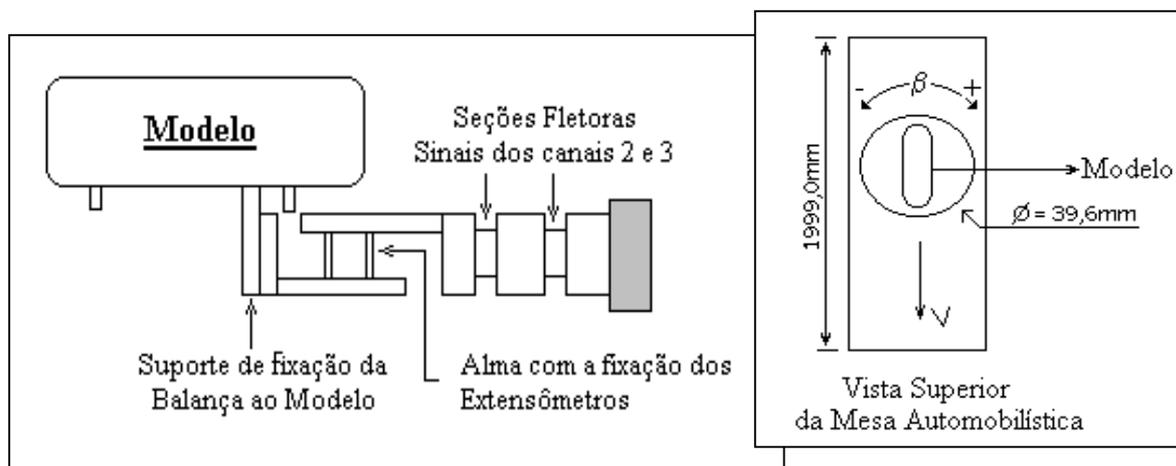


Figura 1. Vista lateral da balança utilizada nos ensaios de força e momento.

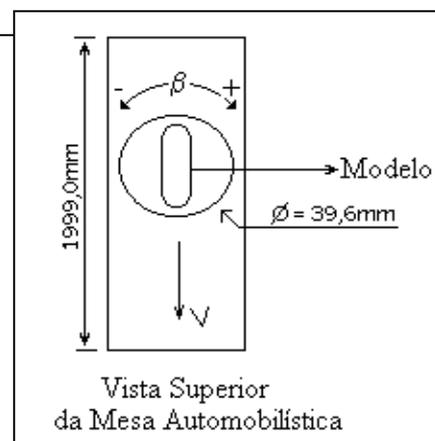


Figura 2. Esquema da Mesa Automobilística

Foi utilizada uma balança que permite fazer medidas de 3 componentes conforme a Fig. 1. Esta é semelhante à balança utilizada em ensaios de modelos aeronáuticos. Extensômetros são utilizados como elementos sensores e são fixados: (i) em uma das almas do filtro mecânico da parte frontal da balança, o qual é usado para fazer os registros da força de arrasto; (ii) nas seções fletoras, cujos sinais de saída fornecem os momentos na seção fletora mais próxima (M_{FA}) e mais afastada (M_{FB}) do modelo. Estes momentos são causados pela força lateral (F_L) e pelo momento de guinada (M_G), em torno do ponto de fixação do modelo à balança. As relações entre estes parâmetros são dadas pelas equações abaixo:

e

onde $L = 0,230\text{m}$, é a distância do ponto de fixação do modelo à seção fletora mais próxima e $\Delta = 0,095\text{m}$, é a distância entre as seções fletoras (vide Fig. 1). Deve-se deixar claro que tanto o momento (M_G) quanto o ângulo de guinada (β) são considerados como sendo positivos no sentido horário, como pode ser visto na figura 2.

A calibração da balança foi realizada através da adição de blocos de massa-padrão obtendo-se assim um valor de força de arrasto, força lateral e momento de guinada em função da tensão fornecida pelos extensômetros.

O modelo utilizado foi construído em madeira e tem semelhança geométrica com o ônibus modelo Mercedes-Benz O 400 RSD. As dimensões do modelo (vide tabela 1) foram escolhidas para se ter uma razão de bloqueio inferior a 5%, de maneira a minimizar as interferências provocada pela fronteira do fluxo de ar proveniente do túnel de vento, pois os ensaios foi feito em uma seção de testes aberta. Deve-se mencionar que não foram feitas correções nos resultados experimentais, pois trata-se de um estudo comparativo.

Conforme mencionado anteriormente, a superfície frontal do modelo básico (denotado como configuração do modelo 1), foi modificada sistematicamente, alterando-se os ângulos com relação ao plano horizontal (α) e com relação ao plano de simetria vertical (γ), como mostrados na figura 3. Na tabela 2 são fornecidos valores para α e γ para as respectivas configurações do modelo. Deste modo, o conjunto (I) formado pelas configurações 1,2 e 3 é usado para se analisar as variações dos esforços aerodinâmicos devido a variação de γ . As configurações 1,4 e 5 formam um conjunto (II), com o qual variações simultâneas de α e γ podem ser analisadas.

O modelo, a mesa automobilística e a balança são montado sem um suporte, o qual é posicionado na saída da seção de testes do túnel de vento. A superfície da mesa automobilística é posicionada um pouco acima da superfície inferior do túnel de vento. Desta forma, a camada limite que passa no vão entre a mesa e o modelo é pouco espessa, minimizando, assim, a interferência nos resultados.

Para o cálculo do número de Reynolds (Re), mediu-se as pressões total e a estática em tomadas de pressão instaladas no início da seção de testes do túnel de vento. Com isso, é possível obter a pressão dinâmica que é lida por um transdutor de pressão, cujo sinal é amplificado, filtrado e, em seguida, transmitido para o sistema de aquisição de dados. Este sistema é constituído por um micro computador, placa de aquisição da *National Instruments* e pelo programa *LabView*, que controla o processo de medida e executa o pós processamento dos dados.

Os ensaios foram realizados com aproximadamente o mesmo valor de pressão dinâmica, de maneira a se obter o mesmo Reynolds, permitindo a comparação dos resultados dos modelos ensaiados. O número de Reynolds tem como o comprimento característico a altura do modelo $H_M = 105,7\text{mm}$ (vide figura 3), por ser esta a dimensão característica normalmente usada na literatura.

O procedimento adotado para realizar os ensaios foi o seguinte: (i) após o alinhamento inicial do modelo com o auxílio de um teodolito, foi realizado o ajuste da pressão dinâmica do túnel de vento. (ii) Em seguida o ângulo de guinada (β) foi variado, tomando valores no intervalo de -15° e $+12^\circ$ variando de 3 em 3 graus. Este intervalo foi estudado para se ter, pelo menos, duas medidas para cada ângulo e para verificar alguma possível assimetria do aparato experimental. (iii) Para cada ângulo β , foram lidos os sinais de tensão provenientes da medida

de pressão dinâmica e de cada canal da balança. (iv) No início e no final de cada ensaio mediu-se a pressão e a temperatura ambiente, com a finalidade de se obter a densidade do ar.

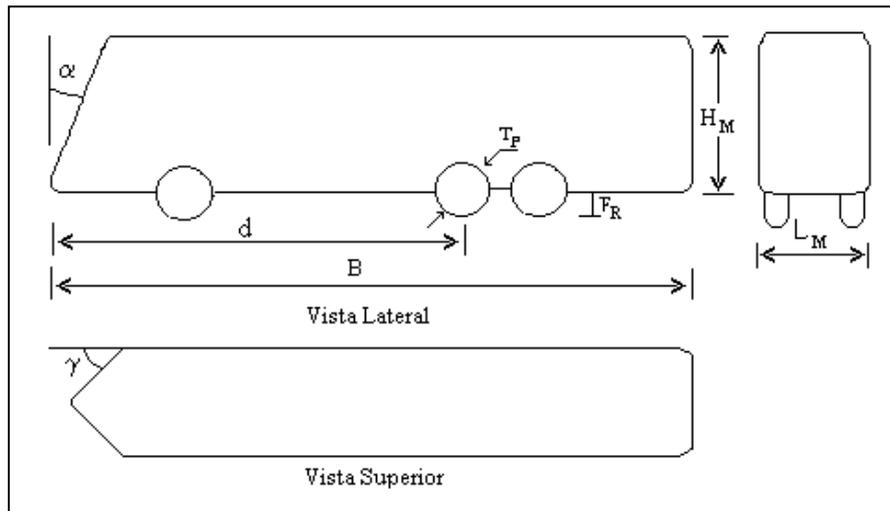


Figura 3. Esquema do modelo com inclinação do plano superior (α) e vertical (γ).

Tabela 1. Dimensões do modelo básico.

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
Balanço dianteiro (G_M)	76,5
Distância do eixo auxiliar em relação à superfície frontal (E_{R1M})	260,0
Distância do eixo motriz em relação à superfície frontal (E_{R2M})	290,0
Espessura do pneu (S_{PM})	10,5
Diâmetro do pneu (T_P)	21,0
Raio de arredondamento das arestas do modelo básico	10
Distância da superfície frontal ao ponto de fixação na balança (d)	262,4

Tabela 2. Ângulos de inclinação frontal (α) e lateral (γ) para as diferentes configurações do modelo.

Modelo	Ângulo de inclinação frontal (α)	Ângulo de inclinação lateral (γ)
Configuração 1	0°	0°
Configuração 2	0°	20°
Configuração 3	0°	40°
Configuração 4	20°	40°
Configuração 5	40°	40°

Por fim, a análise de incertezas dos resultados apresentadas neste trabalho foram tratadas segundo a metodologia apresentada por Kline & McClintock (1953). Nos cálculos de propagação das incertezas, utilizou-se o critério da distribuição de Gauss para um valor de desvio padrão (σ) de 95%, isto é, $\pm 2.\sigma$.

3. RESULTADOS

Para calcular os coeficientes de força lateral, C_{FL} , de momento de guinada e de arrasto, que atuam no ônibus utilizam-se as relações clássicas encontradas na literatura, Hucho(1986). A força lateral tem direção normal ao eixo longitudinal do veículo e o momento de guinada é medido em relação ao ponto de fixação da balança, apresentado na tabela 1. Em todos os coeficientes a área de referência utilizada é $0,008114 \text{ m}^2$, correspondente a superfície frontal do modelo e o comprimento de referência usado para determinar o coeficiente de momento de guinada é a distância entre os eixos, fornecida na tabela 1.

Para se evitar um congestionamento dos pontos experimentais, apresentou-se somente duas curvas que representam os limites inferior e superior desta variação. Analisando as curvas obtidas dos ensaios para os diferentes modelos, constatou-se uma variação muito pequena nos resultados do coeficiente de força lateral (C_{FL}) e momento de guinada (C_M) como pode ser visto respectivamente nas figura 5 e 6.

As incertezas obtidas para os ensaios do coeficiente de força lateral e momento de guinada apresentaram valores em torno de 0,2 para o C_{FL} e 0,35 para o C_M . Embora as incertezas obtidas para estes ensaios tenham sido elevadas, os resultados apresentaram uma dispersão muito pequena. Estes valores de incerteza justificam o fato de C_{FL} ser diferente de zero para ângulo de guinada igual a zero.

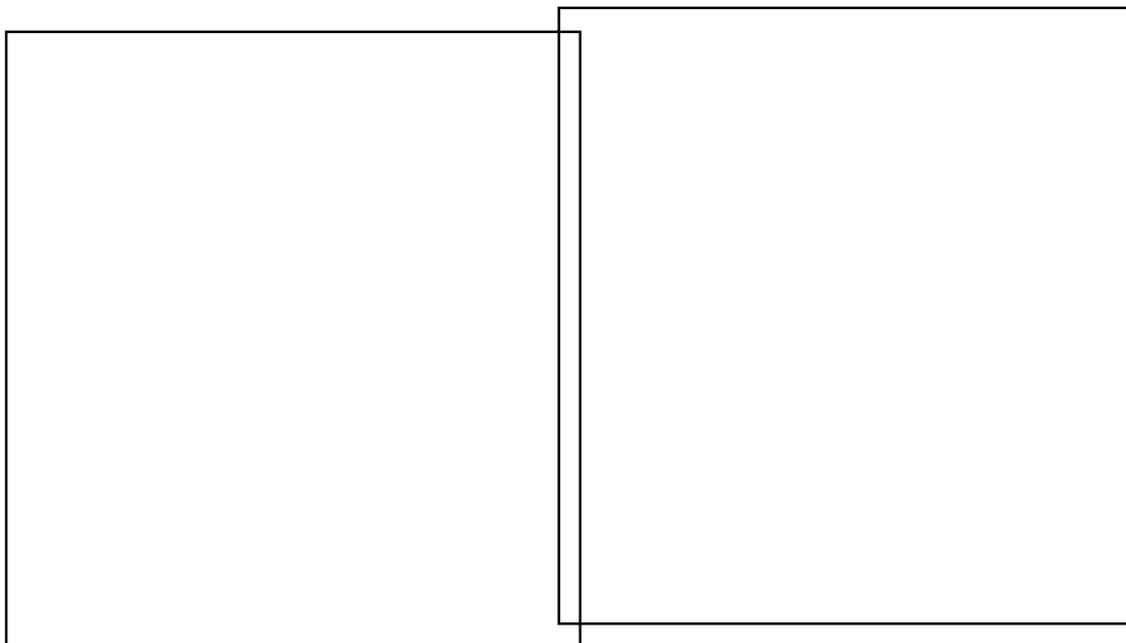


Figura 5. Curva do coeficiente de força lateral (C_{FL}) para os diferentes modelos.

Figura 6. Curva do coeficiente de momento de guinada (C_M) para os diferentes modelos.

Nas figuras 5 e 6 pode-se observar que os resultados para os coeficientes de força lateral e momento de guinada praticamente não se alteraram, mostrando que a modificação da parte frontal do veículo tem pouca influência nestes parâmetros. Para explicar este fato, deve-se pensar em termos de distribuição de pressão na superfície do modelo e das forças que

resultam desta distribuição. A força lateral e o momento de guinada são causados por uma assimetria na distribuição de pressão em relação ao plano de simetria vertical do modelo. Isto é, para $\beta=0$ as distribuições de pressão nas superfícies laterais do modelo são idênticas e, portanto, a força lateral e o momento de guinada são nulos. Quando o modelo é submetido a um escoamento com ângulo de guinada diferente de zero, ocorre uma assimetria das distribuições de pressão nas superfícies laterais do modelo, que acarretam o aparecimento da força lateral e o momento de guinada.

Para a configuração básica, as distribuições de pressão nas superfícies frontal e traseira não fornecem contribuição para a força lateral e para o momento de guinada, pois as forças que atuam nestas superfícies são alinhadas com o eixo de simetria longitudinal do modelo (direção da força de arrasto). Neste caso, somente a força que atua na superfície lateral é responsável pela variação com β , que se observa nas Figs. 5 e 6.

As modificações na superfície frontal do modelo implicam no aparecimento de superfícies inclinadas, com relação ao plano de simetria vertical (vide vista superior na Fig. 3). Neste caso as forças que atuam nestas superfícies tem componentes nas direções das forças de arrasto e lateral. Desta forma, uma assimetria das distribuições de pressão, devido a $\beta \neq 0$, fornece uma contribuição para a força lateral e para o momento de guinada do modelo. No entanto, como a área da superfície frontal do modelo é bem menor que a área da superfície lateral, esta contribuição é pequena comparada com a aquela dada pela assimetria das distribuições de pressão nas superfícies laterais. Este raciocínio explica as pequenas variações encontradas nas inclinações das retas observadas nas Figs. 5 e 6.

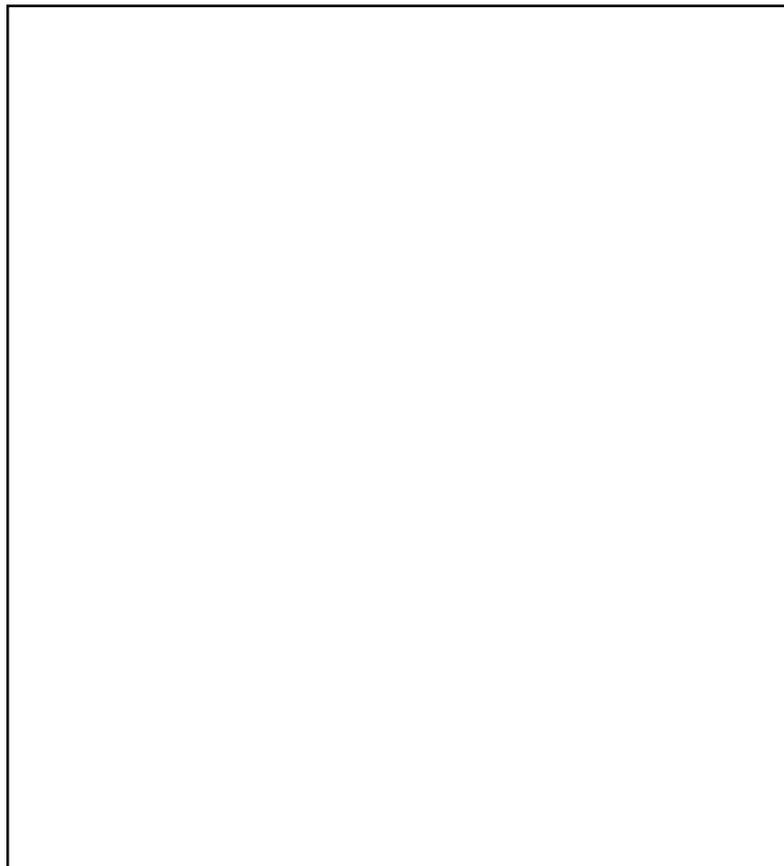


Figura 7. Curva do coeficiente de arrasto (C_D) para os diferentes modelos.

Inicialmente os resultados da figura 7 são analisadas para o caso do escoamento sem ângulo de guinada. Para o conjunto de modelos (I), constituído pelas configurações 1,2 e 3, verifica-se que o aumento do valor do ângulo γ acarreta em diminuição do C_D . Esta diminuição foi bem pronunciada no caso da configuração 2 e pode ser explicada pela redução acentuada na região de estagnação (onde C_p é aproximadamente igual a 1) na parte frontal do modelo, devido a inclinação das superfícies laterais da mesma. Esta explicação é baseada nos resultados do trabalho de Moreira (1996), que considerou a inclinação da superfície frontal, com relação ao plano horizontal e obteve uma redução de arrasto associada à explicação fornecida acima.

Para o conjunto de modelos (II), constituídos pelas configurações 1,4 e 5, observa-se uma redução do C_d devido à inclinação simultânea das superfícies laterais e superior. Não foi verificada variação do C_d devido ao aumento da inclinação da superfície superior (α). A pequena diferença encontrada para os valores de C_d das configurações 4 e 5 está dentro da faixa de incerteza da medida.

Ainda considerando o caso de $\beta=0$, pode-se verificar que as configurações 4 e 5 tem coeficiente de arrasto maior que as configurações 2 e 3. A expectativa inicial era encontrar o resultado oposto, pois era esperado que a região de estagnação na parte frontal do modelo com inclinações simultâneas fosse menor que nos modelos com inclinação lateral. Para fornecer uma explicação para este resultados são necessários ensaios de medida de distribuição de pressão e, também, a realização de visualização do escoamento, pois a causa do resultado mencionado acima pode estar na formação de vórtices longitudinais, com origem nas arestas inclinadas que aparecem nas interseções das superfícies laterais com a superfície superior da parte frontal do modelo. Estes vórtices ocasionam o chamado arrasto de vórtice, que certamente não existe no escoamento sobre as configurações 2 e 3.

Considerando-se a variação do coeficiente de arrasto em função do ângulo de guinada, verifica-se (vide Fig. 7) que a configuração 2 possui comportamento similar à configuração 1 (modelo básico). Este comportamento é alterado para as configurações 3, 4 e 5, para as quais se observa uma menor variação do C_d com β . Deve-se lembrar que as configurações 3, 4 e 5 tem uma característica em comum, pois possuem o mesmo valor para γ .

No trabalho de Moreira (1996) foi verificado que a variação do coeficiente de arrasto do modelo com o ângulo de guinada está fortemente associada à variação do coeficiente de arrasto de base, resultante da distribuição de pressão na superfície traseira do veículo. Por outro lado, esta distribuição de pressão é causada pelo escoamento na esteira próxima do modelo. Estas informações indicam que a parte frontal das configurações 3, 4 e 5 está influenciando o escoamento na esteira dos modelos, talvez, devido à elevada inclinação das superfícies laterais (ângulo γ), que acabam evitando o descolamento na junção entre as partes frontal e lateral do modelo.

4. CONCLUSÕES

A análise dos coeficientes aerodinâmicos é muito importante para ângulos de guinada β diferente de zero, pois um veículo trafegando em uma estrada, certamente estará sujeito a ventos na direção transversal a sua trajetória. Por este motivo, é muito interessante que um veículo tenha baixa variação do coeficiente de arrasto em função do ângulo β .

Nos resultados experimentais apresentados neste trabalho, pode-se observar que o C_{FL} e o C_M praticamente não variaram para as diferentes configurações o modelo básico. Este fato está associado à relação de áreas entre a superfície lateral do modelo e a projeção da parte frontal no plano de simetria vertical dos modelos. Do ponto de vista prático, este resultado mostra que a modificação da parte frontal do modelo, a qual pode acarretar redução significativa do consumo de combustível, quase não tem influência na estabilidade do ônibus.

Os modelos com parte frontal inclinada com relação ao plano de simetria vertical apresentaram coeficientes de arrasto menores que as configurações com inclinação simultânea das superfícies da parte frontal. Este resultado inesperado pode ser consequência da geração de um vórtice longitudinal (arrasto de vórtice), na aresta formada pela interseção das superfícies lateral com a superior da parte frontal do modelo. A análise deste problema pode ser realizada com experimentos adicionais, realizando-se visualização do escoamento e medidas da distribuição de pressão dos modelos estudados no presente trabalho.

A variação do coeficiente de arrasto com relação ao ângulo de guinada foi menor para os modelos com parte frontal inclinada com relação ao plano de simetria vertical. Este resultado parece estar associado com a configuração do escoamento na esteira próxima, o qual parece estar sendo influenciado pelo não descolamento do escoamento sobre a superfície lateral do modelo. Este descolamento ocorre normalmente na junção entre a parte frontal e o corpo do modelo. Para ângulo de derrapagem nulo ($\beta=0$), observa-se um recolamento nas superfícies laterais e superior, entretanto, quando $\beta \neq 0$ não ocorre este recolamento em uma das superfícies laterais. Aparentemente, este tipo de configuração não está ocorrendo para o modelo com maior inclinação da parte frontal, relativa ao plano de simetria vertical.

Por fim, deve-se lembrar que as variações adotadas para as inclinações da superfície frontal tem o objetivo de se compreender melhor o complexo escoamento sobre um veículo. Na prática, ângulos muito elevados para tais inclinações podem acarretar inconveniências em um projeto de ônibus. A questão da metodologia adotada para a calibração da balança, com a qual se obteve valores elevados das incertezas para os coeficientes de força lateral e momento de guinada, deve ser modificada. Uma alternativa para melhoria dos resultados seria fazer uma calibração tipo matricial.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Ampara 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.

6. REFERÊNCIAS

- Câmara, E.F., 1993, “Estudo Aerodinâmico do Escoamento sobre o Modelo de um Ônibus”, Tese de Mestrado, ITA.
- Doebelin, E.O., 1990, “Measurement Systems: Application and Design” Mc Graw-Hill, Inc.
- Gorecki, J.P., 1989, “Túneis Aerodinâmicos”, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.
- Hucho, W.H., 1986, “Aerodynamics of Road Vehicle”, Butterworths Co.
- Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, Mechanical Engineering.
- Manual – Dados Técnicos de Ônibus Rodoviários, O 400R, O 400RS, O 400RSL e O 400RSD”Mercedes Benz do Brasil S.A.
- 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.
- Wong, J.Y., 1978, “Theory of Ground Vehicles”, John Wiley & Sons Inc, 3 ed. pág 127 a 132.