

**UMA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA  
INFLUÊNCIA DE VENTOS LATERAIS NAS  
FORÇAS AERODINÂMICAS EM VEÍCULOS DE  
PASSAGEIROS**



Hilton Carlos de Miranda Mello

DEDALUS - Acervo - EESC



31100006798

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano

São Carlos

1999

Class.	TESE-EESC
Cott.	3516
Tombo	0149/99

811 0000 6798

S/S 1048195

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M527a Mello, Hilton Carlos de Miranda  
Uma avaliação experimental da influência de ventos laterais nas forças aerodinâmicas em veículos de passageiros / Hilton Carlos de Miranda Mello. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Martini Catalano.

1. Vento lateral. 2. Veículos terrestres.  
3. Arrasto. 4. Força lateral. I. Título.

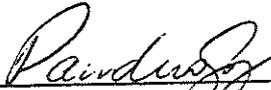
FOLHA DE APROVAÇÃO

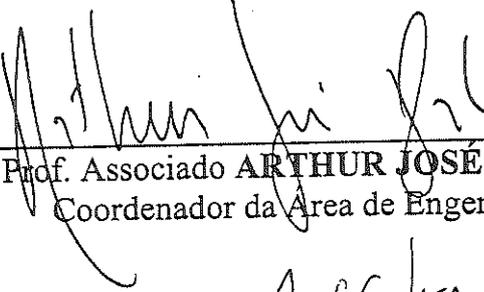
Candidato: Engenheiro **HILTON CARLOS DE MIRANDA MELLO**

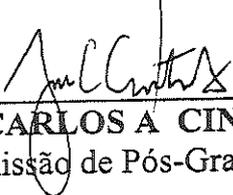
Dissertação defendida e aprovada em 30.08.1999  
pela Comissão Julgadora:

  
Prof. Doutor **FERNANDO MARTINI CATALANO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
Prof. Doutor **MICHAEL GEORGE MAUNSELL**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
Prof. Doutor **PAULO CELSO GRECO JUNIOR**  
(Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais)

  
Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica

  
**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Dedico este trabalho..*

*..ao SENHOR, ao meu pai João, à minha mãe Carmela  
aos meus irmãos Sérgio e Raquel, e meu cunhado Mauro*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fernando Martini Catalano, pela orientação e assistência neste trabalho;

Aos meus colegas do Laboratório de Aeronaves Alexandre Caporali, Dawson Izola, Carlos De Marqui, Fabiano Galdino, João Brandt, José Croce, Juan Gutierrez, Klaus Widmaier, Rogério Frauendorf, Rogério Possi pelo companheirismo e colaboração durante a realização deste trabalho;

Aos meus colegas Ricardo Arantes, André Kaneco e Ângelo Mendonça pelo incentivo e amizade durante estes anos;

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela bolsa de estudo concedida;

Aos professores do LAE, Antônio Canale, Eduardo Bello, Flávio Marques, Francisco Benevenuto, pela atenção dispensada em todos os momentos;

Aos professores Paulo Greco e Michael Maunsell pela co-orientação;

Aos técnicos e funcionários do LAE, Otávio, Osnam, Helenita e Carlinhos pelo auxílio na elaboração dos equipamentos e serviços prestados;

Aos funcionários do LAMAFE, pelo grande auxílio prestado;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica pelo auxílio e serviços prestados;

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	i
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xiv
<b>RESUMO</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Configurações para simulação de movimento do piso.....	3
2.3 Veículos em escala real e reduzida no estudo da influência de ventos laterais turbulentos.....	7
2.4 Configurações de piso e de turbulência do escoamento nos ensaios em túnel de vento.....	8
2.5 Configurações de incidência do escoamento sobre a superfície do modelo dentro da câmara de ensaios.....	10
2.6 Influência da inclinação da parte traseira dos modelos.....	12
2.7 Configurações de movimento do modelo dentro da câmara de ensaios.....	15
2.8 Testes aerodinâmicos de modelos em movimento sob rajadas de ventos laterais.....	17
2.9 Posicionamento do trabalho.....	18
<b>3 REVISÃO TEÓRICA</b> .....	20
3.1 Mecanismo do escoamento de ar ao redor de um veículo.....	20
3.2 Campo de escoamento e sistema de vórtices ao redor de um veículo.....	24

3.3 Fundamentos das forças e momentos aerodinâmicos.....	35
3.4 Distribuição de pressão no veículo.....	46
3.5 Força de arrasto.....	47
3.6 Força lateral.....	59
3.7 Forças e momentos totais.....	63
3.8 Estabilidade aerodinâmica.....	67
<b>4 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>73</b>
4.1 Introdução.....	73
4.2 Túnel de vento.....	73
4.3 Modelo de veículo utilizado.....	76
4.4 Balança aerodinâmica.....	78
4.5 Configuração de ensaio adotada para a movimentação do modelo.....	88
4.6 Configuração da simulação do piso.....	91
4.7 Monitoramento da pressão.....	93
4.8 Configuração experimental utilizada nos ensaios de visualização.....	94
4.9 Correções devido ao bloqueio sólido tridimensional.....	96
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>98</b>
5.1 Introdução.....	98
5.2 Apresentação dos resultados.....	98
5.3 Discussão dos resultados.....	131
5.4 Apresentação dos ensaios de visualização.....	136
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>144</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>149</b>
<b>APÊNDICE I</b>	
<b>APÊNDICE II</b>	

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 – Configuração experimental da fonte de escoamento lateral fixa (DOMINY & DOCTON, 1994).....	10
FIGURA 02 – Configuração experimental da fonte de escoamento giratória, com uma placa móvel (DOMINY & DOCTON, 1994).....	11
FIGURA 03 – Diferentes formas traseiras do modelo utilizadas nos experimentos (BEARMAN & MULLARKEY, 1995).....	13
FIGURA 04 – Vista lateral esquemática da seção de testes do túnel de vento, trilho e carro de sustentação e movimento do modelo (GARRY, MACKLIN & Van OPSTAL, 1995).....	16
FIGURA 05 – Gradiente de pressão e velocidade no escoamento sobre um corpo.....	21
FIGURA 06 – Comparação do arrasto em veículos e outros corpos de áreas frontais íngremes (HUCHO, 1987).....	22
FIGURA 07 – Linhas de corrente, seção média de um VW Golf I (HUCHO, 1987).....	24
FIGURA 08 – Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma placa plana.....	25
FIGURA 09 – Separação do escoamento numa superfície, e o gradiente de pressão adverso.....	26
FIGURA 10 – Formação de vórtice num escoamento sobre o corpo de um cilindro.....	26
FIGURA 11 – Diagramas de vetores das direções da velocidade $V_F$ do veículo e velocidade $V_S$ do vento natural.....	27

FIGURA 12 –	Escoamento ao redor de um veículo, detalhes na extremidade dianteira e outras regiões com entalhes (HUCHO, 1987).....	28
FIGURA 13 –	Padrões de escoamento para diferentes configurações da parte traseira de um veículo (HUCHO, 1987).....	29
FIGURA 14 –	Esteira larga, longa, aberta de um squareback e esteira pequena, curta, fechada de um fastback (SOVRAN et al., 1978).....	29
FIGURA 15 –	Configurações do escoamento na parte traseira de um veículo em diferentes inclinações (AHMED, 1984).....	30
FIGURA 16 –	Diminuição da intensidade de circulação na trilha de vórtices para um “squareback” e “fastback” (AHMED et al., 1979).....	32
FIGURA 17 –	Sistemas de vórtices para uma inclinação da parte traseira do veículo (HUCHO, 1987).....	33
FIGURA 18 –	Sistemas de vórtices na traseira de um veículo numa determinada inclinação (AHMED et al., 1984): (a) regime de escoamento com baixo arrasto; (b) regime de escoamento com alto arrasto, $\varphi = 30^\circ$ .....	34
FIGURA 19 –	Ilustração da pressão e tensão de cisalhamento em uma superfície.....	35
FIGURA 20 –	Força e momento aerodinâmico resultante em um aerofólio genérico.....	36
FIGURA 21 –	Força aerodinâmica resultante e as componentes nas quais se divide (ANDERSON, 1991).....	36
FIGURA 22 –	Nomenclatura para a integração da distribuição de pressão e tensão de cisalhamento sobre a superfície de um corpo bidimensional (ANDERSON, 1991).....	37
FIGURA 23 –	Força aerodinâmica num elemento da superfície de um corpo (ANDERSON, 1991).....	39
FIGURA 24 –	Convenção de sinais para momentos aerodinâmicos em relação ao bordo de ataque.....	40
FIGURA 25 –	Áreas e comprimentos de referência.....	43

FIGURA 26 –	Relacionamento geométrico do comprimento diferencial para o aerofólio.....	45
FIGURA 27 –	Vórtices na esteira de um automóvel (KRAMER, 1984).....	46
FIGURA 28 –	Influência da inclinação do ângulo do pára-brisa na variação do coeficiente de arrasto (BUCHHEIM et al., 1979).....	48
FIGURA 29 –	Variação do coeficiente de momento de arfagem pelo ângulo de ataque do veículo (COLE, 1972).....	50
FIGURA 30 –	Esteira de um VW Golf I, fumaça introduzida dentro da esteira (HUCHO, 1987).....	50
FIGURA 31 –	Determinação do arrasto de um corpo, exemplo de escoamento bidimensional.....	51
FIGURA 32 –	Distribuição de pressão e configurações de linhas de escoamento em um cilindro circular para diferentes números de Reynolds (HUCHO, 1987): (a) escoamento invíscido; (b) escoamento sub-crítico, camada limite laminar; (c) escoamento super crítico, camada limite turbulenta.....	52
FIGURA 33 –	Coeficientes de arrasto de corpos rombudos como uma função do número de Reynolds. Pontos (b) e (c), escoamento bidimensional (HUCHO, 1987).....	53
FIGURA 34 –	Separação do escoamento em um corpo rombudo, linha de separação perpendicular à direção do escoamento.....	54
FIGURA 35 –	Separação de escoamento em um corpo com base rombuda oblíqua, linha de separação inclinada em relação à direção do escoamento principal.....	55
FIGURA 36 –	Definição de arrasto de pressão $D_P$ e do arrasto de fricção $D_F$ ; e a relação de distribuição de pressão e tensão de cisalhamento em um automóvel (SOVRAN et al., 1978).....	57
FIGURA 37 –	Efeito de um automóvel num campo de escoamento circunvizinho. Derivação do arrasto e suas componentes com o auxílio do teorema de momento para o sistema de coordenadas mostrado (HACKETT et al., 1985).....	58

FIGURA 38 –	Varição do arrasto total e do arrasto de partes do corpo em função da variação da inclinação da parte traseira (AHMED et al., 1984).....	59
FIGURA 39 –	Varição do coeficiente de força lateral em função do ângulo de ataque lateral (COLE, 1972).....	60
FIGURA 40 –	Comparação de vários perfis de ventos laterais (HUCHO, 1987).....	61
FIGURA 41 –	Comparação da distribuição de pressão ao redor de uma seção de asa e uma seção horizontal de um veículo (BARTH, 1960).....	62
FIGURA 42 –	Forças e momentos aerodinâmicos atuando no centro de gravidade de um veículo (HUCHO, 1987).....	63
FIGURA 43 –	Campo de escoamento e distribuição de pressão para um veículo num escoamento invíscido bidimensional.....	64
FIGURA 44 –	Condições de escoamento de ar e forças atuantes em um automóvel exposto à ventos laterais (SORGATZ et al., 1982). ..	67
FIGURA 45 –	Redução do momento de guinada pelo controle da separação do escoamento (HUCHO, 1980).....	69
FIGURA 46 –	Definição do centro de pressão (HUCHO, 1987).....	70
FIGURA 47 –	Coeficientes de momento de guinada e de força lateral para veículos com diferentes configurações na forma da traseira (HUCHO, 1987).....	71
FIGURA 48 –	Coeficientes de momento de arfagem e de força de sustentação para veículos com diferentes configurações na forma traseira (HUCHO, 1987).....	72
FIGURA 49 –	Dimensões gerais do circuito do túnel (CATALANO, 1988)...	74
FIGURA 50 –	Túnel de vento LAE-01, vista lateral e superior (CATALANO, 1988).....	75
FIGURA 51 –	Vista lateral e superior do modelo em fibra de vidro construído no Laboratório de Aeronaves, com as dimensões adotadas para um “fastback”.....	76

FIGURA 52 – Vista lateral e superior do modelo padrão para as três configurações da parte traseira do veículo.....	77
FIGURA 53 – Balança aerodinâmica de resposta rápida do Laboratório de Aeronaves, montada abaixo da seção de ensaios do túnel de vento do LAE.....	78
FIGURA 54 – Circuito básico constituído de uma ponte de “Wheatstone”, cujas resistências elétricas ativas são os extensômetros.....	79
FIGURA 55 – Sistema de coordenadas <i>OXYZ</i> fixo na balança aerodinâmica, e sistema <i>Oxyz</i> localizado no c.g. do modelo de veículo.....	80
FIGURA 56 – Procedimento experimental utilizado para calibração da força aerodinâmica de arrasto.....	81
FIGURA 57 – Procedimento experimental utilizado para calibração da força aerodinâmica lateral.....	82
FIGURA 58 – Variação do canal 1 em função do canal 0 na calibração da força de arrasto sobre o modelo.....	84
FIGURA 59 – Variação do canal 0 em função do canal 1 na calibração da força lateral atuante no modelo.....	85
FIGURA 60 – Variação do canal 1 em função do canal 0 na calibração da força de arrasto sobre o modelo.....	86
FIGURA 61 – Variação do canal 0 em função do canal 1 na calibração da força lateral atuante no modelo.....	87
FIGURA 62 – Câmara de ensaios do túnel de vento do LAE, as direções dos eixos paralelos aos eixos <i>X</i> e <i>Y</i> do sistema de coordenadas <i>OXYZ</i> da balança aerodinâmica, e o eixo <i>Z</i> coincidente com o eixo perpendicular ao piso do túnel.....	88
FIGURA 63 – Rotação fornecida ao modelo dentro da câmara de ensaios do túnel de vento, e o movimento do sistema de coordenadas <i>Oxyz</i> localizado no c.g. do veículo.....	89
FIGURA 64 – Dispositivo de giro do modelo em torno de sua haste de sustentação.....	90

FIGURA 65 – Escala graduada e ponteiro utilizados para determinar o posicionamento do modelo dentro da câmara de ensaios do túnel de vento.....	91
FIGURA 66 – Vista da placa utilizada para simulação do piso da rodovia nos ensaios experimentais, e as dimensões de posicionamento desta placa.....	92
FIGURA 67 – Manômetro do tipo “Betz” utilizado durante os experimentos.	93
FIGURA 68 – Tubo “Pitot” estático dentro do túnel de vento (COIMBRA, 1997).....	94
FIGURA 69 – Movimento dos “tufts” devido ao escoamento em alta velocidade sobre a superfície do modelo.....	95
FIGURA 70 – Posicionamento do modelo no interior da câmara de ensaios, para realização dos ensaios de visualização.....	95
FIGURA 71 – Sistema de iluminação instalado ao lado do túnel de vento.....	96
FIGURA 72 – Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -5^\circ$ .....	100
FIGURA 73 – Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -5^\circ$ ..	100
FIGURA 74 – Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -4^\circ$ .....	102
FIGURA 75 – Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -4^\circ$ ..	102
FIGURA 76 – Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -3^\circ$ .....	104
FIGURA 77 – Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -3^\circ$ ..	104
FIGURA 78 – Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -2^\circ$ .....	106
FIGURA 79 – Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -2^\circ$ ..	106

FIGURA 80 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -1^\circ$ .....	108
FIGURA 81 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = -1^\circ$ ..	108
FIGURA 82 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$ .....	110
FIGURA 83 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 0^\circ$ ..	110
FIGURA 84 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 1^\circ$ .....	112
FIGURA 85 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 1^\circ$ ..	112
FIGURA 86 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 2^\circ$ .....	114
FIGURA 87 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 2^\circ$ ....	114
FIGURA 88 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 3^\circ$ .....	116
FIGURA 89 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 3^\circ$ ..	116
FIGURA 90 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 4^\circ$ .....	118
FIGURA 91 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 4^\circ$ ..	118
FIGURA 92 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$ .....	120
FIGURA 93 –	Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ com um ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$ ..	120
FIGURA 94 –	Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	121

FIGURA 95 –	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	121
FIGURA 96 –	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	122
FIGURA 97 –	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	122
FIGURA 98 –	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $0^\circ$ até $3^\circ$ .....	123
FIGURA 99 –	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $4^\circ$ até $7^\circ$ .....	123
FIGURA 100 -	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $8^\circ$ até $12^\circ$ .....	124
FIGURA 101 -	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $13^\circ$ até $16^\circ$ ....	124
FIGURA 102 -	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $17^\circ$ até $20^\circ$ ....	125
FIGURA 103 -	Varição do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ iguais a $0^\circ$ , $5^\circ$ , $10^\circ$ , $15^\circ$ e $20^\circ$ .....	125
FIGURA 104 -	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $1^\circ$ até $4^\circ$ .....	126
FIGURA 105 -	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $5^\circ$ até $8^\circ$ .....	126
FIGURA 106 -	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $9^\circ$ até $12^\circ$ .....	127
FIGURA 107 -	Varição do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $13^\circ$ até $16^\circ$ .....	127

FIGURA 108 - Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ de $17^\circ$ até $20^\circ$ .....	128
FIGURA 109 - Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral $\beta$ iguais a $1^\circ$ , $5^\circ$ , $10^\circ$ , $15^\circ$ e $20^\circ$ .....	128
FIGURA 110 - Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ e do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	129
FIGURA 111 - Variação do coeficiente de arrasto $C_D$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ e do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	129
FIGURA 112 - Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ e do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	130
FIGURA 113 - Variação do coeficiente de força lateral $C_Y$ em função do ângulo de ataque $\alpha$ e do ângulo de ataque lateral $\beta$ .....	130
FIGURA 114 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 0^\circ$ .....	136
FIGURA 115 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 5^\circ$ .....	137
FIGURA 116 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ .....	137
FIGURA 117 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 15^\circ$ .....	137
FIGURA 118 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ .....	138
FIGURA 119 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\beta = -20^\circ$ e $\alpha = 0^\circ$ .....	138
FIGURA 120 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = -3^\circ$ e $\beta = 0^\circ$ .....	139
FIGURA 121 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = -3^\circ$ e $\beta = 5^\circ$ .....	139

FIGURA 122 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = -3^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ .....	139
FIGURA 123 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = -3^\circ$ e $\beta = 15^\circ$ .....	140
FIGURA 124 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = -3^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ .....	140
FIGURA 125 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\beta = -20^\circ$ e $\alpha = -3^\circ$ .....	140
FIGURA 126 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 4^\circ$ e $\beta = 0^\circ$ .....	141
FIGURA 127 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 4^\circ$ e $\beta = 5^\circ$ .....	141
FIGURA 128 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 4^\circ$ e $\beta = 10^\circ$ .....	142
FIGURA 129 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 4^\circ$ e $\beta = 15^\circ$ .....	142
FIGURA 130 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\alpha = 4^\circ$ e $\beta = 20^\circ$ .....	142
FIGURA 131 - Visualização do escoamento através de “tufts”, com $\beta = -20^\circ$ e $\alpha = 4^\circ$ .....	143

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Sinais em volts registrados nos ensaios para calibração do canal de arrasto no modelo, com a seqüência de massas utilizadas.....	83
TABELA 02 – Sinais em volts registrados nos ensaios para calibração do canal de força lateral no modelo, com a seqüência de massas utilizadas.....	84
TABELA 03 – Valores registrados em volts nos ensaios para calibração do canal de arrasto na haste, com as sucessivas massas utilizadas.....	86
TABELA 04 – Valores registrados em volts nos ensaios para calibração do canal de força lateral na haste, com as sucessivas massas utilizadas.....	87
TABELA 05 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = -5^\circ$ .....	99
TABELA 06 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = -4^\circ$ .....	101
TABELA 07 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = -3^\circ$ .....	103
TABELA 08 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = -2^\circ$ .....	105

TABELA 09 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = -1^\circ$ .....	107
TABELA 10 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 0^\circ$ .....	109
TABELA 11 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 1^\circ$ .....	111
TABELA 12 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 2^\circ$ .....	113
TABELA 13 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 3^\circ$ .....	115
TABELA 14 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 4^\circ$ .....	117
TABELA 15 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral, $\alpha = 5^\circ$ .....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LAE	- Laboratório de Aeronaves
MIRA	- Motor Industry Research Association
NACA	- National Advisory Committee for Aeronautics
NPL	- National Physical Laboratories
RMS	- Root Mean Square

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	força tangencial à superfície, N
$A'$	força tangencial à superfície por unidade de comprimento, N/m
$C_A$	coeficiente de força axial
$c_B$	coeficiente de arrasto da esteira de um veículo
$c_D$	coeficiente de força de arrasto
$c_f$	coeficiente de atrito
$c_K$	coeficiente de arrasto da parte frontal de um veículo
$c_L$	coeficiente de força de sustentação
$c_M$	coeficiente de momento de arfagem
$C_M$	coeficiente de momento
$c_N$	coeficiente de momento de guinada
$C_N$	coeficiente de força normal
$C_p$	coeficiente de pressão
$c_R$	coeficiente de momento de rolamento
$c_S$	coeficiente de arrasto na superfície traseira de um veículo
$c_W$	coeficiente de arrasto das rodas de um veículo
$c_Y$	coeficiente de força lateral
$D$	força de arrasto, N
$D_f$	arrasto de fricção, N
$D_p$	arrasto de pressão, N
$L$	força de sustentação, N
$M$	momento aerodinâmico resultante, N.m
$M_A$	momento de arfagem, N.m
$M_{BA}$	momento em relação à borda de ataque, N.m
$M_G$	momento de guinada, N.m

$M_R$	momento de rolamento, N.m
$N$	força normal à superfície, N
$N'$	força normal à superfície por unidade de comprimento, N/m
$p$	pressão superficial, Pa
$P_D$	pressão dinâmica, Pa
$p_l$	pressão superficial na parte inferior do aerofólio, Pa
$P_S$	pressão estática, Pa
$P_T$	pressão total, Pa
$p_u$	pressão superficial na parte superior do aerofólio, Pa
$q_\infty$	pressão dinâmica no fluxo livre, kg.m/s <sup>2</sup>
$R$	força aerodinâmica resultante, N
$Re$	número de Reynolds
$Re_{crit}$	número de Reynolds crítico
$S$	Área frontal de um veículo, m <sup>2</sup>
$s_l$	variável curvilínea ao longo da superfície inferior do aerofólio, m
$s_u$	variável curvilínea ao longo da superfície superior do aerofólio, m
$V_\infty$	velocidade do fluxo livre, m/s
$V$	velocidade do veículo, m/s
$V_S$	velocidade do vento natural, m/s
$Y$	força lateral, N
$\alpha$	ângulo de ataque, graus
$\beta$	ângulo de guinada, graus
$\Gamma$	circulação, m <sup>2</sup> /s
$\eta$	ângulo entre as direções das velocidades do veículo e do vento, graus
$\varphi$	ângulo de inclinação do pára-brisa, graus
$\nu$	viscosidade cinemática do ar, m <sup>2</sup> /s
$\theta$	variação angular da tensão de cisalhamento e pressão superficial, rad
$\rho$	densidade do ar, Kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	tensão de cisalhamento, Pa
$\tau_l$	tensão de cisalhamento na superfície inferior do aerofólio, Pa
$\tau_u$	tensão de cisalhamento na superfície superior do aerofólio, Pa

## RESUMO

MELLO, H. C. M. (1999). *Uma Avaliação Experimental da Influência de Ventos Laterais nas Forças Aerodinâmicas em Veículos de Passageiros*. São Carlos, 1999. 153p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Um trabalho experimental foi realizado para analisar a sensibilidade ao vento lateral, no estudo de características aerodinâmicas que influem na estabilidade de um veículo terrestre. Os coeficientes de arrasto e de força lateral foram obtidos de medidas realizadas com um modelo em escala 1:5, utilizando-se um túnel de vento de circuito aberto e câmara de ensaios fechada. As medidas foram feitas através de uma balança aerodinâmica. A distância entre a superfície inferior do veículo e o piso, “ground clearance”, adotada nos experimentos foi de 0.037m. Os ensaios foram realizados com uma configuração de modelo padrão "MIRA". Neste método de testes o modelo é rotacionado em torno dos eixos  $y$  e  $z$ , do sistema de coordenadas  $oxyz$  fixo no c.g. do modelo, e fixado nas posições de ensaios. A rotação do modelo gera um ângulo de ataque lateral  $\beta$ , que varia de  $0^\circ$  a  $20^\circ$ , e um pequeno deslocamento angular em torno do eixo  $y$ , de  $-5^\circ$  a  $5^\circ$  para o ângulo de ataque  $\alpha$ . Através dos métodos experimentais de visualização foi possível analisar a direção do fluxo na superfície do modelo. Os resultados apresentados pelos experimentos mostraram a variação dos coeficientes de arrasto e de força lateral devido a atuação de rajadas de ventos laterais. Neste trabalho as variações dos coeficientes das forças aerodinâmicas foram avaliadas, tornando possível detectar em quais condições um automóvel apresentaria comportamento instável, devido às variações das forças aerodinâmicas.

Palavras-chave: Vento lateral, veículos terrestres, arrasto, força lateral.

## *ABSTRACT*

MELLO, H. C. M. (1999). *An Experimental Evaluation of the Influence of Lateral Winds on the Aerodynamic Forces on Passenger Vehicles*. São Carlos, 1999. 153p. MSc Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

An experimental work was performed to analyze the effect of lateral wind on the aerodynamic characteristics that influence the stability of a road vehicle. The drag and side force coefficients,  $c_D$  and  $c_Y$ , were obtained from measurements made using a 1:5 scale model. An open circuit wind tunnel with a closed test section was used. The measurements were made using a rapid response wind tunnel balance. The distance between the lower surface of the vehicle and the floor, ground clearance, adopted in the experiments was 0.037m. The tests were executed using a standard configuration "MIRA" model. In this test method the model is turned around the  $y$  and  $z$  axes, using a fixed coordinate  $oxyz$  system at the model c.g., and fastened in position in the test section. The rotation of the model generates a lateral angle of attack  $\beta$ , that varies between  $0^\circ$  and  $20^\circ$ , and a small angular displacement around the  $y$  axis, from  $-5^\circ$  to  $5^\circ$ , for the angle of attack  $\alpha$ . Using experimental visualization methods it was possible to analyze the direction of the flow on the surface of the model. The results presented by the experiments showed the variation of the drag and side force coefficients,  $c_D$  and  $c_Y$ , due to the application of bursts of lateral wind. In this work the variations of the coefficients of the aerodynamic force were evaluated, making possible to detect in which conditions an automobile would present instability, due to the variations of the aerodynamic forces.

Keywords: Side wind, road vehicles, drag, side force.

# 1 INTRODUÇÃO

A estabilidade nos automóveis é uma preocupação constante, e a cada novo projeto ou mesmo modificações nos modelos já existentes, torna-se um fator indispensável a análise das características aerodinâmicas que influenciam na estabilidade do veículo. Quando os automóveis se deslocam ao longo de uma rodovia, o escoamento de ar incidente sobre sua superfície não possui uma direção definida, principalmente devido a ocorrência de rajadas de ventos laterais.

As forças atuantes em veículos nas estradas, podem ser divididas em três contribuições, correspondendo as forças aerodinâmicas, forças de resistência ao rolamento e laterais dos pneumáticos e componente da força peso no deslocamento em pistas inclinadas. A resistência ao avanço devido ao ar circundante corresponde à maior parcela destas forças em altas velocidades, e resistência ao rolamento dos pneumáticos mais a inclinação da pista exercem um consumo de potência do motor menor, porém significativa. Forças aerodinâmicas interagindo com o veículo provocam arrasto, sustentação ou forças para baixo, forças laterais, momentos de rolamento, arfagem e guinada, além de ruídos.

Estas forças e momentos aerodinâmicos têm influência sobre a economia de combustível e manobrabilidade do veículo. Para qualquer tipo de automóvel, as forças aerodinâmicas produzidas resultam de duas fontes: distribuição de pressão e fricção viscosa. Num automóvel se movimentando ao longo de uma rodovia, o ar escoando através de toda sua superfície, provoca forças e momentos em relação à todos os eixos principais do automóvel, os quais afetam as características de estabilidade do veículo. Destas forças, o arrasto aerodinâmico corresponde ao maior

interesse para estudos, no entanto outras duas forças e três momentos aerodinâmicos, também exercem grande influência nas características dinâmicas laterais do veículo. As forças e momentos resultantes do escoamento de ar devem ser equilibrados pelas forças de reação entre o veículo e a estrada, as quais se originam do contato dos pneus com o solo, e a interação aerodinâmica com o solo.

A maneira como o ar incide no veículo deve ser verificada, para que se entenda as características do escoamento ao redor do veículo, e também seja possível mostrar os efeitos nos desempenhos aerodinâmicos. Para um veículo ter boas características de dirigibilidade, aspectos em relação à sensibilidade ao vento lateral devem ser considerados durante a fase de desenvolvimento do projeto.

O fenômeno freqüentemente chamado sensibilidade ao vento lateral, deve ser considerado sob dois aspectos diferentes:

- 1) O motorista é incomodado quando uma compensação ininterrupta à direção da roda é necessária para se corrigir efeitos de vento lateral. Isto conduz ao desgaste físico, fadiga prematura e um risco aumentado;
- 2) Quando ventos laterais fortes ocorrem de direções fortuitas, um problema em relação à segurança pode surgir rapidamente. Se ao motorista falta a habilidade necessária ou experiência para corrigir a trajetória devido ao vento lateral, ocorrem divergências indesejáveis do caminho exigido para o veículo e uma reação incorreta pode conduzir a perda de controle.

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental dos efeitos da variação da direção do escoamento incidente sobre a superfície de um modelo em escala 1:5, nos coeficientes aerodinâmicos de força lateral e de arrasto. Foram obtidos dados experimentais, os quais demonstraram que combinações da variação dos ângulos de ataque com o ângulo de incidência do escoamento sobre o veículo, influem nas forças aerodinâmicas atuantes sobre o mesmo. Estas variações afetam as características de dirigibilidade do veículo, e conseqüentemente podem diminuir suas condições de segurança.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo de revisão bibliográfica são apresentados aspectos gerais relacionados aos trabalhos realizados no estudo de estabilidade aerodinâmica de veículos terrestres. A direção do escoamento paralela ao eixo longitudinal do veículo pode sofrer alterações durante seu deslocamento, e as mudanças dos ângulos de ataque lateral e de ataque em relação ao c.g. do automóvel provocam variações nas forças aerodinâmicas de arrasto, sustentação e lateral.

Os efeitos provocados pelo escoamento abaixo das superfícies dos veículos, são avaliados em alguns trabalhos desenvolvidos para estudar as diferentes formas de simulação de piso, nos ensaios em túnel de vento. As configurações adotadas para movimentação de modelos em escala reduzida, dentro da câmara de ensaios de um túnel de vento, no estudo da influência da variação da direção do escoamento sobre a superfície de veículos terrestres, são outros fatores apresentados em alguns trabalhos.

### **2.2 Configurações para simulação de movimento do piso**

Em experimentos utilizando túneis de vento, uma das formas de simulação do escoamento passando através da parte inferior de um veículo, e em contato com o piso da rodovia, que possui um movimento relativo a esta parte do veículo, é o piso móvel. COOPER et al.(1996) apresentam em seu trabalho a realização de testes em túnel de vento para determinar o efeito do movimento do piso plano nas forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação em um modelo de carro de passageiros.

Os ensaios seguiram quatro diferentes configurações de simulação, para se investigar as influências do piso do túnel de vento. A simulação do movimento do piso foi efetuada com duas larguras diferentes das esteiras móveis. Num dos casos, o movimento do piso foi simulado por uma esteira móvel sem fim, com uma largura igual a do túnel de vento, sendo que esta simulação é comparada ao uso de uma esteira móvel estreitada que corre apenas entre as rodas.

Ambos os casos de movimento do piso foram comparados à simulações com piso do túnel fixo, tanto em ensaios sem um controle da camada limite no piso, quanto numa simulação através de um escoamento para cima, seguido por um escoamento tangencial forçado no controle da camada limite.

Pelos resultados mostrados no trabalho, o escoamento tangencial forçado com um piso fixo aumentou o arrasto e a sustentação no eixo dianteiro, e diminuiu a sustentação no eixo traseiro, comparando-se com os dados do experimento com piso fixo, e sem o escoamento forçado. A tendência do arrasto é coincidente em geral com os resultados de outras investigações, enquanto a tendência da sustentação é contrária a outros dados de referência.

Segundo COOPER et al. (1996), o aumento do arrasto é devido ao fato da velocidade do escoamento aumentar sobre as rodas e partes abaixo do modelo, quando a camada limite do piso é afinada pelo escoamento forçado. O aumento da sustentação com o escoamento tangencial forçado, pode ter sido devido a uma pequena variação do ângulo de ataque positiva causada por este escoamento.

Os resultados deste estudo mostram que houve um efeito do movimento do piso e da rotação das rodas, nas medidas dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação de um veículo de passageiros no túnel de vento. Também é observado que os incrementos no arrasto, entre a configuração de referência com piso fixo, e as duas configurações modificadas com piso móvel, são os mesmos, independente da

simulação do piso. Entretanto, o incremento na sustentação é significativamente diferente com movimento do piso, quando uma superfície inferior lisa é utilizada.

Os efeitos mais importantes do movimento do piso e rotação das rodas, são as reduções nos valores absolutos medidos do arrasto e sustentação, e as variações dos incrementos da sustentação na parte dianteira e traseira do veículo, medidos com a superfície inferior lisa. Embora estes resultados preliminares levantem questões quanto às semelhanças proporcionadas pelo método com piso do túnel de vento fixo, para desenvolvimento de veículos de rodovia aerodinamicamente avançados, não se conhece ainda o suficiente para tirar-se conclusões de validade geral sobre estes aspectos.

LAJOS & HEGEL (1990) realizaram experimentos de simulação do escoamento abaixo de um modelo de veículo em escala 1:5, utilizando esteira móvel. Avaliou-se a influência deste escoamento no desenvolvimento da camada limite ao longo da superfície do piso do túnel, logo abaixo do veículo, e seus efeitos nas características aerodinâmicas do veículo. O túnel de vento onde foram realizados os ensaios possui uma câmara de ensaios com seção aberta, a qual é equipada com uma balança aerodinâmica de seis componentes. A camada limite na frente da esteira móvel é controlada por sucção através de fendas e placas perfuradas.

De acordo com LAJOS & HEGEL (1990), em alguns ensaios com corpos rombudos, a simulação do piso influencia principalmente o campo de escoamento nas proximidades da esteira. Sendo que isto é a consequência da interação do gradiente de pressão adverso na esteira, o escoamento através dos entalhes na parte inferior do modelo e as tensões de cisalhamento na superfície do piso.

As medidas em corpos rombudos próximos ao solo mostram que o arrasto aerodinâmico é em geral apenas moderadamente influenciado pelo movimento do piso. No caso de modelos com a superfície inferior rugosa e borda de ataque arredondada, facilitando a entrada do escoamento nas fendas da parte inferior do modelo, a simulação do piso tem influenciado o arrasto mais significativamente.

Desta maneira, esta configuração de piso móvel afeta o escoamento lateral proveniente da superfície inferior do modelo, causando o descolamento do escoamento ao lado das superfícies laterais do veículo. Neste trabalho foi utilizado um modelo com a superfície inferior lisa, e portanto acredita-se que, os valores obtidos para a força de arrasto não foram influenciados de maneira significativa.

WILDI (1996) em seu trabalho realizou experimentos para determinar a influência de configurações de simulação de piso móvel nas medidas das forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação, e dos momentos de arfagem e guinada. O piso da rodovia é simulado através da utilização de uma placa para o desenvolvimento da camada limite, com um escoamento tangencial forçado integrado ao sistema para controle da espessura da camada limite, juntamente com uma esteira móvel.

A velocidade local próxima ao solo é controlada por ajustes na pressão do escoamento tangencial forçado. A influência do número de Reynolds é pequena para a faixa de velocidades utilizadas nos experimentos, entre 30 m/s até 40 m/s. As forças aerodinâmicas nos componentes expostos ao escoamento incidente, são diretamente relacionados ao perfil de pressão total da camada limite.

Ainda segundo WILDI (1996), o método de simulação da camada limite determina o desenvolvimento de gradientes de pressão na parte de baixo do veículo. A maneira como ocorre a separação varia drasticamente com as diferentes técnicas de simulação da camada limite. Todas as configurações de testes com piso fixo e sem rotação das rodas, mostraram uma grande diminuição da força de sustentação e arrasto, comparados com os valores obtidos para os ensaios com configuração de piso móvel e rotação das rodas.

A simulação das rodas tem uma influência significativa nas forças aerodinâmicas que atuam em componentes sobre a superfície do veículo, assim como em suas resultantes balanceadas entre os eixos traseiro e dianteiro do modelo. O

movimento da esteira impede uma separação do escoamento na superfície inferior do veículo.

### **2.3 Veículos em escala real e reduzida no estudo da influência de ventos laterais**

NGUYEN, SAUNDERS & WATKINS (1997) investigaram a resposta dinâmica obtida de dados experimentais relativos a automóveis sujeitos à rajadas de ventos. Os testes em túnel são realizados utilizando-se três tipos de veículos, sendo um modelo em escala 1:12 de protótipo padrão, um modelo Audi A4 em escala 1:10 e um veículo esportivo de estrada em escala real. Determinou-se um espectro de forças laterais resultantes em diferentes níveis de turbulência do escoamento incidente sobre os veículos. Dos resultados obtidos, NGUYEN, SAUNDERS & WATKINS (1997) concluem que a largura de banda para variação do espectro das forças laterais, torna-se mais estreitada a medida que o nível de turbulência do escoamento é aumentado.

Le GOOD (1995) realizou uma série de experimentos avaliando as correlações de resultados obtidos de um modelo em escala 1:4, em relação aqueles produzidos num modelo em escala real do Rover 820Si. Todos os testes feitos no veículo em escala real foram realizados num túnel de vento com a seção de ensaios fechada do tipo semi-aberto. Nos ensaios do modelo em escala 1:4, um túnel de vento com as mesmas características, mas de dimensões menores foi utilizado.

Os testes no modelo em escala são conduzidos com três tipos de configurações de piso plano do túnel, para estabelecer a influência da simulação do piso no desenvolvimento, de forma sistemática, da superfície superior de carros de passageiros. Segundo Le GOOD (1995), as mudanças nas medidas dos coeficientes de arrasto e sustentação, para pequenas modificações na forma da superfície superior do veículo, tais como as variações da altura do “spoiler” traseiro, podem ser bem prognosticadas em testes utilizando modelo em escala.

É afirmado ainda que pela comparação dos resultados obtidos dos ensaios com o veículo em escala real e com o modelo em escala 1:4, as mudanças nos coeficientes de arrasto e sustentação, devido às variações nas configurações do veículo em escala real, podem ser bem previstas por modificações semelhantes em um modelo em escala 1:4; mostrando também uma boa concordância nos testes com os pisos do túnel fixo e móvel, para os ensaios do modelo em escala 1:4 no túnel de vento.

#### **2.4 Configurações de piso e de turbulência do escoamento nos ensaios em túnel de vento**

MERCKER, SOJA & WIEDEMAN (1996) realizaram investigações experimentais no intuito de estudar a influência de diferentes técnicas de simulação do piso móvel nas forças e momentos aerodinâmicos de um veículo em escala real. Foram feitos testes com quatro larguras de esteira do piso diferentes, sendo utilizado uma esteira com a mesma largura do túnel, esteiras com dimensões coincidentes com a extremidade externa e interna das rodas, e esteira com largura de um metro.

Nos ensaios com piso fixo foram utilizados dispositivos para alterar os contornos da camada limite, com duas espessuras de deslocamento diferentes, e um outro experimento foi realizado com escoamento forçado tangencial. A série de testes em seu todo foi realizada uma vez com as rodas fixas, e outra com as rodas em rotação. Dos resultados obtidos, foi sugerido que uma roda exposta a um determinado escoamento oblíquo, com um ângulo de ataque lateral considerável, pode deixar de produzir um efeito significativo na redução do arrasto gerado pela rotação da roda.

A redução do arrasto devido a rotação das rodas, é mais efetivo quando uma esteira móvel é utilizada, comparando-se ao caso dos experimentos com um piso plano fixo, pelo fato da alta quantidade de movimento na camada limite ao longo da

esteira móvel gerar um arrasto maior na roda do veículo. Os efeitos de deslocamento do início da camada limite ao longo do piso do túnel fazem as linhas de escoamento abaixo do carro curvar-se para fora criando um escoamento lateral. Por este motivo, um gradiente de pressão positivo é gerado, o qual aumenta a sustentação nos testes onde não é utilizado esteira móvel.

MERCKER, SOJA & WIEDEMAN (1996) afirmaram que os resultados mostram uma tendência de diminuição do coeficiente de arrasto, a medida que a largura da esteira diminui. Para todas as configurações de testes, os maiores valores de arrasto encontrados, são medidos com a utilização de esteira móvel com a mesma largura do túnel de vento, ao passo que a configuração convencional com piso fixo proporciona os menores valores de arrasto para o veículo.

HEGEL & BEARMAN (1990) efetuaram investigações experimentais para avaliar a influência dos ventos turbulentos e movimento relativo ao piso nos coeficientes das forças aerodinâmicas. Os experimentos foram realizados num túnel de vento equipado com uma esteira móvel para simulação de movimento do piso.

Os efeitos da turbulência dos ventos são simulados através da colocação de grades na entrada da seção de ensaios, sendo utilizadas quatro diferentes intensidades de turbulência, com três grades distintas e sem estes quadros de grades. Geralmente os efeitos dos ventos são considerados como efeitos de ventos laterais, e neste caso o modelo é simplesmente rotacionado ao redor de um eixo vertical num túnel de vento.

De acordo com HEGEL & BEARMAN (1990), os experimentos mostram que o vento não é significativo apenas pelo fato dele causar efeitos de vento lateral, mas até mesmo em casos com um vento paralelo à direção de movimento, ele pode ter efeitos significativos nas características aerodinâmicas do veículo. A razão disto pode ser encontrada em dois fatos. Um dos fatos é que num veículo, a velocidade do vento não é igual a velocidade relativa do piso abaixo do veículo, para um sistema de referência fixo ao automóvel, e o outro fato é porque o vento é sempre turbulento.

Para corpos moderadamente arredondados a turbulência do vento diminui o arrasto, pela interação do escoamento incidente com a camada limite ao longo das curvaturas, enquanto que para corpos totalmente arredondados o escoamento na frente permanece colado, e o arrasto é diminuído pela interação do escoamento ao longo das superfícies laterais com a esteira atrás do veículo.

## 2.5 Configurações de incidência do escoamento sobre a superfície do modelo dentro da câmara de ensaios

Simulações de ventos laterais são realizadas em túneis de vento com diferentes configurações possíveis de utilização do aparato experimental, sendo consideradas as vantagens de um método em relação aos outros, em termos dos dados obtidos nos ensaios. DOMINY & DOCTON (1994) demonstram em seu trabalho que uma alternativa à colocação do modelo em diferentes posições, para simulações de ventos laterais num túnel de vento, pode ser a movimentação de uma segunda fonte de ventos, como visto na FIGURA 01.

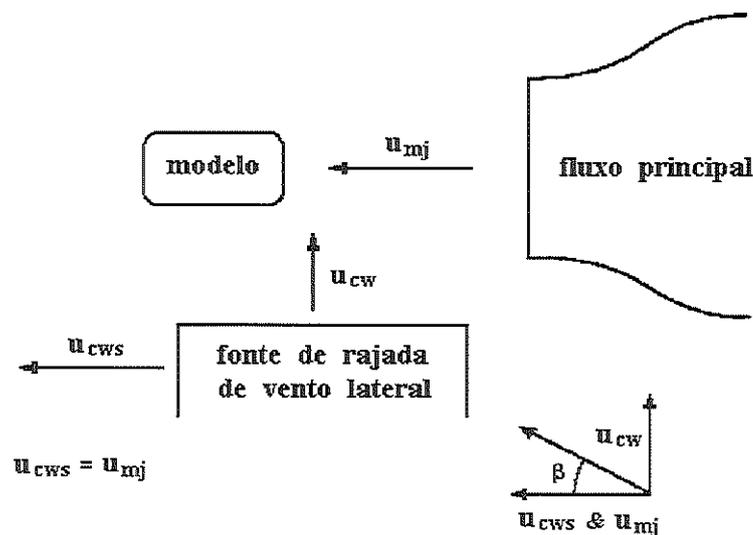


FIGURA 01 – Configuração experimental da fonte de escoamento lateral fixa (DOMINY & DOCTON, 1994).

Neste método os ensaios foram realizados com uma configuração de modelo estacionário convencional, onde o modelo permanece numa posição fixa e um escoamento axial passa sobre sua superfície. Os ventos laterais são gerados por uma outra fonte, estando o escoamento desta numa direção perpendicular à do escoamento principal, como visto na FIGURA 01.

Através de um deslocamento desta fonte com a mesma velocidade do escoamento axial, um vento resultante dos dois escoamentos incide sobre a superfície do modelo. É possível variar o ângulo de incidência do vento lateral resultante, com mudanças da velocidade do escoamento principal axial, juntamente com variações na velocidade do escoamento da fonte secundária móvel, mantendo-se sempre a velocidade de movimento desta fonte igual ao do escoamento principal axial.

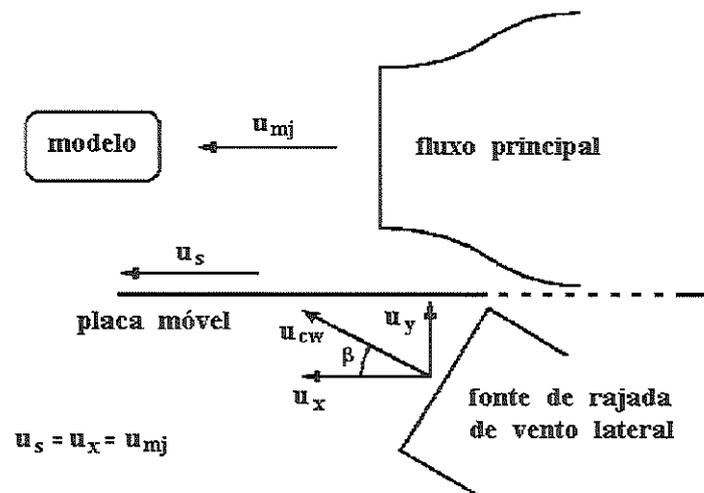


FIGURA 02 – Configuração experimental da fonte de escoamento lateral giratória, com uma placa móvel (DOMINY & DOCTON, 1994).

Com a configuração de modelo estacionário pode-se conseguir a mesma velocidade resultante obtida com o deslocamento da fonte de escoamento secundário lateral, por meio da inclinação desta fonte, cujo escoamento fornecerá uma resultante junto com o escoamento axial. A direção deste escoamento resultante incidente sobre a superfície do modelo, varia de acordo com a velocidade e direção do escoamento lateral secundário, e mudanças na velocidade do escoamento principal.

A duração destes ventos laterais sobre o modelo, pode ser controlada pelo movimento de uma placa que desloca-se longitudinalmente entre a fonte de escoamento lateral e o modelo, sendo esta configuração mostrada na FIGURA 02. Conforme esta placa se aproxima da fonte de vento lateral, o escoamento produzido por esta fonte inclinada é interrompido e o modelo estará sujeito apenas ao escoamento principal axial.

Segundo DOMINY & DOCTON (1994), este método permite o controle da intensidade e duração das rajadas de ventos laterais, e ainda torna possível o estudo das passagens de escoamento rápido e uniforme serem rapidamente implementadas. Mesmo considerando todas as dificuldades geradas pela complexidade desta configuração de testes, é ressaltado que este método tem o potencial para permitir o controle de todas as características dos ventos laterais incidentes nos veículos.

As condições criadas dentro de um laboratório para simulação de ventos laterais atingindo um automóvel, comparadas com as situações que ocorrem nas rodovias, apresentam muitas vezes diferenças que podem ser medidas em testes de campo, com veículos de produção efetivada. Desta maneira muitos testes são realizados com o objetivo de avaliar as influências de fatores em condições reais, no conjunto de dados relativos a experimentos realizados em laboratório, como também as possibilidades de simulação de alguns destes fatores em diferentes configurações de ensaios.

## **2.6 Influência da inclinação da parte traseira dos modelos**

BEARMAN & MULLARKEY (1995) conduziram uma série de experimentos para determinar os valores médios e instáveis dos coeficientes de arrasto, força lateral e momento de guinada num conjunto de veículos rodoviários com formas diferentes, vistas na FIGURA 03. As medidas foram realizadas num túnel de vento com uma balança aerodinâmica respondendo rapidamente. Nos

ensaios foi utilizado um modelo em escala reduzida para cada forma de veículo e um número de Reynolds, baseado no comprimento do modelo,  $Re_y = 4,5 \times 10^5$ .

Os dados foram obtidos em três tipos de escoamentos diferentes no ambiente da câmara de ensaios. Mantendo-se escoamento uniforme, foram determinados através dos dados experimentais os coeficientes de arrasto, força lateral e momento de guinada para todos os modelos, em vários ângulos de ataque lateral. Escoamentos com rajadas transversais senoidais sobrepostas em escoamento uniforme, com comprimentos de onda variando entre 2 a 20 vezes o comprimento do modelo, são gerados pela oscilação de um aerofólio. As medidas neste caso foram realizadas para cada um dos modelos, e as raízes quadradas médias (RMS) dos coeficientes de força lateral e momento de guinada são estimadas.

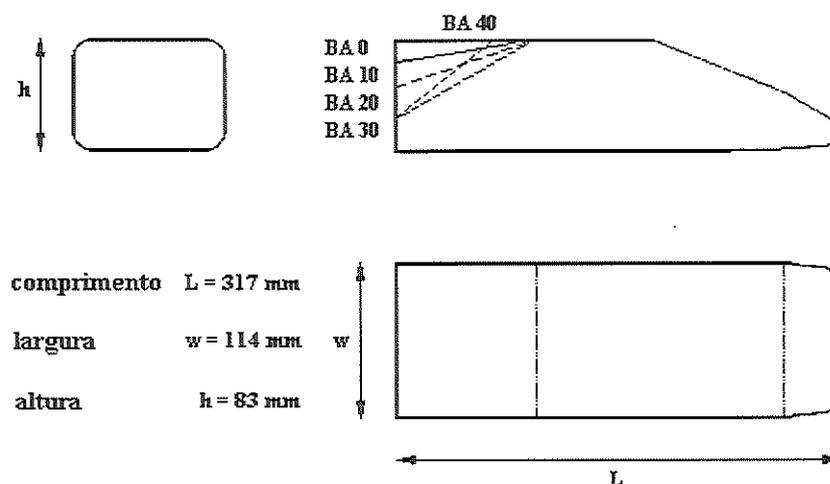


FIGURA 03 – Diferentes formas traseiras do modelo utilizadas nos experimentos (BEARMAN & MULLARKEY, 1995).

Num escoamento turbulento gerado pela presença de uma malha, um conjunto de medidas semelhantes é obtido. Nos casos de escoamento com rajadas transversais senoidais e de escoamento turbulento, funções foram criadas, as quais comparam forças e momentos medidos nestes escoamentos não uniformizados, com valores obtidos dos escoamentos uniformes, assumindo que o escoamento ao redor do veículo se comporta de uma maneira quase uniforme.

BEARMAN & MULLARKEY (1995) afirmaram que de maneira surpreendente, até mesmo para as mais baixas frequências utilizadas na investigação, onde os comprimentos de onda das rajadas senoidais eram iguais a cerca de 20 vezes o comprimento do modelo, as previsões baseadas nos dados obtidos para escoamento uniformizado superestimaram os valores para o escoamento não uniformizado, quando comparados com os valores medidos durante os experimentos para estas condições de escoamento.

Para os modelos testados, as forças e momentos medidos em condições de escoamento uniforme em ângulos de ataque lateral fixados, levariam a valores estimados próximos daqueles obtidos para as forças e momentos em condições de escoamento não uniforme. No entanto, a conclusão geral obtida para a série de formas testadas, é que as forças aerodinâmicas causadas pelas rajadas de ventos apresentam valores menores que aqueles previstos, assumindo-se que o escoamento se apresenta de maneira quase uniforme. Para todos os modelos testados, os coeficientes de força lateral e momento de guinada obtidos do escoamento uniformizado, apresentaram variações aproximadamente lineares com mudanças do ângulo de ataque lateral até 20°.

HOWELL (1996) conduziu uma série de experimentos para investigar as variações ocorridas nas forças aerodinâmicas de arrasto e sustentação, devido às mudanças na forma traseira de um modelo simplificado de veículo. Estas modificações foram efetuadas através da variação do ângulo de inclinação do pára-brisa traseiro, utilizando-se seções superiores da traseira removíveis. Neste trabalho foi avaliada a influência da variação da distância do modelo ao solo, juntamente com configurações de piso móvel e fixo.

Em todas as configurações de ensaio, os menores valores para os coeficientes de arrasto, foram encontrados entre os ângulos de inclinação da superfície superior traseira de 15° até aproximadamente 20°, independente do tipo de simulação do piso. Ainda segundo HOWELL (1996), para todos os ângulos do difusor utilizados, o coeficiente de arrasto diminuiu a medida que a distância do modelo ao solo

aumentou, onde os menores valores foram registrados para uma distância de 100 mm. Ambas as forças de arrasto e sustentação foram fortemente influenciadas pela proximidade do piso.

## **2.7 Configurações de movimento do modelo dentro da câmara de ensaios**

Existem diferentes configurações de movimento de um modelo em testes realizados em túneis de vento. Movimentos que o modelo pode descrever durante os ensaios, permitem a determinação de parâmetros que influenciam nas medidas. GARRY, MACKLIN & Van OPSTAL (1995) demonstraram em seu trabalho que simulações de um veículo terrestre interagindo com rajadas de vento lateral, podem ser realizadas pela utilização de um modelo móvel montado em um trilho, de maneira que o modelo possa atravessar a seção de ensaios de um túnel de vento de circuito aberto convencional, numa direção normal ao escoamento, com variações do ângulo de ataque lateral.

Sobre o carro do modelo foi fixada uma balança aerodinâmica, e nesta foram fixadas placas retangulares e o próprio modelo, de acordo com a FIGURA 04. O isolamento das componentes das cargas aerodinâmicas no modelo, apresentou na prática muitas dificuldades devido às baixas frequências naturais do trilho, suporte do modelo e da balança aerodinâmica.

Neste método foram utilizados três carros que correm sobre trilhos dispostos numa direção perpendicular ao eixo longitudinal do túnel. O carro de partida atuou simplesmente como uma ligação ao sistema de suspensão, e é conectado ao outro carro de propulsão, através de um pino solenoidal operado por controle remoto. Depois de percorrer uma distância de nominalmente 6 metros, o carro de propulsão foi bloqueado e o carro de sustentação do modelo pôde seguir em frente através da seção de ensaios do túnel de vento, antes do sistema de frenagem ser acionado no lado oposto.

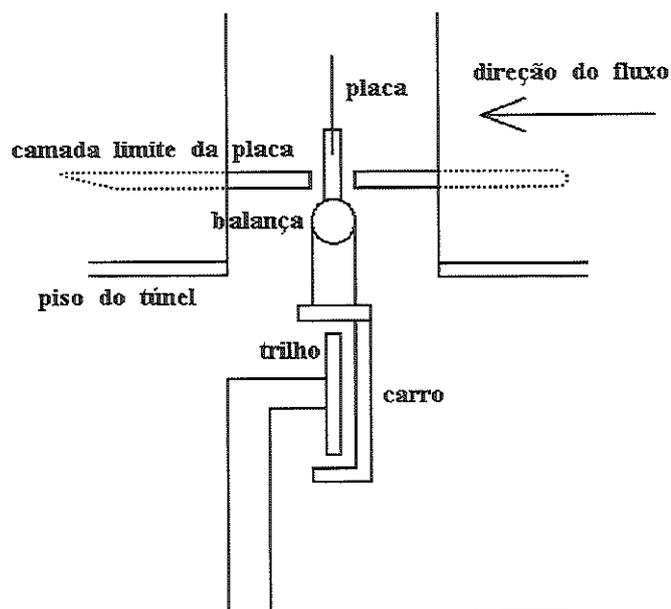


FIGURA 04 – Vista lateral esquemática da seção de testes do túnel de vento, trilho e carro de sustentação do modelo (GARRY, MACKLIN & Van OPSTAL, 1995).

Um modelo de elementos finitos foi usado para identificar as frequências naturais, juntamente com os modos de oscilação, tanto do trilho, quanto da combinação do modelo, suporte e balança aerodinâmica. Os resultados de uma curta série de testes em placas retangulares finas e planas, com variações na razão entre comprimento e espessura, em simulações de ângulo de ataque lateral variando de  $5^\circ$  a  $45^\circ$ , foram obtidos de ensaios estáticos e dinâmicos.

Como previsto por GARRY, MACKLIN & Van OPSTAL (1995), as forças laterais para os ensaios dinâmicos se correlacionaram bem com os dados obtidos nos ensaios estáticos, em ângulos de ataque lateral abaixo de uma descontinuidade associada com o "stall" do campo de escoamento sobre a placa. Depois deste ponto as forças laterais dos ensaios dinâmicos continuaram a aumentar até o maior ângulo de ataque lateral dos testes, igual a  $45^\circ$ . Os resultados preliminares apresentados no trabalho sugeriram que análises de campos de escoamento associados à simples placas planas com razão entre comprimento e espessura variável, e em altos ângulos de ataque lateral, podem resultar numa melhor compreensão do comportamento

transiente dos campos de escoamento ao redor de corpos rombudos e de alguns carros de passageiros.

## **2.8 Testes aerodinâmicos de modelos em movimento sob rajadas de ventos laterais**

KENJI & TOSHIHIKO (1997) efetuaram simulações aerodinâmicas transientes utilizando uma grade móvel que possibilitou variar a turbulência, para estudar as variações do escoamento em ensaios de túnel de vento. Um método numérico foi desenvolvido para prever as características aerodinâmicas transientes de um automóvel. O método utilizou um modelo de turbulência e um sistema de terceira ordem nas rajadas de ventos laterais incidentes sobre a superfície do veículo.

Os cálculos da variação do momento de guinada mostraram boa concordância com os resultados experimentais. Os ensaios envolveram simulações de um automóvel passando por outro, com o conjunto de dados experimentais sendo analisado através de comparações com os resultados simulados, e assim as características aerodinâmicas transientes dos dois automóveis foram analisadas.

HUMPHREYS & BAKER (1993) mostraram em seu trabalho forças e momentos totais medidos em testes estáticos e com movimento, num modelo de veículo. Ao considerar os resultados para os valores máximos das forças aerodinâmicas, este trabalho se concentrou em uma análise mais rigorosa do conjunto de dados resultantes do movimento do modelo, com particular referência à questão do relevante período de tempo da rajada sobre o modelo e o nível de ruído mecânico presente nos resultados analisados do movimento do modelo.

Os testes foram realizados com a configuração do modelo estático e em movimento, sendo que nesta última configuração o modelo foi deslocado através da seção de ensaios do túnel de vento, modificando-se o ângulo de incidência do

escoamento através de mudanças da posição do modelo em relação ao túnel, registrando-se o período e a intensidade das rajadas de vento lateral.

HUMPHREYS & BAKER (1993) afirmaram que os parâmetros das forças máximas normalizadas parecem ser independentes da escala de tempo padrão para ambos os testes estático e móvel. Para ângulos de ataque lateral acima de cerca de 30° os parâmetros das forças máximas normalizadas adquirem o valor unitário, implicando num comportamento quase permanente para as instabilidades induzidas sobre o modelo. Os coeficientes de força lateral mostraram tendências semelhantes com a variação do ângulo de ataque lateral, como em testes realizados em baixa turbulência e em curta escala de duração da turbulência simulada, que estavam presentes nos experimentos com escoamento uniforme.

A invariância dos parâmetros de força máxima normalizada com o tempo de escala padrão, implicou que é possível calcular os valores das forças máximas em escala real, baseado nestes parâmetros e o conhecimento das velocidades máximas do vento em escala real.

## 2.9 Posicionamento do trabalho desenvolvido

No presente trabalho desenvolvido, foi realizado um estudo experimental dos efeitos da variação da direção do escoamento incidente sobre a superfície de um modelo em escala 1:5, nos coeficientes aerodinâmicos de força lateral e de arrasto. Os ensaios experimentais utilizando o modelo, foram conduzidos com uma configuração de piso plano fixo, acima do piso do túnel de vento.

As medidas foram feitas através de uma balança aerodinâmica. Os ensaios foram realizados com uma configuração de modelo padrão "MIRA", para cada ângulo de ataque lateral  $\beta$ , correspondente a variação de posição dentro da câmara de ensaios. Neste método de testes o modelo foi sujeito ao movimento de guinada em torno do eixo  $z$ , perpendicular ao plano do piso do túnel de vento, em relação ao

sistema de coordenadas localizado no seu centro de gravidade. O modelo desenvolveu um deslocamento angular, gerando um ângulo de ataque lateral  $\beta$  que variou de  $0^\circ$  a  $20^\circ$ . Um pequeno deslocamento angular em torno do eixo  $y$ , numa variação de  $-5^\circ$  a  $5^\circ$  no ângulo de ataque  $\alpha$ , foi transferido ao modelo num movimento de arfagem.

Os ângulos resultantes do escorregamento dos pneus conduzem a uma divergência da direção necessária para uma determinada trajetória de viagem, a qual deve ser compensada pelo motorista através da direção. Os movimentos da suspensão dos automóveis, tornam essencial uma análise da atuação destas forças aerodinâmicas, no desenvolvimento de veículos com características de estabilidade melhores, para se fornecer mais segurança e conforto aos passageiros.

Devido as características de movimento da suspensão dos automóveis, existe a ocorrência de um deslocamento para cima e para baixo da parte dianteira e traseira do veículo e, quando combinado com as mudanças da direção do escoamento, afetam as características de dirigibilidade, e conseqüentemente diminuem as condições de segurança do veículo. Os ensaios experimentais foram realizados num túnel de vento, e os dados obtidos comparados com outros resultados encontrados em trabalhos desenvolvidos por diversos autores, instituições de pesquisas e indústrias automobilísticas.

Neste trabalho as variações dos coeficientes das forças aerodinâmicas são avaliadas, e através dos resultados obtidos seria possível detectar em quais condições um automóvel teria um comportamento instável, determinando-se o coeficiente de momento de guinada e, como tais fontes de instabilidade podem ser eliminadas com alterações do projeto do veículo. Através dos métodos experimentais de visualização é possível analisar a direção do escoamento na superfície do modelo, com os descolamentos da camada limite, e a formação dos vórtices laterais.

## 3 REVISÃO TEÓRICA

### 3.1 Mecanismo do escoamento de ar ao redor de um veículo

O escoamento de ar sobre a superfície de um veículo é determinado pelo relacionamento entre sua velocidade e pressão, expresso nas equações de Bernoulli. Esta relação é deduzida pela aplicação da Segunda Lei de Newton à um incremento de volume de um fluido, dentro das condições do escoamento potencial, ou seja, escoamento invíscido e irrotacional. Da equação de Bernoulli, a soma da pressão estática mais a dinâmica é uma constante conforme o escoamento de ar se aproxima do veículo, é igual a pressão total segundo a equação 01:

$$P_s + P_D = P_T \quad (01)$$

$$P_s + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 = P_T \quad (02)$$

Considerando o veículo como estacionário e o ar movendo-se sobre este, como em um túnel de vento, visualizamos o ar escoando ao longo de linhas, as quais denominamos linhas de escoamento, e ao conjunto destas temos uma corrente de escoamento. Existem vários métodos de visualização destas linhas de escoamento, como fumaças de substâncias viscosas, tal como a glicerina ou até mesmo pó de material fosforescente.

A uma certa distância do veículo a pressão estática é igual a pressão ambiente ou barométrica. A pressão dinâmica é produzida pela velocidade relativa, a qual é

constante em todas as linhas de escoamento aproximando-se do veículo. Conforme o escoamento se aproxima do veículo, as correntes de escoamento se dividem, com alguns indo por cima do veículo e outros por baixo. Uma das linhas de escoamento deve ir direto para o volume do veículo sem sofrer desvio, e no ponto onde esta linha se choca, ponto de estagnação, a velocidade relativa do escoamento de ar é zero, com um registro de pressão local dado pela pressão total.

De acordo com SCHENKEL (1977) as linhas de escoamento escoando sobre o capô do automóvel, curvam-se em direção para cima diante da superfície que contém os faróis dianteiros e grade de tomada de ar, apresentando curvatura côncava para cima. A fim de que as correntes de ar sejam curvadas para cima nesta região, a pressão estática deve ser mais alta que a ambiente, proporcionando assim a força necessária para curvar o escoamento de ar para cima.

Se a pressão estática é mais alta, então a velocidade deve diminuir nesta região obedecendo a equação de Bernoulli. A medida que o escoamento se curva para seguir o capô, com uma curvatura para baixo na extremidade deste, a pressão deve diminuir a um valor abaixo da pressão ambiente para deslocar o escoamento de ar, e assim a velocidade deve aumentar. Estes pontos são ilustrados na FIGURA 05, demonstrando o escoamento sobre um cilindro.

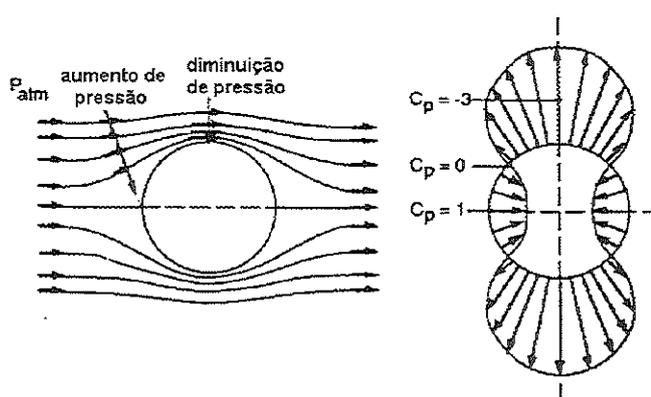


FIGURA 05 – Gradiente de pressão e velocidade no escoamento sobre um corpo.

A análise teórica da resistência do ar ao deslocamento dos veículos de estrada ainda não possui definições teóricas precisas. Predição teórica não é contudo

possível, mas somos capazes de fazer uma avaliação quantitativa do arrasto a partir dos dados experimentais existentes. Além disso, alguma predição quantitativa é essencial se a redução do arrasto se tornar uma parte indispensável no desenvolvimento de um veículo. É fácil ver por que a predição do arrasto é extremamente difícil quando a forma complexa do carro é comparada com corpos rombudos padrões como na FIGURA 06.

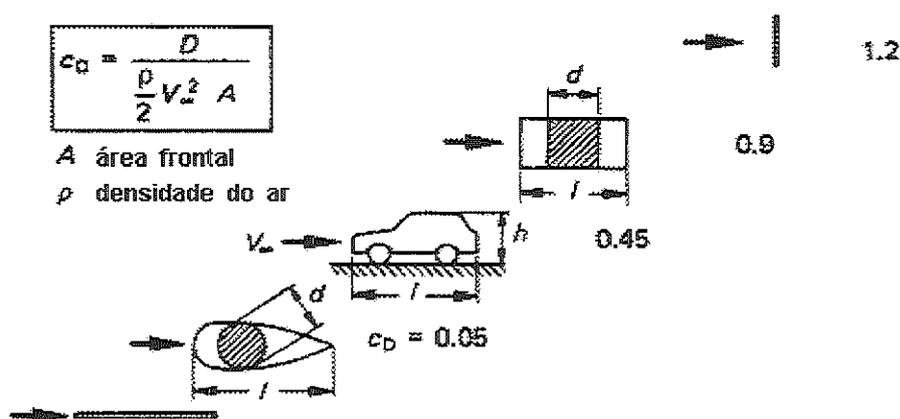


FIGURA 06 – Comparação do arrasto em veículos e outros corpos de áreas frontais íngremes (HUCHO, 1987).

Conforme FIGURA 06, o arrasto de um corpo de revolução,  $C_D = 0.05$ , consiste principalmente em arrasto por fricção. O caso extremo de arrasto por fricção seria o caso de uma placa plana em um escoamento paralelo. A viscosidade do ar só é significativa dentro da zona estreita adjacente à superfície, chamada de camada limite. Segundo SCHLICHTING (1968), a espessura desta camada, a tensão de cisalhamento na superfície, e o ponto de separação podem ser calculados a partir de leis de tensões superficiais determinadas experimentalmente, tendo-se calculado primeiro a velocidade do escoamento externo livre de fricção. Deste modo é possível aperfeiçoar a forma do corpo.

A forma para mínimo arrasto pode ser calculada para um corpo com determinada relação de espessura e volume, sendo que a teoria pode ser usada para transferir os resultados dos modelos em escala para corpos de tamanho real. Porém, a precisão desta predição diminui conforme a espessura do corpo diminui,

principalmente por causa da incerteza em se prever o ponto de separação e a pressão dentro da esteira.

O arrasto de uma caixa retangular com ar que flui ao longo de seu eixo longitudinal,  $C_D = 0.9$ , é quase completamente arrasto de pressão, e a mais pura forma na qual ocorre, é com uma placa plana perpendicular ao escoamento incidente. Até mesmo neste caso simples, devido o ponto de separação ser determinado pelas extremidades afinadas, o arrasto de pressão não pode ser calculado para a esteira turbulenta. A interação do campo de escoamento turbulento, em qual efeitos viscosos predominam, e o escoamento exterior não viscoso é muito mais forte que no caso da camada limite.

De acordo com TANNER (1967), um modelo de confiança para a esteira turbulenta pode ainda trazer resultados que só aparentemente se traduzem em algumas conclusões esperadas, no entanto, não demonstram o que realmente está ocorrendo no campo de escoamento. Cálculos iterativos do escoamento exterior não viscoso e o escoamento em regiões onde a viscosidade predomina portanto ainda não é possível. Segundo HUCHO (1987), um cálculo preciso é possível usando as equações de Navier-Stokes onde o escoamento é laminar, mas a validade geral desta lei não é praticável para escoamento turbulento.

Considerando resultados para modelos individuais, estes deveriam ser tratados com precaução e não deveriam ser usados para uma avaliação do arrasto de veículos superficialmente semelhantes. Na ausência de atrito, o ar tenderia a escoar por cima do teto seguindo para baixo na traseira do carro, trocando pressão por velocidade como ocorre na frente deste. Neste caso, as forças resultantes da pressão na traseira do veículo seriam equilibradas por aquelas na frente, e não haveria a produção do arrasto. Este é devido em parte ao atrito do ar na superfície do veículo, e em parte ao desvio da trajetória para baixo do escoamento principal na traseira deste.

Apesar de seu comparativamente baixo arrasto, o carro de passageiros está mais próximo de uma caixa retangular, que de um corpo de revolução. Entretanto

com progressos de refinamentos aerodinâmicos, os veículos se aproximam do corpo de revolução. O escoamento ao redor do corpo de um carro é caracterizado pela separação, FIGURA 07, e seu arrasto é principalmente devido ao arrasto de pressão.



FIGURA 07 – Linhas de corrente, seção média de um VW Golf I (HUCHO, 1987).

Tentativas para relacionar arrasto com características de forma elementares tem resultado em fracasso. O número de parâmetros que descrevem a geometria de um carro é muito grande e a interação dos campos de escoamento individuais muito complexo; sendo assim, vamos tratar então principalmente de dados qualitativos.

### **3.2 Campo de escoamento e sistema de vórtices ao redor de um veículo**

O comportamento real do escoamento através do veículo é explicado pela atuação da camada limite sobre este. Longe do corpo, todo ar está escoando à uma velocidade uniforme, e ao passar através da superfície do corpo, o ar que interage com a sua superfície terá sua velocidade diminuída até zero devido ao atrito. SCHLICHTING (1968) afirma que o perfil de velocidade desenvolvido próximo a superfície até a fronteira da camada limite, assumirá um valor menor que aquele do escoamento principal.

Esta região de redução de velocidade é denominada de camada limite, a qual inicia-se com uma espessura zero, e cresce com uma distância ao longo do corpo.

Inicialmente, a camada limite é constituída de um escoamento laminar, passando por uma região de transição, para então entrar em escoamento turbulento. Considere o escoamento se aproximando de um corpo com extremidade pontiaguda, conforme mostrado na FIGURA 08.

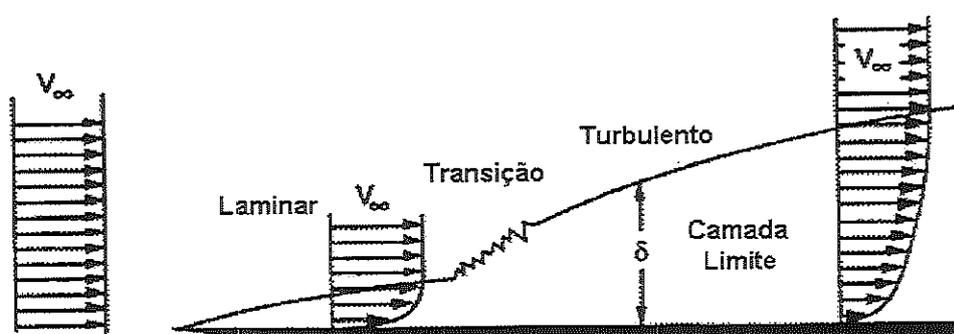


FIGURA 08 – Desenvolvimento da camada limite ao longo de uma placa plana.

Na face da frente do automóvel, a camada limite inicia-se em um ponto onde as linhas de corrente se estagnam ao chocar-se com a sua superfície. Dentro da camada limite a velocidade é reduzida devido ao atrito, e a pressão no ponto de estagnação é a pressão total, diminuindo para trás ao longo da superfície. Deste modo o gradiente de pressão ao longo desta atua para empurrar o ar através da camada limite, o crescimento da camada é impedido. A pressão diminuindo na direção do escoamento é conhecida como gradiente de pressão favorável, devido ao fato da atuação deste gradiente inibir o crescimento da camada limite.

Com o escoamento curvando-se novamente para seguir o corpo, a pressão cresce como anteriormente. Este aumento de pressão atua para desacelerar o escoamento na camada limite, o que causa um crescimento em sua espessura. Desta maneira é produzido o gradiente de pressão adverso. Em algum ponto o escoamento próximo à superfície pode ser revertido pela ação da pressão conforme FIGURA 09. O ponto onde o escoamento para é conhecido como ponto de separação, onde a corrente principal não estará mais ligada ao corpo, sendo capaz de livrar-se e continuar num movimento em uma linha aproximadamente reta, e neste movimento

tenta carregar o ar para a região atrás do corpo, com a pressão nesta região caindo para abaixo da ambiente.

Vórtices se formam e o escoamento torna-se muito instável nesta região, com uma trilha de Vórtices de Von-Karman formada, criando vórtices periodicamente, e interpretado como uma vibração oscilatória aerodinâmica. O fenômeno de separação impede que o escoamento prossiga para baixo na parte traseira do carro. A pressão na região de separação está abaixo daquela imposta na frente do veículo, e a diferença nesta pressão total é responsável pelo arrasto no automóvel.

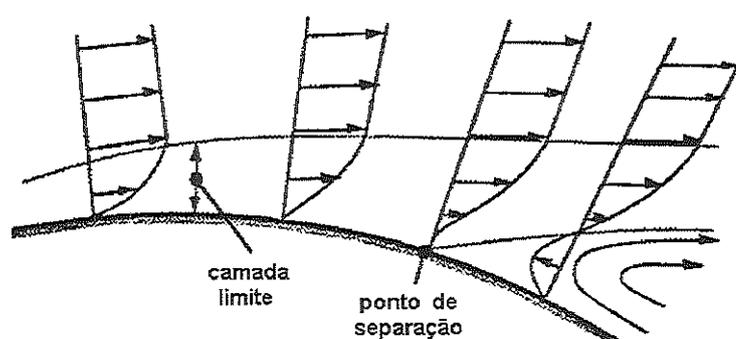


FIGURA 09 – Separação do escoamento numa superfície, e o gradiente de pressão adverso.

As forças de arrasto resultantes da ação da fricção viscosa na camada limite da superfície do veículo é o arrasto de atrito. A ação do vórtice sobre um cilindro é apresentado na FIGURA 10, e o escoamento real sobre o mesmo, sem a hipótese de potencialidade, é mostrada abaixo na FIGURA 09.

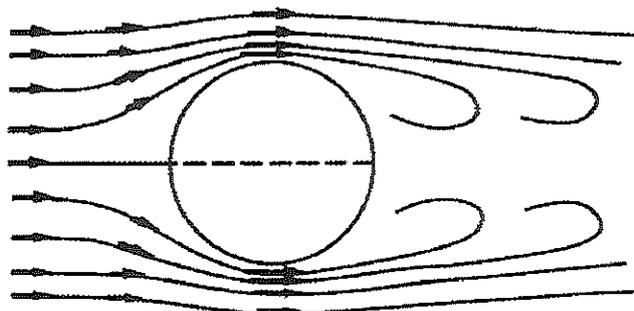


FIGURA 10 – Formação de vórtice num escoamento sobre o corpo de um cilindro.

Como uma regra, o escoamento ao redor de um veículo em movimento é assimétrico. A velocidade do escoamento  $V_\infty$  é o resultado da velocidade do veículo  $V_F$  e a velocidade  $V_S$  do vento natural que forma um ângulo de ataque lateral  $\beta$  relativo à direção de movimento do veículo; veja FIGURA 11. Por motivo de simplicidade, primeiramente o escoamento é considerado simétrico; a influência do vento lateral no arrasto é discutido mais adiante. O campo de escoamento assimétrico é descrito em detalhes no contexto da estabilidade direcional.

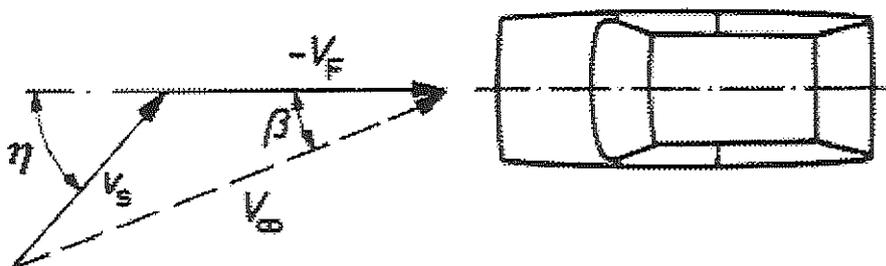


FIGURA 11 – Diagramas de vetores das direções da velocidade  $V$  do veículo e velocidade  $V_S$  do vento natural.

O campo de escoamento ao redor de um veículo não é contudo completamente compreendido, assim um quadro deve ser construído das medidas de distribuição de pressão, medidas do campo de velocidade e observações do escoamento na superfície do veículo. O campo de escoamento para um carro de passageiro derivado de tais informações é ilustrado nas FIGURAS 12 e 13, sendo caracterizado por numerosas separações, veja FIGURAS 34 e 35, para os dois tipos de separação.

Onde as linhas de escoamento são ilustradas em vários pontos nas FIGURAS 12 e 13, ou onde as áreas de separação são pontilhadas, a separação tem um caráter quase bidimensional. Neste caso a linha de separação tende a correr perpendicular à direção do escoamento local. Se um recolamento ocorrer, as denominadas bolhas de separação são formadas. Claro que o escoamento dentro da bolha, o qual é originado de um corpo tridimensional, em natureza é também tridimensional. Porém, desde que

a própria separação é principalmente bidimensional com a linha de separação normal ao escoamento e os eixos dos vórtices paralelos a linha de separação, o escoamento é designado quase bidimensional.

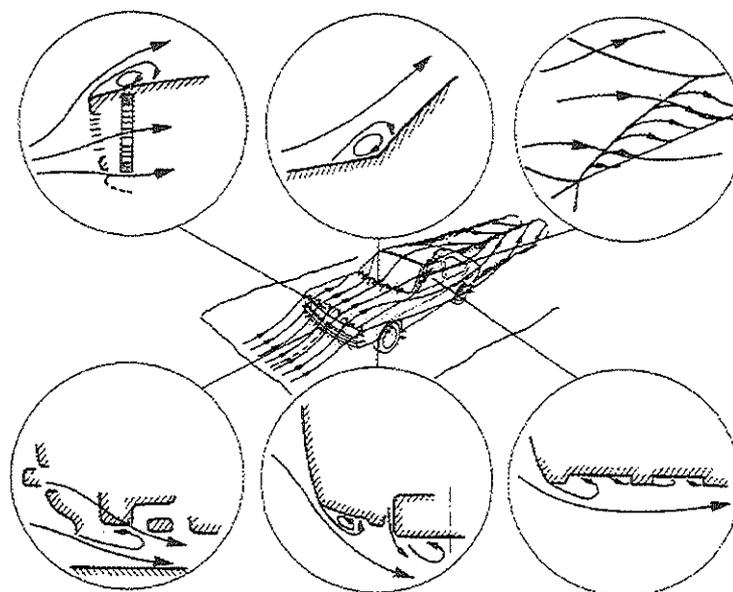


FIGURA 12 – Escoamento ao redor de um veículo, detalhes na extremidade dianteira e outras regiões com entalhes (HUCHO, 1987).

Este tipo de escoamento pode ocorrer no bordo de ataque da capô dianteiro, ao lado dos pára-lamas, na extremidade frontal do teto e no “spoiler” dianteiro, e possivelmente no entalhe de um “notchback”. Esteiras também se formam na traseira rombuda um “squareback”. Dependendo do campo de escoamento exterior, esteiras longas são formadas, as quais se estendem para longe a jusante, ou as esteiras são pequenas e fechadas, veja FIGURA 14.

Embora o escoamento nestas bolhas de separação sejam instáveis, em seu tempo médio se identifica uma macro estrutura na qual as bolhas de separação contêm circulação, e os eixos dos vórtices correm principalmente numa direção perpendicular ao escoamento não perturbado e paralelo à linha de separação. Pouco é conhecido de como estes vórtices se duplicam indo para trás na forma de uma ferradura na direção do escoamento principal nas extremidades laterais de separação das bolhas e como eles interferem com o escoamento exterior. Estes vórtices que

rotacionam transversalmente ao escoamento principal incidente, segundo AHMED & BAUMERT (1979), são visíveis dentro da esteira na extremidade traseira, e o curso deles como um par de vórtices seguindo a jusante

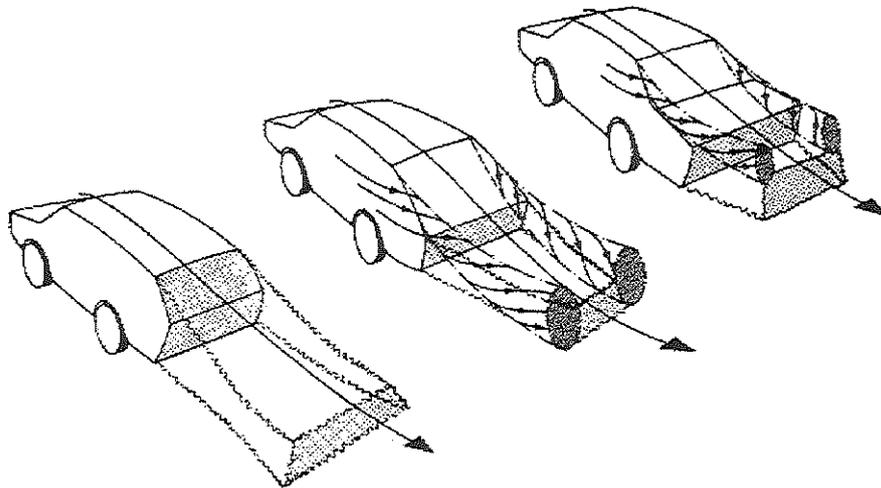


FIGURA 13 – Padrões de escoamento para diferentes configurações da parte traseira de um veículo (HUCHO, 1987).

O segundo tipo de separação é tridimensional em natureza. Ele é mostrado nas FIGURAS 12 e 13, com linhas tracejadas e a formação das áreas sombreadas. São formadas trilhas de vórtices nas extremidades afinadas onde o escoamento é oblíquo, como o que ocorre em uma asa delta. Tais pares de vórtices se formam nas duas colunas dianteiras do teto e retorna curvado para o teto na extremidade superior da coluna. Seu efeito no escoamento do final da traseira ainda não é totalmente conhecido.

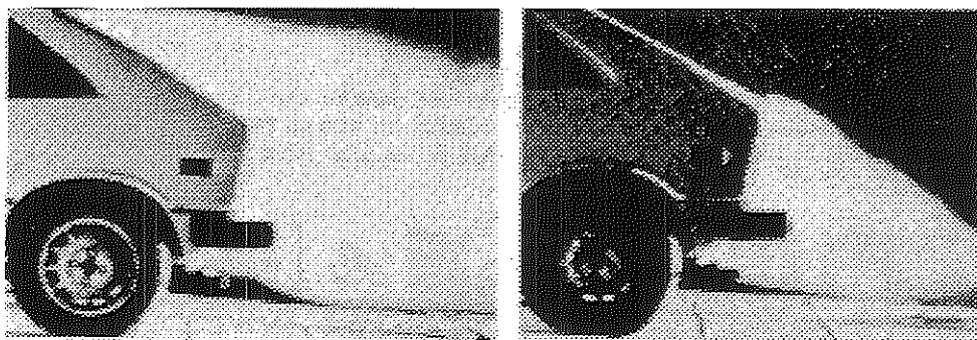


FIGURA 14 – Esteira larga, longa, aberta de um “squareback” e esteira pequena, curta, fechada de um “fastback” (SOVRAN et al., 1978).

Um par de vórtices fortes se formam na traseira do veículo, dependendo da inclinação do final da traseira, FIGURA 13. Estes vórtices traseiros interagem com o campo de escoamento externo e com a esteira de características bidimensionais e são semelhantes aos vórtices de ponta de uma asa de baixo alongamento. De acordo com HUMMEL (1978), estes vórtices induzem um campo de escoamento descendente no espaço entre seus eixos, os quais determinam a posição da linha de separação para a esteira. Este mecanismo é mostrado na FIGURA 14. Um par de vórtices fortes está presente na parte direita da FIGURA 14.

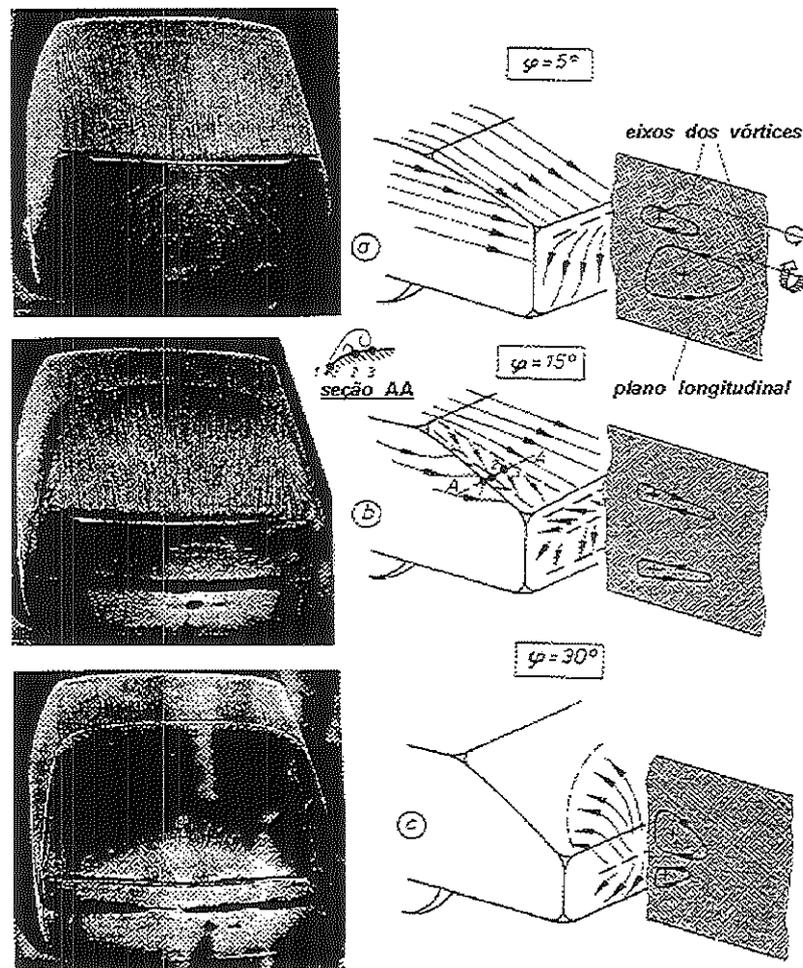


FIGURA 15 – Configurações do escoamento na parte traseira de um veículo em diferentes inclinações (AHMED, 1984).

Sua formação é prevenida artificialmente na parte esquerda da FIGURA 14. Num primeiro instante o campo de escoamento descendente induzido pelo par de

vórtices produz um efeito onde a linha de separação é bastante baixa e uma esteira curta é formada. Num segundo instante o escoamento separa-se na extremidade superior do teto; a esteira agora é longa. AHMED (1984) afirma que a interação do par de vórtices da coluna traseira do teto, vórtices de ponta, e o sistema de vórtices da separação com bolhas do escoamento de características bidimensionais, deve ser examinado em testes aerodinâmicos. A FIGURA 15 mostra o escoamento na traseira de um veículo para três ângulos de inclinação  $\varphi$  do final da traseira.

No caso (a)  $\varphi = 5^\circ$ . Este é um “squareback” e o escoamento corresponde ao mostrado na FIGURA 15. O vórtice mais forte, na posição mais abaixo, que gira no sentido anti-horário na redondeza do veículo, gera um campo de escoamento ascendente com seu vórtice de ferradura em desenvolvimento. Isto também pode ser visto no diagrama de vetor na FIGURA 15.

Para um ângulo de inclinação do final da traseira maior,  $\varphi = 15^\circ$ , FIGURA 15 (b), se desenvolve o par de vórtice das colunas traseiras do teto. Isto induz um campo de escoamento descendente, que força o escoamento externo para baixo na área do final da traseira e mantém o escoamento colado. Para  $\varphi = 30^\circ$ , FIGURA 15 (c), os vórtices das colunas traseiras do teto são muito acentuados; entretanto, o escoamento separa-se antes da inclinação da extremidade traseira.

Para ângulos de inclinação  $\varphi > 30^\circ$  o escoamento separa-se na extremidade superior do teto, não são formados vórtices nas colunas traseiras do teto e um regime de escoamento de veículos tipo “squareback” está novamente presente. Entre  $10^\circ < \varphi < 15^\circ$  o efeito do campo de escoamento descendente que induz o par de vórtices das colunas traseiras do teto e o do campo de escoamento ascendente que induzem vórtices com bolhas na separação contrariam um ao outro.

O arrasto tem um valor mínimo para este intervalo de ângulos. Para  $\varphi = 30^\circ$  o arrasto está num valor máximo. Os vórtices das colunas traseiras do teto são tão fortes que o escoamento permanece colado para quase todas as inclinações da parte de trás, apesar do grande ângulo  $\varphi$  de inclinação.

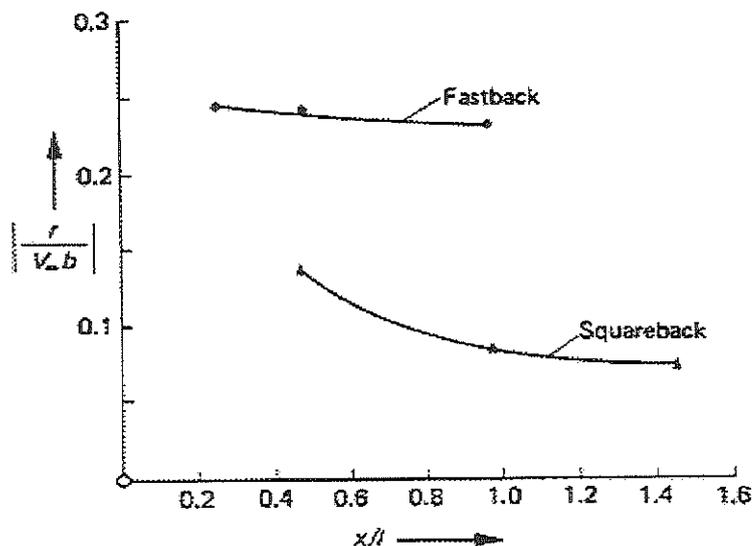


FIGURA 16 – Diminuição da intensidade de circulação na trilha de vórtices para um “squareback” e “fastback” (AHMED et al., 1979).

O campo de escoamento é bastante instável para  $\varphi = 30^\circ$ . A linha de separação mudou sua posição da extremidade superior da inclinação para uma posição mais abaixo, ao acaso, movendo-se para cima e para baixo várias vezes durante o tempo que leva para atravessar o plano  $yz$ . Conforme a FIGURA 16 mostra, a intensidade dos vórtice  $\Gamma$  é significativamente mais alta em um “fastback” que num “notchback”, e o declínio da intensidade dos vórtices atrás do veículo é menos acentuada.

Dos detalhes elaborados acima, pode ser deduzido o padrão de vórtices esboçado na FIGURA 17. Em princípio há três diferentes sistemas de vórtices. Vórtices C emanam das colunas traseiras do teto e têm características de escoamento potencial. Com a exceção de um núcleo de área viscoso comparativamente pequeno, sua velocidade circunferencial aumenta com a diminuição do raio, medido do centro do vórtice. A intensidade  $\Gamma$  destes vórtices das colunas traseiras do teto aumenta com a inclinação do ângulo  $\varphi$ ; conforme na FIGURA 17, esboço inferior.

Se a inclinação do ângulo  $\varphi$  excede  $30^\circ$ , estes vórtices estouram e o padrão de escoamento muda para um regime de escoamento de um veículo “squareback”.

Vórtices A e vórtices B são gerados de uma maneira que possuem características bidimensionais nas extremidades A e B respectivamente. Eles são do tipo viscoso e sua vorticidade é baixa.

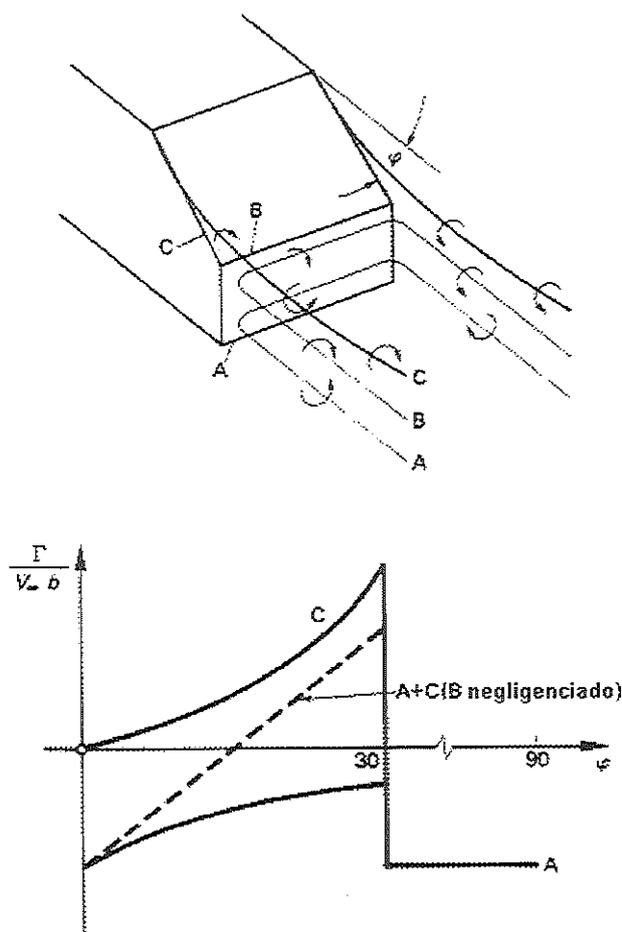


FIGURA 17 – Sistemas de vórtices para uma inclinação da parte traseira do veículo (HUCHO, 1987).

Eles estão inclinados na parte traseira como mostrado. De acordo com AHMED et al. (1984), estes vórtices ou são dissipados (na FIGURA 16 a curva mais baixa) ou de alguma maneira fundem-se aos vórtices das colunas traseiras do teto. Uma ilustração destes sistemas de vórtices pode ser visto na FIGURA 18.

Nos regimes de escoamento com alto arrasto para  $\phi = 30^\circ$ , FIGURA 18 (b), um quarto vórtice é gerado para esta inclinação. O escoamento ao longo do lado inferior

do veículo é particularmente obscuro e sugere uma comparação com aquele de uma placa muito áspera ou com o escoamento em um canal estreito com uma parede muito áspera. A forma do campo de escoamento nas cavidades das rodas e ao redor das rodas rotacionando também é pouco conhecido ainda, apesar dos desenvolvimentos obtidos na aerodinâmica de automóveis.

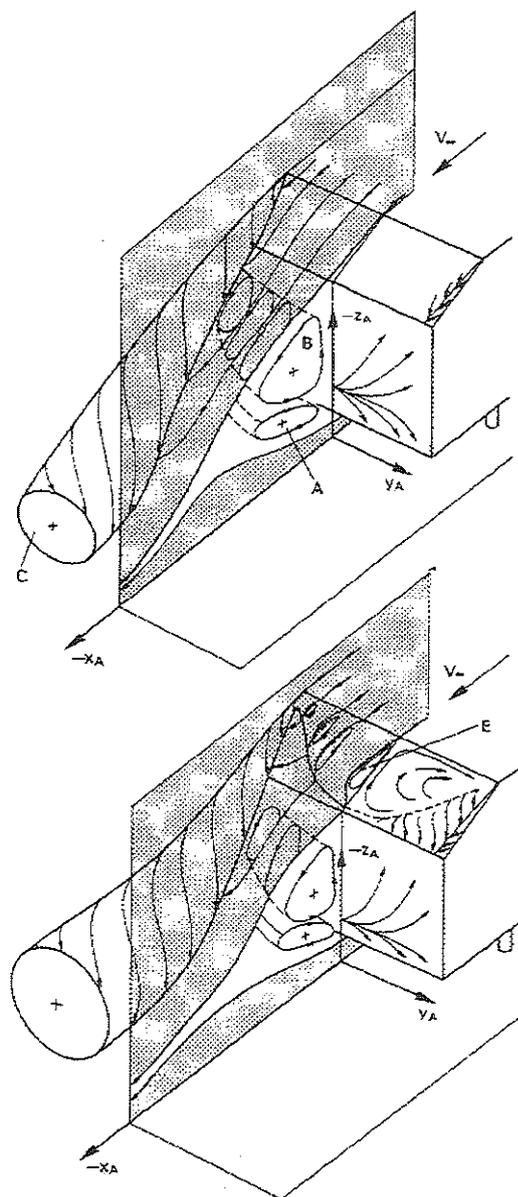


FIGURA 18 – Sistemas de vórtices na traseira de um veículo numa determinada inclinação (AHMED et al., 1984): (a) regime de escoamento com baixo arrasto; (b) regime de escoamento com alto arrasto,  $\phi = 30^\circ$ .

### 3.3 Fundamentos das forças e momentos aerodinâmicos

A resistência aerodinâmica em um automóvel viajando numa auto estrada envolve uma complexa interação do corpo, o ar, e o solo. De acordo com ANDERSON (1991), nestes e em todos os outros casos, as forças e momentos aerodinâmicos no corpo são devidos a apenas duas fontes básicas:

- 1) distribuição de pressão sobre a superfície do corpo e
- 2) distribuição de tensão de cisalhamento sobre a superfície do corpo.

Não importa o quanto complexa a forma do corpo possa ser, as forças e momentos aerodinâmicos no corpo são completamente devido às duas fontes básicas citadas acima. A única natureza destes mecanismos é comunicar uma força à um corpo que se move por um fluido, devido ao surgimento das distribuições de pressão e tensão de cisalhamento no corpo. A pressão  $p$  e a tensão de cisalhamento  $\tau$  têm dimensão de força por unidade de área. Como mostrado na FIGURA 19,  $p$  atua normal à superfície, e  $\tau$  atua tangencialmente à superfície.

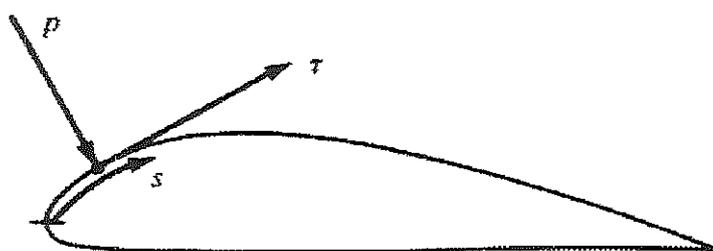


FIGURA 19 – Ilustração da pressão e tensão de cisalhamento em uma superfície.

O efeito principal da distribuição de pressão  $p$  e da tensão de cisalhamento  $\tau$  integradas sobre a superfície completa do corpo é uma força aerodinâmica resultante  $R$  e um momento  $M$  no corpo como mostrado na FIGURA 20. Por sua vez, a resultante  $R$  pode ser dividida em componentes, dois conjuntos dos quais são

mostrados na FIGURA 21. Na FIGURA 20  $V_\infty$  é o vento relativo, definido como a velocidade do escoamento numa região distante à frente do corpo. O escoamento distante do corpo é chamado de escoamento livre, e portanto  $V_\infty$  é também chamado de velocidade do fluxo livre.

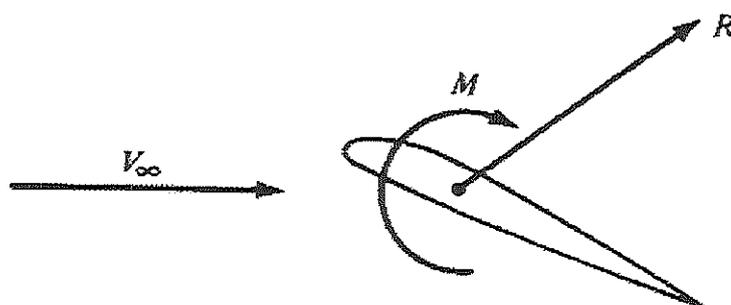


FIGURA 20 – Força e momento aerodinâmico resultante em um aerofólio genérico.

Este tipo de arrasto é formalmente definido como a força correspondente a taxa de diminuição da quantidade de movimento, numa direção paralela ao escoamento não perturbado, do escoamento externo ao redor do corpo.

$L \equiv$  sustentação  $\equiv$  componente de  $R$  perpendicular a direção de  $V_\infty$

$D \equiv$  arrasto  $\equiv$  componente de  $R$  paralela a direção de  $V_\infty$

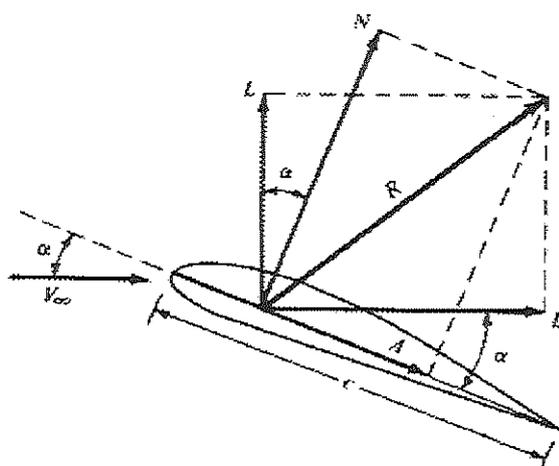


FIGURA 21 – Força aerodinâmica resultante e as componentes nas quais se divide (ANDERSON, 1991).

A corda  $c$  é a distância linear do bordo de ataque até ao bordo de fuga do corpo. As vezes,  $R$  é dividida em componentes perpendicular e paralela à corda, como também mostrado na FIGURA 21.

$N \equiv$  força normal  $\equiv$  componente de  $R$  perpendicular a corda  $c$

$A \equiv$  força axial  $\equiv$  componente de  $R$  paralela a corda  $c$

O ângulo de ataque  $\alpha$  é definido como o ângulo entre a corda  $c$  e  $V_\infty$ . Conseqüentemente,  $\alpha$  é também o ângulo entre  $L$  e  $N$ , e entre  $D$  e  $A$ . A relação geométrica entre estes dois conjuntos de componentes é, segundo a FIGURA 21:

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (03)$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (04)$$

Considere o corpo bidimensional mostrado na FIGURA 22. A linha de corda é desenhada horizontalmente, e portanto o vento relativo é inclinado em relação a horizontal pelo ângulo de ataque  $\alpha$ . Um sistema de coordenadas  $xy$  está orientado paralelo e perpendicular, respectivamente, à corda.

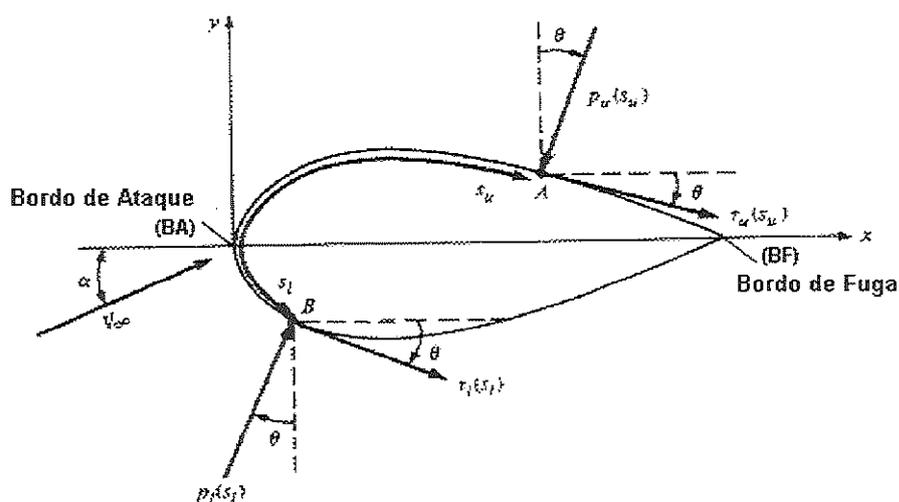


FIGURA 22 – Nomenclatura para a integração da distribuição de pressão e tensão de cisalhamento sobre a superfície de um corpo bidimensional (ANDERSON, 1991).

A distância da borda de ataque medida ao longo da superfície do corpo até um ponto arbitrário  $A$  na superfície superior é  $s_u$ ; similarmente, a distância até um ponto arbitrário  $B$  na superfície inferior é  $s_l$ . A pressão e tensão de cisalhamento na superfície superior são denotadas por  $p_u$  e  $\tau_u$ , respectivamente; e ambos  $p_u$  e  $\tau_u$  são funções de  $s_u$ .

Similarmente,  $p_l$  e  $\tau_l$  são as quantidades correspondentes na superfície inferior e são funções de  $s_l$ . Para um dado ponto, a pressão é normal à superfície e orientada por um ângulo  $\theta$  em relação a perpendicular; tensão de cisalhamento é tangencial à superfície e orientada pelo mesmo ângulo  $\theta$  em relação a horizontal. Na FIGURA 22, a convenção de sinal para  $\theta$  é positiva quando medida no sentido horário da linha vertical para a direção de  $p$  e da linha horizontal para direção de  $\tau$ . Na FIGURA 22, todos os ângulos  $\theta$  são mostrados em suas direções positivas.

Agora considere a forma bidimensional da FIGURA 23 como uma seção transversal de um aerofólio infinitamente longo de seção uniforme. Um comprimento unitário de um cilindro qualquer é mostrado na FIGURA 23. Considere um elemento superficial de área  $dS$  deste cilindro, onde  $dS = (ds)(1)$  como mostrado pela área sombreada na FIGURA 23.

Assim temos as contribuições para a força normal total  $N'$  e a força axial total  $A'$  devidas a pressão e tensão de cisalhamento no elemento de área  $dS$ . Os caracteres ' de  $N'$  e  $A'$  denotam força por unidade de comprimento. Examinando ambas as FIGURAS 22 e 23, vemos que as forças diferenciais normal e axial atuando no elemento de superfície  $dS$  são as seguintes :

Acima da superfície do corpo :

$$dN'_u = -p_u ds_u \cos \theta - \tau_u ds_u \sin \theta \quad (05)$$

$$dA'_u = -p_u ds_u \sin \theta + \tau_u ds_u \cos \theta \quad (06)$$

Abaixo da superfície do corpo :

$$dN'_l = p_l ds_l \cos \theta - \tau_l ds_l \sin \theta \quad (07)$$

$$dA'_l = p_l ds_l \sin \theta + \tau_l ds_l \cos \theta \quad (08)$$

Nas equações 05 à 08, as direções positivas de  $N'$  e  $A'$  são aquelas mostradas na FIGURA 22. Nestas equações, a convenção de sentido horário positivo para  $\theta$  deve ser seguida. Considerando a FIGURA 22, próximo à bordo de ataque do corpo, onde a inclinação da superfície superior do corpo é positiva, a tensão de cisalhamento  $\tau$  está inclinada para cima, e portanto ela fornece uma contribuição positiva para  $N'$ .

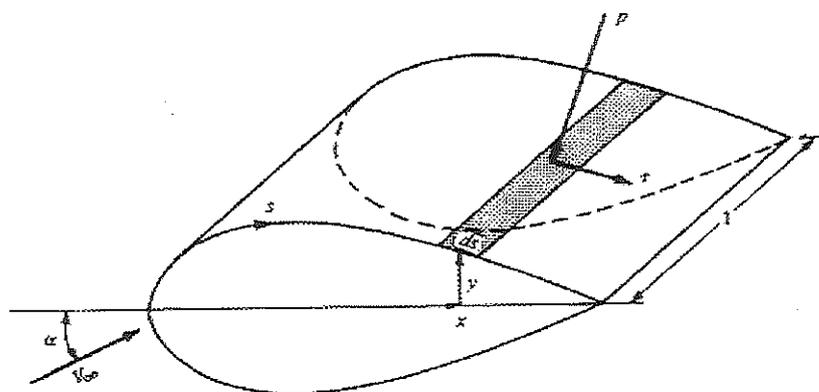


FIGURA 23 – Força aerodinâmica num elemento da superfície de um corpo  
(ANDERSON, 1991).

Para uma tensão de cisalhamento  $\tau$  inclinada para cima,  $\theta$  estaria no sentido anti-horário, e portanto negativo. Assim sendo, na equação 05,  $\sin \theta$  seria negativo, fazendo do termo da tensão de cisalhamento um valor positivo, conforme ele deveria ser neste caso. Portanto, as equações 05 à 08 valem em geral, para ambas as partes

dianteira e traseira do corpo, desde que a convenção de sinal acima para  $\theta$  seja consistentemente aplicada.

As forças normal e axial totais por unidade de comprimento são obtidas pela integração das equações 05 à 08, desde a bordo de ataque até a bordo de fuga :

$$N' = - \int_{BA}^{BF} (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta) ds_u + \int_{EA}^{BF} (p_l \cos \theta - \tau_l \sin \theta) ds_l \quad (09)$$

$$A' = \int_{BA}^{BF} (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta) ds_u + \int_{BA}^{BF} (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta) ds_l \quad (10)$$

Por outro lado, a sustentação e arrasto totais por unidade de comprimento podem ser obtidos pela substituição das equações 09 e 10 nas equações 03 e 04; observando que as equações 03 e 04 são válidas para forças em corpos de forma arbitrária, tanto para forças por unidade de comprimento, quanto para forças em corpos de comprimento qualquer.

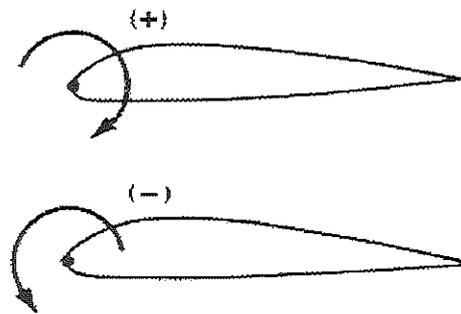


FIGURA 24 – Convenção de sinais para momentos aerodinâmicos em relação ao bordo de ataque.

O momento aerodinâmico exercido em um corpo depende do ponto em relação ao qual este momento atua. Considere momentos atuando em relação à bordo de ataque. Por convenção, momentos os quais tendem a aumentar o ângulo de ataque  $\alpha$  são positivos, e os momentos os quais tendem a diminuir  $\alpha$  são negativos. Esta convenção é ilustrada na FIGURA 24. Pelas FIGURAS 22 e 23, o momento por

unidade de comprimento em relação ao bordo de ataque devido à pressão  $p$  e tensão de cisalhamento  $\tau$  no elemento de área  $dS$  na superfície inferior do corpo é :

$$dM'_u = (p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x ds_u + (-p_u \sin \theta + \tau_u \cos \theta)y ds_u \quad (11)$$

$$dM'_l = (-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x ds_l + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y ds_l \quad (12)$$

Nas equações 09 e 10, notamos a mesma convenção de sinal para  $\theta$  aplicada anteriormente e que  $y$  é um número positivo sobre a corda e um número negativo abaixo da corda. Integrando as equações 09 e 10 do bordo de ataque até o bordo de fuga, nós obtemos para o momento em relação ao bordo de ataque, a seguinte expressão por unidade de comprimento :

$$M'_{BA} = \int_{BA}^{BF} [(p_u \cos \theta + \tau_u \sin \theta)x - (p_u \sin \theta - \tau_u \cos \theta)y] ds_u + \int_{BA}^{BF} [(-p_l \cos \theta + \tau_l \sin \theta)x + (p_l \sin \theta + \tau_l \cos \theta)y] ds_l \quad (13)$$

Nas equações 09, 10, e 13,  $\theta$ ,  $x$ , e  $y$  são funções de  $s$  para uma determinada forma de corpo. Consequentemente, se  $p_u$ ,  $p_l$ ,  $\tau_u$ , e  $\tau_l$  são conhecidos como funções de  $s$ , da teoria ou de práticas experimentais; as integrais nestas equações podem ser calculadas. Claramente, as equações 09, 10, e 13 demonstram o princípio descrito acima, isto é, as fontes de sustentação aerodinâmica, arrasto, e momentos em um corpo são as distribuições de pressão e tensão de cisalhamento integradas sobre a superfície do corpo.

ANDERSON (1991) afirma que um dos objetivos principais da aerodinâmica teórica é calcular  $p(s)$  e  $\tau(s)$  para uma determinada forma de corpo e condições de escoamento livre, e desta forma fornecer as forças e momentos aerodinâmicos pelas equações 09, 10, e 13. Dentro do estudo da aerodinâmica, torna-se claro que existem valores de natureza mais fundamental que as próprias forças e momentos

aerodinâmicos. Estes valores são coeficientes adimensionais de forças e momentos aerodinâmicos, os quais possibilitam uma avaliação destas forças e momentos.

Define-se  $\rho_\infty$  e  $V_\infty$  como densidade e velocidade, respectivamente, no escoamento livre, distante à frente do corpo. Nós definimos uma quantidade dimensional chamada pressão dinâmica no escoamento livre como

$$\text{Pressão dinâmica :} \quad q_\infty \equiv \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2 \quad (14)$$

A pressão dinâmica tem as unidades de pressão, newtons por metro quadrado. Seja  $S$  uma área de referência e  $l$  um comprimento de referência. Os coeficientes adimensionais de força e momento são definidos como segue :

$$\text{Coeficiente de sustentação :} \quad C_L \equiv \frac{L}{q_\infty S} \quad (15)$$

$$\text{Coeficiente de arrasto :} \quad C_D \equiv \frac{D}{q_\infty S} \quad (16)$$

$$\text{Coeficiente de força normal :} \quad C_N \equiv \frac{N}{q_\infty S} \quad (17)$$

$$\text{Coeficiente de força axial :} \quad C_A \equiv \frac{A}{q_\infty S} \quad (18)$$

$$\text{Coeficiente de momento :} \quad C_M \equiv \frac{M}{q_\infty S l} \quad (19)$$

Nos coeficientes acima, a área de referência  $S$  e comprimento de referência  $l$  são escolhidos de maneira coerente para pertencer a uma determinada forma geométrica do corpo; pois para formas diferentes,  $S$  e  $l$  podem ser valores diferentes. Por exemplo, para uma asa de avião,  $S$  é a área do plano que contém a corda da asa, e  $l$  é o comprimento da corda, como ilustrado na FIGURA 25. Porém, para uma esfera,  $S$  é a área da seção transversal, e  $l$  é o diâmetro, como mostrado na FIGURA 25. A escolha particular da área e comprimento de referência não é crítica; porém, quando

usamos dados de coeficiente de força e momento, deve-se conhecer as grandezas de referência aos quais os dados particulares são baseados.

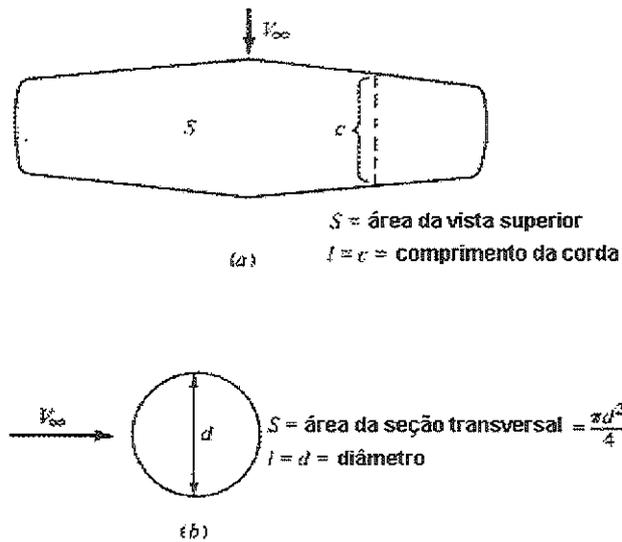


FIGURA 25 – Áreas e comprimentos de referência.

Os símbolos em letras maiúsculas listados acima, isto é,  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$ ,  $C_N$ , e  $C_A$ , denotam os coeficientes de força e momento para um corpo tridimensional completo como um avião ou uma asa finita. Em contraste, para um corpo bidimensional, como visto nas FIGURAS 22 e 23, as forças e momentos são dadas por unidade de comprimento. Para estes corpos bidimensionais, é convencional denotar os coeficientes aerodinâmicos através de letras minúsculas; por exemplo,

$$c_l \equiv \frac{L'}{q_\infty c} \quad (20a)$$

$$c_d \equiv \frac{D'}{q_\infty c} \quad (20b)$$

$$c_m \equiv \frac{M'}{q_\infty c^2} \quad (20c)$$

onde a área de referência  $S = c(1) = c$ .

Duas grandezas adimensionais adicionais de uso imediato são:

$$\text{Coeficiente de Pressão} \quad C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (21)$$

$$\text{Coeficiente de Atrito} \quad c_f \equiv \frac{\tau}{q_\infty} \quad (22)$$

onde  $p_\infty$  é a pressão no escoamento livre.

As formas mais úteis das equações 09, 10, e 13 são obtidas em termos dos coeficientes adimensionais introduzidos acima. Da geometria mostrada na FIGURA 26, temos:

$$dx = ds \cos \theta \quad (23)$$

$$dy = -(ds \sin \theta) \quad (24)$$

$$S = c(1) \quad (25)$$

Substituindo as equações 23 e 24 nas equações 09, 10, e 13, dividindo por  $q_\infty$ , e dividindo mais adiante por  $S$  na forma da equação 25, nós obtemos as seguintes formas integrais para os coeficientes de força e momento:

$$c_n = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c (C_{p,l} - C_{p,u}) dx + \int_0^c \left( c_{f,u} \frac{dy_u}{dx} + c_{f,l} \frac{dy_l}{dx} \right) dx \right] \quad (26)$$

$$c_a = \frac{1}{c} \left[ \int_0^c \left( C_{p,u} \frac{dy_u}{dx} - C_{p,l} \frac{dy_l}{dx} \right) dx + \int_0^c (c_{f,u} + c_{f,l}) dx \right] \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
c_{m_{BA}} = & \frac{1}{c^2} \left[ \int_0^c (C_{p,u} - C_{p,l}) x dx - \int_0^c \left( c_{f,u} \frac{dy_u}{dx} + c_{f,l} \frac{dy_l}{dx} \right) x dx \right] \\
& + \frac{1}{c^2} \left[ \int_0^c \left( C_{p,u} \frac{dy_u}{dx} + c_{f,u} \right) y_u dx + \int_0^c \left( -C_{p,l} \frac{dy_l}{dx} + c_{f,l} \right) y_l dx \right]
\end{aligned} \quad (28)$$

Quando avaliando estas integrais, se lembre de que  $y_u$  está acima do eixo  $x$ , e conseqüentemente é positivo, ao passo que  $y_l$  está abaixo do eixo  $x$ , e conseqüentemente é negativo. Também,  $dy/dx$  em ambas as superfícies superior e inferior seguem a regra habitual de cálculo, isto é, positivo para essas porções do corpo com uma inclinação positiva e negativo para aquelas porções com uma inclinação negativa.

Os coeficientes de sustentação e arrasto podem ser obtidos das equações 03 e 04 arranjando os coeficientes de forma:

$$c_l = c_n \cos \alpha - c_a \sin \alpha \quad (29)$$

$$c_d = c_n \sin \alpha + c_a \cos \alpha \quad (30)$$

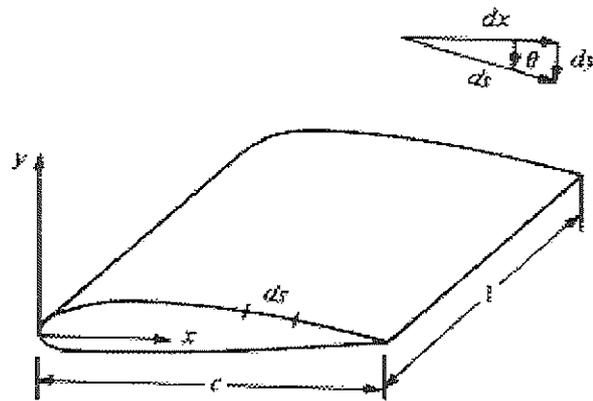


FIGURA 26 – Relacionamento geométrico do comprimento diferencial para o aerofólio.

Formas integrais para  $c_l$  e  $c_d$  são obtidas substituindo as equações 15 e 16 em 29 e 30. É importante notar das equações 15 até 19 que os coeficientes de força e

momentos aerodinâmicos podem ser obtidos pela integração dos coeficientes de pressão e atrito sobre a superfície do corpo. Segundo ANDERSON (1991), este é um procedimento comum em aerodinâmica teórica e experimental. Além disso, embora todas as deduções tenham sido desenvolvidas para um corpo bidimensional, um desenvolvimento análogo pode ser apresentado para corpos tridimensionais. A geometria e equações se tornam mais complexas e abrangentes, mas o princípio é o mesmo.

### 3.4 Distribuição de pressão no veículo

Os mecanismos básicos de deslocamento de um fluido sobre um corpo são responsáveis pela distribuição de pressão estática ao longo da superfície do corpo. Na extremidade da frente do capô há o desenvolvimento de uma pressão negativa conforme o escoamento se desloca sobre a frente do veículo. O gradiente de pressão adverso nesta região tem o potencial para descolar a camada limite e criar um arrasto nesta área. Próximo a base do pára-brisa e capota, o escoamento deve ser curvado para cima, com a ocorrência do aumento de pressão.

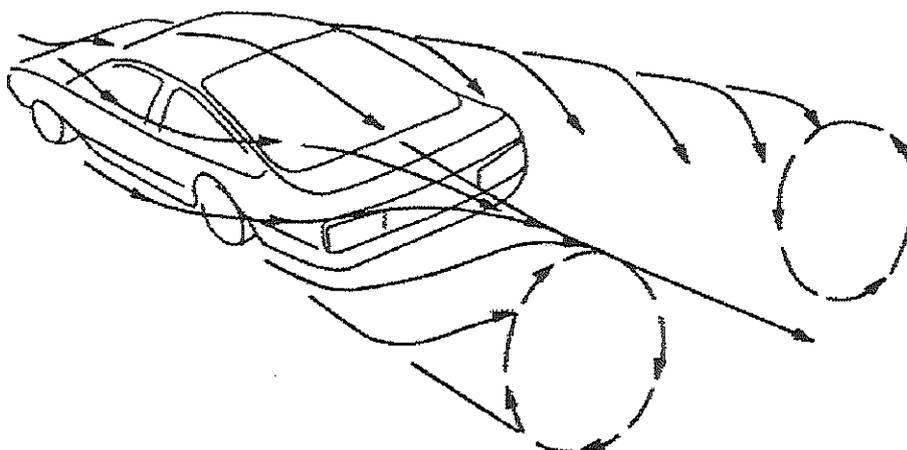


FIGURA 27 – Vórtices na esteira de um automóvel (KRAMER, 1984).

As altas pressões são acompanhadas por menores velocidades nesta região, as quais são uma ajuda para se manter um espaço sem perturbações aerodinâmicas.

Sobre a linha do teto a pressão torna-se negativa novamente, conforme o escoamento de ar segue o seu contorno.

Devido à pressão baixa, o escoamento sobre a lateral do carro tende a injetar mais ar dentro da camada limite, e pode adicionar um potencial para separação, pela definição de KRAMER (1984). O escoamento ao longo da lateral do carro é entranhado pela baixa pressão na região traseira do veículo, combina-se com o escoamento de cima do teto para formar uma trilha de vórtices na traseira do automóvel até uma certa distância. O escoamento de ar total combinado da parte de cima com as laterais de um automóvel são ilustrados na FIGURA 27.

### 3.5 Força de arrasto

Arrasto é a mais conhecida e importante força aerodinâmica encontrada em carros de passageiros. O arrasto total em um veículo é devido às contribuições de muitos fatores. Para automóveis comuns de estradas, aproximadamente 65% do arrasto resulta da forma da superfície deste. A maior fonte de arrasto está na parte traseira devido a zona de separação nesta área, onde temos a máxima possibilidade de redução do arrasto total, de acordo com BUCHHEIM (1981).

O ângulo de inclinação do pára-brisa traseiro até no máximo  $15^\circ$  consiste num fator de redução do arrasto. A medida que o ângulo aumenta, o arrasto também aumentará, devido a separação do escoamento numa posição próximo à extremidade do teto do automóvel. Na frente do veículo o arrasto é influenciado pelo projeto da parte frontal e o ângulo do pára-brisa. Geralmente o arredondamento da extremidade frontal estabelece a área sobre a qual a pressão dinâmica pode atuar para induzir arrasto.

O escoamento em direção ao veículo determina um ponto onde a linha de escoamento se choca, e tem a velocidade reduzida a zero, definindo a posição do ponto de estagnação. Esta linha de corrente é importante conforme ela estabelece a

separação do escoamento para cima e abaixo do automóvel. Mínimo arrasto é obtido quando o ponto de estagnação é mantido baixo no perfil frontal do veículo. O pára-brisa define a direção do escoamento quando este se aproxima horizontalmente do teto, e deste modo o seu ângulo tem uma influência direta sobre o arrasto na parte superior.

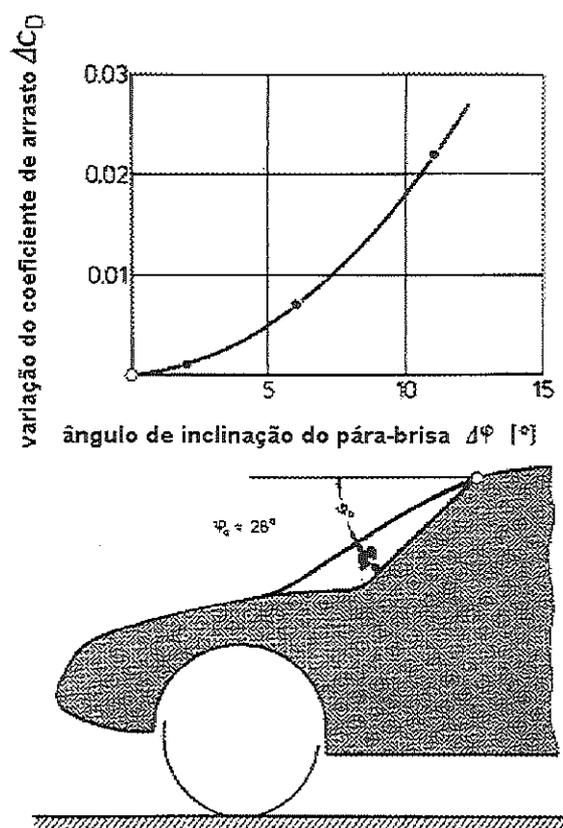


FIGURA 28 – Influência da inclinação do ângulo do pára-brisa na variação do coeficiente de arrasto (BUCHHEIM et al., 1979).

Ângulos rasos reduzem o arrasto, mas dificultam o projeto do veículo, tendo como um dos problemas uma carga de aquecimento solar maior sobre o painel, e demandando construção complexa de pára-brisa para minimizar algumas distorções em ângulos rasos. A FIGURA 28 mostra a mudança no arrasto conforme o ângulo do pára-brisa é aumentado de um ângulo nominal de  $28^\circ$ . A parte de baixo do veículo é uma área crítica na geração do arrasto no corpo. Suspensões, sistemas de exaustão e outras saliências são responsáveis por arrasto nesta região. O escoamento de ar

contido em planos de cisalhamento, é controlado pela velocidade do ar nula na superfície da rodovia, e arrasto induzido pelo escoamento nos componentes da parte inferior do automóvel. A utilização de superfícies lisas e planos sob o veículo podem contribuir para uma redução do arrasto.

As rodas e suas cavidades são os maiores contribuidores para o arrasto na parte de baixo do automóvel, onde um valor significativo é detectado devido a rotação das rodas e recirculação do ar dentro das cavidades destas. Uma melhoria que deve ser adotada, é a proteção aerodinâmica das rodas e suas cavidades. Enquanto isto é possível de ser realizado nas rodas traseiras, a direção de rotação e esterçamento das rodas dianteiras dificulta a aplicação desta correção na parte da frente do veículo segundo SCIBOR (1984).

O escoamento de um fluido sobre um automóvel tem uma descrição muito complexa em termos do modelamento de seu movimento, e isto implica necessariamente num desenvolvimento, em parte empírico, do equacionamento da força de arrasto aerodinâmica, a qual é frequentemente dada pela seguinte relação:

$$D_A = \frac{\rho V^2 C_D A}{2} \quad \Rightarrow C_D = \frac{D_A}{\frac{\rho V^2 A}{2}} \quad (31)$$

O coeficiente de arrasto varia em função da forma do automóvel, para uma mesma velocidade de escoamento e densidade do ar constante. O vento relativo pode ser representado por um vetor, com origem em um ponto qualquer do escoamento, e devido a um arrasto médio na superfície da rodovia, este não será equivalente ao valor da velocidade medida no veículo.

Com o melhoramento do projeto aerodinâmico de um automóvel, seu coeficiente de arrasto fica menos sensível ao ângulo de ataque lateral, pelo fato do escoamento não se separar tão rapidamente. Normalmente o coeficiente de arrasto aumenta de 5% a 10% com o ângulo de ataque lateral, numa faixa típica de veículos especiais dirigidos, como carros de passageiros. A FIGURA 29 mostra uma

influência do ângulo de ataque no coeficiente de momento de arfagem para três veículos diferentes.

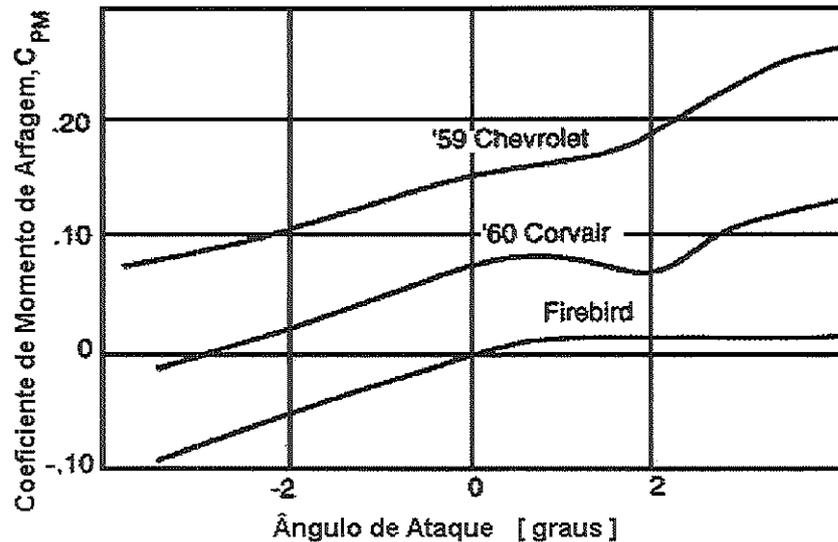


FIGURA 29 – Variação do coeficiente de momento de arfagem pelo ângulo de ataque do veículo (COLE, 1972).

Corpos rombudos, como um cilindro circular, uma esfera ou uma placa plana normal ao escoamento, mostram características de arrasto bastante diferentes. Na parte traseira de um automóvel, no escoamento externo invíscido, gradientes de pressão extremamente acentuados ocorrem, os quais induzem uma separação do escoamento (FIGURA 30).



FIGURA 30 – Esteira de um VW Golf I, fumaça introduzida dentro da esteira (HUCHO, 1987).



A distribuição de pressão é, desse modo, alterada consideravelmente quando comparada com o caso teórico de escoamento invíscido. Como um exemplo, a FIGURA 32 mostra a distribuição de pressão para um cilindro circular.

Na parte dianteira a distribuição de pressão é semelhante à aquela em escoamento invíscido, embora na parte traseira a separação de escoamento induza uma sucção considerável. Integrando as componentes de força na direção do escoamento livre, resultando da distribuição de pressão,

$$D_p = \oint p \sin \varphi \, dS \quad (32)$$

têm-se o denominado arrasto de pressão  $D_p$ , FIGURA 31.

Arrasto de fricção ocorre como resultado das tensões de cisalhamento nas paredes mas, para corpos rombudos, o arrasto de pressão é predominante. Em geral, o arrasto de um corpo pode ser escrito como

$$D = D_f + D_p \quad (33)$$

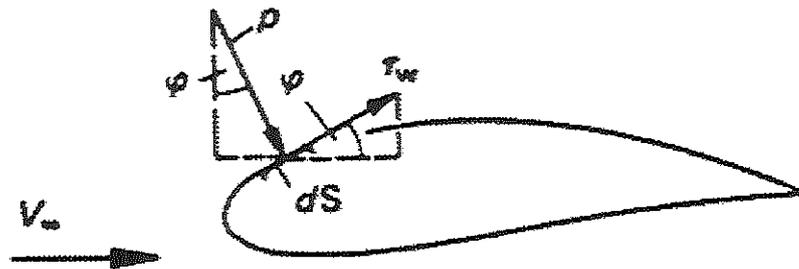


FIGURA 31 – Determinação do arrasto de um corpo, exemplo de escoamento bidimensional.

Para corpos rombudos, o coeficiente de arrasto

$$c_{D,A} = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (34)$$

é baseado na pressão dinâmica do escoamento livre e na maior secção transversal do corpo, denominada de  $A$ . Esta é a projeção do corpo em um plano perpendicular ao escoamento livre (área frontal).

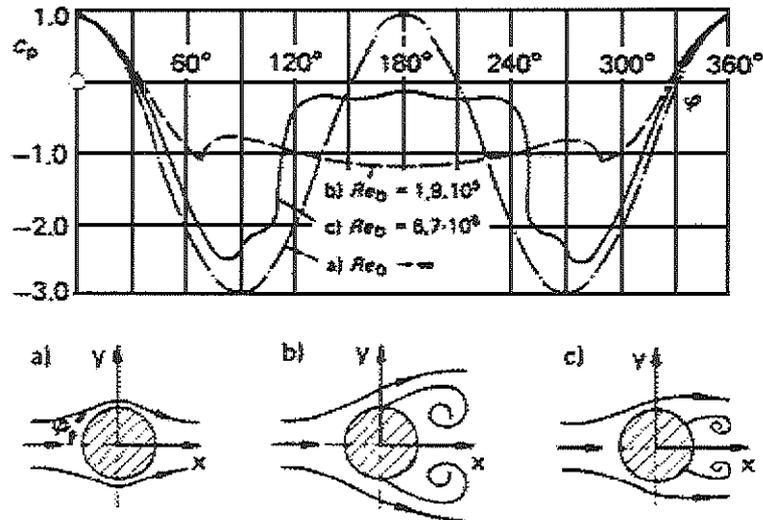


FIGURA 32 – Distribuição de pressão e configurações de linhas de escoamento em um cilindro circular para diferentes números de Reynolds (HUCHO, 1987): (a) escoamento invíscido; (b) escoamento sub-crítico, camada limite laminar; (c) escoamento super crítico, camada limite turbulenta.

A FIGURA 33 mostra este coeficiente de arrasto traçado em função do número de Reynolds para um cilindro circular e uma placa plana. Se muito pequenos os números de Reynolds, não tem influência significativa no coeficiente de arrasto pois, em corpos com extremidades afinadas, a separação de escoamento ocorrerá da mesma maneira para todos os números de Reynolds. Porém, para corpos ligeiramente arredondados, a posição do ponto de separação depende do estado da camada limite. Em baixos números de Reynolds a camada limite é laminar; veja o caso (b) na FIGURA 32.

O ponto de separação é localizado próximo ao ponto de máxima espessura. A região de esteira resultante atrás do corpo é larga e o correspondente coeficiente de arrasto é alto. Para um número de Reynolds crítico de cerca de  $Re_{D,crit} = 5 \times 10^5$ , uma transição súbita para uma camada limite turbulenta acontece na parte dianteira do

corpo. A camada limite turbulenta permanece colada por um tempo maior; veja caso (c) nas FIGURAS 32 e 33. A região de esteira correspondente é estreita e o coeficiente de arrasto é muito mais baixo que para números de Reynolds sub-críticos.

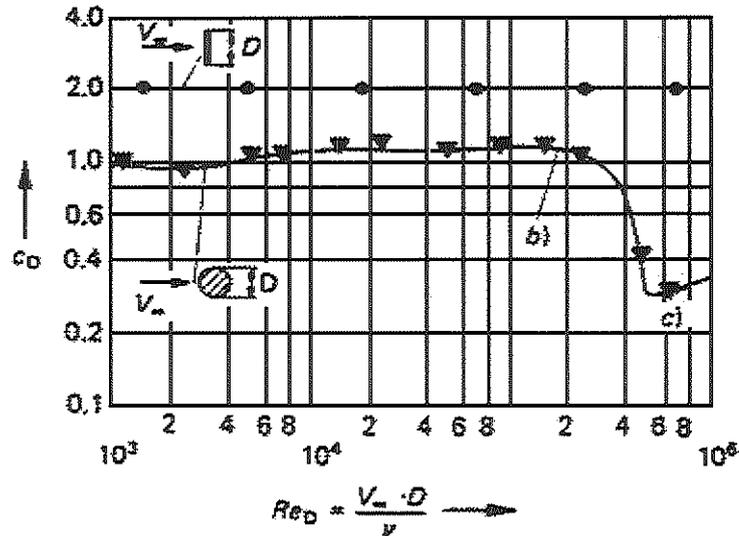


FIGURA 33 – Coeficientes de arrasto de corpos rombudos como uma função do número de Reynolds (HUCHO, 1987).

Geralmente, uma mudança súbita do coeficiente de arrasto de um veículo, como uma função de seu número de Reynolds, deveria ser evitado. Para este propósito, separação de escoamento é fixada em certos pontos (por exemplo na extremidade superior da inclinação do pára-brisa traseiro). Até este ponto a forma do corpo deveria ser projetada de forma que o escoamento permaneça colado e que o aumento de pressão seja tão grande quanto possível para várias condições de escoamento livre. A esteira resultante deve ser tão pequena quanto possível para se obter baixo arrasto.

Segundo HUCHO (1978), os coeficientes de arrasto alcançados por carros europeus atuais, excluindo carros esporte e de corrida, variam de 0.30 a 0.52. Em geral, a dependência destes coeficientes de arrasto do número de Reynolds é muito pequena e mudanças súbitas não acontecem. Isto demonstra que a parte predominante do arrasto destes veículos é arrasto de pressão.

Para algumas formas de corpo com linhas de escoamento não convencionais, coeficientes de arrasto foram medidos na região 0.15 a 0.27. Para corpos deste tipo a porção correspondente ao arrasto de pressão é relativamente pequena. Estes coeficientes de arrasto portanto contêm uma proporção grande de arrasto por fricção e, então, dependem notoriamente do número de Reynolds, conforme HUCHO (1978).

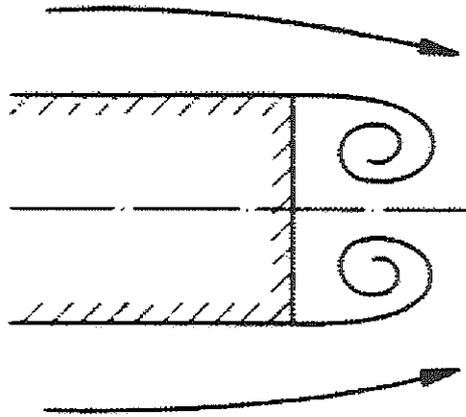


FIGURA 34 – Separação do escoamento em um corpo rombudo, linha de separação perpendicular à direção do escoamento.

As separações de escoamento que conduzem a um arrasto de pressão podem ser divididas em dois tipos diferentes. Como mostrado na FIGURA 34, a linha de separação pode ser localizada perpendicular à direção de escoamento. Neste caso, são gerados vórtices, os eixos dos quais também são perpendiculares ao escoamento exterior. Assim as componentes de velocidade paralelas aos eixos dos vórtices são muito pequenas.

De acordo com SCHLICHTING (1982), um escoamento simétrico na região de separação, como mostrado na FIGURA 34, só existe para números de Reynolds pequenos, por exemplo em um cilindro circular, para  $Re_D < 60$ . Para números de Reynolds maiores, a formação de vórtices periódicos acontece e o escoamento na região separada é basicamente instável.

A energia cinética do campo de vórtice é dissipada rapidamente pela mistura turbulenta e conversão irreversível em calor por fricção. Isto conduz a uma perda de pressão total considerável na região atrás do corpo e a correspondente diferença em energia cinética é igual ao trabalho que é necessário para superar o arrasto de pressão. Atrás do corpo é formada uma esteira na qual num determinado período de tempo, uma sucção relativamente uniforme e velocidades de escoamento muito baixas estão presentes.

O outro tipo de separação de escoamento é caracterizado por uma linha de separação inclinada com relação ao escoamento incidente, veja FIGURA 35. Neste caso, são formados vórtices, os eixos dos quais são aproximadamente paralelos às linhas de separação. Uma componente de velocidade considerável, paralela à linha de separação e portanto na direção dos eixos dos vórtices, está presente. Assim, uma bem ordenada, separação de escoamento tridimensional estável é encontrada. Na superfície traseira do corpo esta separação de escoamento induz sucção que conduz a um arrasto de pressão. Na base inclinada do corpo o escoamento é colado.

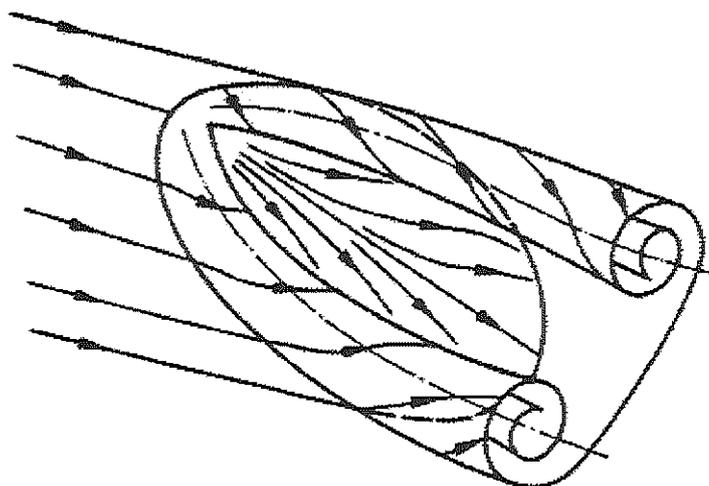


FIGURA 35 – Separação de escoamento em um corpo com base rombuda oblíqua, linha de separação inclinada em relação à direção do escoamento principal.

Nas redondezas dos vórtices a distribuição de pressão é caracterizada por picos de sucção. Segundo HUMMEL (1978), este tipo de separação de escoamento é bem conhecido nas pesquisas aeronáuticas de investigações no campo de escoamento de

asa delta. Atrás do corpo são observadas apenas perdas de pressão totais relativamente pequenas. O campo de escoamento de vórtices concentrados, porém, contém muita energia cinética, que corresponde ao trabalho necessário para superar o arrasto de pressão.

THWAITES (1960) afirma que existe uma relação entre ambos tipos de separação de escoamento atrás de corpos rombudos, as quais já foram investigadas em pesquisas aeronáuticas. Conforme o ângulo de ataque de uma asa delta é aumentado, uma mudança súbita da estrutura dos vórtices é observada, que é chamado de “breakdown” vórtice ou “bursting” vórtice. O fenômeno não é contudo completamente compreendido. Porém, conduz a uma destruição do escoamento de vórtice tridimensional bem ordenados; este processo começa no centro do vórtice e se esparrama a jusante, em cima de grandes porções de vórtices.

O estado final é um escoamento separado na região do centro do vórtice, o qual está embutido em um escoamento tridimensional bem ordenado. Investigações experimentais sistemáticas realizadas por MOREL (1987) em veículos com inclinações diferentes da superfície traseira devem revelar o comportamento destas separações. Estas investigações indicam claramente ambos os tipos de separação de escoamento. Transição de um tipo para outro conduz a mudanças de características do arrasto de pressão, que também são conhecidos em asas delta.

No problema do arrasto de um corpo, poderia ser mencionado finalmente que a forma da parte dianteira de um corpo em sua maior seção transversal tem apenas influência secundária no arrasto total. As contribuições principais para a força de arrasto se originam da parte traseira do corpo. Não é importante achar uma forma adequada para se dividir o escoamento incidente, mas é muito importante projetar uma superfície traseira do corpo que conduza as linhas de escoamento divididas a uma reunião suave.

Formas otimizadas para os corpos, em relação às linhas de escoamento, possuem uma parte traseira muito afilada. O objetivo da análise do arrasto

aerodinâmico é determinar a relação entre sua causa e efeito. Se cada detalhe que contribui para o arrasto pudesse ser determinado e então minimizado, um veículo com arrasto aerodinâmico mínimo seria obtido, mas o alto grau de interação entre partes limita o sucesso deste procedimento. Carros com arrasto aerodinâmico muito baixo não podem ser projetados parte por parte, mas exigem consideração do fenômeno de arrasto no total.

De acordo com SOVRAN et al. (1978), a análise consistente das diferentes contribuições para o arrasto total conduz para um resultado correto, mas erros aparecem freqüentemente quando efeitos parciais de cada forma do arrasto estão misturados um ao outro, sendo um exemplo disto o arrasto induzido. As causas físicas do arrasto aerodinâmico pode ser investigadas comparando-se o escoamento atuante, exposto a fricções (viscoso), com o ideal, escoamento sem fricção (não viscoso) e dividindo o arrasto em suas componentes de pressão e de fricção.

A ocorrência de ambas as componentes é explicada na FIGURA 36. O efeito do arrasto aerodinâmico no campo circunvizinho é mostrado em uma forma altamente simplificada na FIGURA 37, segundo HACKETT et al. (1985).

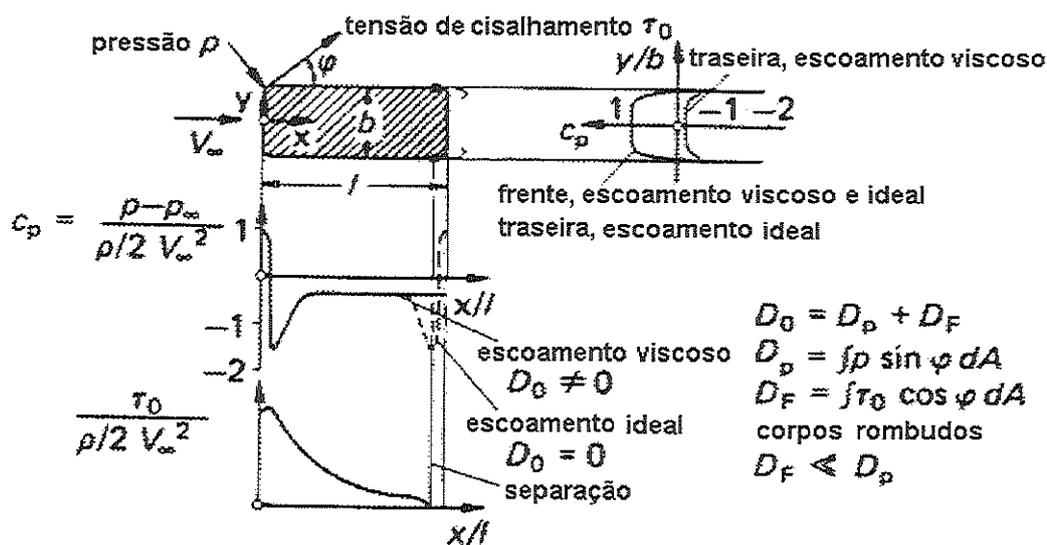


FIGURA 36 – Definição de arrasto de pressão  $D_p$  e do arrasto de fricção  $D_F$ , e a relação de distribuição de pressão e tensão de cisalhamento em um automóvel (SOVRAN et al., 1978).

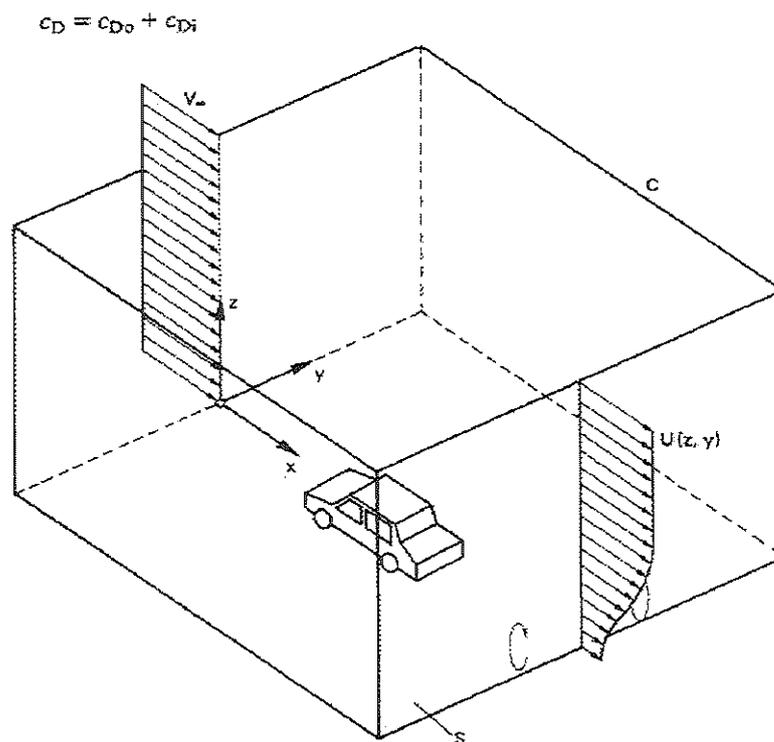


FIGURA 37 – Efeito de um automóvel num campo de escoamento circunvizinho. Derivação do arrasto e suas componentes com o auxílio do teorema de momento para o sistema de coordenadas mostrado (HACKETT et al., 1985).

O campo de escoamento circunvizinho gera uma distribuição de pressão e de tensão de cisalhamento ao redor do veículo. Para pontos onde o escoamento é contraposto por um alto aumento de pressão, o escoamento tende a separar-se do contorno. No exemplo da FIGURA 36 é assumido, para um efeito de simplificação, que a separação só acontece na parte final da traseira do veículo. A influência da inclinação da parte traseira do veículo no arrasto total e de partes isoladas pode ser visto na FIGURA 38.

De acordo com AHMED et al. (1984), como uma consequência a distribuição de pressão diverge daquela em um escoamento não viscoso. Se a pressão é traçada contra a largura do veículo, como mostrado na parte direita superior na FIGURA 36, fica evidente que esta mudança na distribuição de pressão é altamente significativa para a origem do arrasto. A tensão de cisalhamento na parede diminui conforme a

espessura da camada limite aumenta, e cai para zero no ponto de separação. Se a pressão e tensões de cisalhamento são integradas em cima da superfície inteira, como descrito nas duas integrais na FIGURA 36, a pressão e arrasto por fricção são obtidos e, por adição, o arrasto total. Isto também inclui arrasto induzido por alguns vórtices presentes, freqüentemente chamado de arrasto induzido da aerodinâmica da asa de aeronaves.

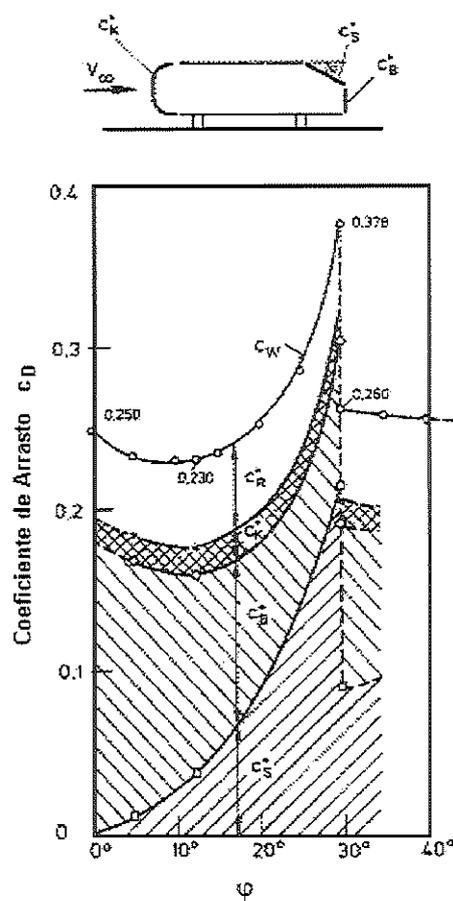


FIGURA 38 – Variação do arrasto total e do arrasto de partes do corpo em função da variação da inclinação da parte traseira (AHMED et al., 1984).

### 3.6 Força lateral

As componentes de vento lateral impõe uma força lateral no veículo, que tende a mudar sua direção de uma determinada trajetória. O exato efeito depende do

tipo do automóvel e a natureza do vento. Em ventos cruzados de alta intensidade, a força lateral é freqüentemente maior que a força de arrasto, tal que o ângulo resultante total do vento é muito maior que o ângulo do vento relativo, como afirma GILHAUS (1986).

A força lateral atua sobre o corpo em seu centro de pressão, o qual normalmente é localizado à frente do centro de gravidade, tal que o veículo gira em torno de seu c.g., com a parte dianteira do veículo sendo desviada da trajetória, e exigindo do motorista uma correção instantânea. Em túnel de vento a força lateral é medida no plano do solo, em um registrador numa posição equidistante entre os eixos. A diferença entre esta posição e o centro de pressão, resulta em um momento de giro e de guinada, enquanto a força lateral está presente.

O coeficiente de força lateral é zero para um ângulo relativo do vento também zero, e cresce de maneira aproximadamente linear com um ângulo de  $20^\circ$  até  $40^\circ$ . A inclinação do gradiente varia de certo modo com o tipo de veículo, mas está geralmente na faixa de 0.035 até 0.06, segundo os dados de COLE (1972). A FIGURA 39 mostra valores característicos do  $c_Y$  como função do ângulo do vento relativo.

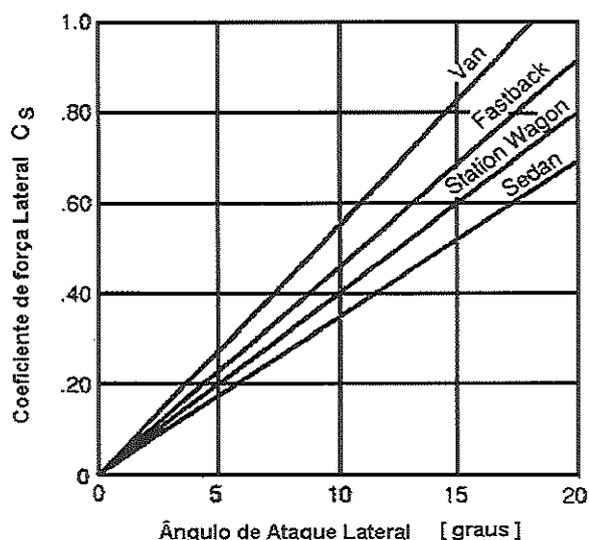


FIGURA 39 – Variação do coeficiente de força lateral em função do ângulo de ataque lateral (COLE, 1972).

Um caso especial de vento lateral consiste em uma corrente de ar fixa que tem um perfil de velocidade constante indiferente com relação a altura. Embora dificilmente possível na natureza, este caso pode ser proporcionado num túnel de vento com a exclusão da estreita camada limite no piso, FIGURA 40.

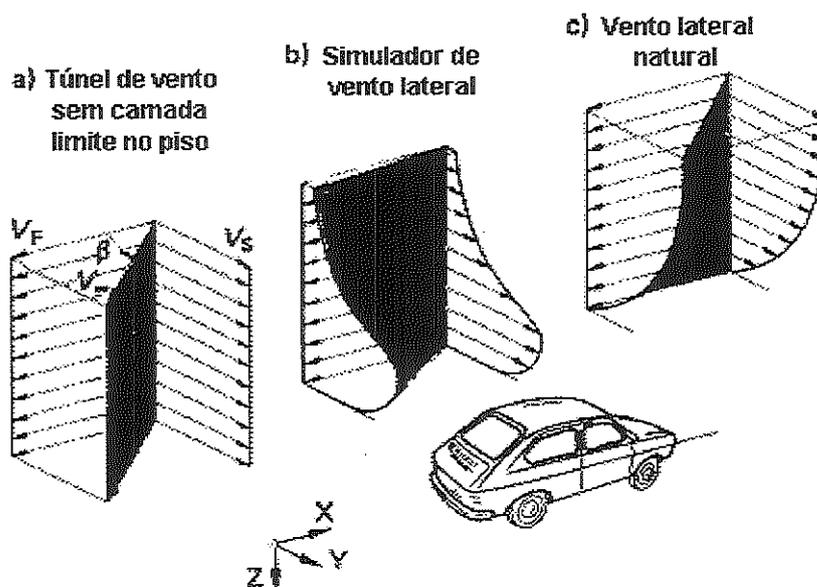


FIGURA 40 – Comparação de vários perfis de ventos laterais (HUCHO, 1987).

Sob condições de ventos laterais naturais, a relação mostrada na figura da direita está presente, devido ao fato do perfil de vento lateral inteiro ter características de camada limite.

Quando combinada com a velocidade do veículo o perfil do escoamento de ar resultante é fortemente distorcido. Para comparação, a parte central da FIGURA 40 mostra o perfil do vento de um simulador de vento lateral onde o perfil pode ser visto ao ser distorcido.

A força lateral aerodinâmica resulta da diferença de pressão entre o lado de barlavento e o de sotavento de um veículo. O lado direito da FIGURA 41, segundo BARTH (1960) mostra a distribuição de pressão ao redor de uma seção horizontal de um veículo.

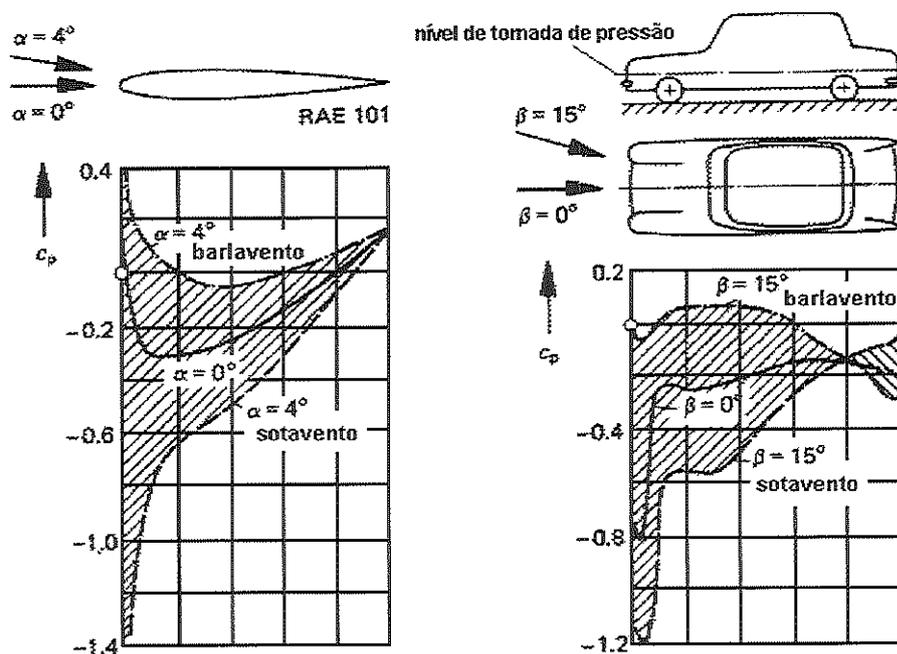


FIGURA 41 – Comparação da distribuição de pressão ao redor de uma seção de asa e uma seção horizontal de um veículo (BARTH, 1960).

No lado de sotavento considerável pressão negativa se desenvolve devido às velocidades de corrente de ar altas sobre o veículo em sua extremidade frontal. No lado de barlavento, com exceção de uma leve pressão negativa na extremidade frontal, uma pequena pressão positiva existe ao longo do lado do veículo em sua parte central.

Na metade traseira do veículo, pressão negativa crescente é observada continuamente. Comparação da distribuição de pressão de um veículo e a de uma seção de asa mostra boa correlação, pelo menos em princípio. O ângulo de ataque da seção de asa foi escolhido de forma que o nível de pressão obtido fosse aproximadamente semelhante daquele no veículo. As pressões do lado de barlavento e de sotavento resultam numa força lateral no veículo que é direcionada para o lado de sotavento, num momento de guinada que geralmente tende a virar o nariz do veículo para o lado de sotavento.

### 3.7 Forças e momentos totais

Além do arrasto discutido em detalhes até o momento, outras forças e momentos ocorrem em um veículo, as quais são mostradas esquematicamente na FIGURA 42. Em escoamento simétrico, onde  $\beta = 0$ , o arrasto  $D$  é acompanhado por uma força de sustentação  $L$ , veja a distribuição de pressão da FIGURA 43.

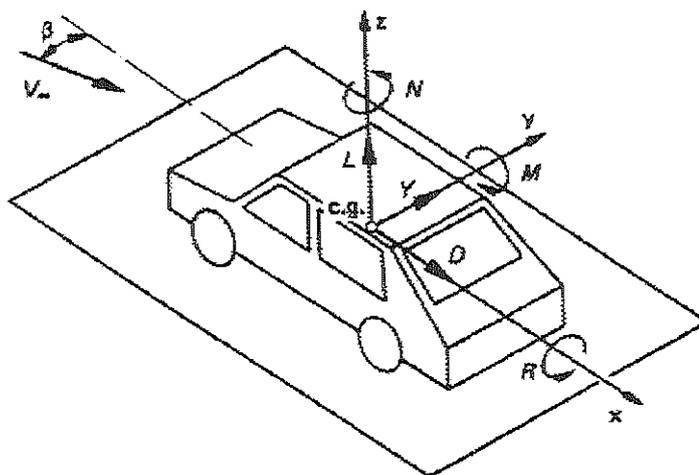


FIGURA 42 – Forças e momentos aerodinâmicos atuando no centro de gravidade de um veículo (HUCHO, 1987).

Além disso, um momento de arfagem  $M$  com relação ao eixo lateral  $y$  está presente. Os três componentes  $L$ ,  $D$  e  $M$  determinam o vetor da força aerodinâmica resultante completamente. Para uma posição conhecida do centro de gravidade, o qual é usado como o ponto de referência para o momento de arfagem, as forças adicionais que agem nos eixos dianteiro e traseiro resultantes do escoamento ao redor do veículo podem ser facilmente calculadas.

Em condições de vento cruzado, com ângulo de ataque lateral  $\beta \neq 0$ , um campo de escoamento assimétrico ao redor do veículo estará presente. Neste caso, além das forças e momentos aerodinâmicos mencionados até agora, uma força lateral  $Y$  é observada. Além disso, existe a ocorrência de um momento de rolamento  $R$  com

relação ao eixo longitudinal  $x$  e um momento de guinada  $N$  em relação ao eixo vertical  $z$ . Assim seis componentes  $L, D, Y$  e  $M, R, N$  determinam o vetor da força aerodinâmica total. Para uma posição conhecida do ponto de referência, as forças adicionais que agem nas quatro rodas do veículo podem ser calculadas.

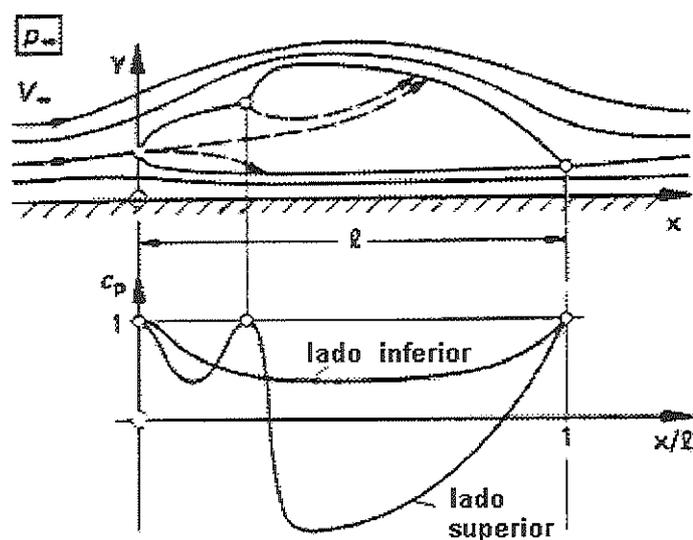


FIGURA 43 – Campo de escoamento e distribuição de pressão para um veículo num escoamento invíscido bidimensional.

As forças e momentos aerodinâmicos que atuam em veículos podem ser obtidos de medidas em túnel de vento para carros em escala real ou em modelos menores. Três e seis componentes medidas são realizadas em escoamento simétrico e assimétrico respectivamente. Com a finalidade de conseguir resultados nos testes em modelos, que também sejam válidos para um veículo em escala real, a lei de similaridade de Reynolds tem que ser respeitada. Isto significa que para ambos os casos o número de Reynolds,

$$Re_l = \frac{V_\infty l}{\nu} \quad (35)$$

da equação 35, tem que ser o mesmo. Os resultados serão independentes das dimensões reais utilizadas nos testes, se coeficientes adimensionais são obtidos por analogia com o coeficiente de arrasto conforme:

$$c_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (36)$$

$$c_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (37)$$

$$c_Y = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 A} \quad (38)$$

$$c_M = \frac{M}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 Al} \quad (39)$$

$$c_R = \frac{R}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 Al} \quad (40)$$

$$c_N = \frac{N}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2 Al} \quad (41)$$

Todos estes coeficientes são baseados na pressão dinâmica do escoamento livre e na maior seção transversal do corpo, a área frontal  $S$ . Além disso, uma dimensão característica tal como o comprimento total  $l$  do veículo é usado para os três momentos. Os coeficientes aerodinâmicos adimensionais podem apenas ser dependentes de outros parâmetros adimensionais envolvidos nos problema de escoamento, como por exemplo o número de Reynolds  $Re_l$  ou o ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

Nesta relação, ocorre um problema de estabilidade que pode ser explicado para um veículo em vento cruzado. Em escoamento assimétrico, um momento de guinada

atua no corpo e o coeficiente correspondente a este momento é  $c_N$ . Este momento de guinada tem a tendência de girar o veículo sobre seu eixo vertical  $z$ .

HUCHO (1984) afirma que o veículo é aerodinamicamente estável se o momento de guinada resultante tem a tendência em reduzir o ângulo de ataque lateral  $\beta$ . Com a notação da FIGURA 42, isto é válido para:

$$\frac{dc_N}{d\beta} > 0 \quad (\text{estável}) \quad (42)$$

Reciprocamente, o veículo é aerodinamicamente instável para

$$\frac{dc_N}{d\beta} < 0 \quad (\text{instável}) \quad (43)$$

Similarmente, conforme discutido para o coeficiente de arrasto, todas as outras forças e momentos podem ser influenciados pela forma particular do veículo. Sem entrar em detalhe, podem ser discutidas algumas possibilidades. A forma do lado inferior do carro tem uma influência grande na sustentação.

Com alturas relativas ao solo pequenas e uma forma lisa da superfície inferior, altas velocidades podem ser obtidas entre o veículo e o solo. Isto conduz para baixas pressões no lado inferior do veículo, as quais mantêm a força de sustentação pequena. Separações de escoamento do tipo vórtice como na FIGURA 35, relacionados a formas inclinadas da base de um veículo, podem causar contribuições consideráveis para a sustentação total.

Além disso, o comportamento de veículos em condições de vento de cruzado podem ser um tanto quanto fortemente influenciados pelo seu amoldamento particular. Segundo HUCHO (1972), para ângulos pequenos de vento lateral, valores maiores da derivada do momento de guinada  $dc_N/d\beta$  podem ser permitidos uma vez que o momento de guinada  $N$  ainda é pequeno e o problema principal neste caso é

reduzir o arrasto. Para ângulos maiores de ataque lateral, deve ser permitido um aumento no arrasto uma vez que o problema principal é agora manter o momento de guinada em uma ordem de magnitude tolerável.

### 3.8 Estabilidade aerodinâmica

A concentração das pressões negativas no lado de sotavento, à frente do veículo, é largamente responsável para o momento de guinada aerodinâmico. Esta é a característica que mais causa instabilidade. Em outras palavras, quando ventos laterais em um veículo provocam uma divergência angular  $\beta$ , ângulo de ataque lateral, o efeito deste momento de guinada aerodinâmico tende a aumentar o ângulo ainda mais.

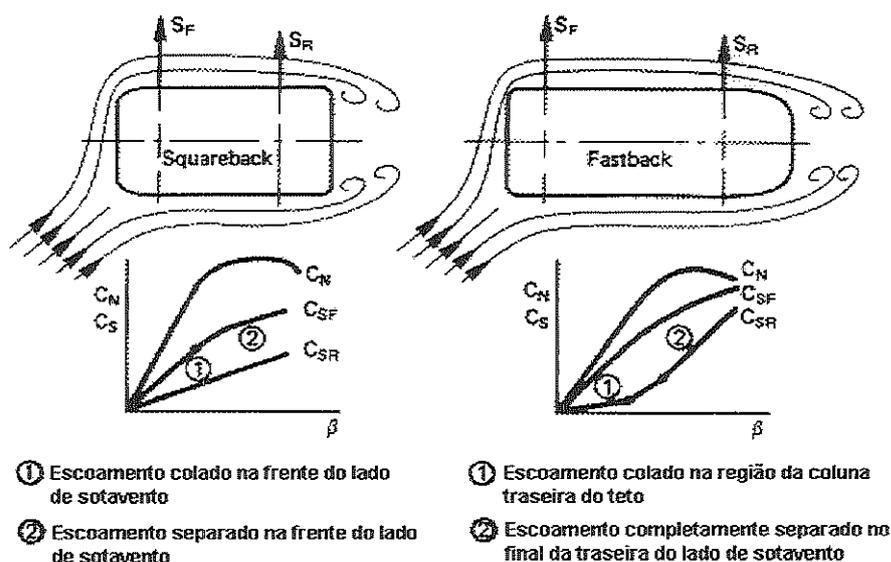


FIGURA 44 – Condições de escoamento de ar e forças atuantes em um automóvel exposto à ventos laterais (SORGATZ et al., 1982).

Uma ilustração clara das características de escoamento em veículos de produção em série expostos a ventos laterais é mostrada na FIGURA 44. De acordo com SORGATZ et al. (1982), para ângulos de ataque lateral pequenos, pressões negativas muito altas ocorrem na extremidade dianteira do veículo do lado de

sotavento, apresentando uma diminuição gradativa até a coluna dianteira do teto deste mesmo lado, ao passo que mais adiante à jusante do escoamento exibe apenas baixas pressões negativas.

Para ângulos de ataque lateral maiores, o escoamento de ar separa-se no canto do pára-lama e na coluna dianteira do teto do lado de sotavento, que resulta em picos de pressão negativa menores nestas áreas. A dobra na curva do coeficiente de força lateral na parte dianteira indica o começo da transição para separação do escoamento.

No lado de barlavento, na parte dianteira existe baixa pressão positiva, que volta a uma pressão negativa mais adiante à jusante do escoamento. A magnitude e extensão da região de pressão positiva crescem conforme o ângulo de ataque lateral aumenta. Para tais ângulos de ataque lateral, os veículos exibindo extremidades traseiras bem afiladas e arredondadas, com colunas traseiras do teto inclinadas, exibem um aumento de pressão significativo no lado de sotavento em suas partes traseiras, e uma correspondente diminuição de pressão no lado de barlavento.

Para um posterior aumento dos ângulos de ataque lateral esta tendência é revertida e diminuída lentamente até desaparecer, devido a uma mudança significativa das características de separação na extremidade traseira e padrões de vórtice na coluna traseira do teto.

Carros “fastback” e “notchback” entretanto mostram uma inclinação diferente da curva do coeficiente de força lateral na traseira em relação aos veículos “squareback”. Para ângulos de ataque lateral pequenos, veículos “fastback” mostram uma inclinação suave da curva do coeficiente de força lateral na traseira, a qual muda para uma inclinação mais íngreme em ângulos de ataque lateral maiores. Neste estágio a curva do coeficiente de momento de guinada fica negativa.

A questão que surge agora é de como a curva do coeficiente de força lateral ou do coeficiente de momento de guinada, respectivamente, pode ser influenciada através de mudanças de contorno.

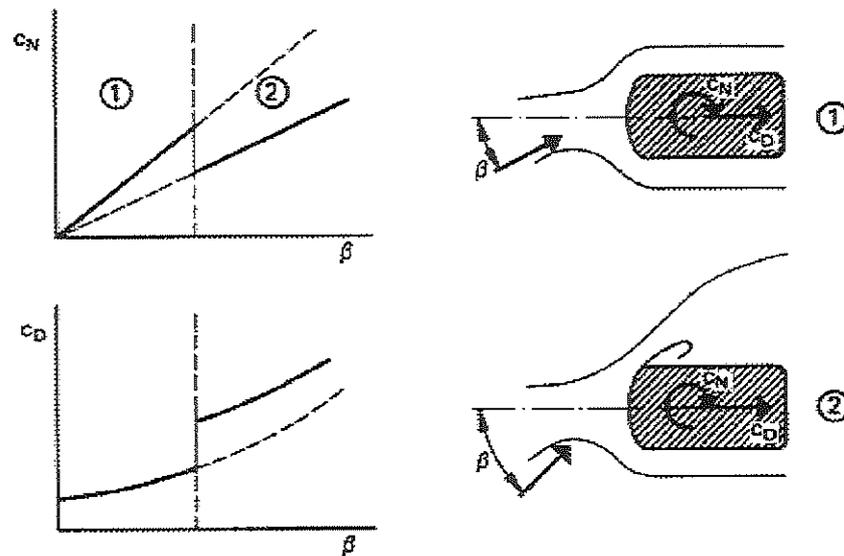


FIGURA 45 – Redução do momento de guinada pelo controle da separação do escoamento (HUCHO, 1984).

Da aerodinâmica de aerofólio é conhecido que uma seção de aerofólio que é estolada, exibindo separação no lado superior, tem sustentação muito baixa e um momento de arfagem pequeno. Quando este princípio é aplicado a um veículo, significa que extremidades afinadas nos cantos dianteiros do veículo, embora aumentando o arrasto no veículo, podem reduzir a força lateral e o momento de guinada no veículo.

As metas contraditórias entre projetos para otimização do arrasto e redução da força lateral e momento de guinada devido ao vento lateral, são superadas pela otimização da frente do veículo para escoamento livre de separação em ângulos de ataque lateral entre  $-10^\circ \leq \beta \leq +10^\circ$ , que é uma região na qual ventos laterais causam relativamente uma pequena preocupação. Para ângulos de ataque lateral maiores, onde ventos laterais causam mais preocupação, é permitida uma separação do escoamento de ar com a finalidade de reduzir o momento de guinada.

O subsequente aumento no arrasto pode então ser tolerado, porque estes ângulos de ataque lateral maiores só ocorrem em curtos espaços de tempo. Os

desenvolvimentos por baixo arrasto em ângulos de ataque lateral pequenos e baixos momentos de guinada em ângulos de ataque lateral mais altos podem ser vistos na FIGURA 45.

Tratando de dinâmica do veículo, momentos são normalmente relacionados a um ponto de referência no centro entre o eixo dianteiro e traseiro, e no centro da distância entre as rodas, a nível da estrada. HUCHO (1984) afirma que com respeito a sensibilidade ao vento lateral porém, o momento de guinada  $N_{sp}$  é relacionado ao centro de gravidade do veículo, ao redor do qual o movimento de guinada ocorre, como pode ser visto na FIGURA 46.

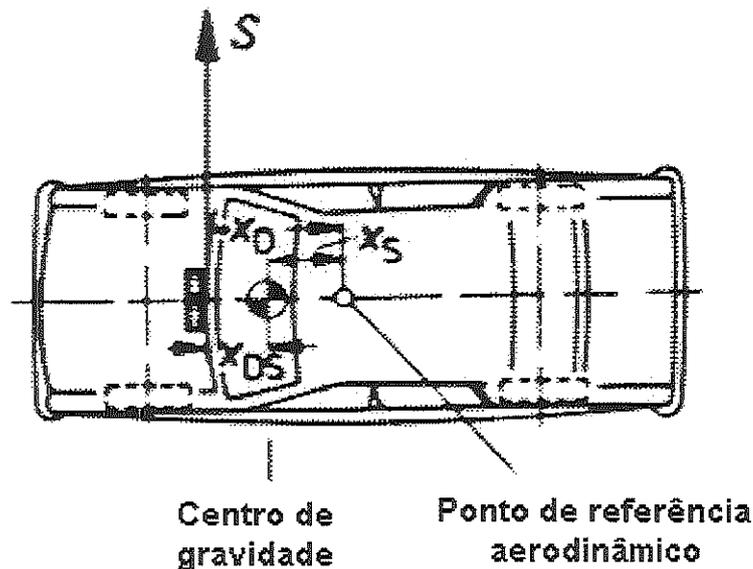


FIGURA 46 – Definição do centro de pressão (HUCHO, 1987).

Os dois pontos de referência para o movimento de guinada serão coincidentes apenas se o peso do veículo é distribuído igualmente nos eixos dianteiros e traseiros. Aumento do carregamento no eixo traseiro tende a aumentar automaticamente o momento de guinada induzido e um aumento do carregamento no eixo dianteiro tende a reduzir este momento, comparado com o momento de guinada aerodinâmico. O caso posterior pode resultar até mesmo em uma mudança de sinal na expressão de estabilidade.

As possibilidades de influências nas forças e momentos aerodinâmicos pela modificação da forma do veículo são mostradas na FIGURA 47, e mais adiante detalhadas na FIGURA 48. Da FIGURA 47 pode ser visto que o momento de guinada e o coeficiente de força lateral são extremamente dependentes da configuração do final da traseira do veículo.

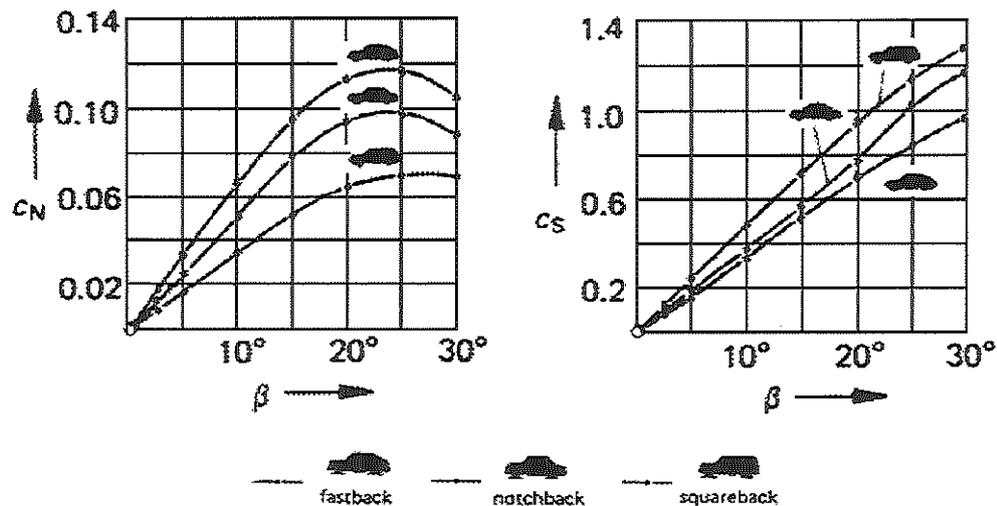


FIGURA 47 – Coeficientes de momento de guinada e de força lateral para veículos com diferentes configurações na forma da traseira (HUCHO, 1987).

O menor momento de guinada e as maiores forças laterais são encontrados com a configuração de “squareback”, considerando que o “fastback” exibe a menor força lateral e os maiores momentos de guinada. A configuração de “notchback” exibe valores intermediários tanto para forças laterais quanto para momentos de guinada. A avaliação do efeito das forças e momentos acima na divergência lateral de um veículo de sua direção desejada torna-se o objetivo básico dos desenvolvimentos de projetos dos veículos atuais.

As forças de sustentação mostradas na FIGURA 48 são de magnitude semelhante as das forças de arrasto. Porém, elas apenas afetam a estabilidade direcional em velocidades acima de 100 km/h, pois em velocidades mais baixas estas forças são pequenas em relação ao peso do veículo e seu efeito contrário atuando nos pneus é pequeno.

No caso de cupês rápidos ou carros esporte, a sustentação deve ser reduzida pela modificação da forma do veículo ou adição de “spoilers” adicionais na dianteira e traseira do veículo. Para aumentar as velocidades máximas de carros de corrida nas curvas, são utilizados “spoilers” ou asas que provocam sustentação negativa, mesmo que isto implique num aumento no arrasto e portanto uma possível velocidade máxima relativamente reduzida.

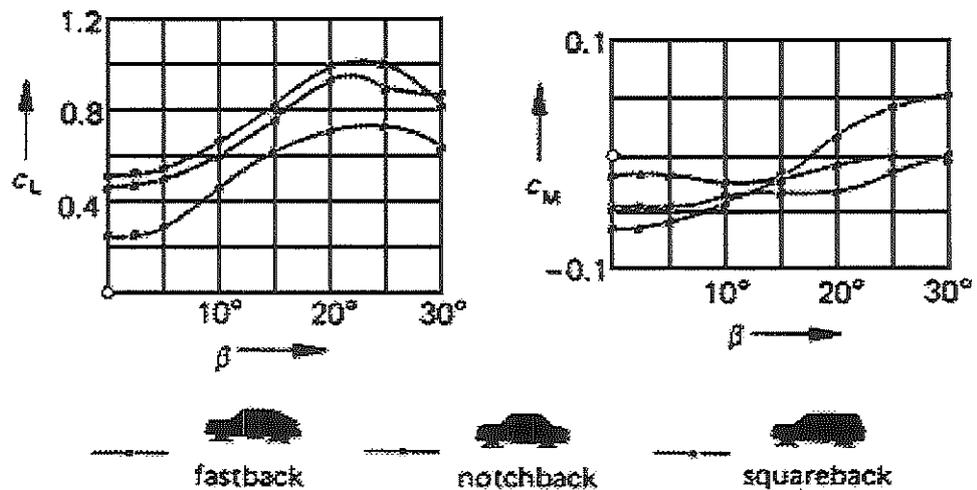


FIGURA 48 – Coeficientes de momento de arfagem e de força de sustentação para veículos com diferentes configurações na forma traseira (HUCHO, 1987).

## 4 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

### 4.1 Introdução

O presente capítulo contém a descrição em detalhes dos procedimentos experimentais adotados, assim como a configuração de ensaios utilizada na realização dos experimentos. O trabalho desenvolvido analisou os efeitos das variações da direção do escoamento incidente sobre um modelo de veículo nas forças aerodinâmicas de arrasto e lateral. Assim utilizou-se um modelo construído em fibra de vidro no Laboratório de Aeronaves, com dimensões e formas padronizadas em escala 1:5. As forças de arrasto e lateral foram medidas através do uso de uma balança aerodinâmica.

Neste trabalho foram efetuados ensaios de visualização, utilizando-se “tufts” para cobrir a superfície do modelo de veículo. A finalidade da adoção deste método de visualização, é observar experimentalmente como o escoamento se comporta numa situação em que sua direção de incidência é alterada, simulando-se as condições de ventos laterais, através de imagens fotográficas.

### 4.2 Túnel de vento

Os ensaios foram realizados em um túnel de vento de circuito aberto do LAE. Os túneis de circuito aberto são também chamados de “Eiffel”, quando a câmara de ensaios é aberta, e N.P.L. quando a câmara de ensaios é fechada. No túnel de vento de circuito aberto tipo N.P.L. utilizado no experimento, o ar entra pelo efusor ou

contração de entrada, passa pela câmara de ensaios, e depois por um difusor onde é descarregado na atmosfera.

O circuito do túnel constitui-se de: efusor, câmara de ensaios, difusor e o ventilador. A geometria varia transversalmente. Hexagonalmente no efusor, câmara de ensaios e difusor, passando a circular na seção do ventilador e posteriormente à uma seção de saída quadrada, como visto na FIGURA 49.

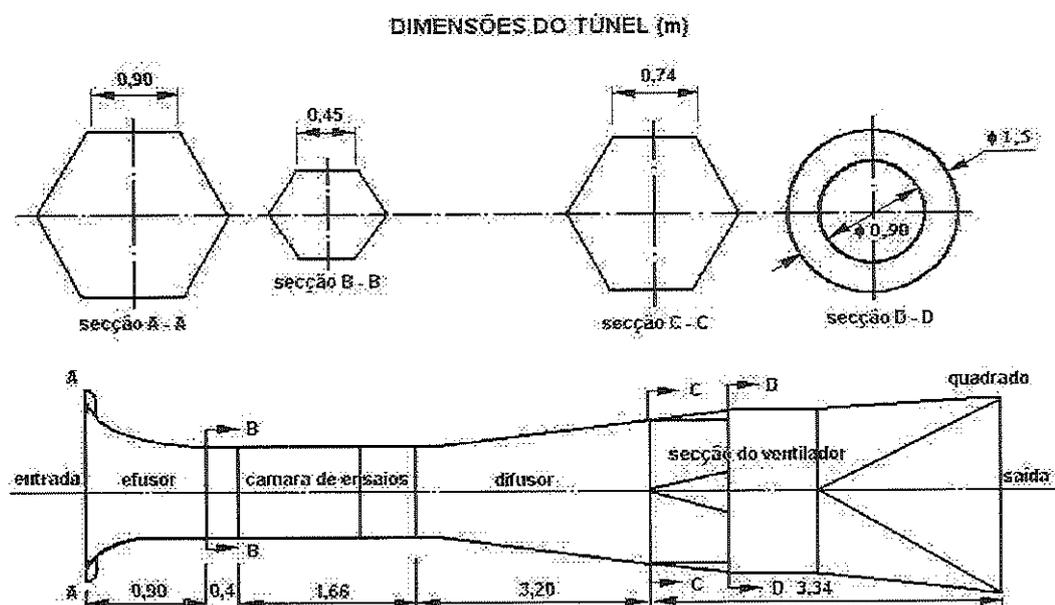


FIGURA 49 – Dimensões gerais do circuito do túnel (CATALANO, 1988).

O túnel permite variar as velocidades na câmara de ensaios de 10 a 70 m/s. No entanto para se evitar excesso de vibrações, durante a realização dos experimentos não ultrapassou-se a velocidade de 34 m/s. Originalmente concebido pelo IPT, na extinta seção de aeronáutica, foi transferido para o Laboratório de Aeronaves somente suas partes principais ( efusor, câmara de ensaio, difusor e ventilador ). Posteriormente o túnel de vento foi reprojetoado e reconstruído nas dependências do laboratório, e calibrado por CATALANO (1998).

O efusor possui 0,90 m de comprimento, a câmara estabilizadora de 0,40 m, a câmara de ensaios de 1,66 m, o difusor de 3,2 m, além da seção do ventilador de 3,38

m. O efusor possui uma seção longitudinal hexagonal com área transversal de entrada  $2,014 \text{ m}^2$  e razão de contração de 1:4. A câmara estabilizadora e a câmara de ensaios possuem área na seção transversal de  $0,526 \text{ m}^2$  com lados de  $0,45 \text{ m}$ . O difusor possui um ângulo de difusão de  $4,7^\circ$  com razão entre as áreas de saída e entrada de 2,70.

A seção do ventilador envolve em seus primeiros  $0,90 \text{ m}$  de comprimento, uma carenagem do ventilador, proporcionando uma razão de contração de 1:26; o restante de seu comprimento envolve um ventilador quadripá de  $1,48 \text{ m}$  de diâmetro, o qual é acionado por um sistema de polia-correia acoplado a um motor de combustão interna oito cilindros em V com  $155 \text{ HP}$  de potência máxima.

Na entrada do efusor estão instaladas quatro telas de "nylon" uniformizadoras com porosidade de 54%, diâmetro do fio de  $4,5 \times 10^{-4} \text{ m}$  e 630 malhas por metro. O túnel descrito acima é mostrado na FIGURA 50.

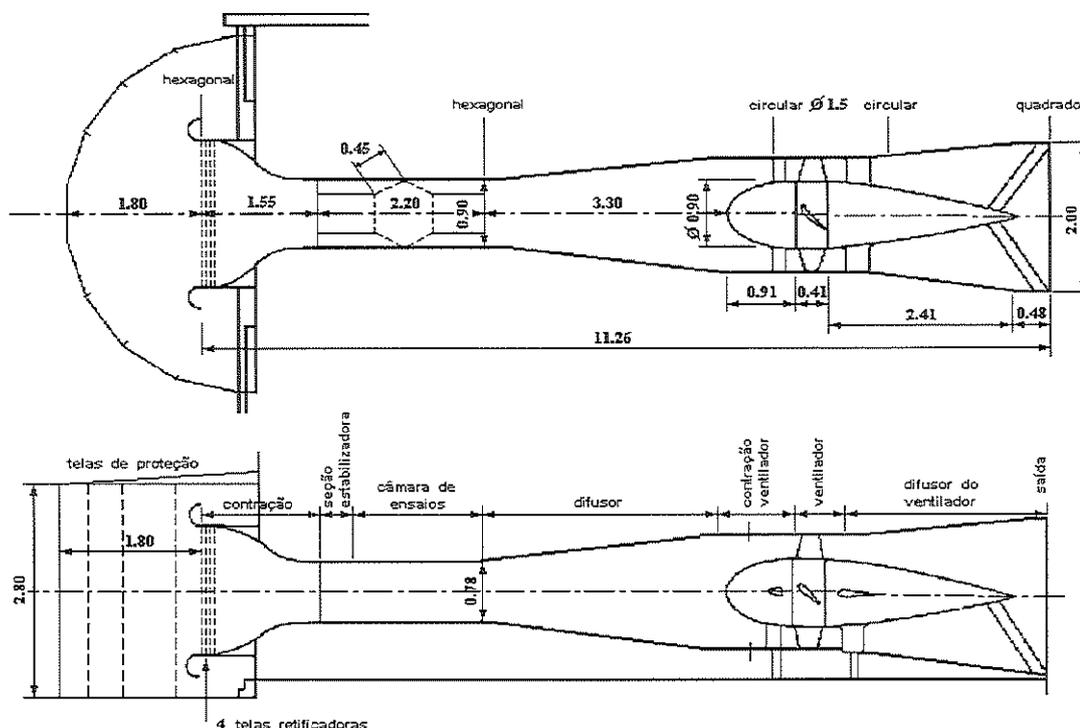


FIGURA 50 – Túnel de vento LAE-01, vista lateral e superior (CATALANO, 1988).

### 4.3 Modelo de veículo utilizado

O experimento foi realizado com um modelo confeccionado em fibra de vidro. Foi construído de forma a produzir um bloqueio de 10% na área de seção transversal da câmara de ensaio do túnel. O modelo é fixado no centro da seção transversal da câmara de ensaio do túnel de vento. As dimensões do modelo são mostradas a seguir, e seu desenho mostrado na FIGURA 51.

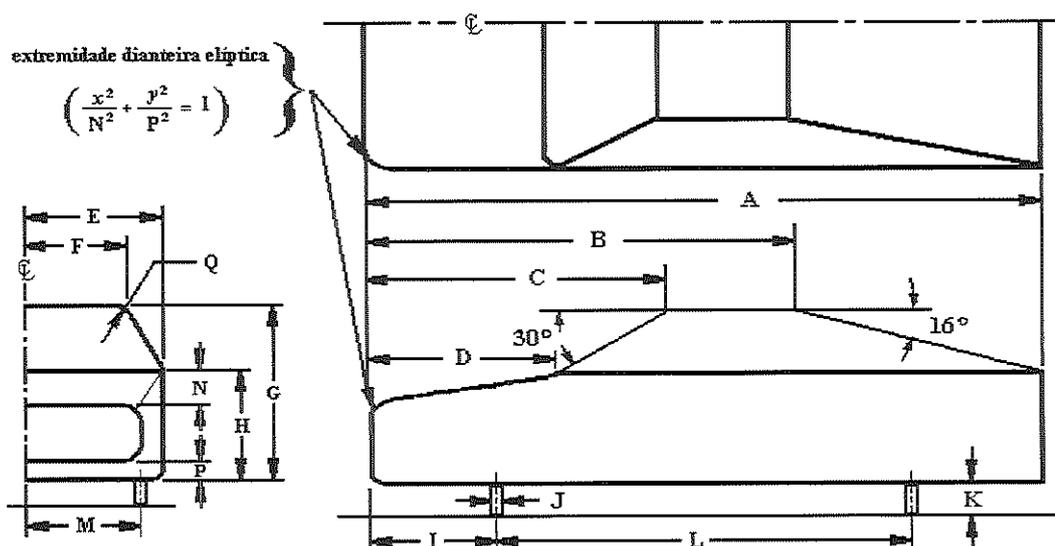


FIGURA 51 – Vista lateral e superior do modelo em fibra de vidro construído no Laboratório de Aeronaves, com as dimensões adotadas para um “fastback”.

Dimensões gerais do modelo fabricado no Laboratório de Aeronaves da Escola de Engenharia de São Carlos:

A ⇒	0.643 m	B ⇒	0.425 m
C ⇒	0.275 m	D ⇒	0.163 m
E ⇒	0.132 m	F ⇒	0.078 m
G ⇒	0.198 m	H ⇒	0.074 m

I $\Rightarrow$ 0.119 m	J $\Rightarrow$ 0.008 m
K $\Rightarrow$ 0.037 m	L $\Rightarrow$ 0.392 m
M $\Rightarrow$ 0.103 m	N $\Rightarrow$ 0.018 m
P $\Rightarrow$ 0.012 m	Q $\Rightarrow$ 0.014 m

Através de um modelo padrão é possível adotar três formas diferentes para traseira do veículo, uma configuração de “squareback”, “fastback” e “notchback”. A configuração adotada para a construção do modelo é a “fastback”, como visto na FIGURA 51. O modelo padrão para as três configurações, da qual se deriva a forma adotada nos experimentos é mostrado na FIGURA 52.

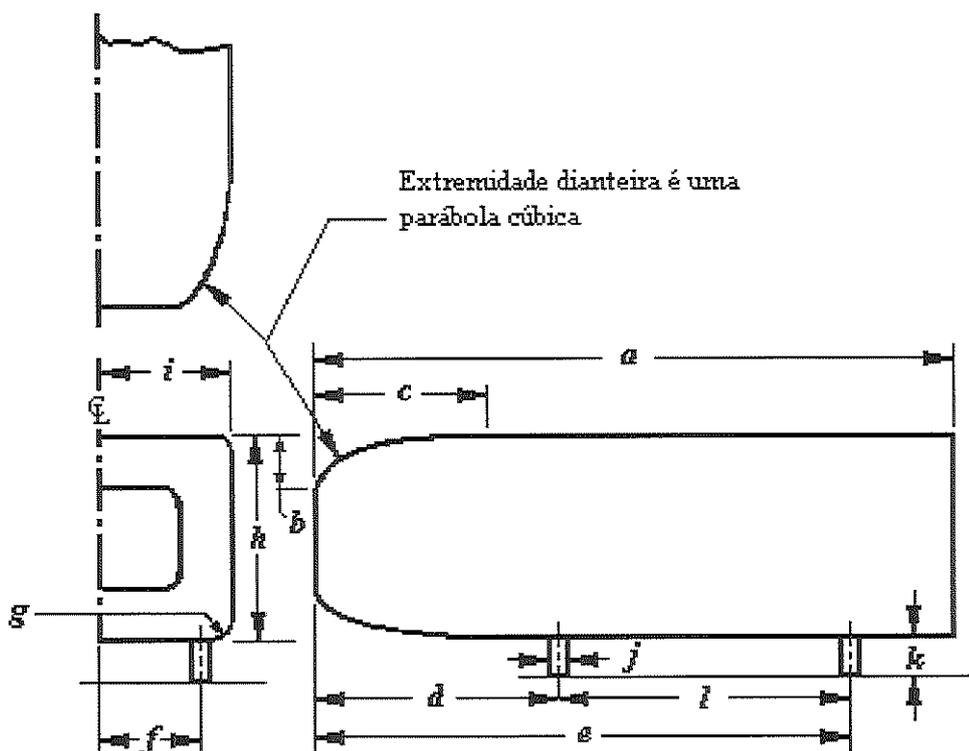


FIGURA 52 – Vista lateral e superior do modelo padrão para as três configurações da parte traseira do veículo.

#### 4.4 Balança aerodinâmica

Para se medir a força de arrasto e a força lateral, utilizou-se uma balança aerodinâmica do LAE, mostrada na FIGURA 53. Segundo MAUNSELL (1977), o princípio básico da balança é o uso de extensômetros para medir o alongamento sofrido num ponto da superfície de cada lâmina, sendo este alongamento proporcional ao esforço que o causou.

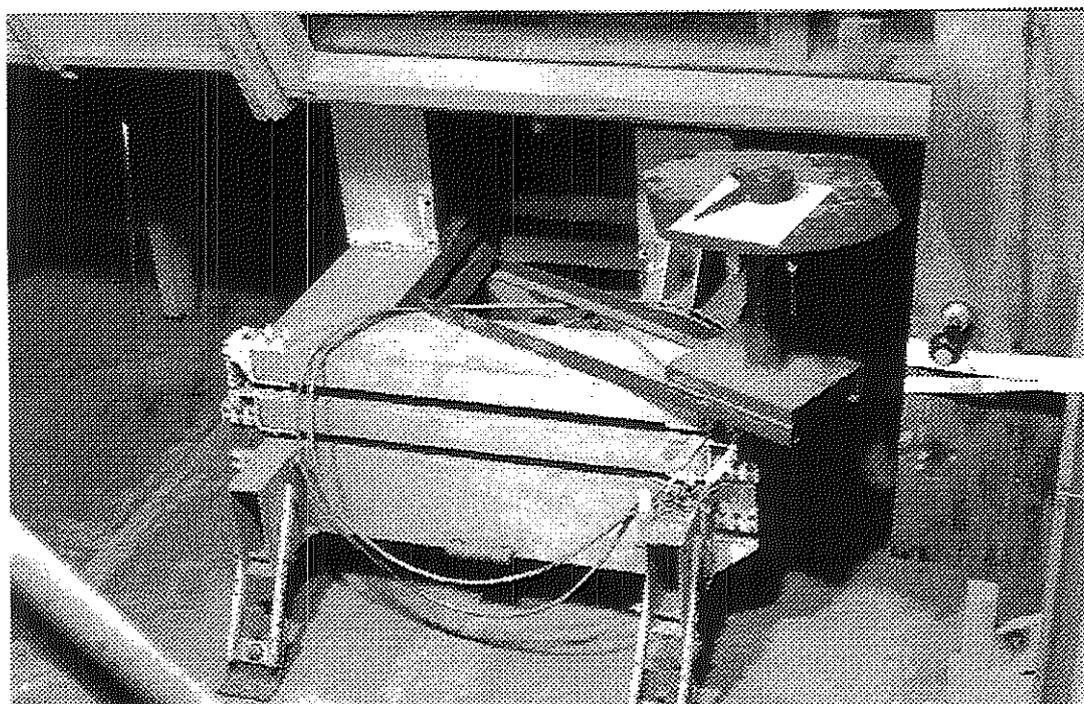


FIGURA 53 – Balança aerodinâmica de resposta rápida do Laboratório de Aeronaves, montada abaixo da seção de ensaios do túnel de vento do LAE.

Ligados à balança estavam um microcomputador e um condicionador de sinais. Assim foi possível obter os dados em milivolts (mv), que eram armazenados no microcomputador. A calibração da balança foi feita variando-se a força aplicada ao modelo. Para isso utilizou-se um sistema de roldanas e um fio amarrado ao modelo. Variando-se o peso foi possível traçar um gráfico força x milivolts, obtendo assim as curvas de calibração.

Os extensômetros são dispositivos elétricos utilizados para obter-se os valores de forças aplicadas em determinadas direções, oferecendo uma grande precisão nas medidas destes esforços. O princípio de funcionamento dos extensômetros baseia-se nas características que os condutores metálicos possuem de alterar sua resistência ao serem comprimidos ou tracionados, provocando variações na corrente elétrica que os atravessa, para uma determinada tensão elétrica fixa.

O circuito básico utilizado para se efetuar as medidas, baseado no descrito acima, se constitui de uma ponte de "Wheatstone" de quatro resistências elétricas ativas, sendo duas delas de extensômetros sob tensão e duas de extensômetros sob compressão, o qual pode ser visto na FIGURA 54.

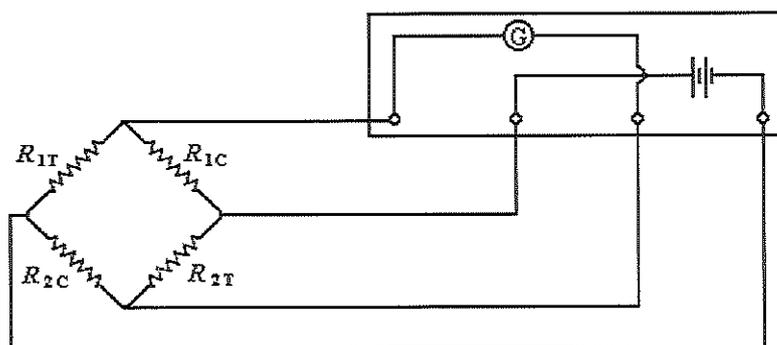


FIGURA 54 – Circuito básico constituído de uma ponte de “Wheatstone”, cujas resistências elétricas ativas são os extensômetros.

Desta maneira, os extensômetros são colados sobre a superfície metálica na estrutura da balança aerodinâmica, a qual sofre deformações devido a tração ou compressão, deformando também os extensômetros que estão sujeitos aos mesmos esforços, e ao mesmo tempo alterando a corrente do circuito, sendo que esta é medida através de um galvanômetro.

Para o aparelho funcionar utilizando o princípio acima descrito, ele deve sofrer esforços que causem alongamentos dentro do limite de escoamento do material da lâmina, sendo necessário verificar que o esforço máximo, qualquer que seja a sua

direção, não ultrapasse o limite elástico do material. Variações na temperatura podem provocar alterações na leitura, pois o fio metálico do circuito também se dilata ou contrai com a variação da temperatura.

Cada lâmina tem um extensômetro colado em cada lado, de modo que a flexão da lâmina provoca a tensão de um e a compressão do outro. Através deste arranjo conseguiu-se o autobalanceamento dos extensômetros e a anulação do efeito da temperatura. Portanto, emprega-se os extensômetros aos pares, em lados opostos na mesma seção. Na instrumentação usada nos experimentos, o galvanômetro fornece a leitura direta, sendo utilizado durante os ensaios um aparelho amplificador HBM - AE 3407-A.

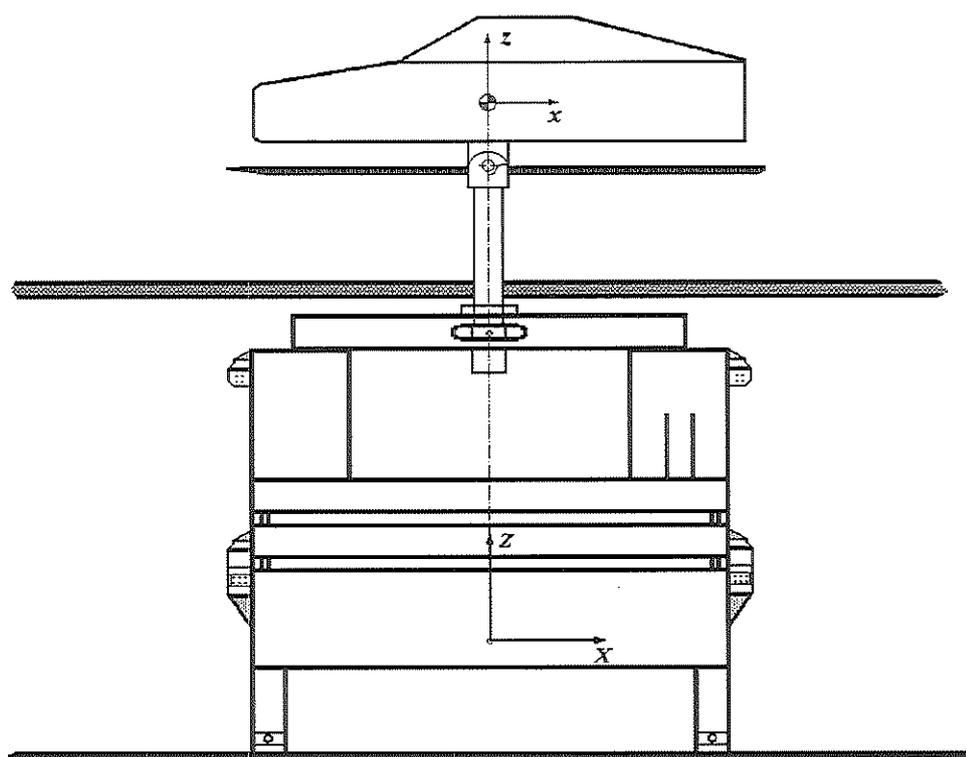


FIGURA 55 – Sistema de coordenadas  $OXYZ$  fixo na balança aerodinâmica, e sistema  $Oxyz$  localizado no c.g. do modelo de veículo.

Após toda a configuração experimental estar montada, um procedimento de calibração é determinado para o conjunto envolvendo a balança aerodinâmica, haste

de sustentação e modelo de veículo em escala 1:5. A calibração é realizada aplicando-se forças nas direções e sentidos das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral, que estarão atuando sobre o veículo durante os experimentos. Desta maneira, as forças são aplicadas num ponto da superfície do modelo, correspondente à direção e sentido da força aerodinâmica resultante que atua numa direção relativa ao sistema de coordenadas fixo na balança aerodinâmica, como visto na FIGURA 55.

A simulação da força de arrasto foi realizada pela aplicação de uma força variável, num ponto da superfície traseira do modelo. A direção desta força está contida no mesmo plano do eixo longitudinal do túnel de vento, e conseqüentemente do eixo longitudinal do modelo de veículo.

Em relação ao sistema de coordenadas fixo na balança aerodinâmica  $OXYZ$ , o ponto de aplicação da força possui coordenada 0 no eixo  $Y$ , e para o sistema de coordenadas fixo no modelo em escala  $Oxyz$ , este ponto possui coordenada em  $z$  correspondente à posição da força de arrasto resultante sobre o modelo, e no eixo  $x$  coincidente com a extremidade traseira do modelo de veículo, FIGURA 56.

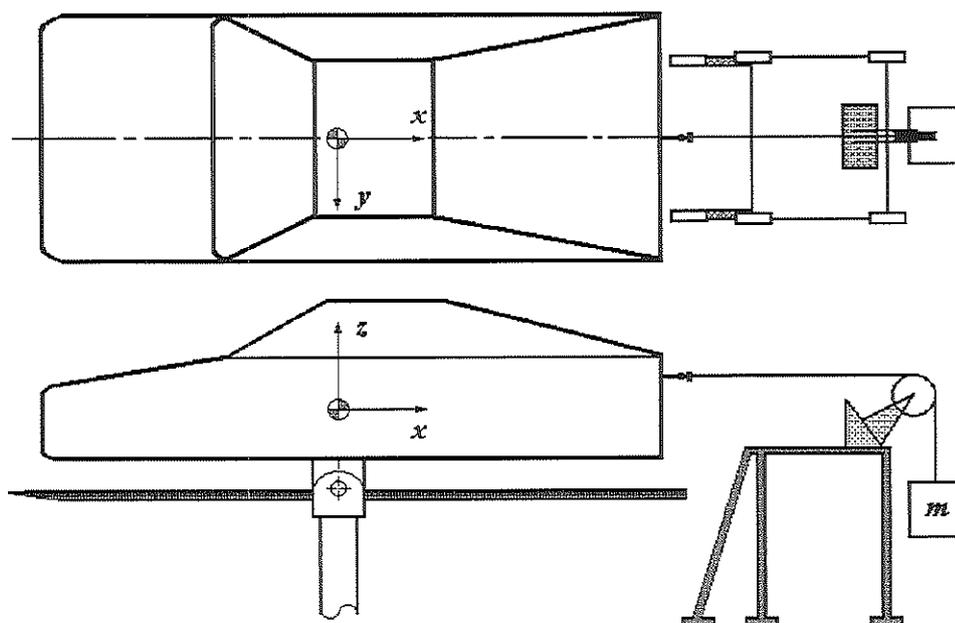


FIGURA 56 – Procedimento experimental utilizado para calibração da força aerodinâmica de arrasto.

Estas forças são aplicadas sobre o modelo fixado numa posição em que os eixos longitudinais do modelo e do túnel de vento são coincidentes. A variação da intensidade da força aplicada sobre o modelo de veículo, é feita através da mudança de uma força peso utilizada para simular a força de arrasto resultante, de acordo com o esquema mostrado na FIGURA 56.

Para realizar-se a calibração da força lateral, o procedimento é o mesmo adotado para a força de arrasto. O ponto de aplicação da força sobre o modelo, neste caso é sobre a superfície lateral do modelo de veículo em escala 1:5. A direção desta força está localizada no plano  $YZ$  referente ao sistema de coordenadas  $OXYZ$  fixo na balança aerodinâmica, e coincidente com o plano  $yz$  do referencial  $Oxyz$  no c.g. do modelo de veículo. Portanto esta força é aplicada numa direção perpendicular ao eixo longitudinal do túnel de vento, FIGURA 57.

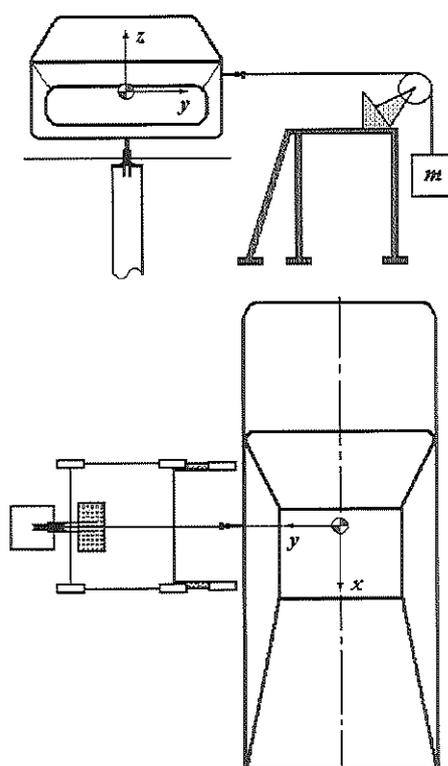


FIGURA 57 – Procedimento experimental utilizado para calibração da força aerodinâmica lateral.

Referente ao sistema de coordenadas localizado na balança aerodinâmica, esta força possui coordenada 0 no eixo  $X$ , no ponto sobre a superfície do modelo onde a força é aplicada. Em relação ao eixo  $z$ , do referencial fixo no modelo de veículo, este ponto possui coordenada coincidente com a da força lateral aerodinâmica resultante, e no eixo  $y$  do mesmo sistema de coordenadas, o ponto tem coordenada correspondente a metade da largura do modelo de veículo.

A força variável aplicada sobre o modelo, durante as simulações é sempre perpendicular ao eixo longitudinal do modelo de veículo. A aplicação da força, tanto para o caso da força de arrasto, quanto para a força lateral, é feita através de um fio de aço ligado ao ponto de aplicação sobre a superfície do modelo, em uma das extremidades, e à massas conhecidas na outra ponta, como pode ser visto nas FIGURAS 56 e 57.

É utilizado um procedimento padrão para a variação da intensidade da força aplicada sobre o modelo, onde as massas são alteradas de maneira padronizada, e a leitura efetuada no aparelho amplificador HBM - AE 3407-A. As sucessivas combinações das massas em gramas, utilizadas nas simulações das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral no modelo, são mostradas a seguir, juntamente com as leituras registradas em volts, nas TABELAS 01 e 02 respectivamente.

TABELA 01 – Sinais em volts registrados nos ensaios para calibração do canal de arrasto no modelo, com a seqüência de massas utilizadas.

<b>Calibração do Canal de Arrasto</b>		
Massa (g)	Canal 0 (V)	Canal 1 (V)
0.00	0.0000	0.0000
198.23	-0.2411	-0.0011
454.99	-0.5325	-0.0062
652.20	-0.7721	-0.0064
827.43	-0.9811	-0.0092
1077.83	-1.2457	-0.0093
1328.42	-1.5201	-0.0100
1579.49	-1.8085	-0.0150

Na calibração do canal de arrasto, as medidas do canal 0 são correspondentes as forças aplicadas na direção  $X$ , e as do canal 1 são referentes às interferências na direção  $Y$  do sistema de coordenadas  $OXYZ$  da balança aerodinâmica. Pela FIGURA 58 a influência do canal 1, como interferência no canal 0 deve ser desprezada, pois não é significativa.

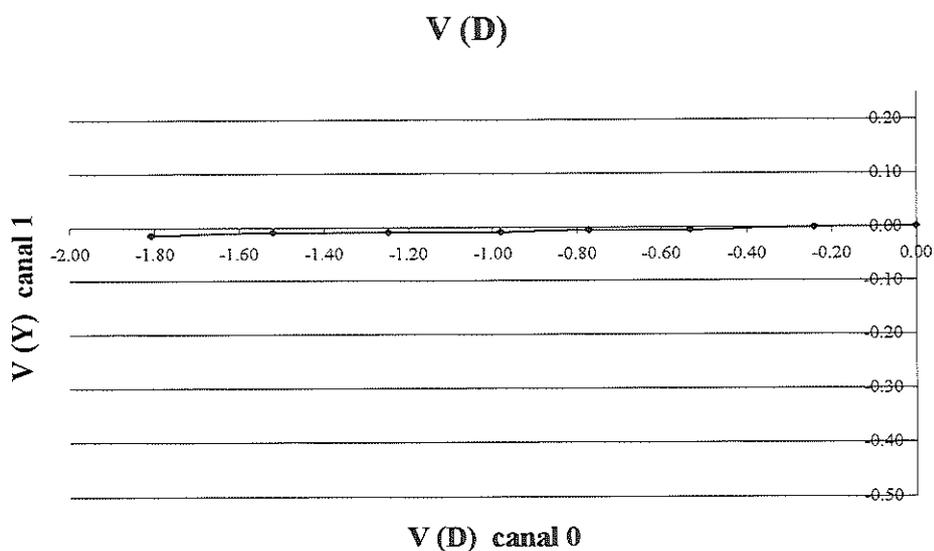


FIGURA 58 – Variação do canal 1 em função do canal 0 na calibração da força de arrasto sobre o modelo.

TABELA 02 – Sinais em volts registrados nos ensaios para calibração do canal de força lateral no modelo, com a seqüência de massas utilizadas.

<b>Calibração do Canal de Força Lateral</b>		
Massa (g)	Canal 1 (V)	Canal 0 (V)
0.00	0.0000	0.0000
198.23	-0.1226	-0.0014
454.99	-0.2794	-0.0054
652.20	-0.3996	-0.0075
827.43	-0.4996	-0.0141
1077.83	-0.6294	-0.0154
1328.42	-0.7798	-0.0239
1579.49	-0.9404	-0.0289

Para calibração do canal de força lateral, as medidas do canal 1 correspondem as forças aplicadas na direção  $Y$ , e as do canal 0 estão relacionadas às interferências na direção  $X$  do sistema de coordenadas  $OXYZ$  na balança aerodinâmica. De maneira semelhante ao caso da calibração da força de arrasto, na calibração da força lateral a interferência do canal 0, influenciando o canal 1 é desprezível, e portanto não deve ser considerada, FIGURA 59.

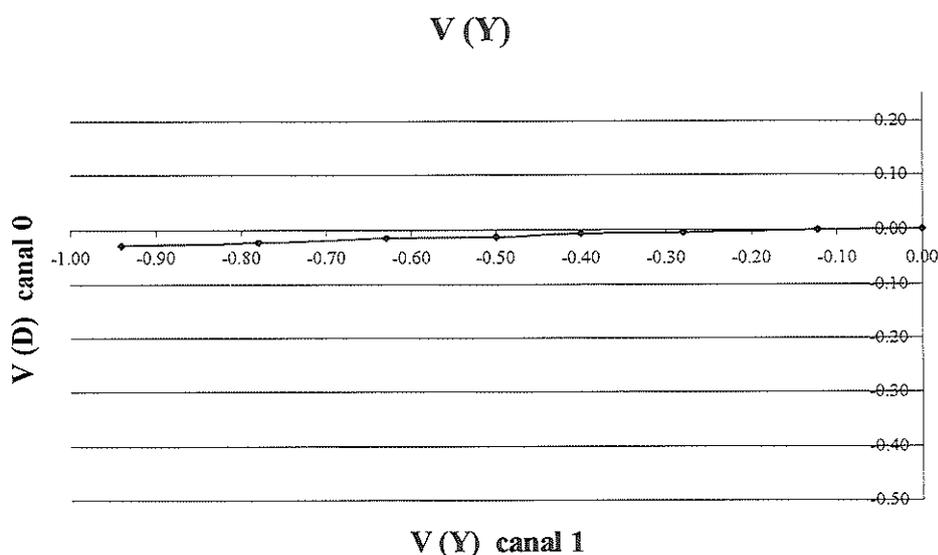


FIGURA 59 – Variação do canal 0 em função do canal 1 na calibração da força lateral atuante no modelo.

Na medição das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral, utilizando-se a configuração adotada nos experimentos, é levado em consideração a força de arrasto produzida pela haste de sustentação do modelo. Como na parte superior desta haste existe uma placa para articulação do movimento de arfagem do modelo, a superfície desta placa gera uma força lateral aerodinâmica, que também é levada em consideração nos cálculos da força lateral resultante. Sendo assim, é realizado o mesmo procedimento experimental de calibração apenas para haste de sustentação do modelo. As seqüências de massas em gramas, utilizadas nas simulações das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral na haste, são mostradas a seguir, com os correspondentes valores registrados em volts para as forças simuladas de arrasto e lateral, nas TABELAS 03 e 04 respectivamente.

TABELA 03 – Valores registrados em volts nos ensaios para calibração do canal de arrasto na haste, com as sucessivas massas utilizadas.

Calibração do Canal de Arrasto		
Massa (g)	Canal 0 (V)	Canal 1 (V)
0.00	0.000	0.0000
100.23	-0.521	-0.0129
299.99	-1.567	-0.0140
547.20	-2.881	-0.0178
796.86	-4.140	-0.0191
1047.26	-5.404	-0.0195
1297.85	-6.633	-0.0248
1548.92	-7.903	-0.0270

Em relação a calibração do canal de arrasto para haste, como no caso do modelo, as medidas do canal 0 são correspondentes as forças aplicadas na direção  $X$ , e as do canal 1 são referentes às interferências na direção  $Y$  do sistema de coordenadas  $OXYZ$  na balança aerodinâmica. Pela FIGURA 60 a interferência do canal 1 na resposta do canal 0 deve ser desprezada, pois não é significativa.

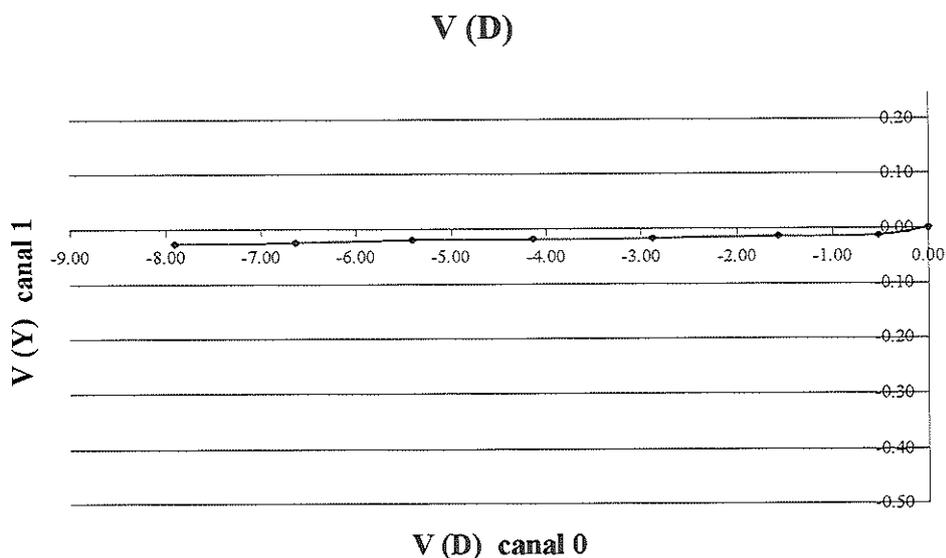


FIGURA 60 – Variação do canal 1 em função do canal 0 na calibração da força de arrasto sobre o modelo.

TABELA 04 – Valores registrados em volts nos ensaios para calibração do canal de força lateral na haste, com as sucessivas massas utilizadas.

Calibração do Canal de Força Lateral		
Massa (g)	Canal 1 (V)	Canal 0 (V)
0.00	0.0000	0.0000
100.23	-0.0212	-0.0067
299.99	-0.0590	-0.0228
547.20	-0.1098	-0.0280
796.86	-0.1611	-0.0284
1047.26	-0.2126	-0.0294
1297.85	-0.2671	-0.0299
1548.92	-0.3264	-0.0509

No procedimento de calibração do canal da força lateral na haste, do mesmo modo que no caso do modelo, as medidas do canal 1 correspondem as forças aplicadas na direção  $Y$ , e as do canal 0 estão relacionadas às interferências na direção  $X$  do sistema de coordenadas  $OXYZ$  da balança aerodinâmica. Da mesma forma que na calibração do canal de força lateral no modelo, a interferência do canal 0 no sinal do canal 1 é desprezível, e portanto não deve ser considerada, FIGURA 59.

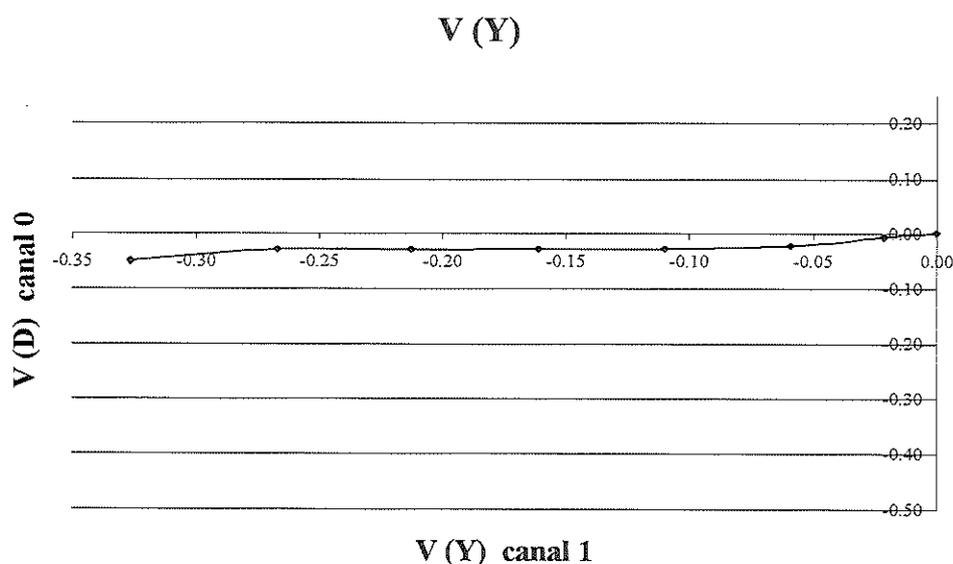


FIGURA 61 – Variação do canal 0 em função do canal 1 na calibração da força lateral atuante no modelo.

#### 4.5 Configuração de ensaio adotada para a movimentação do modelo

O mudança de posição de um modelo em escala 1:5, para simulações de ventos laterais num túnel de vento, é o método utilizado nos ensaios para a determinação da influência da mudança de direção do escoamento incidente sobre o veículo, nas forças aerodinâmicas de arrasto e lateral. Dentro deste método os ensaios são realizados com uma configuração de modelo estacionário convencional para cada ângulo de ataque lateral  $\beta$ , onde o modelo permanece numa posição fixa e um escoamento de ar axial passa sobre sua superfície.

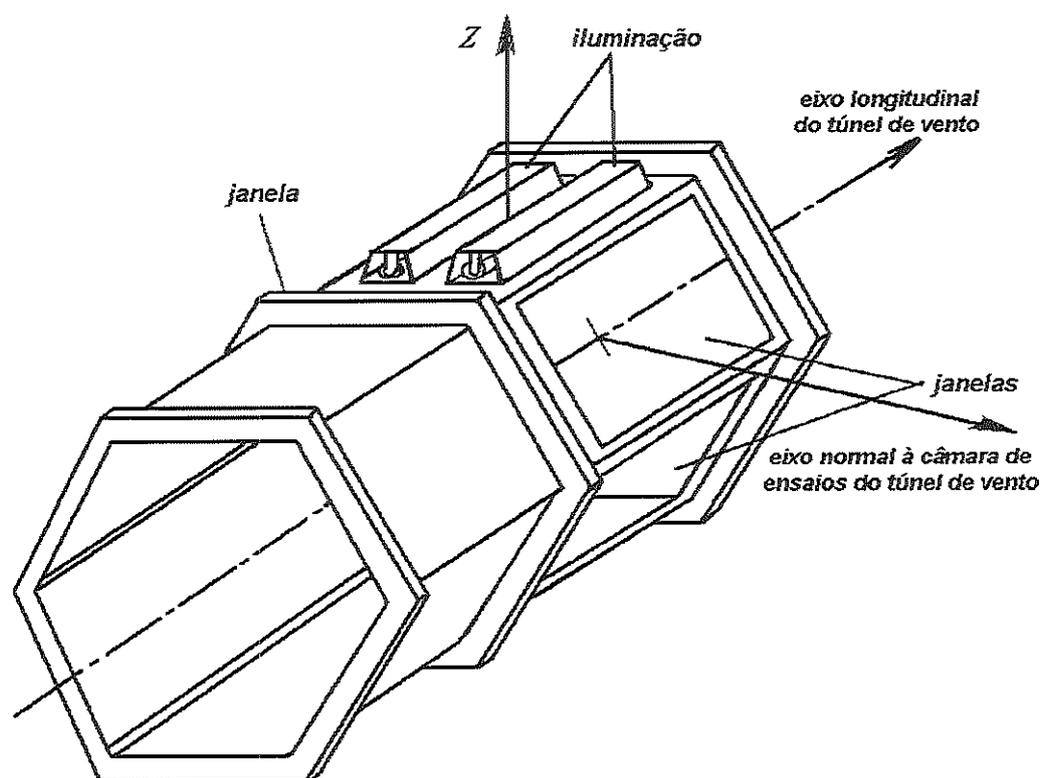


FIGURA 62 – Câmara de ensaios do túnel de vento do LAE, as direções dos eixos paralelos aos eixos  $X$  e  $Y$  do sistema de coordenadas  $OXYZ$  da balança aerodinâmica, e o eixo  $Z$  coincidente com o eixo perpendicular ao piso do túnel.

As medidas registradas no aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em volts, correspondem as forças atuantes em direções coincidentes com o eixo longitudinal do túnel de vento, e com uma direção normal ao eixo longitudinal na seção de ensaios, FIGURA 62. Estas direções estão relacionadas ao sistema de coordenadas  $OXYZ$  fixo na balança aerodinâmica. Desta maneira, as forças calculadas que são derivadas das medidas obtidas da balança aerodinâmica, são referentes ao sistema  $OXYZ$ , nas direções  $X$  e  $Y$ .

As forças aerodinâmicas de arrasto e lateral são determinadas através da mudança do sistema de coordenadas das forças axial  $A$  e normal  $N$  no sistema de coordenadas  $OXYZ$ , para o sistema de coordenadas  $oxyz$  fixo no c.g. do veículo, de acordo com a FIGURA 63.

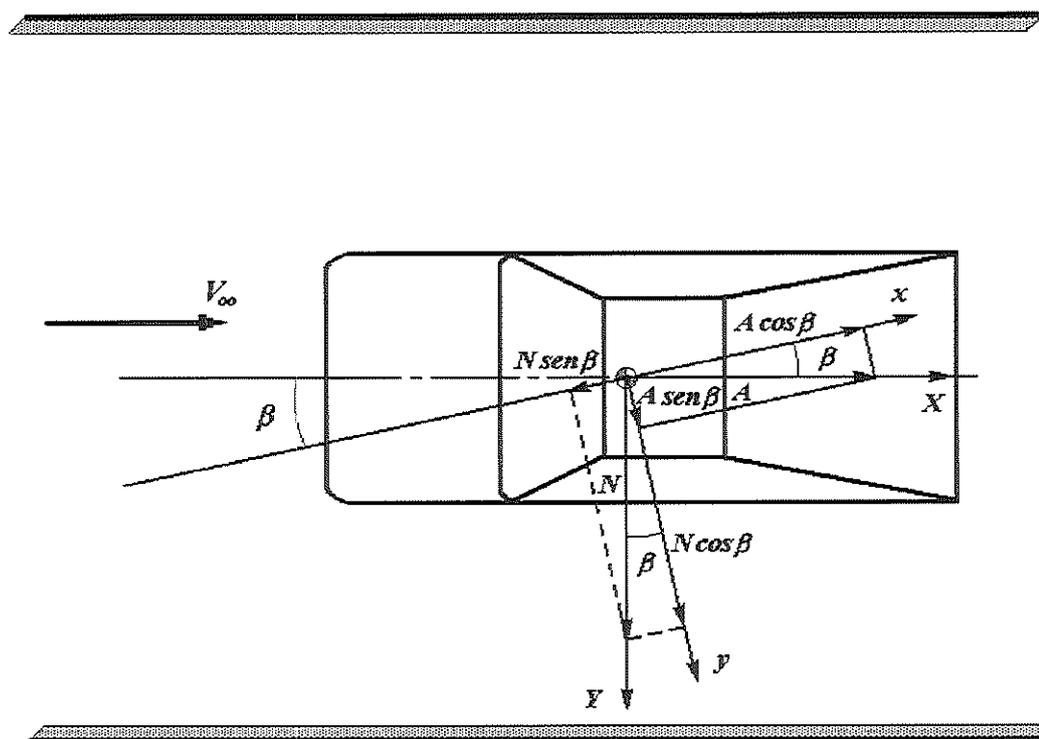


FIGURA 63 – Rotação fornecida ao modelo dentro da câmara de ensaios do túnel de vento, e o movimento do sistema de coordenadas  $oxyz$  localizado no c.g. do veículo.

O plano de medidas  $xy$  do sistema de coordenadas  $oxyz$  é paralelo ao plano  $XY$ , no sistema de coordenadas  $OXYZ$  da balança aerodinâmica. A mudança do sistema de coordenadas é feita por meio da rotação do sistema  $oxyz$ , num giro correspondente ao ângulo de incidência do escoamento sobre a superfície do modelo, ou seja, ângulo de ataque lateral  $\beta$ , como mostrado na FIGURA 63, e portanto a força de arrasto é determinada pela seguinte expressão:

$$D = A \cos \beta - N \sin \beta \quad (44)$$

e a força lateral aerodinâmica por:

$$Y = A \sin \beta + N \cos \beta \quad (45)$$

A movimentação do modelo de veículo dentro da câmara de ensaios é feita utilizando-se um dispositivo mecânico localizado na parte superior da balança aerodinâmica, e ao lado do piso do túnel de vento, que é mostrado na FIGURA 64. Este dispositivo é acoplado na base do eixo de sustentação do modelo através de duas hastes articuladas.

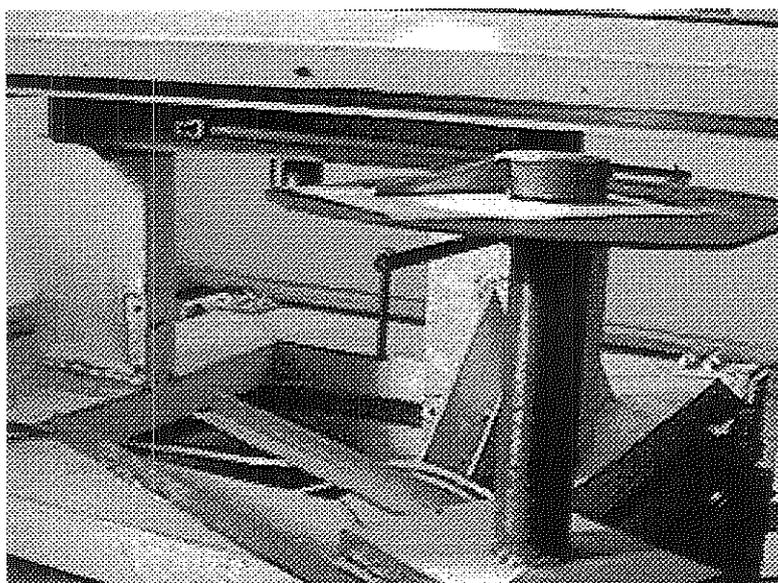


FIGURA 64 – Dispositivo de giro do modelo em torno de sua haste de sustentação.

Este dispositivo consiste de uma placa, na qual em sua superfície superior encontra-se uma escala graduada em graus de  $-30^{\circ}$  até  $30^{\circ}$ . Na posição de  $0^{\circ}$ , o sistema determina uma posição onde o eixos longitudinais do modelo e do túnel de vento são coincidentes. No centro da placa existe um ponteiro metálico preso num eixo fixo, sendo que ao girar a placa em torno deste eixo, pode-se determinar o ângulo que o modelo rotaciona dentro da câmara de ensaios do túnel de vento, como mostrado na FIGURA 65.

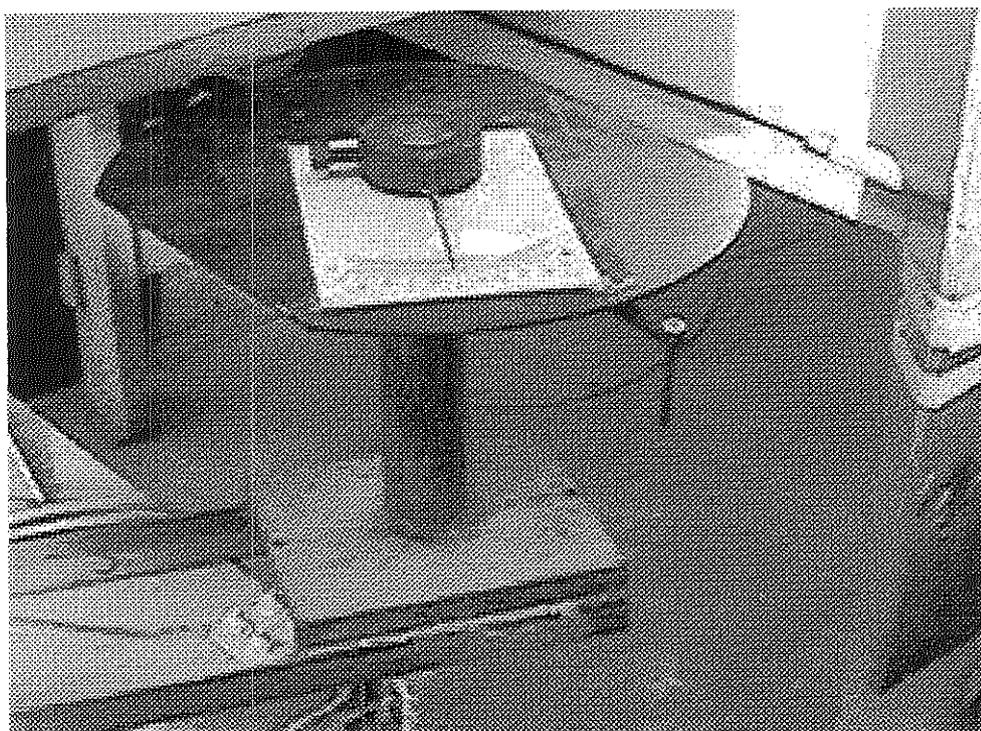


FIGURA 65 – Escala graduada e ponteiro utilizados para determinar o posicionamento do modelo dentro da câmara de ensaios do túnel de vento.

#### **4.6 Configuração da simulação do piso**

Os testes no modelo em escala 1:5 são conduzidos com configuração de piso plano fixo, acima do piso do túnel de vento. A placa construída para simulação do piso da rodovia é fixada logo abaixo da superfície inferior do modelo de veículo, e

seu perfil permite simular o efeito do desenvolvimento da camada limite do escoamento na parte inferior do modelo. A distância estabelecida entre a superfície inferior do modelo e a placa é o “ground clearance”  $e$ . A distância adotada entre a superfície inferior do modelo em escala 1:5 e a placa de simulação do piso da rodovia, deve levar em consideração o fato de que uma proximidade da placa e esta superfície do modelo pode provocar uma interferência da camada limite do piso na distribuição do escoamento sobre a superfície do modelo.

Para as dimensões adotadas no modelo em escala 1:5, uma distância menor que 0.025 m ocasionaria uma interferência da camada limite do piso simulado (“ground board”, uma placa em condições estáticas) na camada limite desenvolvida ao longo da superfície inferior do modelo. Assim para a realização dos experimentos foi adotada uma distância  $e = 0.037$  m. A configuração experimental para simulação do piso é mostrada na FIGURA 66.

“Ground clearance”:  $e = 0.037m$

Distância da placa ao piso do túnel:  $h = 0.216m$

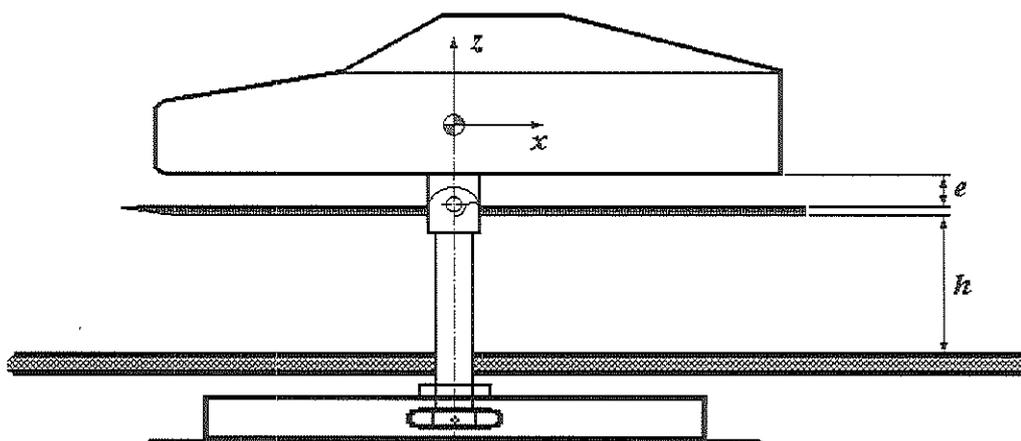


FIGURA 66 – Vista da placa utilizada para simulação do piso da rodovia nos ensaios experimentais, e as dimensões de posicionamento desta placa.

#### 4.7 Monitoramento da pressão

Os ensaios foram realizados num túnel de vento de circuito aberto, onde o escoamento apresenta certas variações devido a influência de ventos externos. Portanto o escoamento no interior do túnel apresenta mudanças na pressão dinâmica, e torna-se importante averiguar a pressão dinâmica a cada levantamento dos dados. Para o monitoramento do valor da pressão dinâmica utilizou-se um manômetro do tipo “Betz”. Este manômetro possibilita uma leitura com precisão de 0.05 mm de água da pressão no interior do túnel. Este manômetro pode ser visto na FIGURA 67.

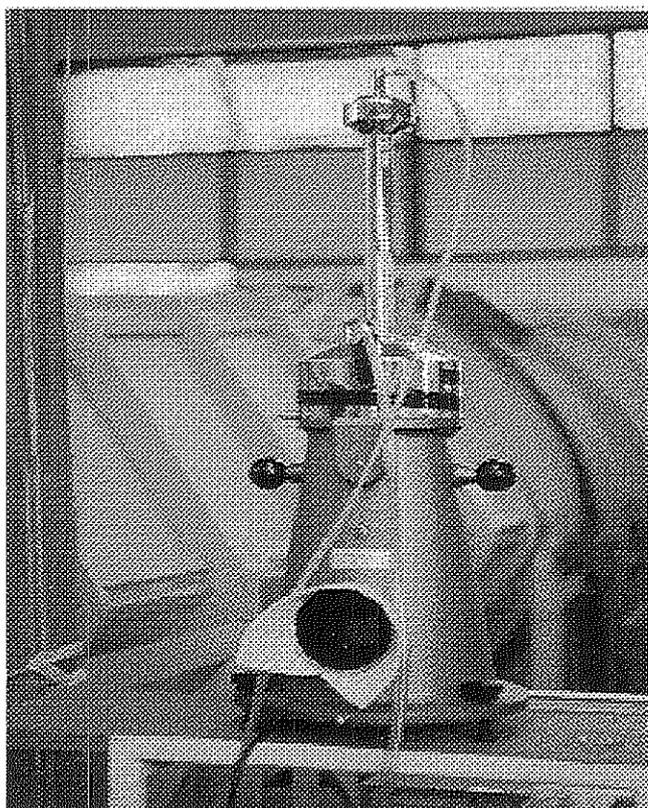


FIGURA 67 – Manômetro do tipo “Betz” utilizado durante os experimentos.

Para a obtenção da pressão dinâmica utilizou-se acoplado ao manômetro um tubo “Pitot” estático, o qual foi posicionado na seção de entrada da câmara de

ensaios, numa distância de 150 mm do teto. O tubo “Pitot” estático é mostrado na FIGURA 68.

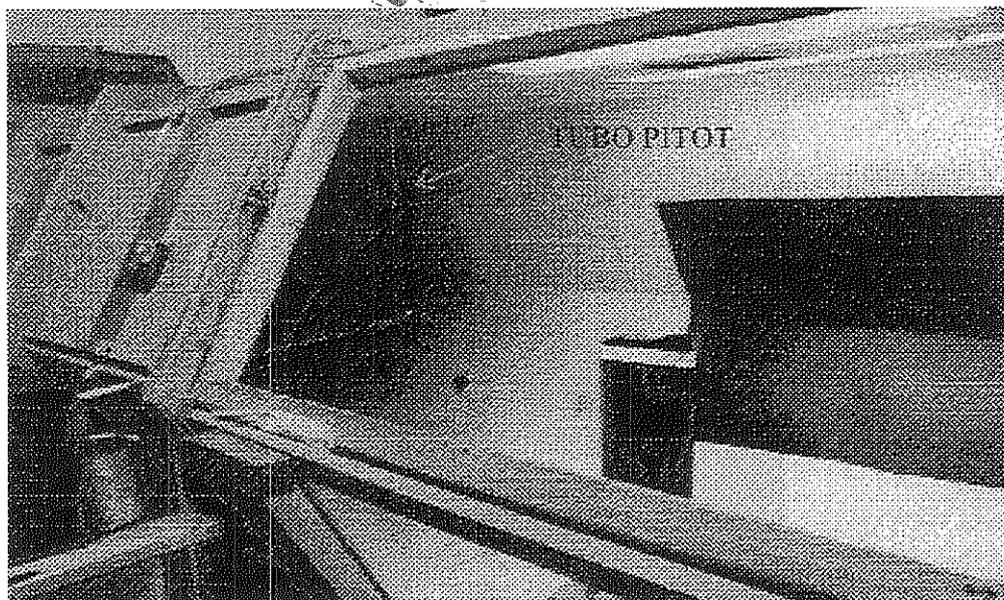


FIGURA 68 – Tubo “Pitot” estático dentro do túnel de vento (COIMBRA, 1997).

#### **4.8 Configuração experimental utilizada nos ensaios de visualização**

Foram realizados ensaios com a finalidade de visualizar o escoamento sobre a superfície do modelo de veículo, e observar os descolamentos da camada limite nas superfícies laterais, no teto e na superfície inclinada do modelo “fastback”. A observação da formação dos vórtices laterais é possível através do método de visualização adotado, devido ao posicionamento dos “tufts”, como na FIGURA 69.

Os ensaios de visualização são realizados no interior da câmara de ensaios do túnel de vento, mostrada na FIGURA 70, e as posições dos “tufts” são fotografadas, revelando as variações ocorridas na direção do escoamento sobre a superfície do modelo.

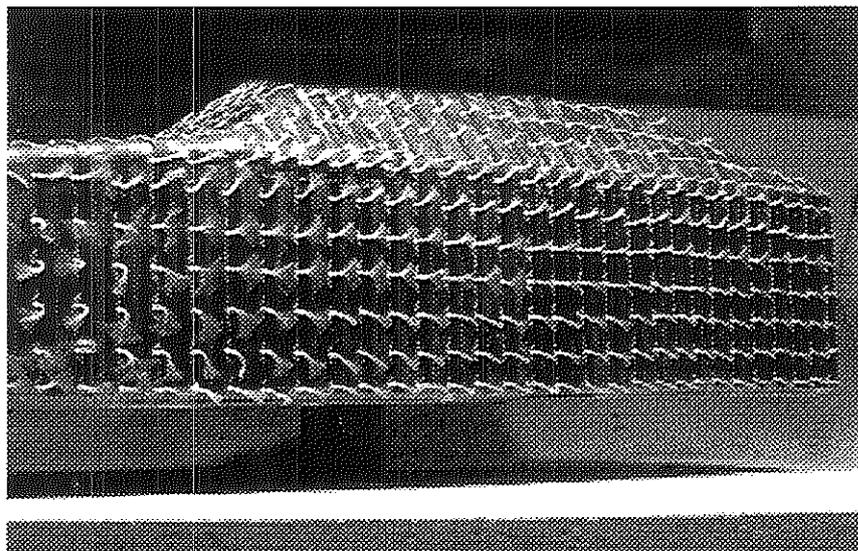


FIGURA 69 – Movimento dos “tufts” devido ao escoamento em alta velocidade sobre a superfície do modelo.

O modelo é posicionado dentro da câmara de ensaios, em três diferentes ângulos de ataque. Os ensaios são realizados com  $\alpha = -3^\circ$ ,  $\alpha = 0^\circ$  e  $\alpha = 4^\circ$ . Os testes são desenvolvidos com a variação do ângulo de ataque lateral, utilizando-se em posições fixas  $\beta = 0^\circ$ ,  $\beta = 5^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$ ,  $\beta = 15^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$  e  $\beta = -20^\circ$ .



FIGURA 70 – Posicionamento do modelo no interior da câmara de ensaios, para realização dos ensaios de visualização.

Ao lado do túnel de vento, é montado um sistema de iluminação para auxiliar o registro fotográfico do posicionamentos dos “tufts”, como pode ser visto na FIGURA 71.

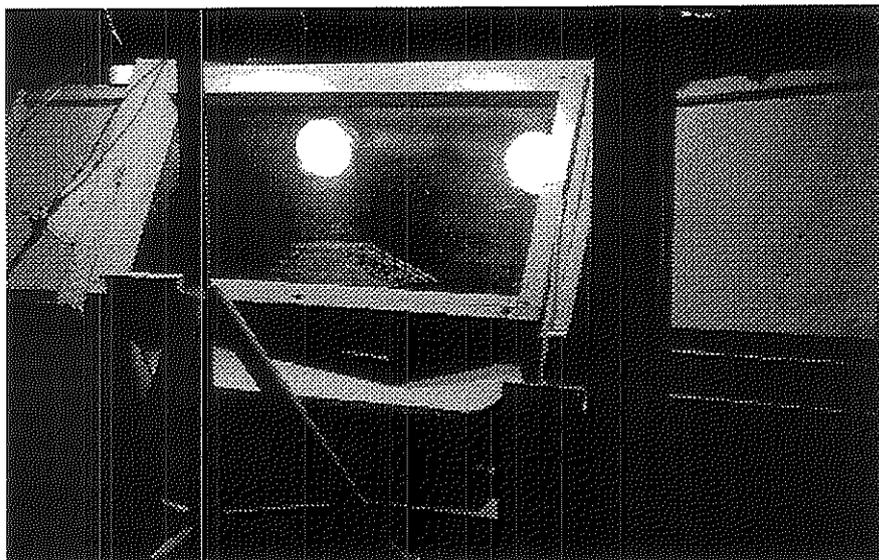


FIGURA 71 – Sistema de iluminação instalado ao lado do túnel de vento.

#### 4.9 Correções devido ao bloqueio sólido tridimensional

Um aumento da espessura da camada limite na câmara de ensaios ao longo de seu comprimento, provoca uma diminuição da área efetiva do escoamento e um conseqüente aumento da velocidade axial acompanhada por um decréscimo gradual da pressão estática. Um corpo colocado numa câmara de ensaios fechada está sujeito a um escoamento que está acelerando na direção axial. O aumento da velocidade observado quando da presença do modelo e da estrutura na câmara de ensaios, é chamado bloqueio sólido. Seu efeito é função da espessura do modelo, de sua distribuição de espessura e de suas dimensões. É conveniente expressar o bloqueio em termos de um fator  $\varepsilon_S$  definido pela equação (46):

$$V_L = V_R(1 + \varepsilon_S) \quad (46)$$

onde  $V_L$  é a velocidade do escoamento livre, e  $V_R$  é a velocidade medida não corrigida.

O fator  $\varepsilon_S$  pode ser determinado para um corpo de revolução, segundo CATALANO (1988), pela equação (47):

$$\varepsilon_S = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \tau_{(3)} \left( 1 + 0,4 \frac{t}{c} \right) \frac{V}{c^{3/2}} \quad (47)$$

onde:

$$V = \text{volume do modelo} = 0,02742 \text{ m}^3$$

$$t = \text{espessura máxima do modelo} = 0,201 \text{ m}$$

$$c = \text{comprimento do modelo ao longo de seu eixo longitudinal} = 0,642 \text{ m}$$

$\tau_{(3)}$  = fator dependente da forma da seção de ensaios, e segundo CATALANO (1988), para um túnel com seção de ensaios hexagonal, seu valor é 0,771

$$\varepsilon_S = \frac{\sqrt{\pi}}{2} * 0,771 * \left( 1 + 0,4 * \frac{0,201}{0,642} \right) * \frac{0,02742}{0,642^{3/2}}$$

Portanto, efetuando-se o cálculo acima, obtém-se:

$$\varepsilon_S = 0,04098$$

e a velocidade do escoamento livre deve ser corrigida por:

$$V_L = 1,04098 V_R$$

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Introdução

Os resultados obtidos nos ensaios aerodinâmicos são apresentados neste capítulo, na forma de gráficos para a variação dos coeficientes das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral, em função da mudança dos ângulos de ataque  $\alpha$  e de ataque lateral  $\beta$ . As tabelas contidas neste capítulo, apresentam os valores das velocidades do fluxo durante a realização dos experimentos, e os valores calculados das forças aerodinâmicas de arrasto e lateral.

A discussão dos resultados apresentados avalia os dados experimentais obtidos nos ensaios na forma de gráficos, os quais são analisados comparando-se as variações correspondentes às mudanças da direção do escoamento incidente sobre a superfície do modelo.

### 5.2 Apresentação dos resultados

Os valores corrigidos da velocidade do fluxo medido no interior da câmara de ensaios do túnel de vento, são apresentados nas TABELAS 05 à 15. As velocidades são corrigidas pela relação  $V_L = 1,04098V_R$ .

As tabelas apresentam as forças aerodinâmicas de arrasto e lateral, atuantes nas direções  $x$  e  $y$ , do sistema de coordenadas,  $Oxyz$  fixo no c.g. do modelo de veículo.

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = -5^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 24^\circ\text{C} = 297\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91500\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 32.91\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,072\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1267 \times 10^3$$

TABELA 05 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = -5^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	582.53	32.65	10.592	0.000
1	588.40	32.82	10.794	0.193
2	596.23	33.04	10.835	0.932
3	591.34	32.90	10.991	1.184
4	594.28	32.98	11.113	2.302
5	595.26	33.01	11.666	2.359
6	600.15	33.14	12.268	3.425
7	598.19	33.09	13.097	4.586
8	596.23	33.04	13.553	6.109
9	593.30	32.95	13.995	7.872
10	592.32	32.93	14.767	8.999
11	593.30	32.95	15.410	10.290
12	591.34	32.90	16.609	12.136
13	590.36	32.87	16.720	12.934
14	588.40	32.82	16.992	15.444
15	598.19	33.09	17.972	16.845
16	591.34	32.90	18.371	18.408
17	589.38	32.85	19.432	20.378
18	591.34	32.90	20.125	22.256
19	583.51	32.68	20.124	23.474
20	583.51	32.68	21.072	25.237

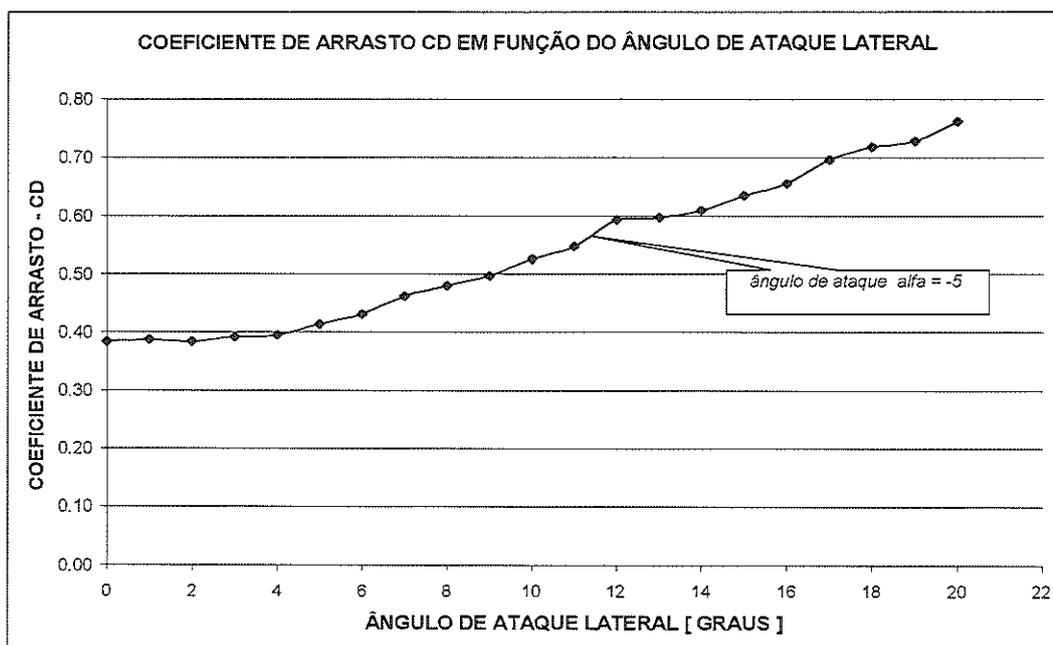


FIGURA 72 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -5^\circ$ .

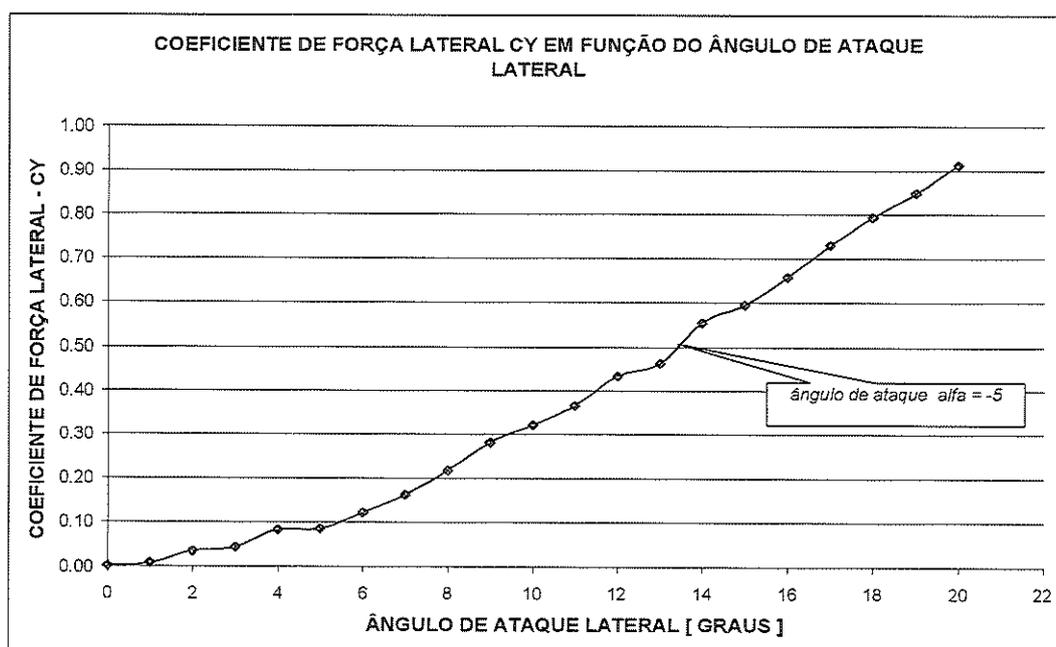


FIGURA 73 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -5^\circ$ .



**Ângulo de ataque:**  $\alpha = -4^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 26^\circ\text{C} = 299\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91200\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.41\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{\text{atm}}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,062\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1275 \times 10^3$$

TABELA 06 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = -4^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	602.11	33.20	11.060	0.000
1	608.96	33.39	11.266	0.415
2	612.88	33.49	11.293	0.948
3	612.88	33.49	11.573	1.925
4	617.77	33.63	11.838	2.287
5	614.84	33.55	12.227	3.353
6	612.88	33.49	12.884	4.636
7	617.77	33.63	13.704	5.709
8	614.84	33.55	14.093	6.969
9	615.81	33.57	15.101	8.382
10	612.88	33.49	15.367	10.245
11	613.86	33.52	15.969	11.509
12	609.94	33.41	16.917	13.671
13	613.86	33.52	17.407	14.872
14	617.77	33.63	18.589	16.659
15	611.90	33.47	18.952	17.980
16	602.11	33.20	19.536	20.048
17	603.09	33.23	20.754	22.129
18	598.19	33.09	20.499	23.193
19	599.17	33.12	21.295	25.816
20	593.30	32.95	21.865	27.231

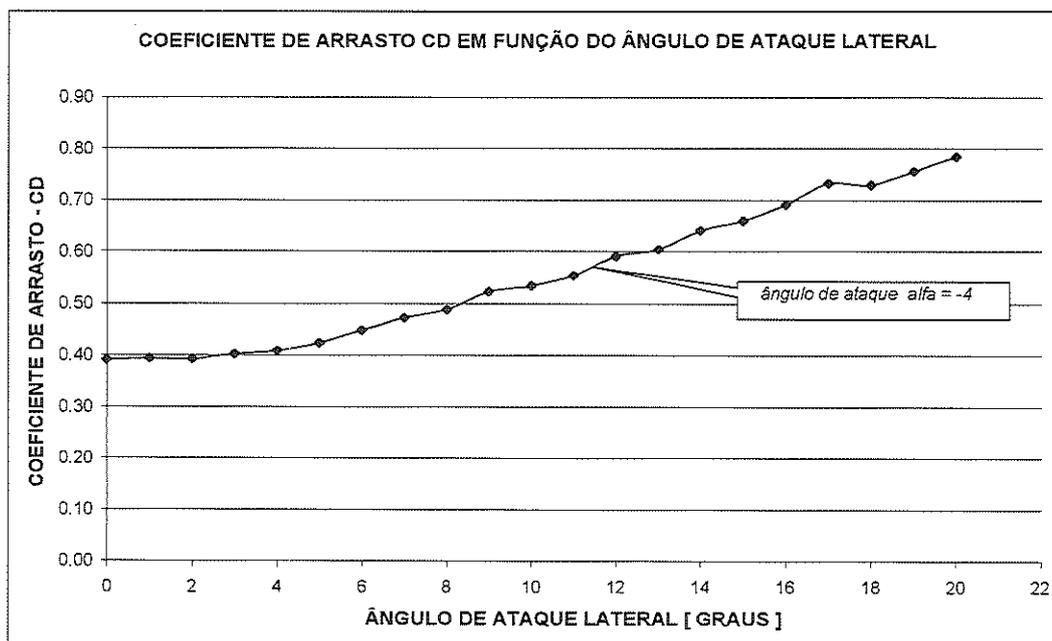


FIGURA 74 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -4^\circ$ .

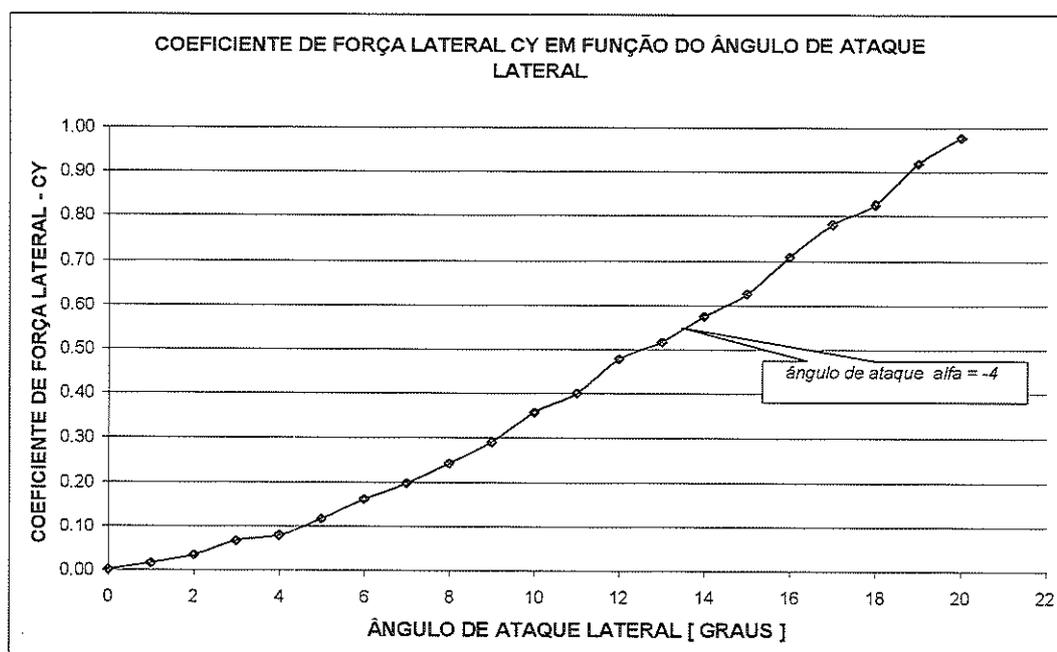


FIGURA 75 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -4^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = -3^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91800\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.44\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,072\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1288_x10^3$$

TABELA 07 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = -3^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	611.90	33.47	11.578	0.000
1	612.88	33.49	11.577	0.586
2	608.96	33.39	11.890	1.630
3	616.79	33.60	12.037	2.165
4	617.77	33.63	12.279	2.682
5	613.86	33.52	12.282	3.607
6	609.94	33.41	12.896	4.604
7	606.02	33.31	13.772	6.133
8	619.73	33.68	14.294	7.614
9	615.81	33.57	14.407	8.907
10	610.92	33.44	15.129	10.522
11	612.88	33.49	15.749	11.887
12	611.90	33.47	16.924	13.757
13	609.94	33.41	17.180	15.210
14	616.79	33.60	17.874	17.383
15	613.86	33.52	18.256	18.409
16	606.02	33.31	18.869	20.372
17	609.94	33.41	19.732	22.127
18	597.21	33.06	19.646	23.125
19	600.15	33.14	20.527	24.940
20	602.11	33.20	21.141	26.563

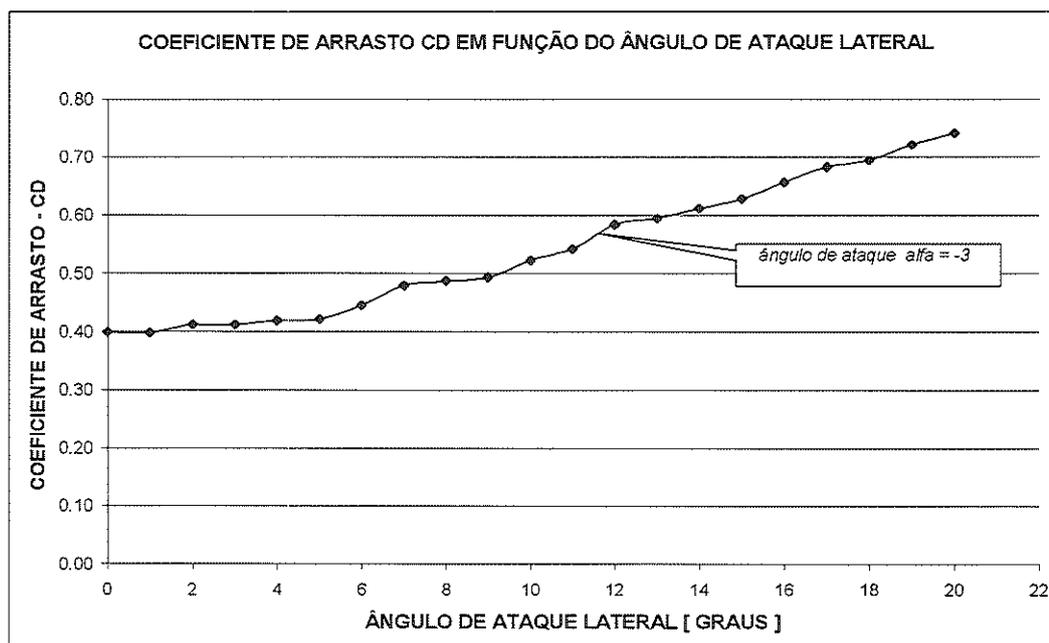


FIGURA 76 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -3^\circ$ .

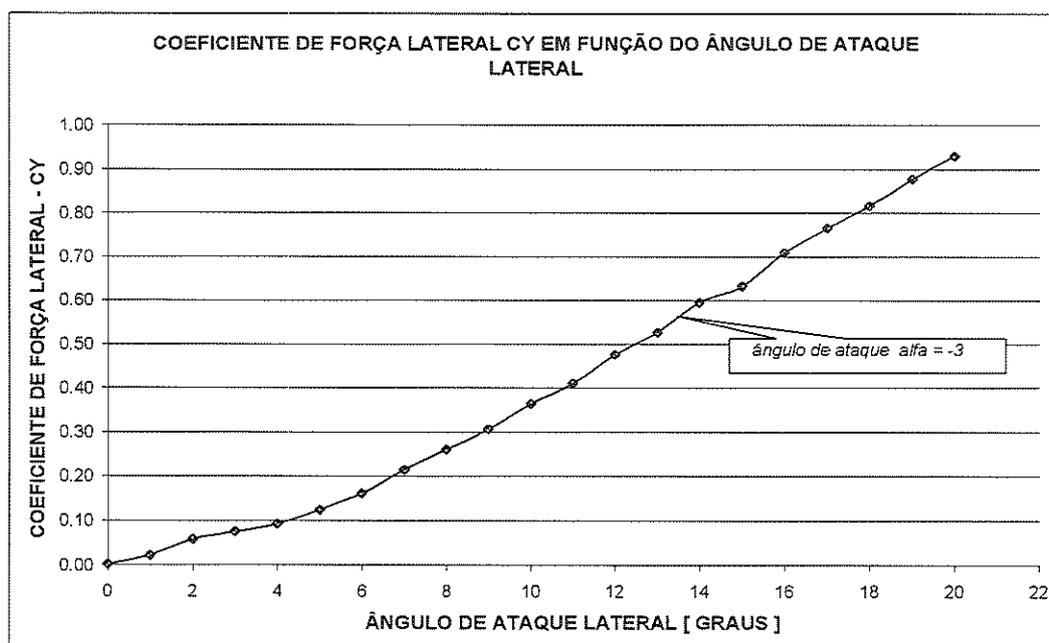


FIGURA 77 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -3^\circ$ .

$$\hat{\text{Ângulo de ataque:}} \quad \alpha = -2^\circ$$

Condições do ensaio:

$$\text{Temperatura ambiente:} \quad T = 26^\circ\text{C} = 299\text{ K}$$

$$\text{Pressão atmosférica:} \quad P = 91200\text{ N/m}^2$$

$$\text{Velocidade do fluxo média:} \quad V_\infty = 33.65\text{ m/s}$$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,062\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1284_x10^3$$

TABELA 08 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = -2^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	608.96	33.39	10.244	0.000
1	610.92	33.44	10.522	0.204
2	619.73	33.68	10.507	1.301
3	623.65	33.79	10.613	1.412
4	622.67	33.76	10.653	2.419
5	613.86	33.52	11.402	2.452
6	622.67	33.76	11.848	3.846
7	626.58	33.87	12.438	4.655
8	625.61	33.84	12.839	6.125
9	628.54	33.92	13.524	7.480
10	629.52	33.95	14.193	9.367
11	621.69	33.73	14.508	11.057
12	620.71	33.71	15.516	12.698
13	630.50	33.97	16.371	14.447
14	613.86	33.52	16.261	15.704
15	617.77	33.63	17.179	17.573
16	617.77	33.63	17.843	19.665
17	612.88	33.49	18.720	21.662
18	610.92	33.44	18.709	22.872
19	605.05	33.28	19.584	25.226
20	605.05	33.28	20.221	26.878

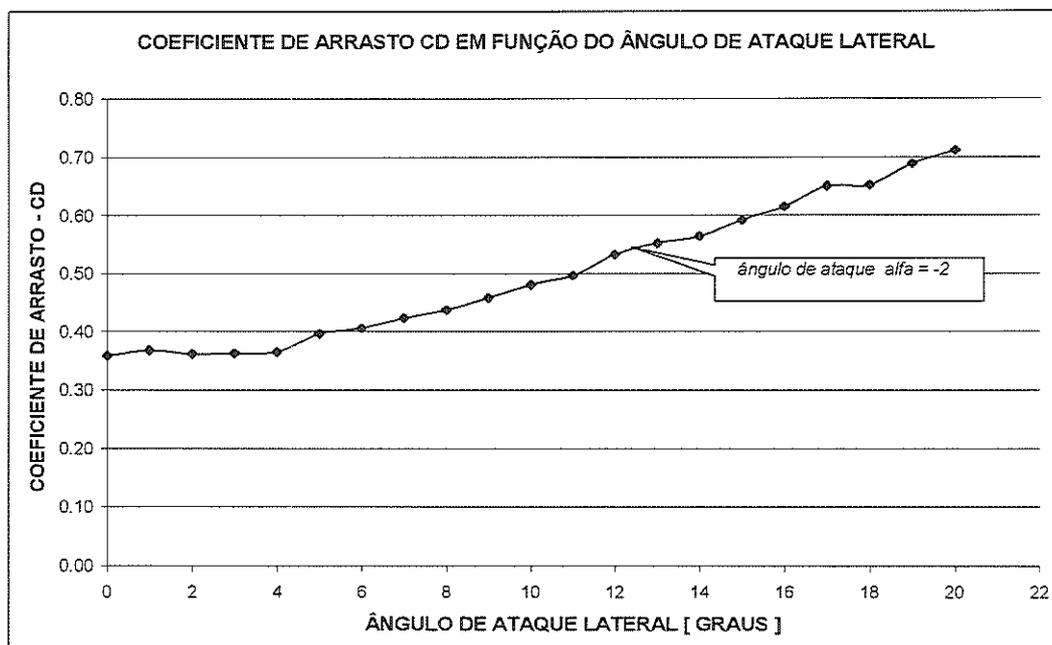


FIGURA 78 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -2^\circ$ .

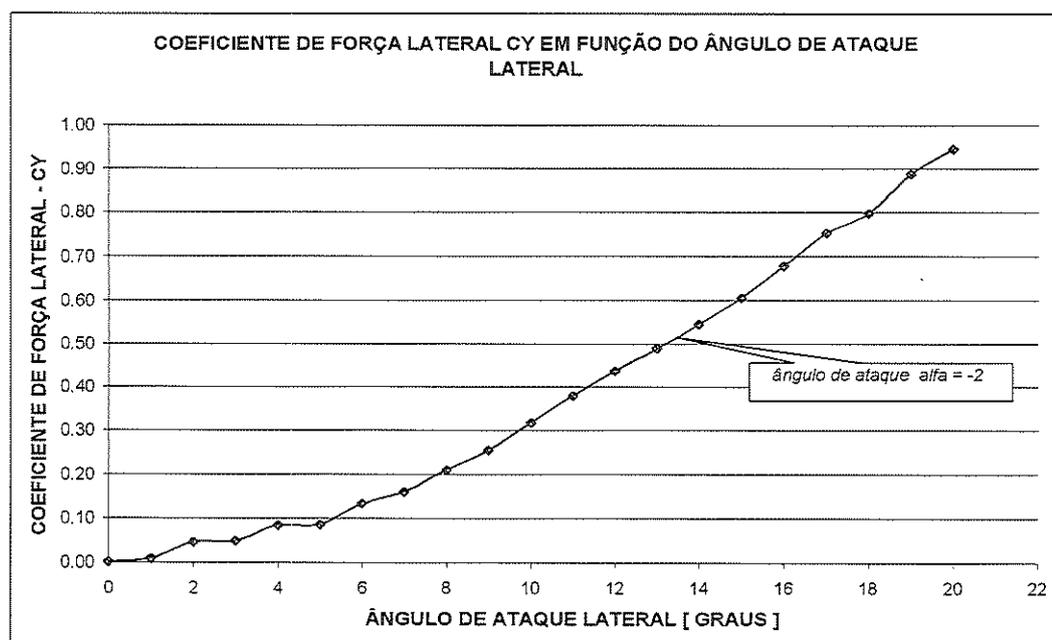


FIGURA 79 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -2^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = -1^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 27^\circ\text{C} = 300\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91100\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.43\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,057\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1269 \times 10^3$$

TABELA 09 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = -1^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	621.69	33.73	11.799	0.000
1	619.73	33.68	11.814	0.656
2	612.88	33.49	12.071	0.826
3	613.86	33.52	12.021	1.651
4	614.84	33.55	12.058	1.938
5	618.75	33.65	12.290	2.729
6	618.75	33.65	12.700	4.351
7	611.90	33.47	13.023	5.326
8	616.79	33.60	13.743	7.136
9	608.96	33.39	14.375	8.568
10	612.88	33.49	14.460	9.666
11	617.77	33.63	15.505	11.318
12	617.77	33.63	16.236	12.581
13	611.90	33.47	16.603	14.313
14	613.86	33.52	17.108	15.575
15	607.00	33.33	17.817	17.522
16	600.15	33.14	18.159	19.086
17	599.17	33.12	18.638	20.446
18	598.19	33.09	18.905	22.901
19	593.30	32.95	19.724	24.140
20	588.40	32.82	20.671	26.216

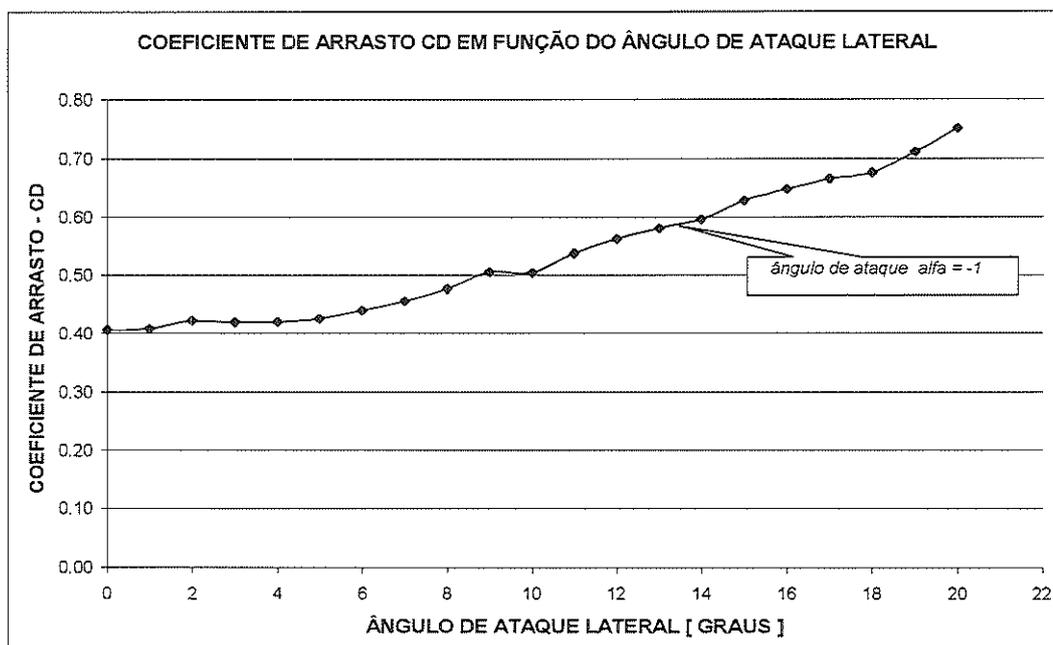


FIGURA 80 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -1^\circ$ .

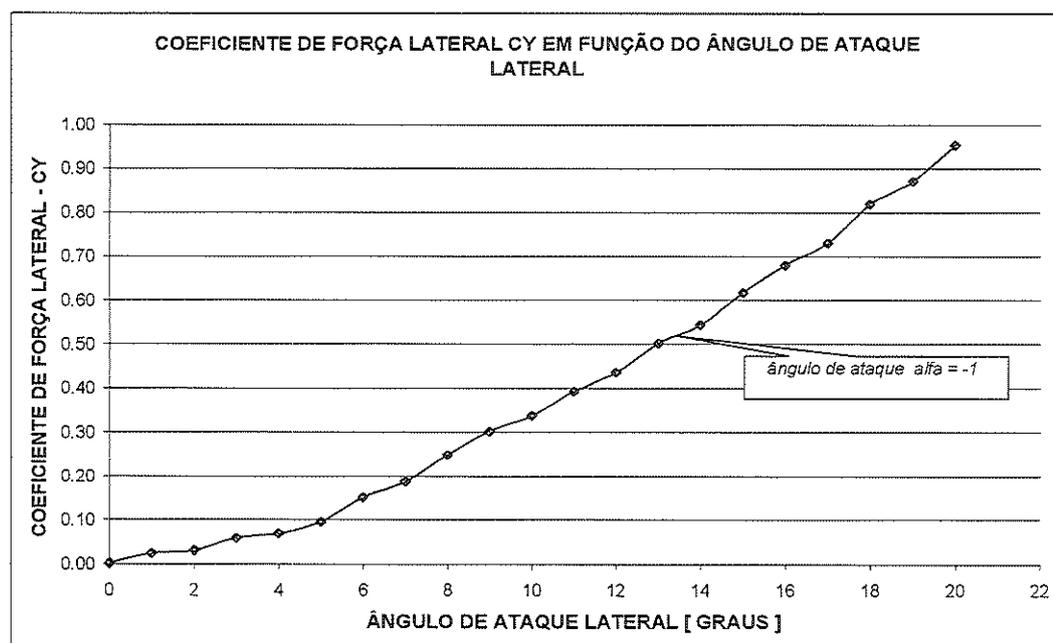


FIGURA 81 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = -1^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = 0^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 26^\circ\text{C} = 299\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91400\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.39\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,064\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1276 \times 10^3$$

TABELA 10 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 0^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	613.86	33.52	11.663	0.000
1	612.88	33.49	12.029	0.495
2	622.67	33.76	12.064	0.793
3	621.69	33.73	12.116	1.623
4	625.61	33.84	12.263	1.935
5	621.69	33.73	12.451	3.041
6	614.84	33.55	12.377	3.686
7	609.94	33.41	12.588	5.039
8	615.81	33.57	13.224	6.496
9	608.96	33.39	13.846	7.781
10	606.02	33.31	14.511	8.987
11	608.96	33.39	14.901	11.352
12	601.13	33.17	15.256	12.575
13	607.98	33.36	16.648	14.154
14	618.75	33.65	16.547	15.367
15	607.98	33.36	17.413	16.798
16	604.07	33.25	18.017	19.303
17	599.17	33.12	18.313	20.640
18	596.23	33.04	18.880	22.320
19	585.46	32.74	19.320	23.826
20	587.42	32.79	20.009	25.747

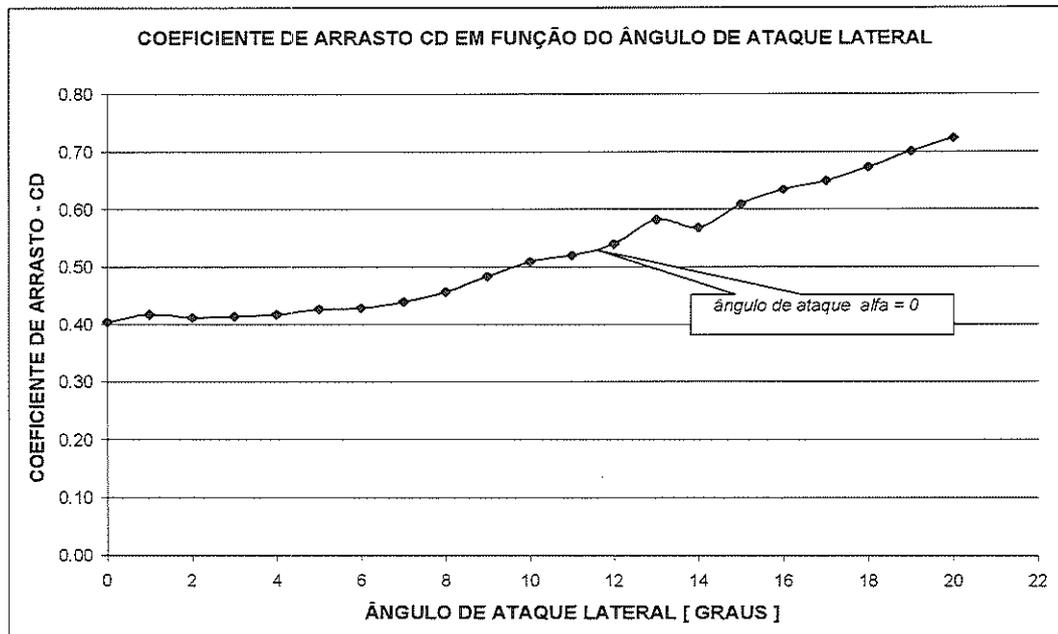


FIGURA 82 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 0^\circ$ .

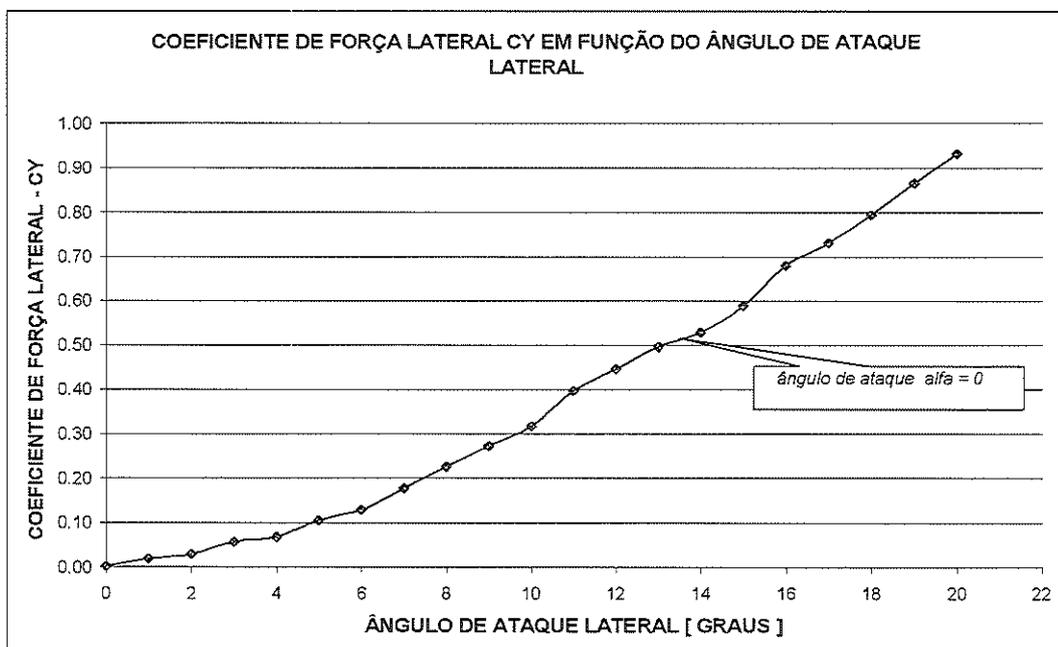


FIGURA 83 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 0^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = 1^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91200\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.87\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{\text{atm}}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,065\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1296 \times 10^3$$

TABELA 11 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 1^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	620.71	33.71	13.362	0.000
1	633.44	34.05	13.477	0.305
2	630.50	33.97	13.451	0.990
3	627.56	33.89	13.624	1.437
4	621.69	33.73	13.683	1.969
5	628.54	33.92	13.685	2.188
6	628.54	33.92	13.750	3.465
7	630.50	33.97	14.547	5.047
8	627.56	33.89	14.728	6.541
9	631.48	34.00	15.401	8.011
10	632.46	34.02	15.540	9.756
11	631.48	34.00	15.879	11.441
12	633.44	34.05	16.970	12.602
13	631.48	34.00	17.343	14.128
14	627.56	33.89	18.183	16.252
15	629.52	33.95	18.895	17.896
16	622.67	33.76	19.507	19.318
17	627.56	33.89	20.303	21.335
18	617.77	33.63	21.007	23.115
19	615.81	33.57	21.639	24.607
20	607.98	33.36	21.940	26.080

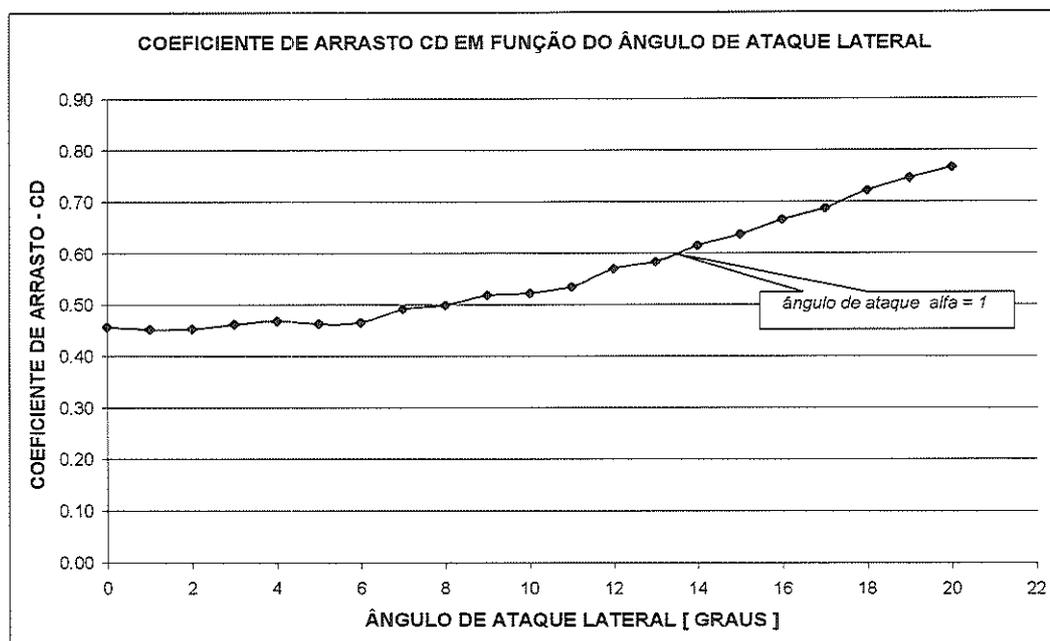


FIGURA 84 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 1^\circ$ .

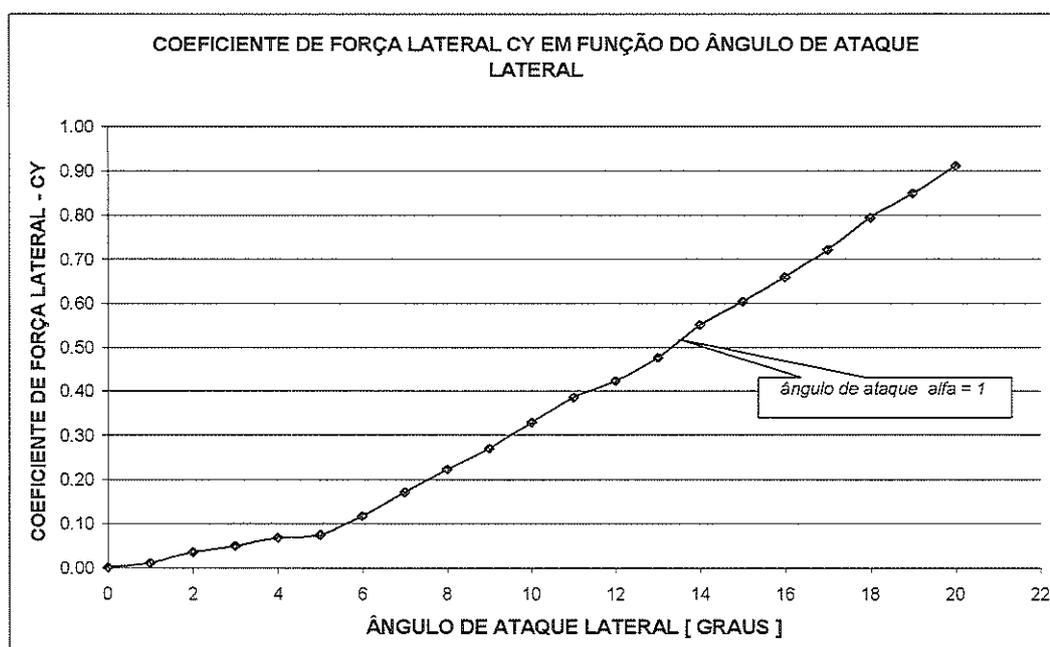


FIGURA 85 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 1^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = 2^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 23^\circ\text{C} = 296\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91600\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.42\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,077\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1293 \times 10^3$$

TABELA 12 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 2^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL ( GRAUS )	PRESSÃO DINÂMICA ( Pa )	VELOCIDADE DO FLUXO ( m/s )	FORÇA DE ARRASTO ( N )	FORÇA LATERAL ( N )
0	607.98	33.36	12.835	0.000
1	609.94	33.41	12.864	0.856
2	611.90	33.47	12.862	1.052
3	612.88	33.49	13.253	1.534
4	604.07	33.25	13.216	2.068
5	607.98	33.36	13.284	3.263
6	610.92	33.44	13.602	4.229
7	614.84	33.55	13.933	5.654
8	618.75	33.65	14.427	7.032
9	611.90	33.47	14.688	7.898
10	613.86	33.52	15.239	9.552
11	614.84	33.55	16.121	11.354
12	616.79	33.60	17.024	13.288
13	609.94	33.41	17.490	14.247
14	609.94	33.41	18.125	15.675
15	613.86	33.52	18.814	17.344
16	607.98	33.36	19.309	18.591
17	607.00	33.33	20.350	21.125
18	606.02	33.31	20.180	22.030
19	602.11	33.20	20.746	23.286
20	598.19	33.09	21.946	25.221

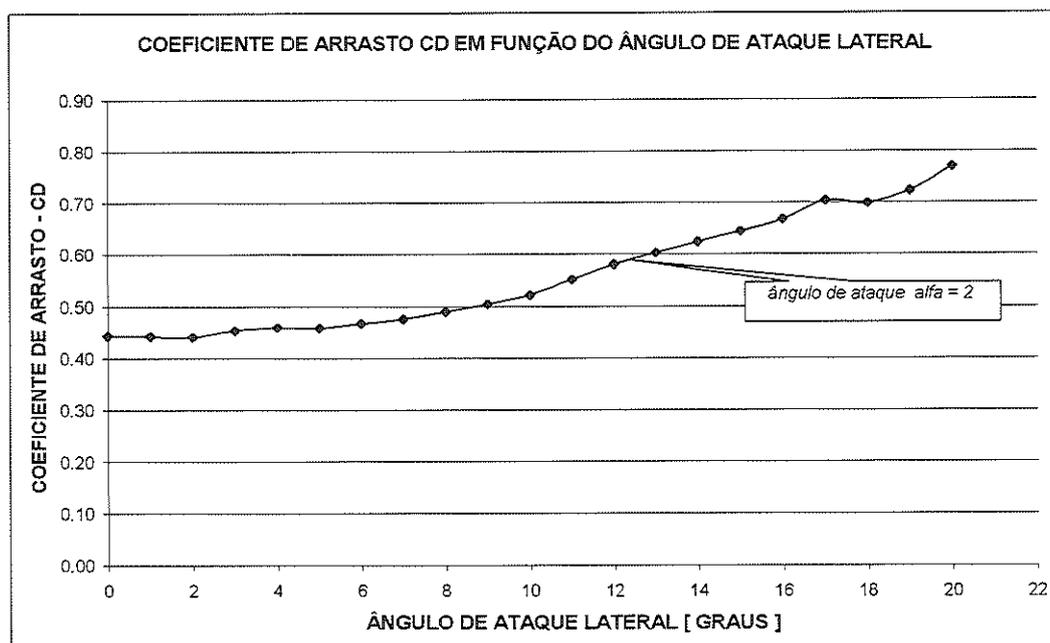


FIGURA 86 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 2^\circ$ .

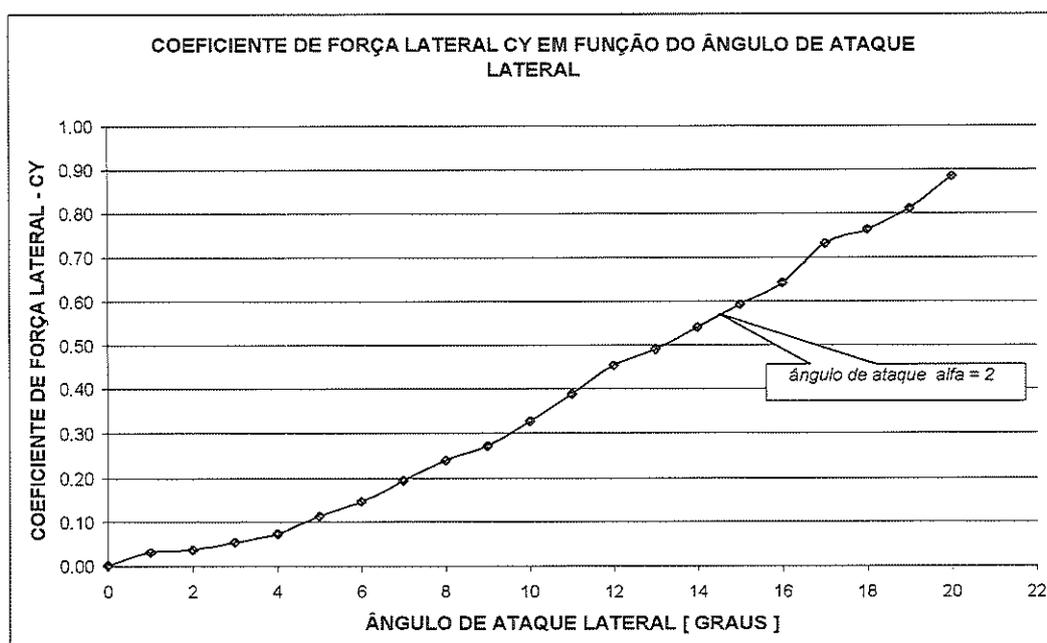


FIGURA 87 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 2^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = 3^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 24^\circ\text{C} = 297\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 91800\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.36\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{atm}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,076\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1289 \times 10^3$$

TABELA 13 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 3^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	602.11	33.20	12.869	0.000
1	598.19	33.09	13.099	0.530
2	599.17	33.12	13.087	0.944
3	607.98	33.36	13.066	1.689
4	608.96	33.39	13.520	2.222
5	614.84	33.55	13.463	2.682
6	612.88	33.49	14.027	3.759
7	613.86	33.52	13.918	4.870
8	618.75	33.65	14.246	6.673
9	611.90	33.47	14.935	7.803
10	617.77	33.63	15.092	8.872
11	613.86	33.52	15.825	10.472
12	614.84	33.55	16.638	13.307
13	611.90	33.47	17.206	14.080
14	608.96	33.39	17.885	16.109
15	613.86	33.52	18.627	17.192
16	600.15	33.14	18.887	18.642
17	602.11	33.20	20.049	20.221
18	599.17	33.12	20.455	22.120
19	597.21	33.06	21.055	24.266
20	598.19	33.09	21.950	25.135

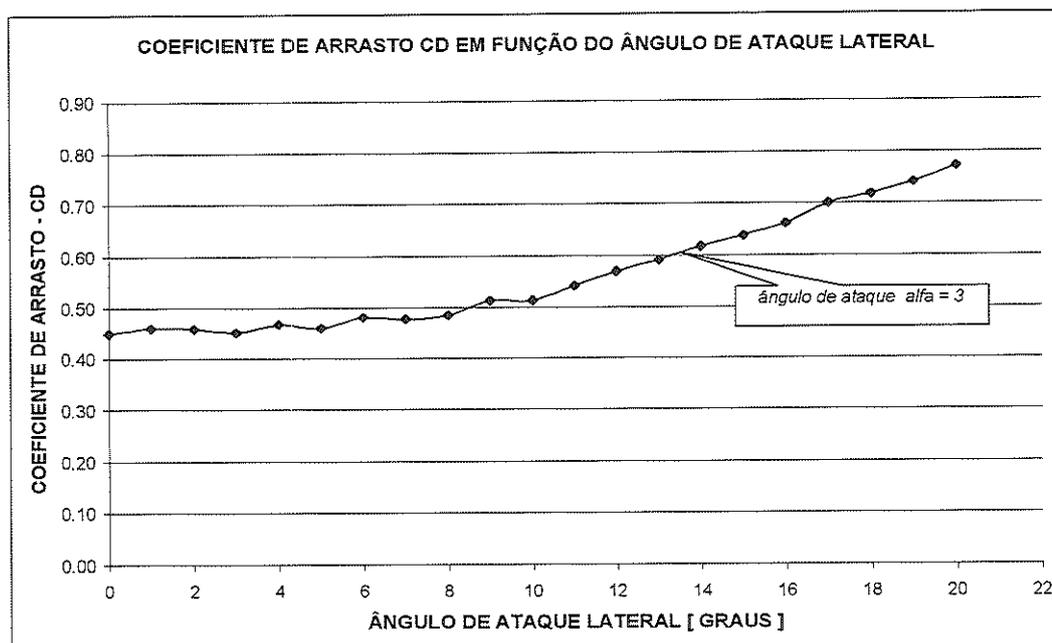


FIGURA 88 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 3^\circ$ .

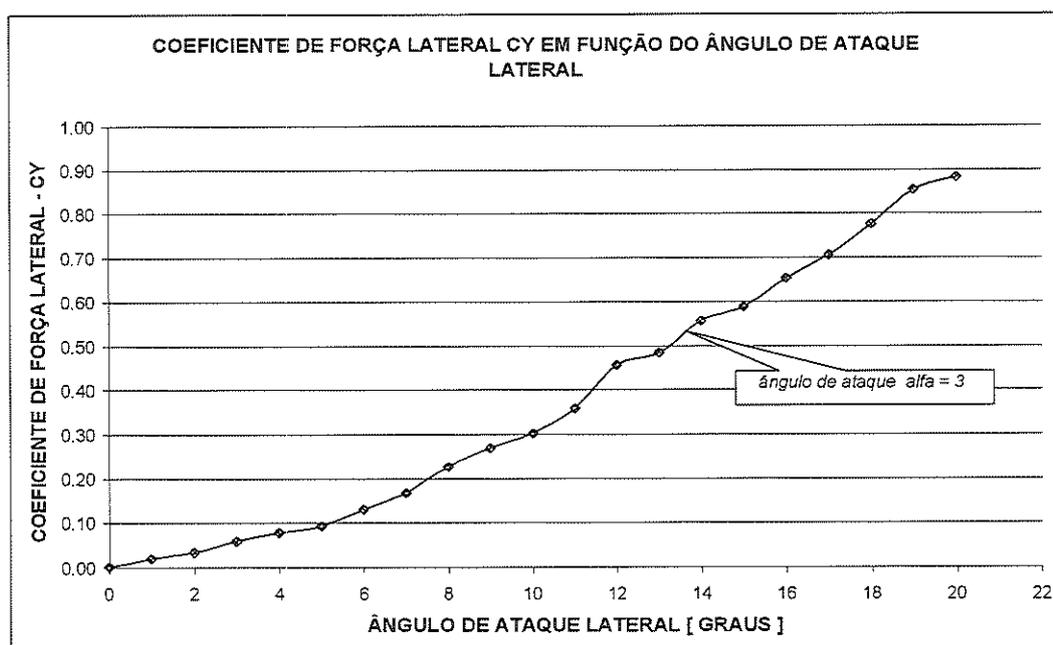


FIGURA 89 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 3^\circ$ .

Ângulo de ataque:  $\alpha = 4^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 22^\circ\text{C} = 295\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 92000\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 34.27\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{\text{atm}}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,086\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1337 \times 10^3$$

TABELA 14 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 4^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	627.56	33.89	13.753	0.000
1	626.58	33.87	13.803	0.625
2	634.42	34.08	13.769	0.886
3	640.29	34.23	13.766	1.809
4	640.29	34.23	13.870	1.965
5	636.37	34.13	14.296	3.683
6	649.10	34.47	14.788	4.570
7	653.02	34.57	14.868	5.502
8	641.27	34.26	15.546	6.823
9	648.12	34.44	16.018	8.243
10	649.10	34.47	16.046	10.214
11	655.96	34.65	17.029	11.934
12	651.06	34.52	17.709	12.927
13	648.12	34.44	19.069	15.527
14	650.08	34.50	19.357	16.459
15	642.25	34.29	20.335	17.872
16	642.25	34.29	20.901	19.787
17	642.25	34.29	21.799	22.051
18	638.33	34.18	22.361	23.156
19	629.52	33.95	23.289	25.035
20	624.63	33.81	23.707	26.442

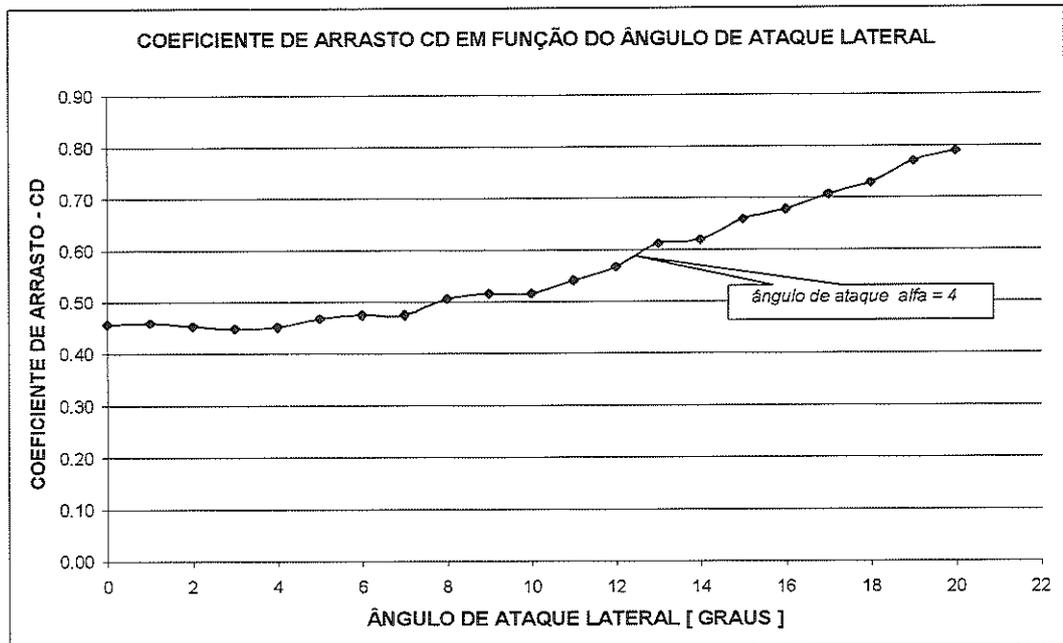


FIGURA 90 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 4^\circ$ .

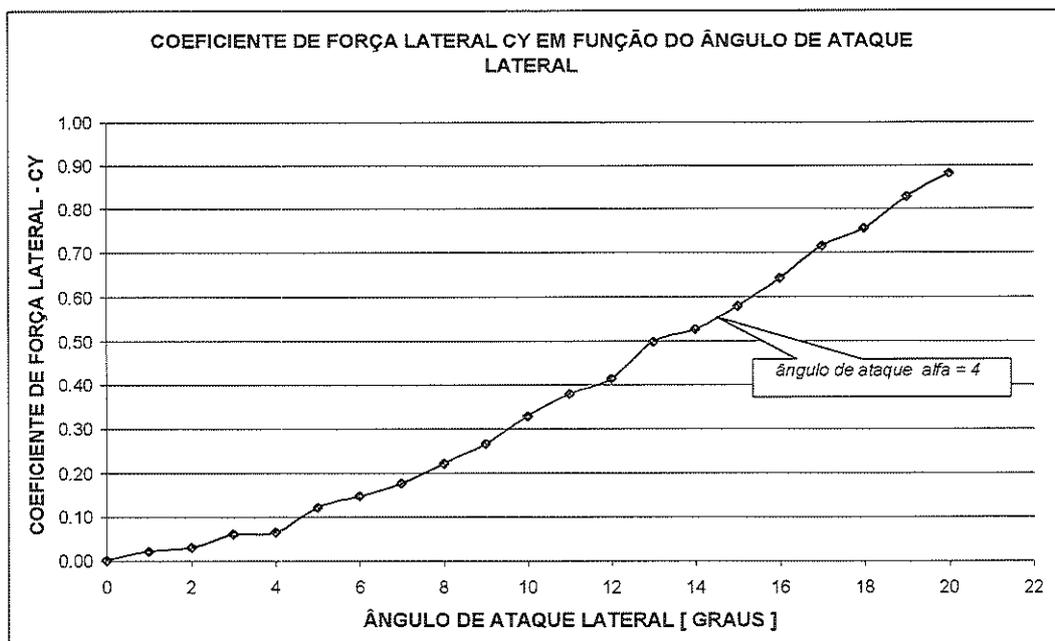


FIGURA 91 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 4^\circ$ .

**Ângulo de ataque:**  $\alpha = 5^\circ$

Condições do ensaio:

Temperatura ambiente:  $T = 21^\circ\text{C} = 294\text{ K}$

Pressão atmosférica:  $P = 92400\text{ N/m}^2$

Velocidade do fluxo média:  $V_\infty = 33.21\text{ m/s}$

$$\text{Cálculo do } \rho: \quad \rho = \frac{P_{\text{atm}}}{RT}$$

onde  $R = 287,3\text{ J/KgK}$

$$\Rightarrow \quad \rho = 1,094\text{ Kg/m}^3 \quad Re = 1305 \times 10^3$$

TABELA 15 – Dados de pressão dinâmica, velocidade do fluxo, força de arrasto e força lateral medidos em diferentes ângulos de ataque lateral,  $\alpha = 5^\circ$ .

ÂNGULO DE ATAQUE LATERAL (GRAUS)	PRESSÃO DINÂMICA (Pa)	VELOCIDADE DO FLUXO (m/s)	FORÇA DE ARRASTO (N)	FORÇA LATERAL (N)
0	596.23	33.04	14.433	0.000
1	595.26	33.01	14.531	0.539
2	593.30	32.95	14.697	1.116
3	605.05	33.28	14.693	1.493
4	603.09	33.23	14.968	2.340
5	605.05	33.28	15.409	2.570
6	612.88	33.49	15.398	3.721
7	615.81	33.57	15.978	5.173
8	613.86	33.52	16.528	6.310
9	610.92	33.44	16.052	8.031
10	611.90	33.47	17.312	9.246
11	607.98	33.36	17.494	11.503
12	617.77	33.63	18.880	12.687
13	609.94	33.41	18.841	14.288
14	605.05	33.28	19.905	15.455
15	599.17	33.12	20.275	17.702
16	592.32	32.93	21.180	18.354
17	593.30	32.95	22.713	19.964
18	585.46	32.74	23.189	21.046
19	588.40	32.82	24.185	23.475
20	590.36	32.87	24.344	24.495

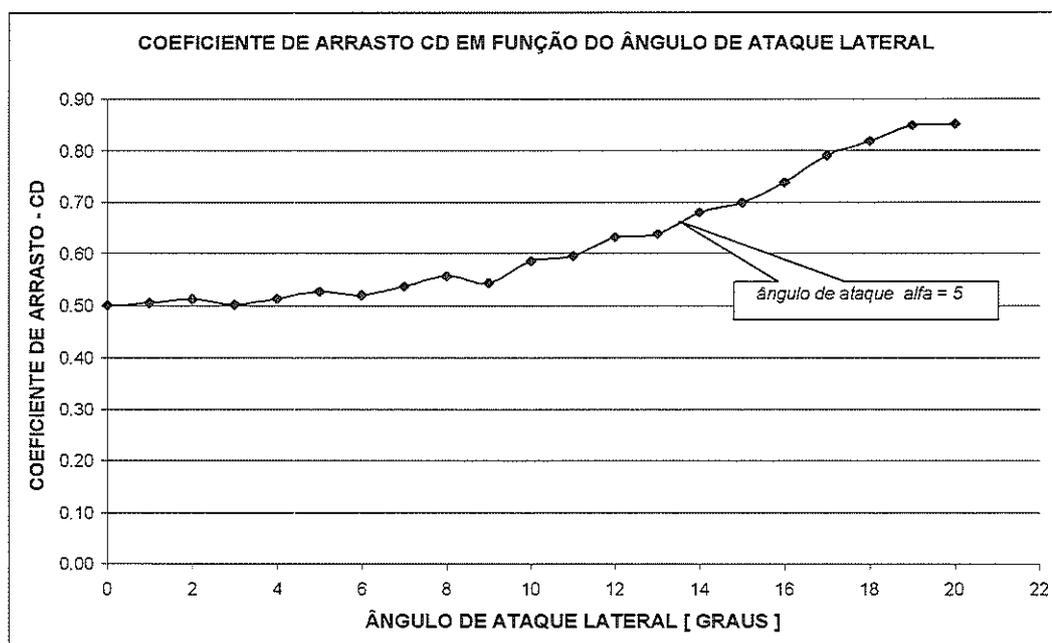


FIGURA 92 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 5^\circ$ .

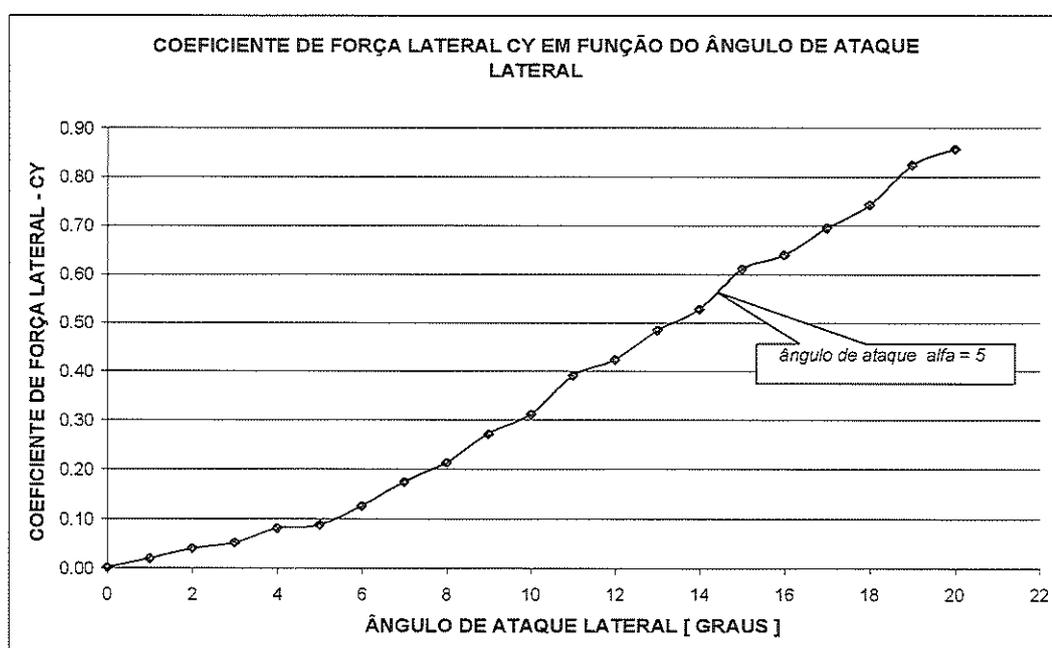


FIGURA 93 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  com um ângulo de ataque  $\alpha = 5^\circ$ .

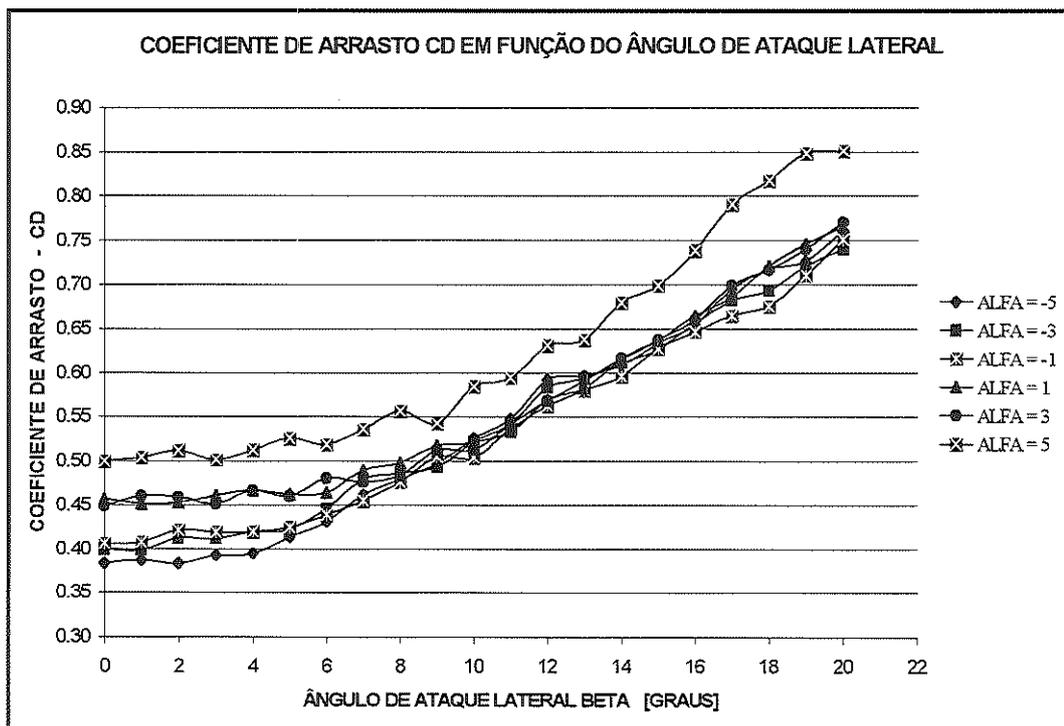


FIGURA 94 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

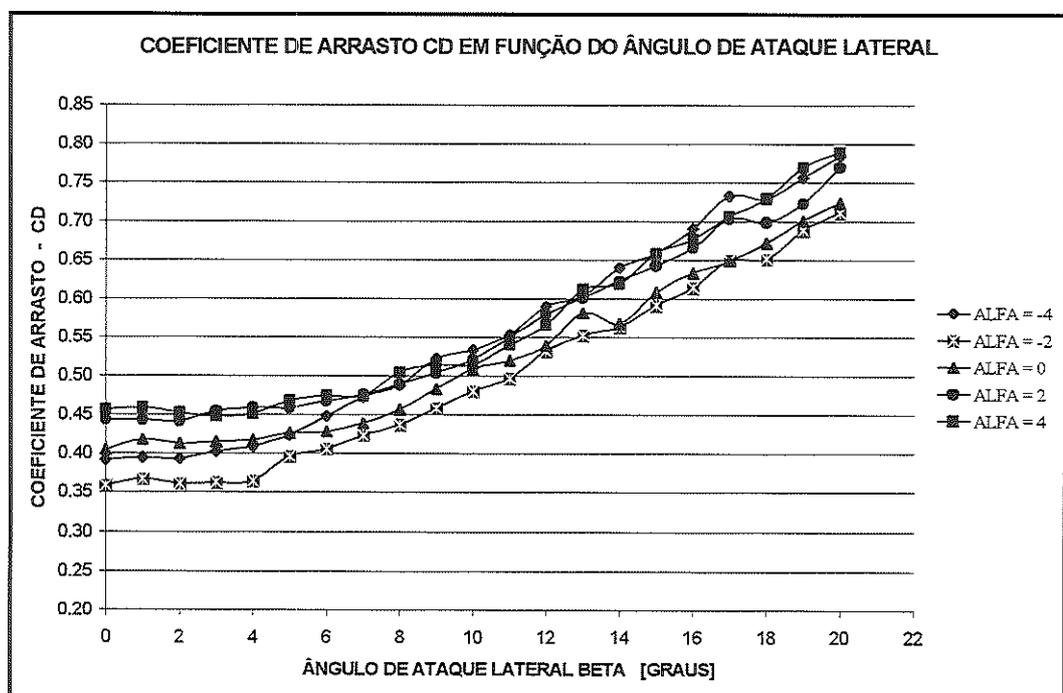


FIGURA 95 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

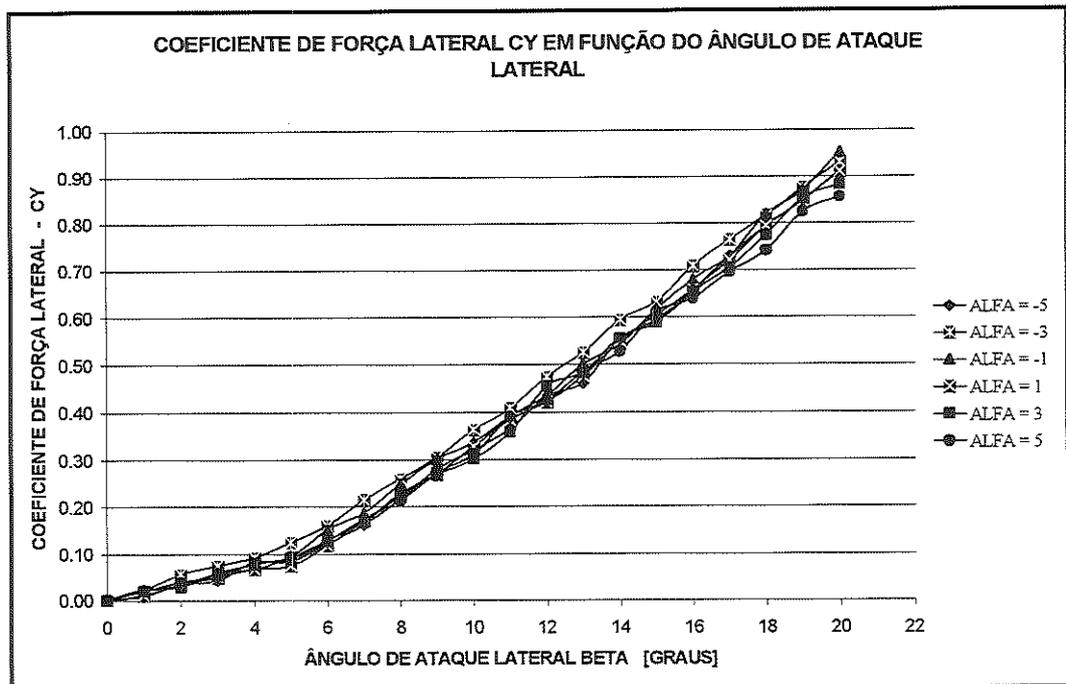


FIGURA 96 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

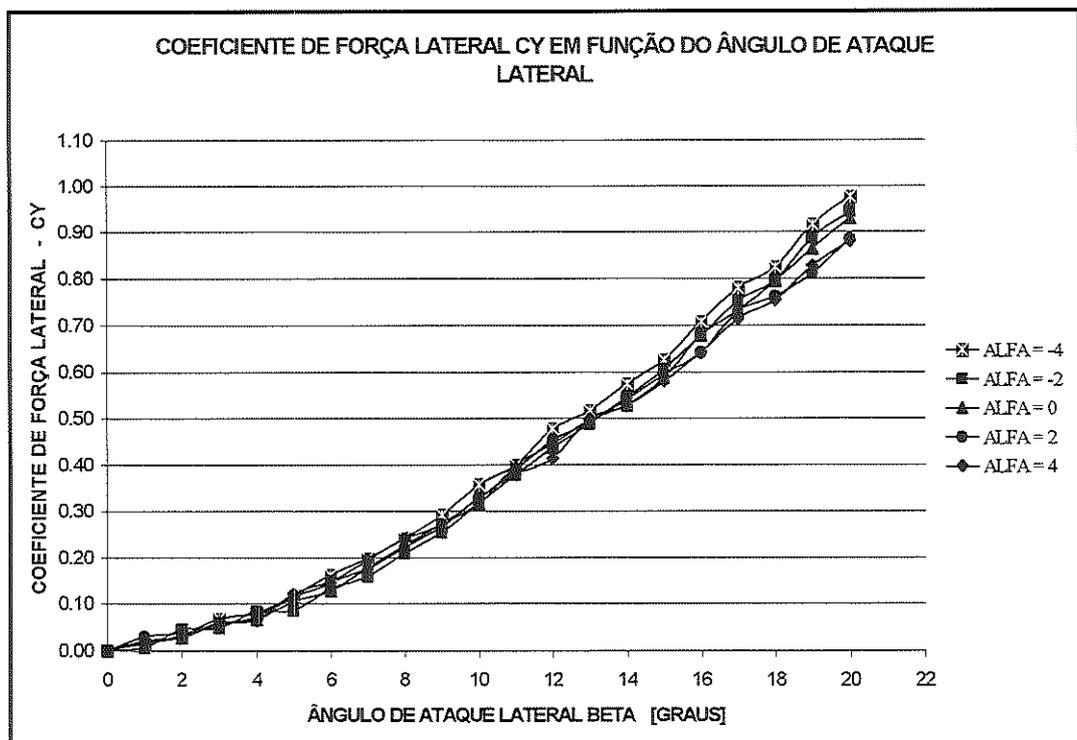


FIGURA 97 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

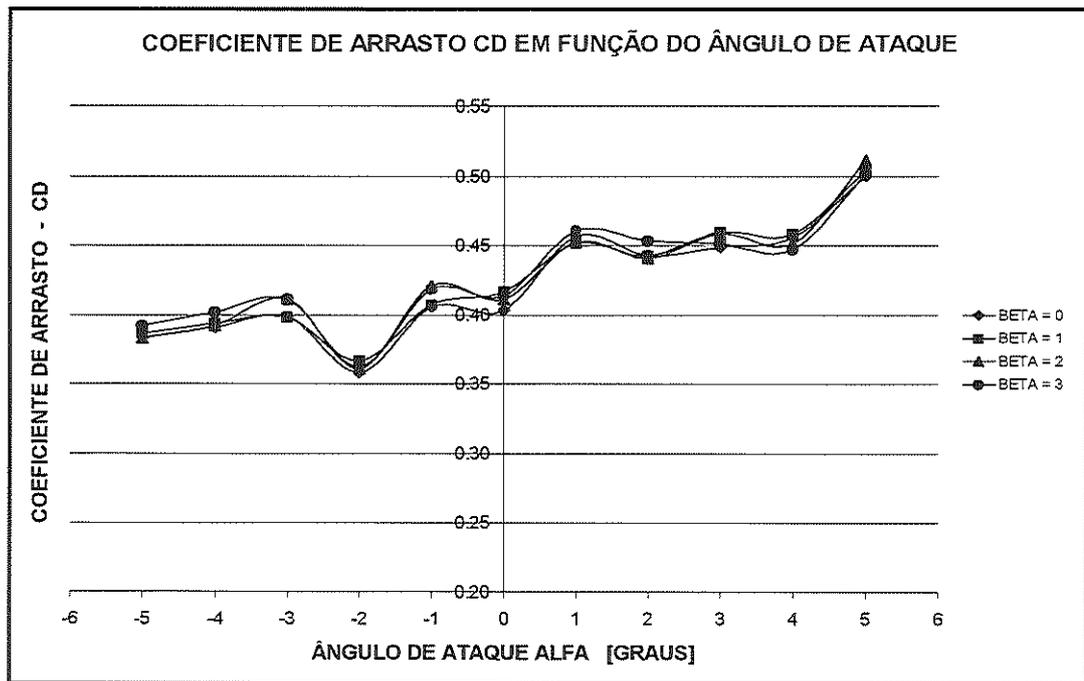


FIGURA 98 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $0^\circ$  até  $3^\circ$ .

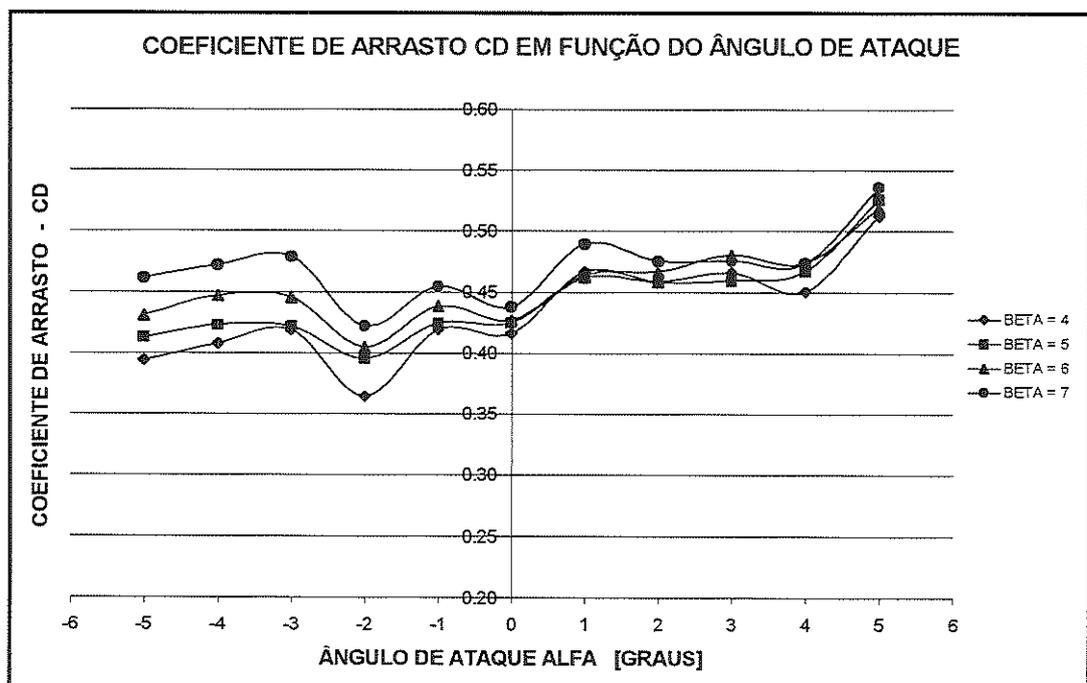


FIGURA 99 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $4^\circ$  até  $7^\circ$ .

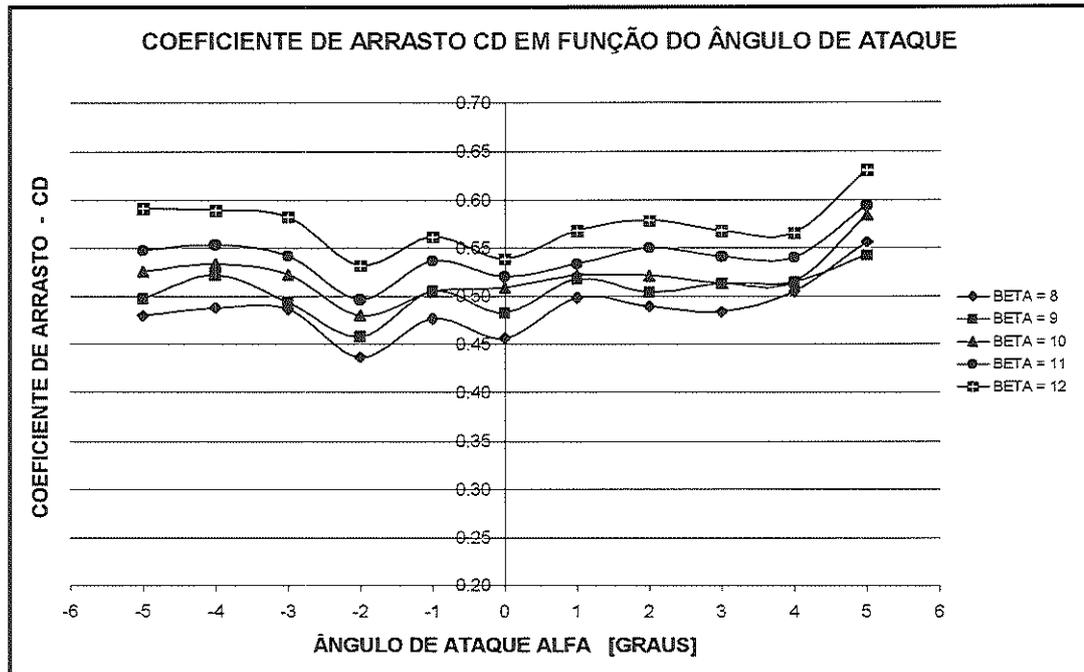


FIGURA 100 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $8^\circ$  até  $12^\circ$ .

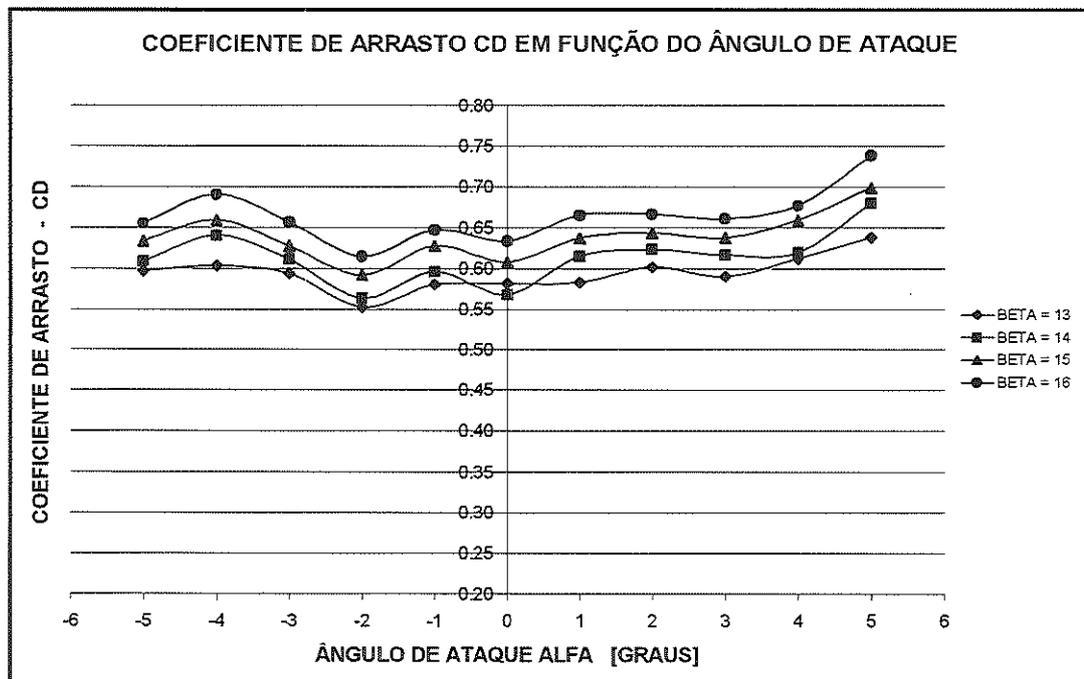


FIGURA 101 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $13^\circ$  até  $16^\circ$ .

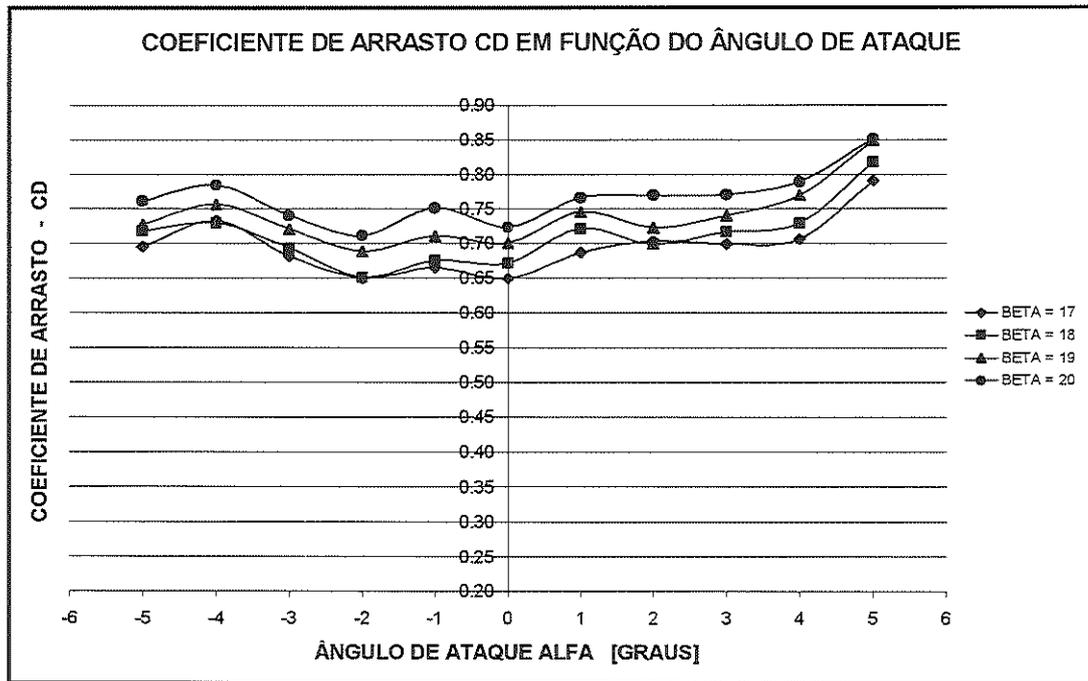


FIGURA 102 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $17^\circ$  até  $20^\circ$ .

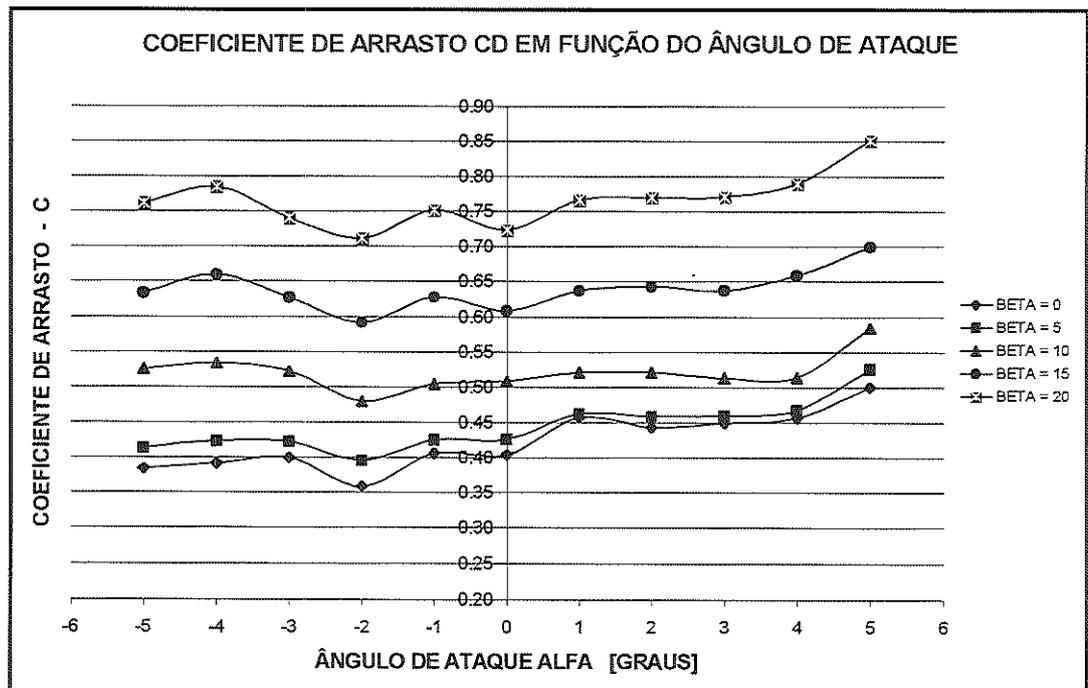


FIGURA 103 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  iguais a  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $20^\circ$ .

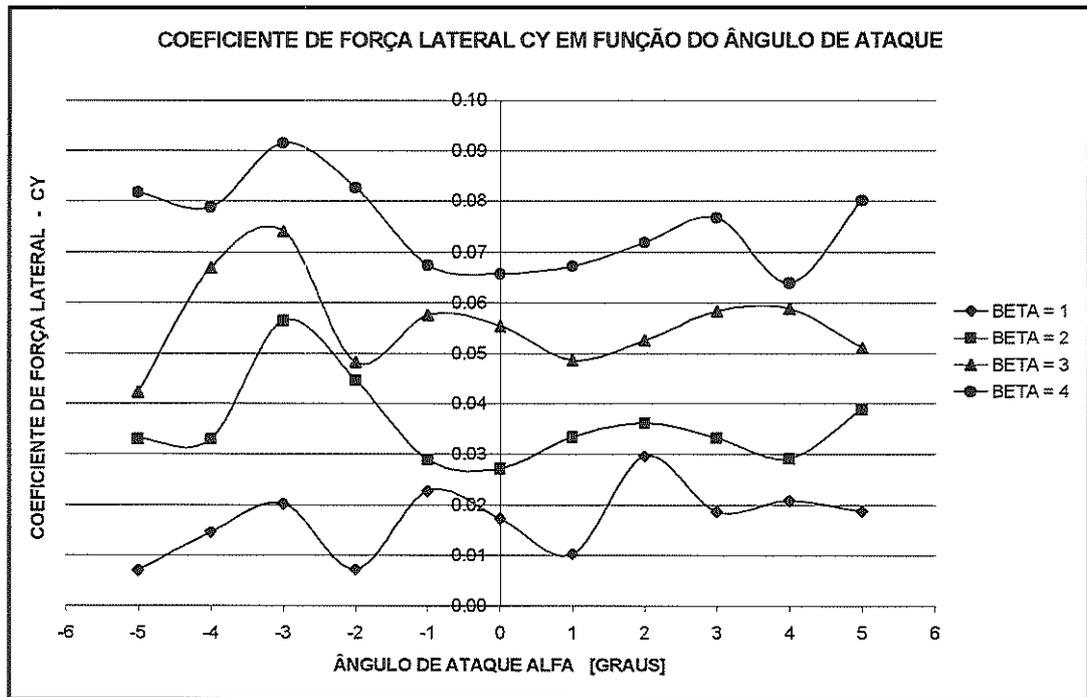


FIGURA 104 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $1^\circ$  até  $4^\circ$ .

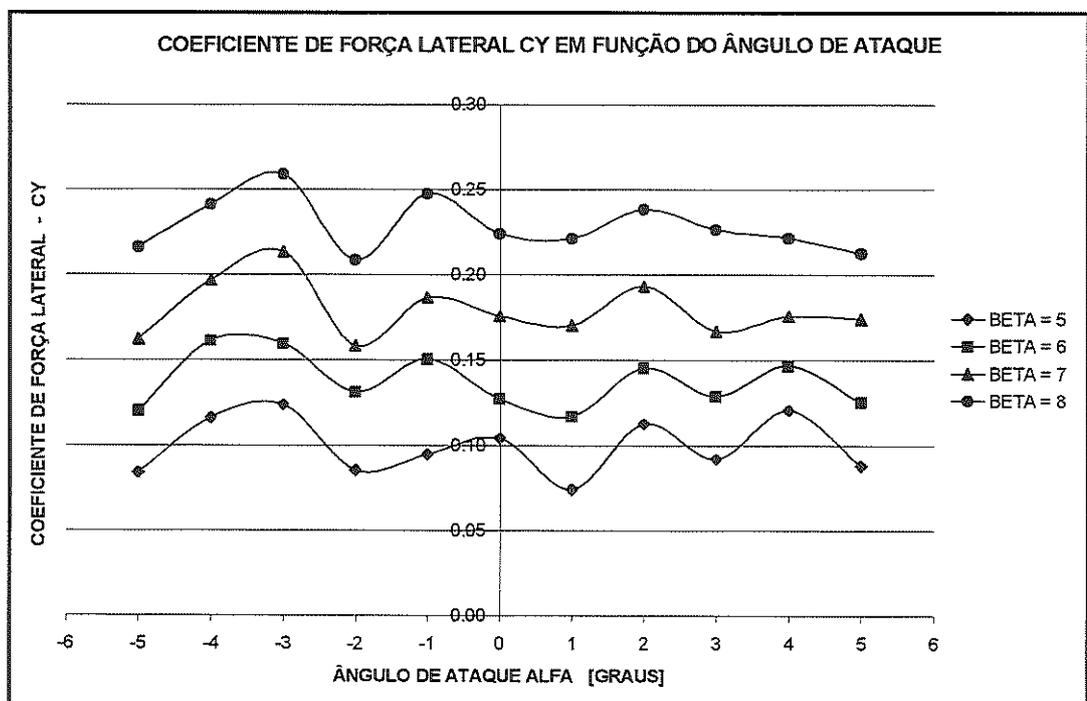


FIGURA 105 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $5^\circ$  até  $8^\circ$ .

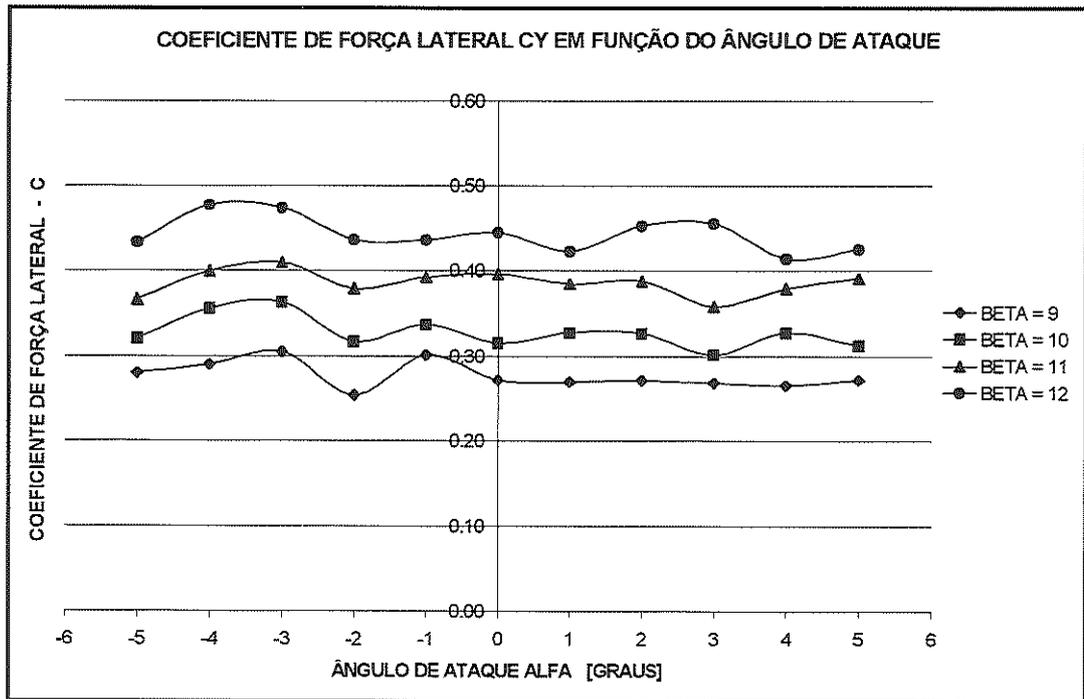


FIGURA 106 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $9^\circ$  até  $12^\circ$ .

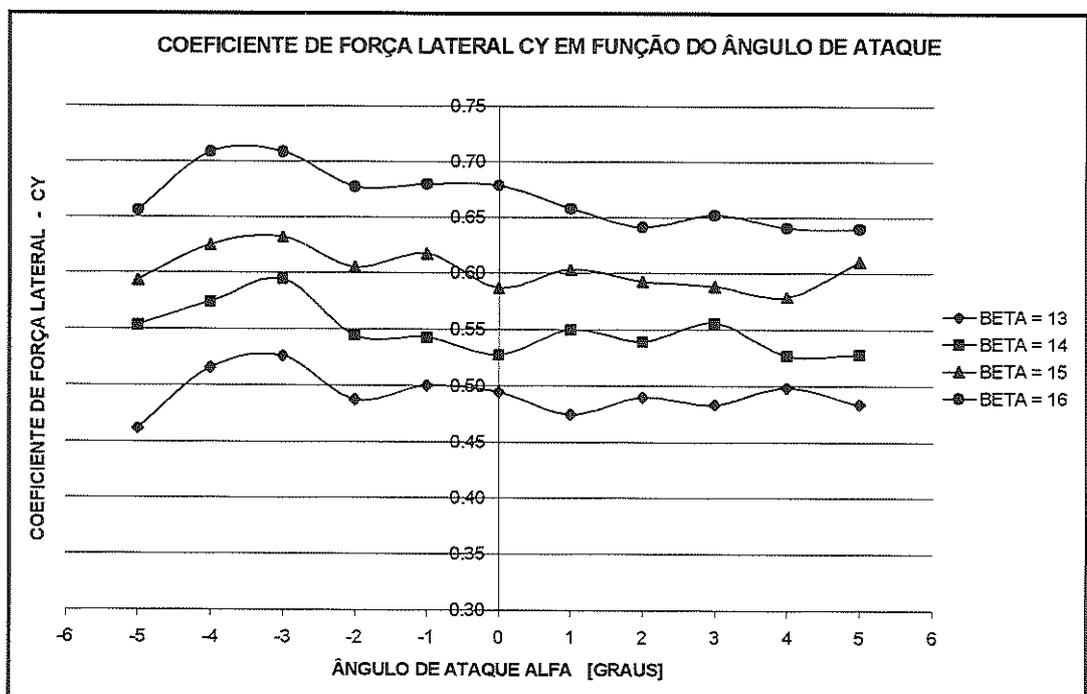


FIGURA 107 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $13^\circ$  até  $16^\circ$ .

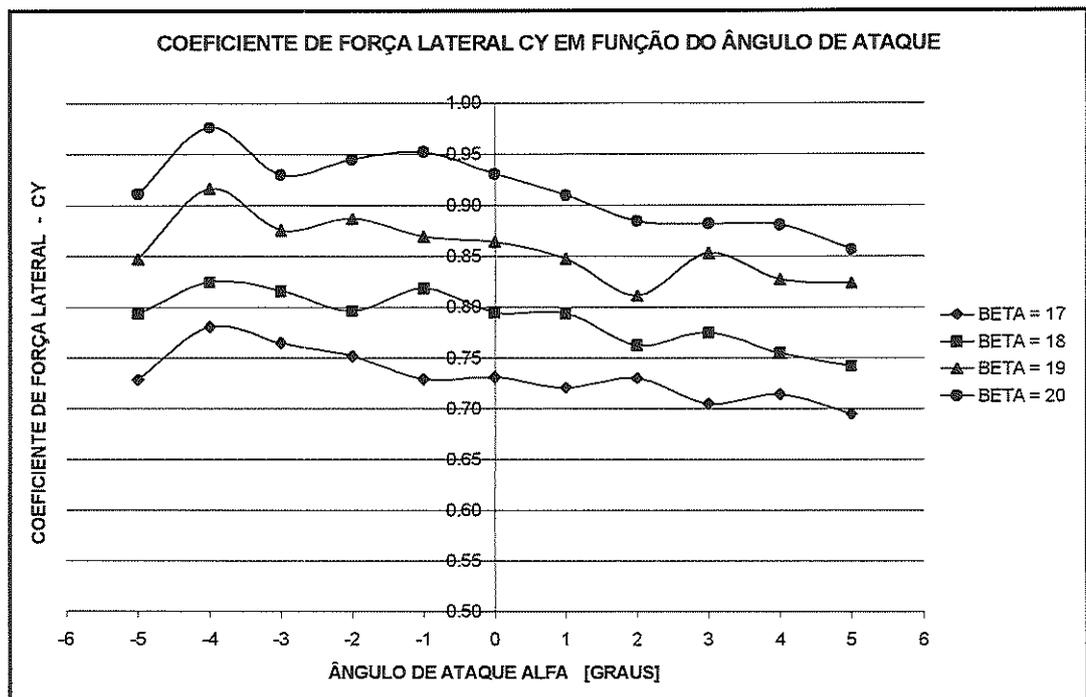


FIGURA 108 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $17^\circ$  até  $20^\circ$ .

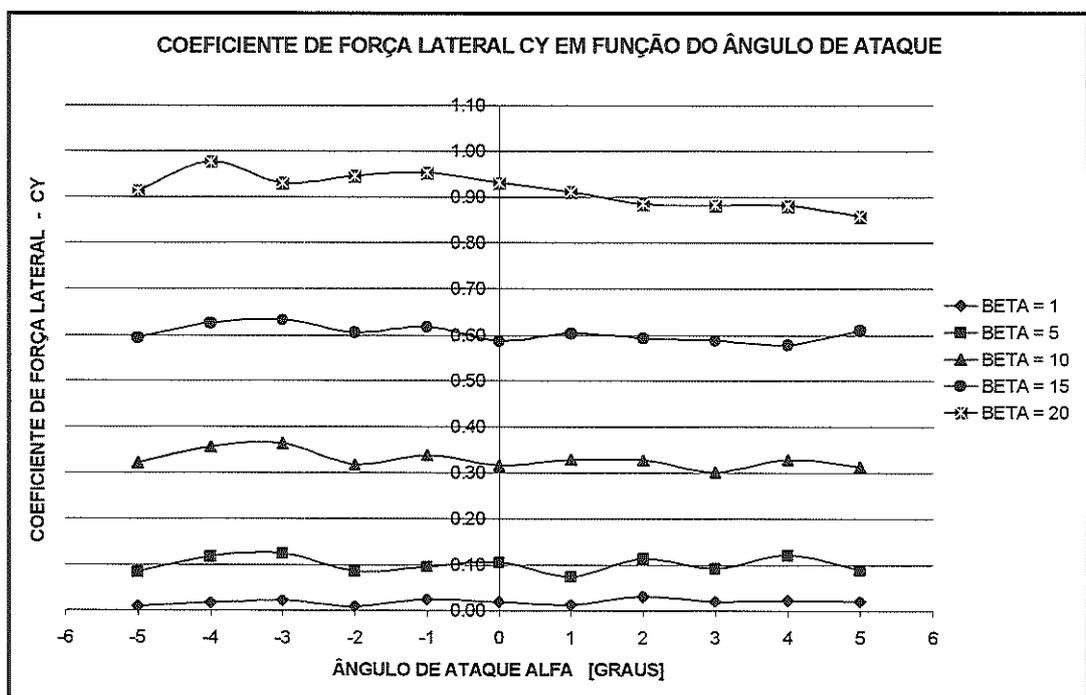


FIGURA 109 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , com ângulos de ataque lateral  $\beta$  iguais a  $1^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $20^\circ$ .

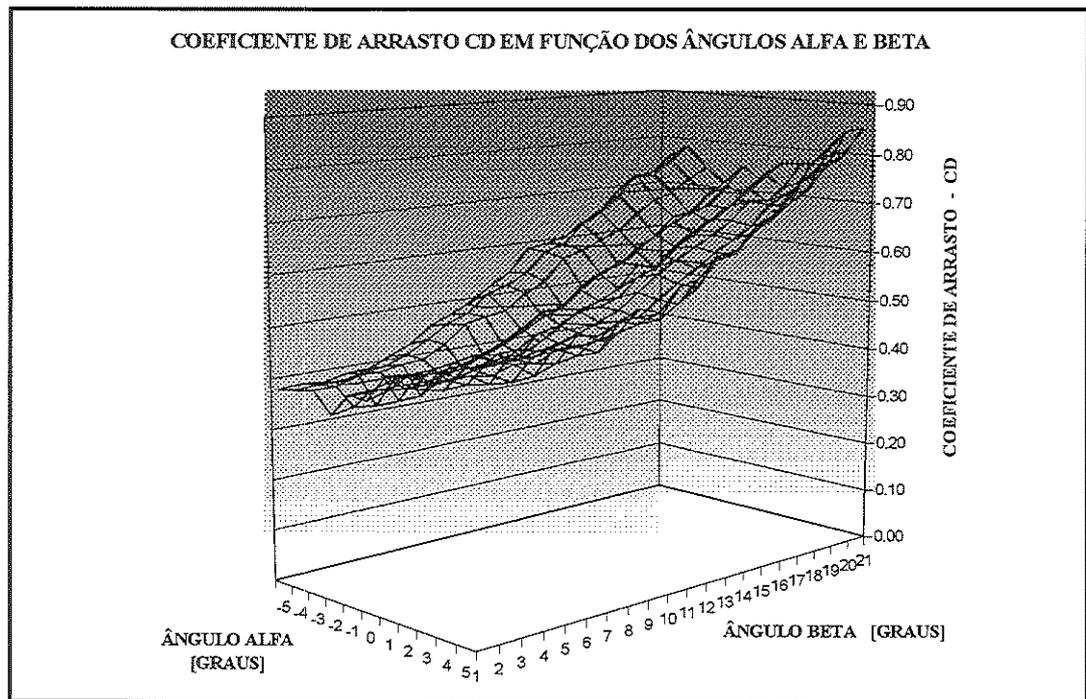


FIGURA 110 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$  e do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

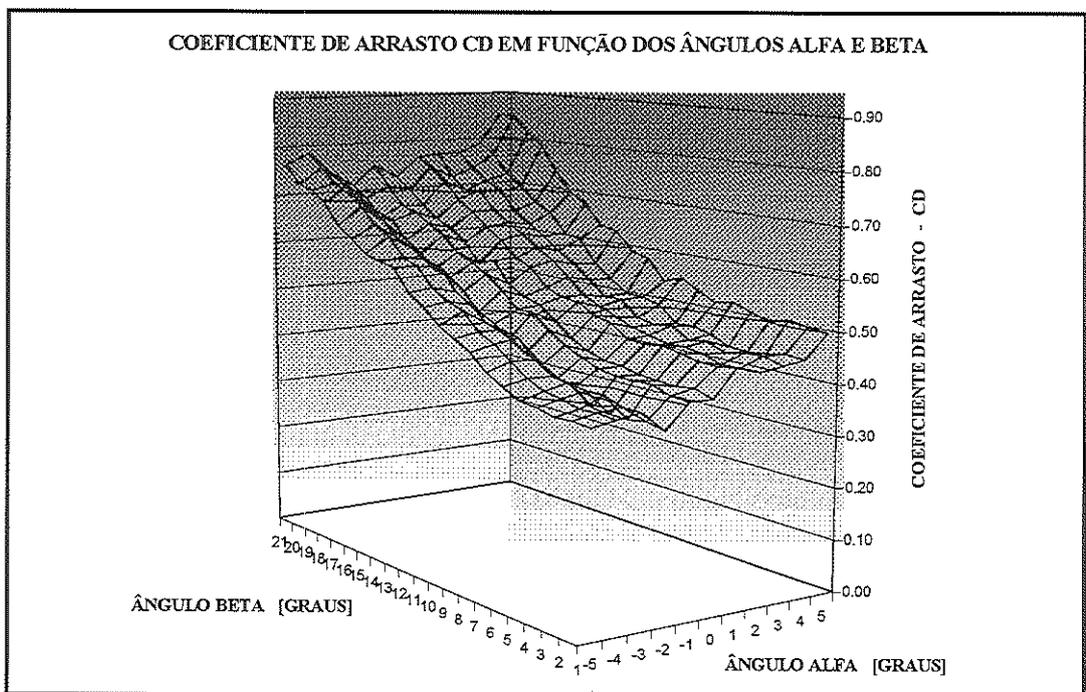


FIGURA 111 – Variação do coeficiente de arrasto  $C_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$  e do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

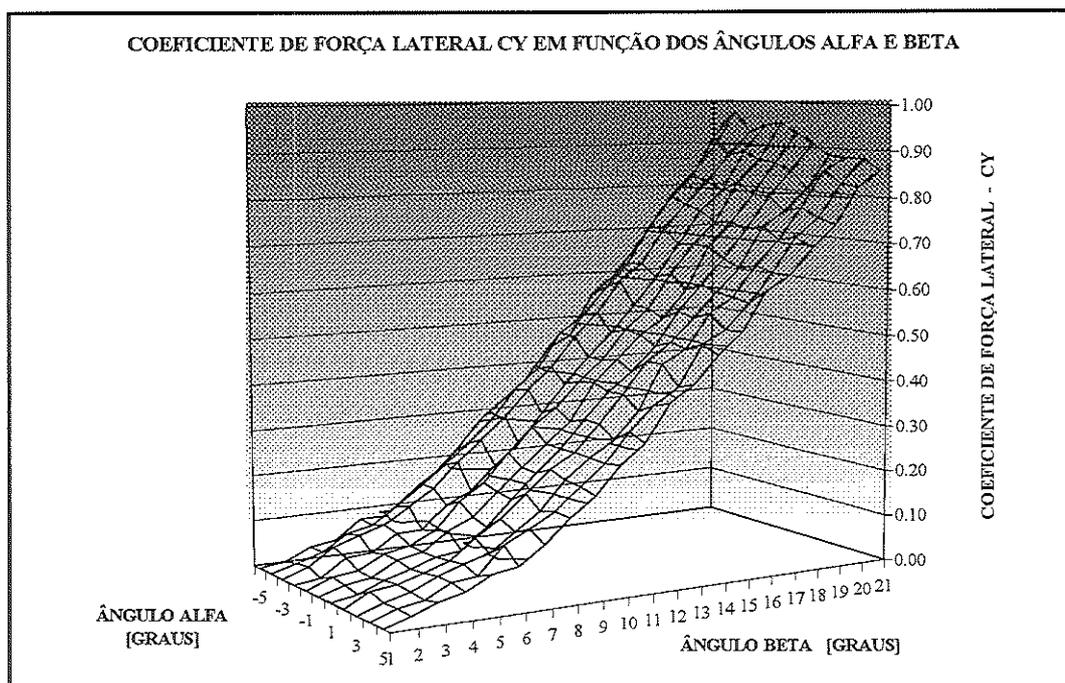


FIGURA 112 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$  e do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

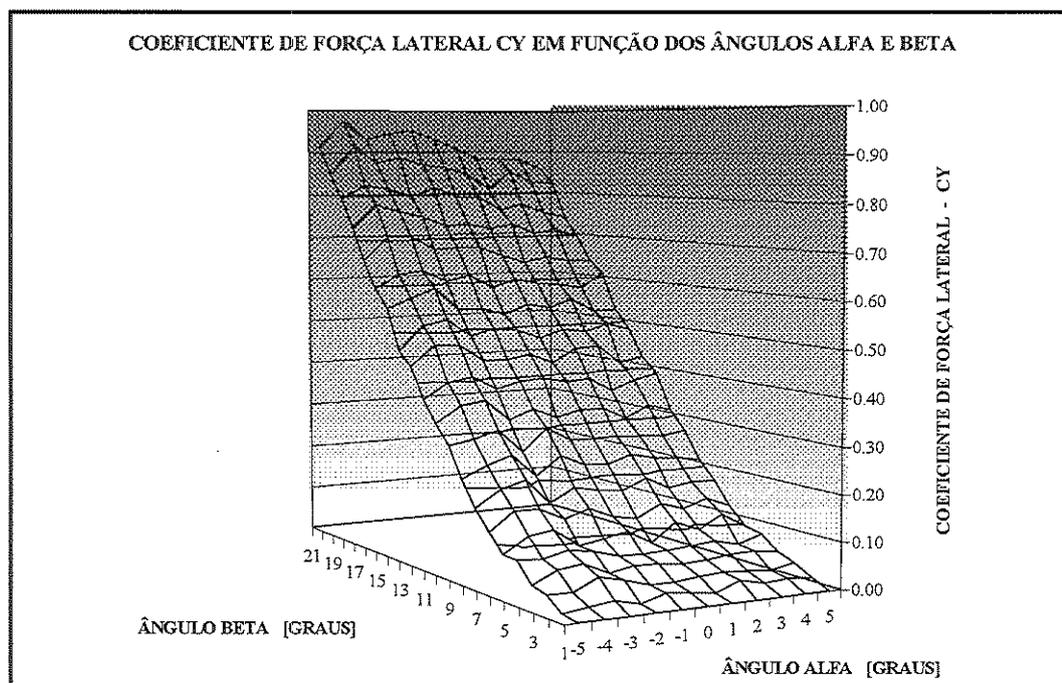


FIGURA 113 – Variação do coeficiente de força lateral  $C_Y$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$  e do ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

### 5.3 Discussão dos resultados

Durante a realização dos experimentos, os valores da velocidade do fluxo permaneceram em média numa faixa de 33.5 a 33.8 m/s, com um valor mínimo de 32.65 m/s e um valor máximo de 34.57 m/s, conforme pode ser visto nas TABELAS 05 a 15. As temperaturas registradas durante os ensaios sempre estiveram na faixa de 21 a 27 °C. O número de Reynolds durante os ensaios experimentais permaneceu numa faixa de  $Re = 1269 \times 10^3$  a  $Re = 1337 \times 10^3$ .

Um dos parâmetros a serem estudados neste trabalho é o arrasto aerodinâmico, através da variação do coeficiente de arrasto  $c_D$ , ocasionado por variações na direção do escoamento e na inclinação entre a parte dianteira e traseira do veículo. Estas variações ocorrem devido as mudanças do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , correspondente ao ângulo de incidência do escoamento sobre a superfície do veículo; e do ângulo de ataque  $\alpha$ , relativo a posição do veículo em relação a um sistema de coordenadas fixo na balança aerodinâmica.

Diante de uma variação da direção de incidência do escoamento sobre a superfície do modelo em escala 1:5, variando-se o ângulo de ataque lateral  $\beta$  de 0° até 20°, em todas as condições de ensaio observou-se um aumento do valor do coeficiente de arrasto  $c_D$ . Os maiores valores obtidos para o coeficiente de arrasto  $c_D$ , foram observados para  $\beta = 20^\circ$  e  $\beta = 19^\circ$ , sendo que para  $\beta = 20^\circ$  todos os valores registrados estavam acima dos valores correspondentes ao ângulo  $\beta = 19^\circ$ . Nos experimentos realizados em diferentes ângulos de ataque  $\alpha$ , existem valores do coeficiente de arrasto  $c_D$  variando numa faixa de 0.68 até 0.86, para ângulos de ataque lateral  $\beta = 19^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

Pelas FIGURAS 94 e 95, verificou-se que os menores valores para o coeficiente de arrasto  $c_D$ , correspondem aos ângulos de ataque lateral  $\beta$  entre  $0^\circ$  e  $3^\circ$ . Utilizando-se diferentes ângulos de ataque  $\alpha$  nos ensaios, pelos gráficos da variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , observou-se que os menores valores para o  $c_D$  variam de 0.35 a 0.57. Todos os coeficientes de arrasto  $c_D$  correspondentes aos ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $0^\circ$  até  $3^\circ$ , possuem valores muito próximos, sendo estes os menores valores encontrados para o  $c_D$ .

Conforme os dados experimentais apresentados nas FIGURAS 94 e 95, pode-se observar a variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$  do modelo testado, em relação à direção do escoamento no interior do túnel de vento. De acordo com as FIGURAS 94 e 95, o coeficiente de arrasto  $c_D$  apresentou as maiores variações em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , quando o ângulo de ataque  $\alpha$  foi fixado em  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$  e  $\alpha = -4^\circ$ ; sendo que no ângulo de ataque  $\alpha = 5^\circ$  ocorreu a maior variação do valor do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo  $\beta$ .

As FIGURAS 72 até 92, dentro da seqüência de números pares, demonstram a variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função da mudança do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , para um determinado ângulo de ataque  $\alpha$  fixado. Estes gráficos mostram o efeito da variação do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , como única mudança de posição do modelo em relação ao escoamento de ar dentro do túnel de vento. Verifica-se que o deslocamento angular de  $0^\circ$  até  $20^\circ$  em  $\beta$ , provocou um aumento no coeficiente de arrasto  $c_D$ , para todos os ângulo de ataque  $\alpha$ , com uma variação menor de  $0^\circ$  até  $4^\circ$ , e mais acentuada a partir de  $\beta = 5^\circ$ .

Os efeitos da variação do ângulo de ataque  $\alpha$  no coeficiente de arrasto  $c_D$ , são apresentados nas FIGURAS 98 até 102, onde o coeficiente  $c_D$  varia em função do ângulo de ataque  $\alpha$  para cada ângulo de ataque lateral  $\beta$ . Estas figuras apresentam os resultados do movimento de arfagem do modelo, determinando a influência do ângulo de ataque  $\alpha$  sobre o coeficiente aerodinâmico de arrasto  $c_D$ , com o ângulo de

ataque lateral  $\beta$  fixado. Em todos os experimentos realizados, os maiores valores encontrados para os coeficientes  $c_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , correspondem aos valores de  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ ,  $\alpha = 3^\circ$  e  $\alpha = 1^\circ$ .

Para ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $0^\circ$  até  $7^\circ$ , os maiores valores do coeficiente de arrasto  $c_D$  são encontrados para ângulos de ataque  $\alpha$  positivos. Pelas FIGURAS 98 até 102 da variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$ , verificou-se que os menores valores do  $c_D$  foram encontrados para os ângulos  $\alpha = -2^\circ$ ,  $\alpha = -1^\circ$  e  $\alpha = -5^\circ$ .

Outro parâmetro analisado neste trabalho é a força lateral aerodinâmica, através da variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ . Em todas as condições experimentais, as mudanças da direção do escoamento incidente sobre a superfície do modelo, provocaram uma variação comparativamente maior no coeficiente de força lateral  $c_Y$ , em relação ao coeficiente de arrasto  $c_D$ .

Os maiores valores obtidos para o coeficiente de força lateral  $c_Y$ , foram observados para  $\beta = 20^\circ$  e  $\beta = 19^\circ$ , sendo que para  $\beta = 20^\circ$  todos os valores registrados estavam acima dos valores correspondentes ao ângulo  $\beta = 19^\circ$ . Nos experimentos realizados em diferentes ângulos de ataque  $\alpha$ , existem valores do coeficiente de força lateral  $c_Y$  variando numa faixa de 0.80 até 0.98, para ângulos de ataque lateral  $\beta = 19^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

Dos resultados obtidos nos ensaios, relacionados a variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$ , em função do ângulo de guinada  $\beta$ , observou-se pelas FIGURAS 110 e 112 um aumento muito expressivo do coeficiente de força lateral  $c_Y$ , à medida que o ângulo  $\beta$  aumenta de  $0^\circ$  até  $20^\circ$ . Comparado-se a variação ocorrida no coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , com a alteração do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do mesmo ângulo, pode-se observar que o coeficiente de força lateral  $c_Y$  apresenta uma variação relativamente maior em relação ao ângulo  $\beta$ .

De acordo com as FIGURAS 104 até 109, os menores valores encontrados para os coeficientes de força lateral  $c_Y$ , são correspondentes aos valores do ângulo de ataque lateral  $\beta = 0^\circ$  e  $\beta = 1^\circ$ . Utilizando-se diferentes ângulos de ataque  $\alpha$  nos ensaios, pelos gráficos da variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , observou-se que os menores valores para o  $c_Y$  variam de 0 a 0.03.

Todos os coeficientes de força lateral  $c_Y$  correspondentes aos ângulos de ataque lateral  $\beta$  de  $0^\circ$  até  $3^\circ$ , possuem valores relativamente menores, se comparados aos com os valores de  $c_Y$  encontrados para valores de  $\beta$  acima de  $8^\circ$ . Durante a realização dos experimentos os valores encontrados para  $c_Y = 0$ , correspondem ao ângulo  $\beta = 0^\circ$ .

No estudo da estabilidade aerodinâmica de um veículo, os valores dos coeficientes de força lateral  $c_Y$  são muito importantes, quando avaliada a sua variação em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ . De acordo com as FIGURAS 96 e 97, o coeficiente de força lateral  $c_Y$  apresentou as maiores variações em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , quando o ângulo de ataque  $\alpha$  foi fixado em  $\alpha = -4^\circ$ ,  $\alpha = -2^\circ$  e  $\alpha = -1^\circ$ ; sendo que no ângulo de ataque  $\alpha = -4^\circ$  ocorreu a maior variação do valor do coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função do ângulo  $\beta$ .

As mudanças de inclinação do modelo, num movimento de rotação em torno do eixo y, do sistema de coordenadas Oxyz fixo no c.g. do veículo, determinaram variações nos coeficientes de força lateral. As FIGURAS 73 até 93, dentro da seqüência de números ímpares, apresentam as variações ocorridas nos coeficientes de força lateral  $c_Y$ , devido a alteração do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , e como no caso do coeficiente de arrasto  $c_D$ , sem mudança do ângulo de ataque  $\alpha$ .

Conforme os resultados experimentais apresentados nas FIGURAS 112 e 113, observa-se que o traçado das curvas do coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , são mais definidas uma em relação à outra para todos

os ângulos de ataque a partir de  $\beta = 4^\circ$ . Como o observado para o coeficiente de arrasto  $c_D$ , para ângulos de ataque lateral maiores, a variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$  é mais significativa, para qualquer ângulo de ataque  $\alpha$  utilizado no experimento.

Nas FIGURAS 104 até 109 são apresentados os resultados da influência da variação do ângulo de ataque  $\alpha$  no coeficiente de força lateral  $c_Y$ , e como no caso da força de arrasto  $c_D$ , apenas alteração do ângulo de ataque  $\alpha$ . Para ângulo de ataque lateral  $\beta$  fixados, os maiores valores dos coeficientes de força lateral  $c_Y$ , corresponderam aos ângulos de ataque  $\alpha = -4^\circ$ ,  $\alpha = -3^\circ$  e  $\alpha = -1^\circ$ .

## 5.4 Apresentação dos ensaios de visualização

Foram realizados ensaios com a finalidade de visualizar o escoamento sobre a superfície do modelo de veículo, e observar os descolamentos da camada limite nas superfícies laterais, no teto e na superfície inclinada do modelo. A observação da formação dos vórtices laterais corresponde à uma posição desordenada dos “tufts”. Os ensaios de visualização foram realizados com diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$  e de ataque  $\alpha$ . O modelo é posicionado dentro da câmara de ensaios, em três diferentes ângulos de ataque:

- 1)  $\alpha = -3^\circ$                       2)  $\alpha = 0^\circ$                       3)  $\alpha = 4^\circ$

Os ensaios são realizados com a variação do ângulo de ataque lateral, utilizando-se seis posições fixas:

- 1)  $\beta = 0^\circ$                       2)  $\beta = 5^\circ$                       3)  $\beta = 10^\circ$   
 4)  $\beta = 15^\circ$                       5)  $\beta = 20^\circ$                       6)  $\beta = -20^\circ$

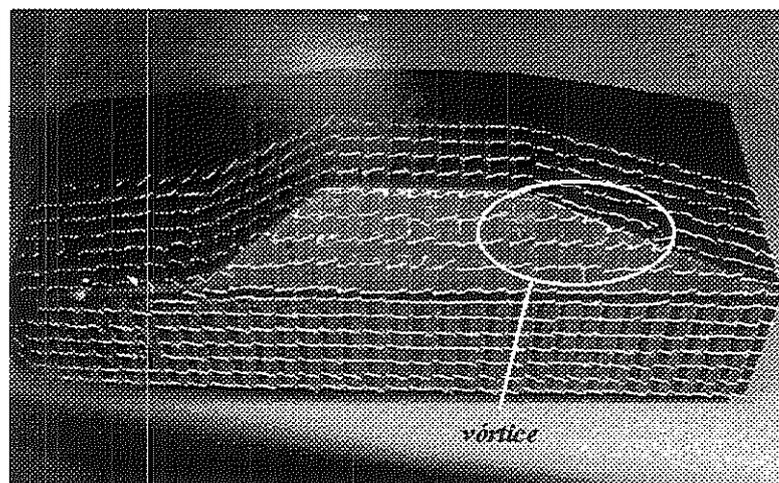


FIGURA 114 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$ .

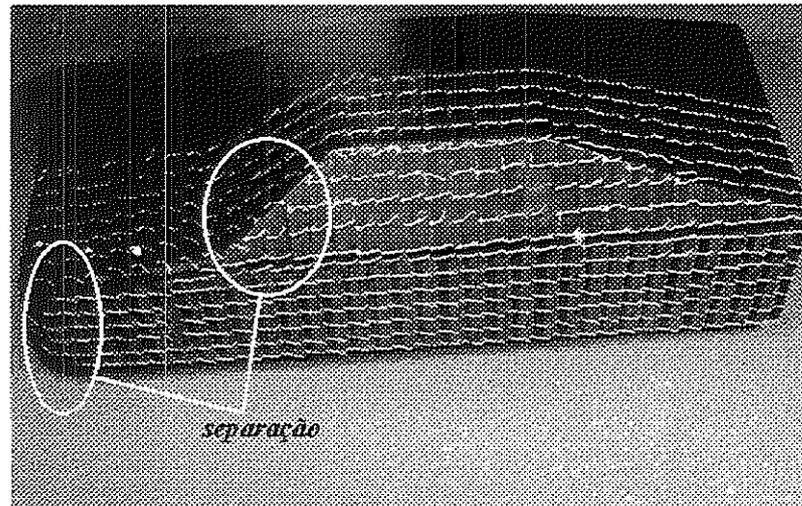


FIGURA 115 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 5^\circ$ .

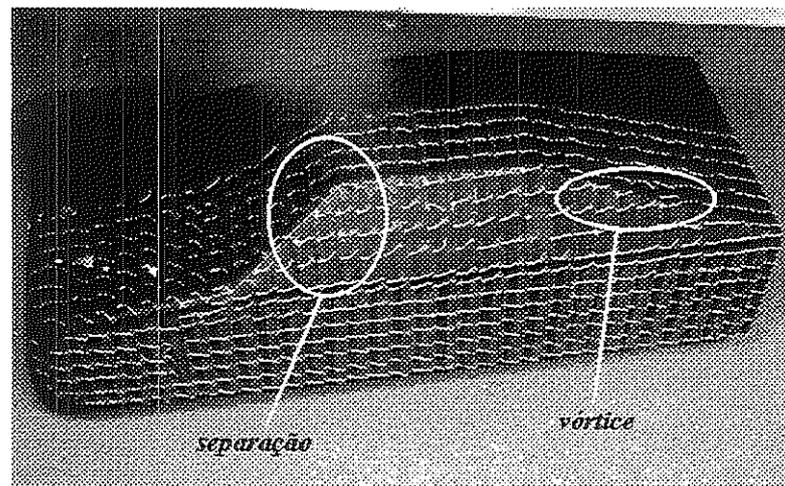


FIGURA 116 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$ .

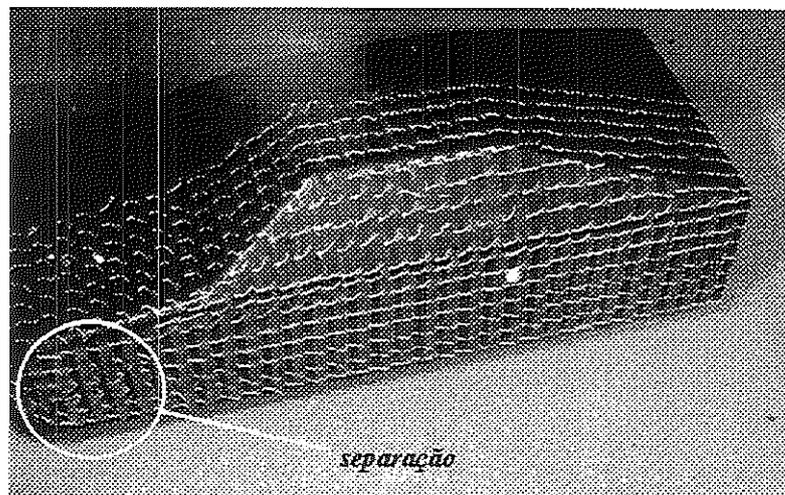


FIGURA 117 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 15^\circ$ .

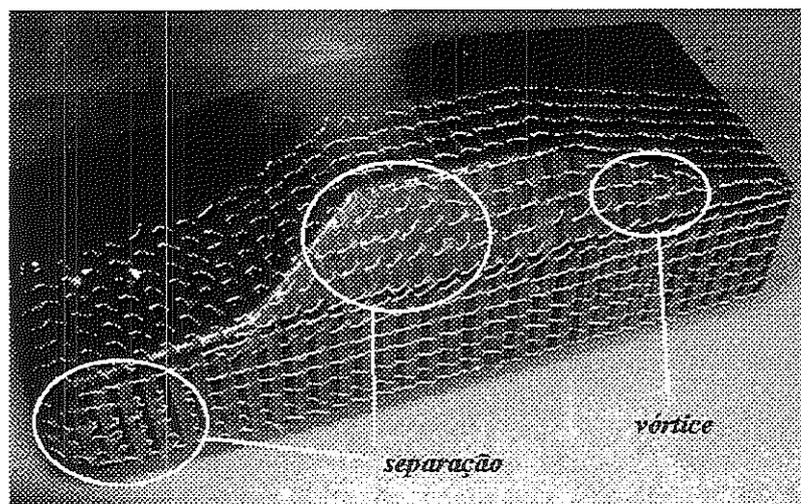


FIGURA 118 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

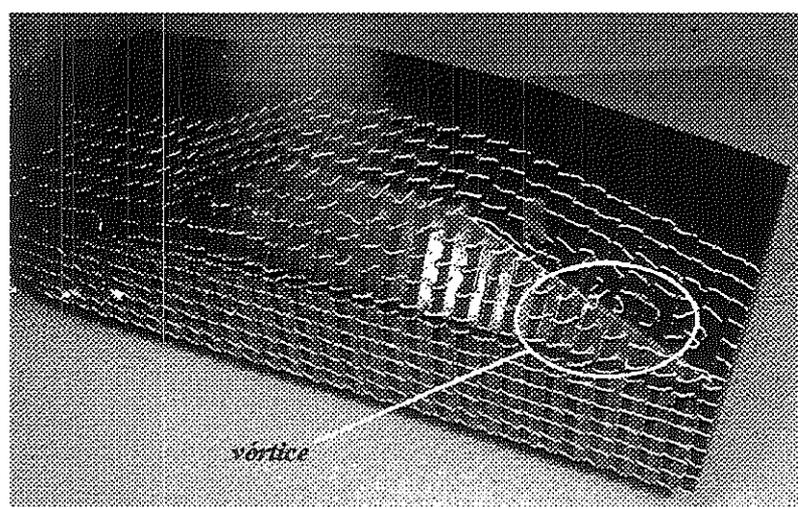


FIGURA 119 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 0^\circ$  e  $\beta = -20^\circ$ .

Pela FIGURA 118, na metade traseira do modelo, no lado de sotavento os “tufts” permanecem colados na superfície do modelo. Em sua extremidade frontal, a partir de  $\beta > 5^\circ$ , devido ao arredondamento verificou-se um descolamento da camada limite, como pode ser observado nas FIGURAS 114 a 118. No lado de barlavento, visto na FIGURA 119, na extremidade frontal ocorre um descolamento, como pode ser observado nas outras imagens, e ao longo da lateral do veículo em sua parte central, os “tufts” permanecem colados. Nas FIGURAS 114 a 118, verificou-se a formação dos vórtices laterais na altura das janelas laterais, visto através da posição desordenada dos “tufts” ao longo de toda lateral do modelo.

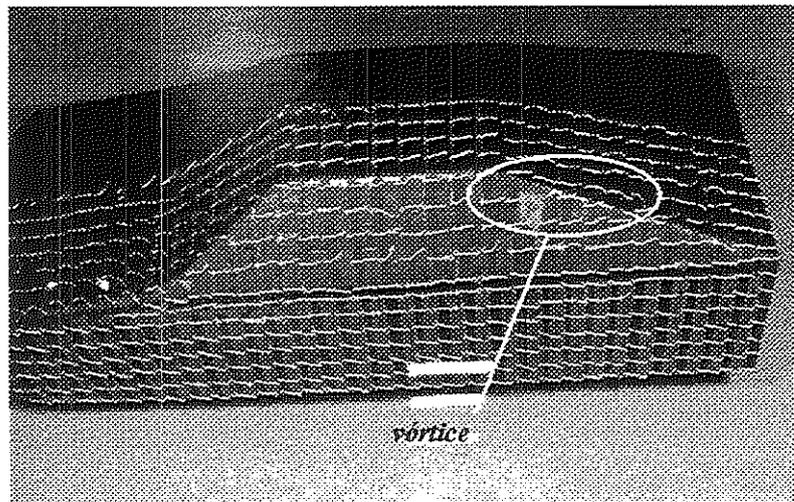


FIGURA 120 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$ .

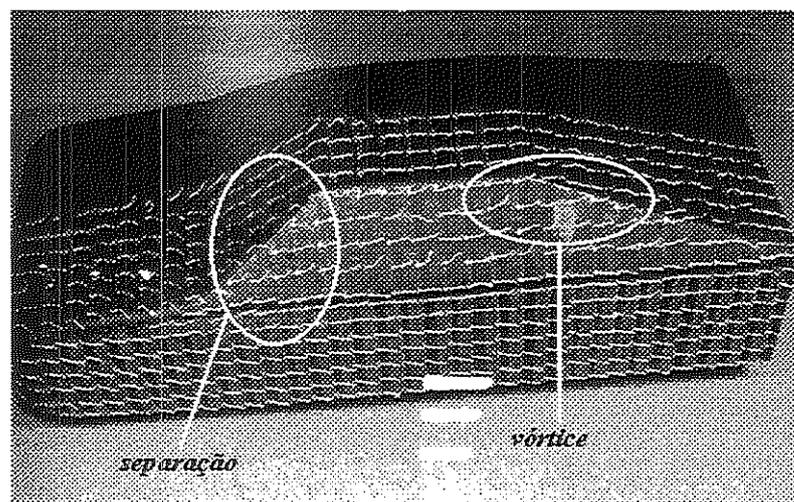


FIGURA 121 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = 5^\circ$ .

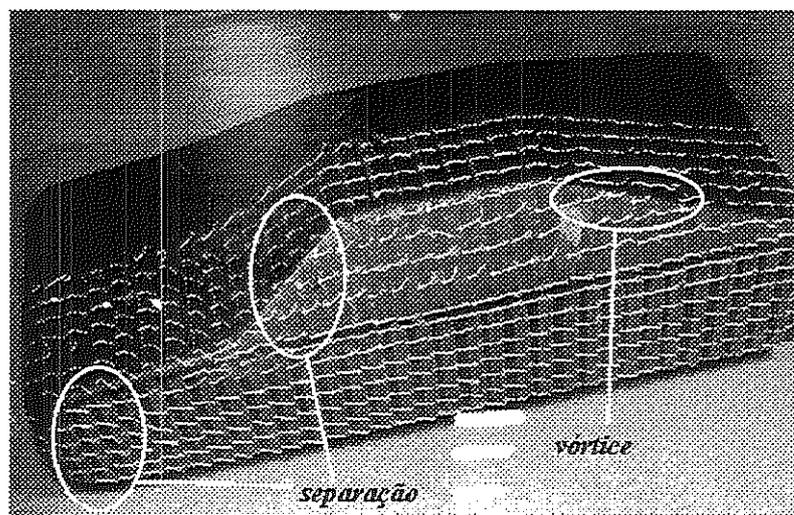


FIGURA 122 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$ .

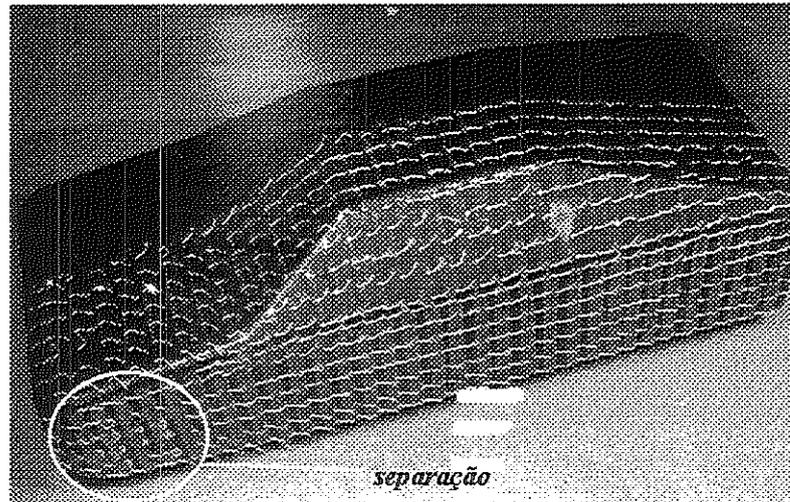


FIGURA 123 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = 15^\circ$ .

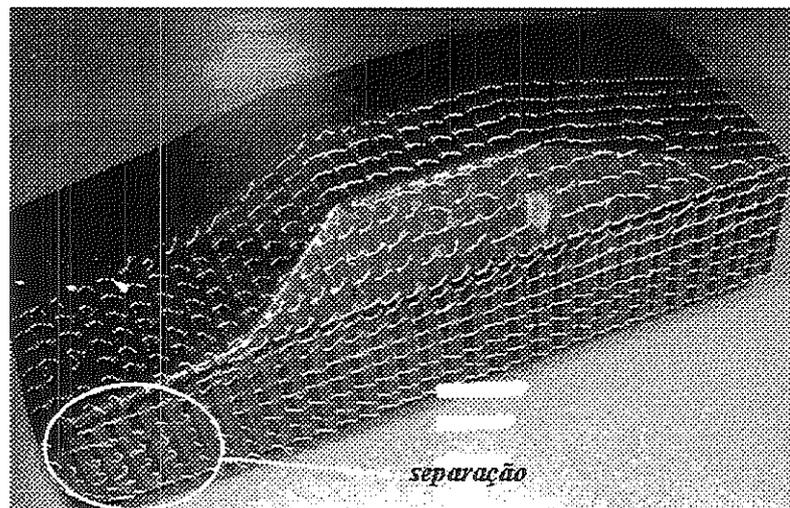


FIGURA 124 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

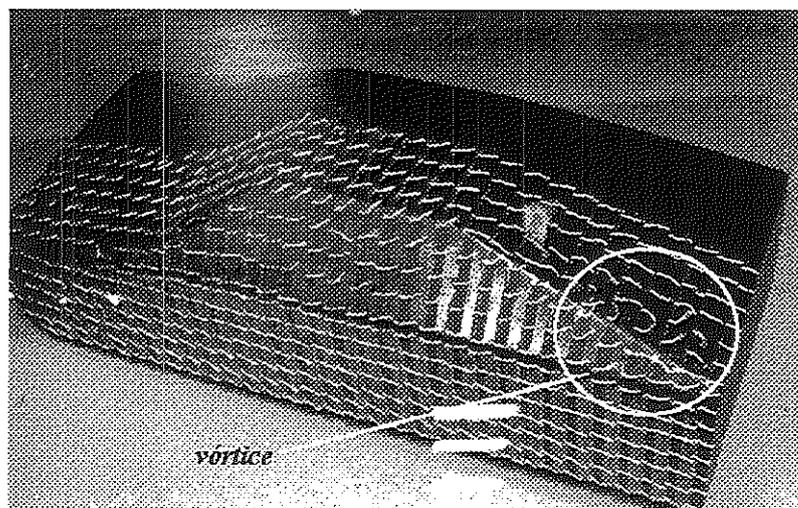


FIGURA 125 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = -3^\circ$  e  $\beta = -20^\circ$ .

Pelas FIGURAS 123 e 124, observou-se na extremidade da frente do capô, que devido ao arredondamento, a partir de  $\beta > 5^\circ$  ocorre um descolamento da camada limite. Conforme o fluxo se desloca sobre o veículo, os “tufts” estão posicionados de maneira desordenada, indicando que houve um descolamento da camada limite na região próxima da extremidade do capô. Próximo a base do pára-brisa e capota, o fluxo deve ser curvado para cima, como indicam as FIGURAS 122,123 e 124. No lado de sotavento, há um descolamento da camada limite na extremidade frontal, como pode ser observado nas FIGURAS 120 a 125. Sobre a linha do teto os “tufts” se curvam conforme o fluxo de ar segue o seu contorno, mas permanecem colados sobre a superfície. Pelas FIGURAS 120 A 125, verificou-se as formações dos vórtices laterais, ao longo da superfície lateral inclinada, entre as colunas do teto.

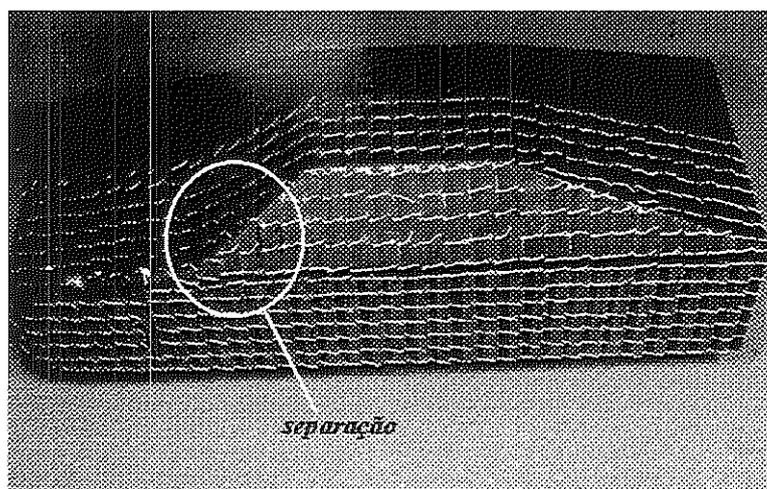


FIGURA 126 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = 0^\circ$ .

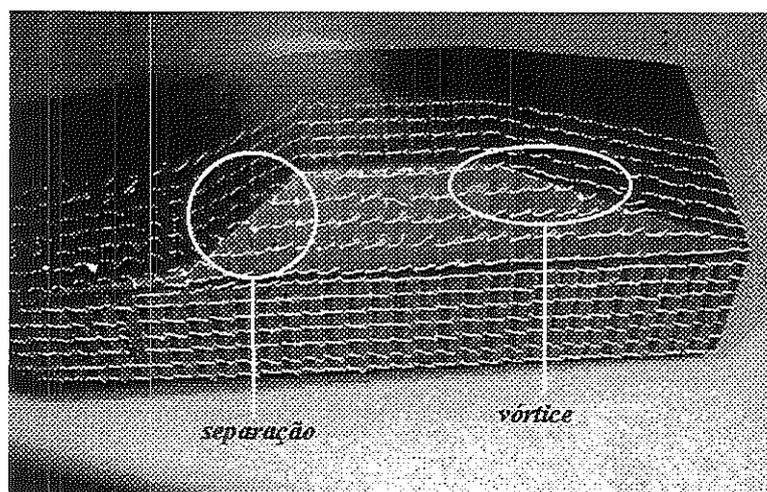


FIGURA 127 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = 5^\circ$ .

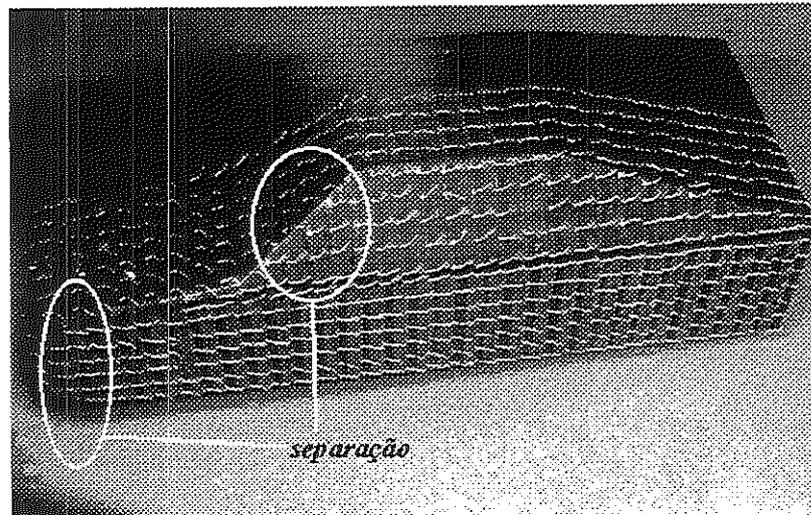


FIGURA 128 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = 10^\circ$ .

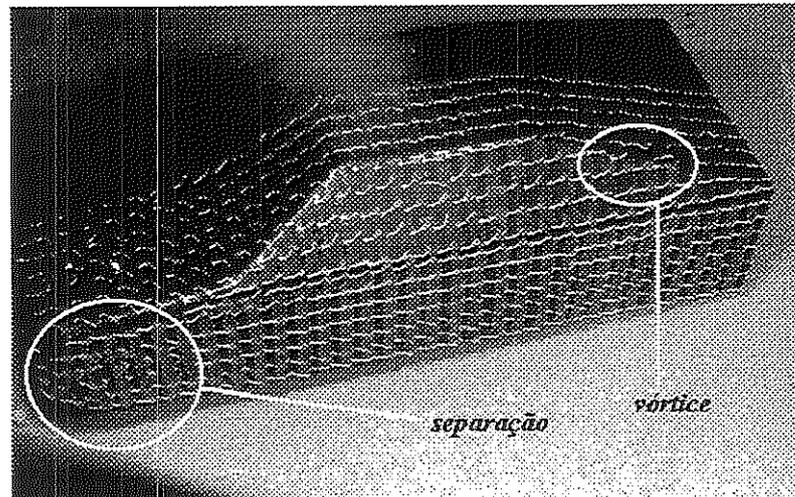


FIGURA 129 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = 15^\circ$ .

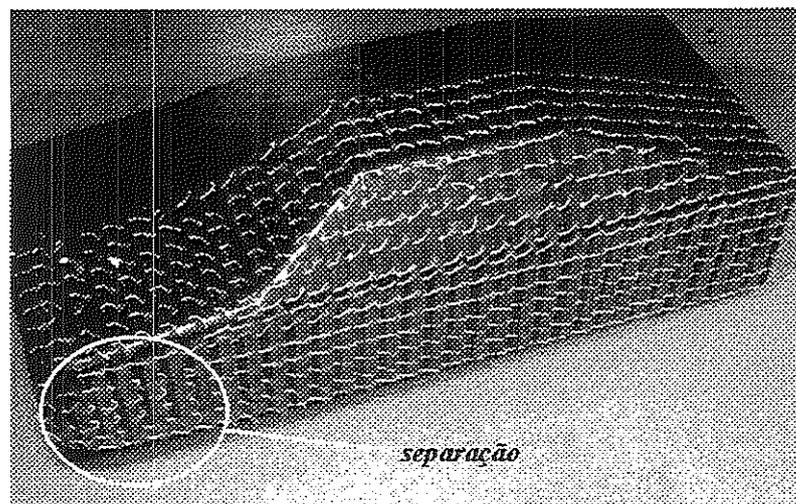


FIGURA 130 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = 20^\circ$ .

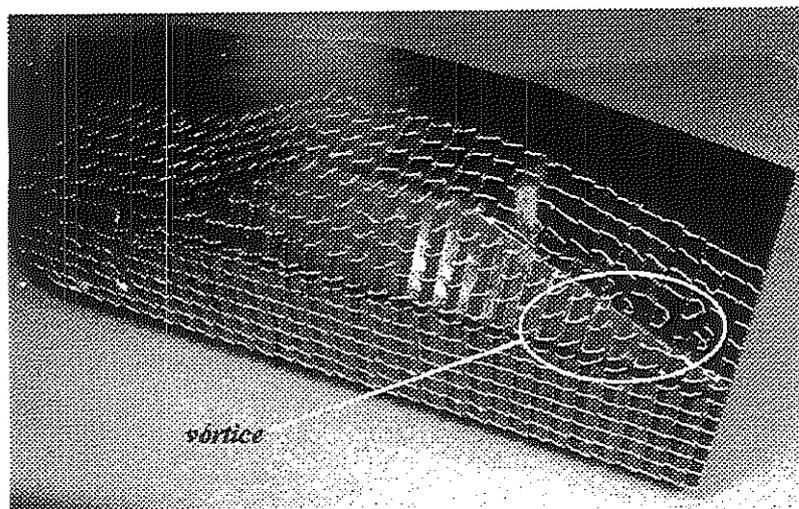


FIGURA 131 – Visualização do fluxo através de “tufts”, com  $\alpha = 4^\circ$  e  $\beta = -20^\circ$ .

Comparando-se as FIGURAS 130 e 131, verificou-se as linhas de fluxo escoando sobre o teto do automóvel, curvam-se na direção do fluxo incidente sobre a superfície do veículo, o que observado pelo posicionamento dos “tufts”. No lado de sotavento observado nas FIGURAS 126 a 130, ocorre a separação da camada limite na parte frontal do modelo, e os “tufts” não permanecem numa posição ordenada e nem colados à superfície do modelo. Na FIGURA 131 verificou-se que os vórtices das colunas traseiras do teto são muito acentuados, como pode ser visto pelas posições dos “tufts” na extremidade superior do teto e a na linha inclinada da parte traseira do modelo. Pelas FIGURAS 126 a 131, observou-se as formações de vórtices ao longo da lateral superior do modelo, numa posição correspondente as janelas laterais do veículo, tanto do lado de sotavento como do lado de barlavento.

Devido ao efeito do arredondamento observou-se na extremidade da frente do capô, ocorre um descolamento da camada limite. Para extremidades moderadamente arredondadas, as quinas provocam as bolhas de separação na região adjacente aos contornos. O efeito da inclinação com ângulo de ataque  $\alpha < 0^\circ$ , melhorando o escoamento na parte traseira, diminui a ocorrência das bolhas de separação ao longo do contorno da extremidade traseira do teto do veículo. Este efeito pode ser observado pelo posicionamento dos “tufts” nesta região da superfície do veículo.

## 6 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

No presente trabalho foram estudadas características aerodinâmicas que influenciam a estabilidade de um veículo de passageiros. As variações da direção de um escoamento incidente sobre a superfície de um automóvel, sujeito a ventos laterais durante seu deslocamento ao longo de uma rodovia, foram simuladas nas instalações do Laboratório de Aeronaves. Todas as simulações de variação da direção do escoamento, através de mudanças no ângulo de ataque lateral  $\beta$ , realizadas no interior da câmara de ensaios do túnel de vento LAE-01, demonstraram que mudanças ocorridas na direção do escoamento resultante dos ventos laterais e da velocidade do veículo, produzem variações nos coeficientes aerodinâmicos de arrasto  $c_D$  e de força lateral  $c_Y$ .

O estudo da variação das forças aerodinâmicas, devido a presença de ventos laterais é de importância na análise das características aerodinâmicas que influem na estabilidade do veículo. Neste trabalho as variações das forças de arrasto e lateral, foram analisadas através das variações dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto  $c_D$  e de força lateral  $c_Y$ , ocorridas devido as variações dos ângulos de ataque  $\alpha$  e de ataque lateral  $\beta$ . Os resultados obtidos nos ensaios experimentais, apresentaram uma concordância com resultados apresentados em outros trabalhos no estudo da variação dos coeficientes de arrasto  $c_D$  e de força lateral  $c_Y$  em função dos ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ .

A magnitude da velocidade e o tempo de duração das rajadas de ventos laterais, determinam a direção do escoamento incidente sobre a superfície do veículo, e assim o tempo de atuação das forças aerodinâmicas resultantes desta mudança no ângulo de ataque lateral  $\beta$ . Os experimentos foram realizados com tempo de

incidência dos ventos laterais em intervalos sem variações. Na região em que os ventos laterais causam relativamente uma pequena preocupação, correspondente ao intervalo do ângulo de ataque lateral  $-10^\circ \leq \beta \leq +10^\circ$ , os resultados demonstraram que o coeficiente de força lateral  $c_Y$  variou de 0 até uma faixa de 0.30 a 0.40, em todos os ângulos de ataque  $\alpha$ .

Nos casos de ventos laterais com velocidades mais altas, os ângulos de ataque lateral  $\beta$  assumem valores maiores. Nestes ângulos de ataque lateral  $\beta$  maiores, onde os ventos laterais causam maiores preocupações, os resultados demonstraram que o coeficiente de força lateral  $c_Y$  sofreu uma variação maior, se comparado a ângulos de ataque lateral  $\beta$  menores, numa faixa de 0.35 a 0.95.

Pelo trabalho realizado, as variações ocorridas nos coeficientes das forças aerodinâmicas de arrasto  $c_D$  e lateral  $c_Y$ , foram verificadas em todas as condições de ensaios, devido as mudanças de posição do modelo em escala 1:5, em relação à direção do escoamento incidente em sua superfície. Estes deslocamentos angulares correspondentes à direção do escoamento determinaram consideráveis modificações nestes coeficientes aerodinâmicos.

Através das modificações dos ângulos de ataque lateral  $\beta$ , do modelo em relação à direção do escoamento dentro do túnel de vento, verificou-se a variação da força de arrasto pelos resultados obtidos nos experimentos. De acordo com os gráficos da variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , observou-se que o coeficiente de arrasto  $c_D$  sofreu um aumento à medida que o ângulo de ataque lateral  $\beta$  variou de  $0^\circ$  até  $20^\circ$ . Estes gráficos mostram que o coeficiente de arrasto  $c_D$  variou de maneira semelhante para todos os ângulos de ataque  $\alpha$ , considerando-se o traçado das curvas.

A influência da mudança do ângulo de ataque  $\alpha$  no coeficiente de arrasto  $c_D$  foi verificada pelos gráficos apresentados nos resultados, onde observamos que para todos os ângulos de ataque  $\alpha$  utilizados nos ensaios, a influência do ângulo de ataque lateral  $\beta$  é mais significativa, em termos de variação do coeficiente de arrasto  $c_D$ . Os

efeitos dos ângulos de ataque  $\alpha$ , na variação do coeficiente de arrasto  $c_D$ , para determinados ângulos de ataque lateral  $\beta$  fixados, foram comparados nos gráficos tridimensionais, verificando-se o traçado das curvas para os diferentes ângulos de ataque  $\alpha$  e ataque lateral  $\beta$ .

Pelas alterações efetuadas nos ângulos de ataque lateral  $\beta$  do modelo em relação à direção do escoamento no interior do túnel de vento, foi possível verificar a variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$  de acordo com os resultados experimentais. Observando-se os gráficos da variação do coeficiente de força lateral  $c_Y$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , observou-se que o coeficiente  $c_Y$  é alterado, ocorrendo um considerável aumento, quando o ângulo  $\beta$  cresce de  $0^\circ$  até  $20^\circ$ . Estes gráficos permitiram observar que o coeficiente de força lateral  $c_Y$  varia num padrão semelhante em todos os ângulos de ataques  $\alpha$  fixados.

Conforme os resultados apresentados neste trabalho, verificou-se que o coeficiente de arrasto  $c_D$  define uma variação em função do ângulo de guinada  $\beta$ , e num trabalho posterior, através de um tratamento dos dados obtidos nos ensaios, detectando algumas prováveis interferências ocorridas durante a realização dos experimentos, seria possível definir um modelo para a variação do coeficiente de arrasto  $c_D$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ ,  $c_D(\beta)$ . De maneira análoga ao discutido em relação ao coeficiente de arrasto  $c_D$ , e de acordo com os resultados experimentais obtidos, verificou-se que o coeficiente de força lateral  $c_Y$ , assim como o coeficiente de arrasto  $c_D$ , define uma variação em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , e também é possível definir uma relação como  $c_Y(\beta)$ , entre o coeficiente de força lateral  $c_Y$  e o ângulo de ataque lateral  $\beta$ .

É demonstrado em outros trabalhos que o coeficiente de arrasto diminui a medida que a distância do modelo ao solo aumenta. Ambas as forças de arrasto e sustentação são fortemente influenciadas pela proximidade do piso, e valores para a distância entre a superfície inferior do veículo e o solo menores que 100 mm, influenciam muito a força de arrasto aerodinâmico. Neste trabalho foi adotada uma distância da superfície inferior do modelo em escala 1:5, para o piso simulado

correspondente a 185 mm, e portanto os valores medidos para as forças aerodinâmicas de arrasto e lateral não foram influenciados pela proximidade ao solo e um estudo desta influência seria possível num trabalho futuro, utilizando-se distâncias menores da superfície inferior do modelo ao solo.

No presente trabalho foram realizados ensaios com a finalidade de visualizar o escoamento sobre a superfície do modelo em escala 1:5. Observou-se os descolamentos da camada limite nas superfícies laterais, no teto e na inclinação da extremidade dianteira do modelo. Verificou-se a formação dos vórtices laterais nas superfícies inclinadas do lado de barlavento e de sotavento. As direções do escoamento ao longo do escoamento sobre a superfície do modelo, foram observadas através das posições dos “tufts” nas partes dianteira, lateral e sobre o teto do modelo.

Em experimentos utilizando esteira móvel, os testes podem ser feitos com quatro larguras de esteira do piso diferentes, sendo utilizado por exemplo uma esteira com a mesma largura do túnel, ou esteiras com dimensões coincidentes com as extremidades externa e interna das rodas. Simulações de um veículo terrestre interagindo com rajadas de vento lateral, podem ser realizadas pela utilização de um modelo móvel montado em trilho, de maneira que o modelo possa atravessar a seção de ensaios, de um túnel de vento de circuito aberto convencional, numa direção normal ao escoamento, com variações do ângulo de ataque lateral.

Num trabalho futuro esta mesma configuração experimental, com apenas duas modificações, utilizando esteira móvel na simulação do piso e movimentação do modelo, poderia ser utilizada para o estudo da variação dos coeficientes de arrasto  $c_D$  e de força lateral  $c_Y$ , em função das variações da direção do escoamento incidente sobre a superfície do veículo, devido a presença de ventos laterais.

Neste trabalho foi utilizado um modelo com a superfície inferior lisa, e portanto os valores obtidos para a força de arrasto não foram influenciados de maneira significativa. Como a simulação das rodas exerce uma influência nas forças

aerodinâmicas que atuam na superfície do veículo, seria interessante num trabalho futuro utilizar-se uma configuração de modelo com rodas em rotação.

Devido ao fato de ocorrer um escoamento assimétrico sobre a superfície de um automóvel se deslocando ao longo de uma rodovia, um momento de guinada atua no veículo e o coeficiente correspondente a este momento é o  $c_N$ . Este momento de guinada tem a tendência de girar o veículo sobre seu eixo vertical  $z$ . Num estudo futuro para analisar se o veículo é aerodinamicamente estável, deve-se determinar os coeficientes de momento de guinada  $c_N$  resultante, que tem a tendência de reduzir o ângulo de ataque lateral  $\beta$ . Neste sentido, pode-se traçar os gráficos dos coeficientes de momento de guinada  $c_N$  em função do ângulo de ataque lateral  $\beta$ , e analisar as curvas de  $c_N(\beta)$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, S. R., RAMM, R., FALTIN, G. (1984). *Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake*. SAE Paper 840300, Detroit.
- AHMED, S. R. (1984). *Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicle*. Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, v. 105, n. 4, Dec., p. 429-434.
- AHMED, S. R., BAUMERT, W. (1979). *The Structure of Wake Flow Behind Road Vehicle*. Aerodynamics of Transportation. ASME-CSME Conference, Niagara Falls, June 18<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup>, p.93-103.
- ANDERSON, J. D. (1991). *Fundamentals of Aerodynamics*. 2 ed. New York, McGraw-Hill.
- BARTH, R. (1960). *The Influence of Asymmetrical Stream on the Aerodynamics Strengths at Vehicle Models and Similar Bodies*. ATZ . v. 62, p. 80-95.
- BEARMAN, P. W.; MULLARKEY, S. P. (1995). *Aerodynamic Forces on Road Vehicles due to Steady Side Winds and Gusts*. Department of Aeronautics . Imperial College of Science, Technology and Medicine . SW7 2BY . London.
- BUCHHEIM, R.; DEUTENBACK, K. R.; LUCKOFF, H. J. (1981). *Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars*. SAE Paper, n. 810185, p. 14.

- CATALANO, F. M. (1988). *Projeto, Construção e Calibração de um Túnel Aerodinâmico de Circuito Aberto Tipo N.P.L. de Seção Transversal Hexagonal*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COLE, D. (1972). *Elementary Vehicle Dynamics*. The University of Michigan . Ann Arbor.
- COOPER, K. R.; FEDIW, A. A.; GARRY, K. P. (1996). *Development of a Moving Ground Belt System for the Study of Vehicle Aerodynamics*. National Research Council of Canada . Ottawa, Cranfield University . London.
- DOMINY, R. G.; DOCTON, M. K. R. (1994). *Passenger Vehicles in Unsteady Cross Winds*. School of Engineering University of Durham . England . Durham.
- GARRY, K. P.; MACKLIN, A. R.; Van OPSTAL, E. P. E. (1995). *Measurement of Transient Aerodynamic Loads on Bluff Bodies at Extreme Yaw Angles*. Cranfield University . London, Technische Universitet Netherlands . Delft.
- GILHAUS, A. M.; RENN, V. E. (1986). *Drag and Driving Stability Related Aerodynamic Forces and Their Interdependence / Results of Measurement on 3/8 Scale Basic Car Shape*. SAE Paper, n. 860211, p.15.
- HEGEL, I.; BEARMAN, P. W. (1990). *Effect of Ground Motion and Wind Turbulence on the Aerodynamic Force Coefficients of a Basic Bluff Body*. Technical University of Hungary . Budapest, Department of Aeronautics. Imperial College of Science, Technology and Medicine . London.
- HOUGHTON, E. L.; CARPENTER, P. W. (1993). *Aerodynamics for Engineering Students*. 4 ed. New York, Halsted Press.

- HOWELL, J. P. (1996). *The Influence of Ground Simulation on the Aerodynamics of Simple Car Shapes with an Underfloor Diffuser*. Rover Group Ltd. . United Kingdon . Coventry.
- HUCHO, W. H. (1987). *Aerodynamics of Road Vehicles*. 1 ed. London, Butterworth.
- HUCHO, W. H. (1978). *The Aerodynamic Drag of cars current understanding, unresolved problems and future prospects*. In: SOVRAN, G., MOREL, T., MASON, W. T., (Ed.): *Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*. Plenum Press, New York, p. 7-44.
- HUCHO, W. H.; JANSSEN, L. J.; EMMELMANN, H. J. (1976). *The Optimization of Body Details / A Method for Reducing Aerodynamic Drag of Road Vehicles*. SAE Paper, n. 760185, p. 18.
- HUMMEL, D. (1978). *On the Vortex Formation over a Slender Wing at Large Angles of Incidence*. AGARD CPP-247. p. 15-17.
- HUMPHREYS, N. D.; BAKER, C. J. (1993). *The Application of Wind Engineering Techniques to Moving Ground Vehicles*. University of Nottingham . United Kingdon. Nottingham.
- KRAMER, C. (1984). *Introduction to Aerodynamic*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, p.60, jan.
- LAJOS, T.; HEGEL, I. (1990). *Some Experiences of Ground Simulation with Moving Belt*. Technical University of Hungary . Budapest.
- Le GOOD, G. M. (1995). *Passenger Car Wind Tunnel Testing: The Correlation of 1/4 Scale Model to Full Scale Results*. Rover Group Ltd. . United Kingdon . Coventry.

- MAUNSELL, M. G. (1977). *Desenvolvimento, Construção e Ensaios de uma Balança Aerodinâmica*. São Carlos. 290p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MERCKER, E.; SOJA, H.; WIEDEMAN, J. (1996). *Experimental Investigation on the Influence of Various Ground Simulation Techniques on a Passenger Car*. DNW . Vollenhove . Netherlands, AUDI AG . Germany . Ingolstadt.
- MOREL, T. (1978). *The Effect of Base Slant on the Flow Pattern and Drag of Three-dimensional Bodies with Blunt Ends*. In: SOVRAN, G., MOREL, T., MASON, W. T., (Ed.): *Aerodynamic Drag mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles*. Plenum Press, New York, p. 191-226.
- NGUYEN, T. M.; SAUNDERS, J. W.; WATKINS, S. (1997). *Sideways Dynamic Force on Passenger Cars in Turbulent winds*. Topics in Vehicle Aerodynamics . SAE - Special Publications . v. 1232 . p. 157 - 172 . n. 970405 . Warrendale . PA .
- SCHLICHTING, H. (1968). *Boundary Layer Theory*. 6 ed. New York, McGraw-Hill.
- SCHENKEL, F. K. (1977). *The Origins of Drag and Lift Reductions on Automobiles with Front and Rear Spoilers*. SAE Paper, n. 770389, p. 11.
- SCIBOR, R. A. J. (1984). *Road Vehicle Aerodynamics*. Pentech Press . London, v.2, p.244.
- SORGATZ, U., BUCHHEIM, R. (1982). *Examinations to the Crosswind Behavior of Future Vehicles*. ATZ . v. 84, p. 11-18.
- TANNER, M. (1967). *A Procedure to the Calculation of the Static Pressure and Resistance of Blunt Bodies with Incompressible and not Periodic Stream*. Germany . Braunschweig.

THWAITES, B. (1960). *Incompressible Aerodynamics*. Clarendon Press, Oxford.

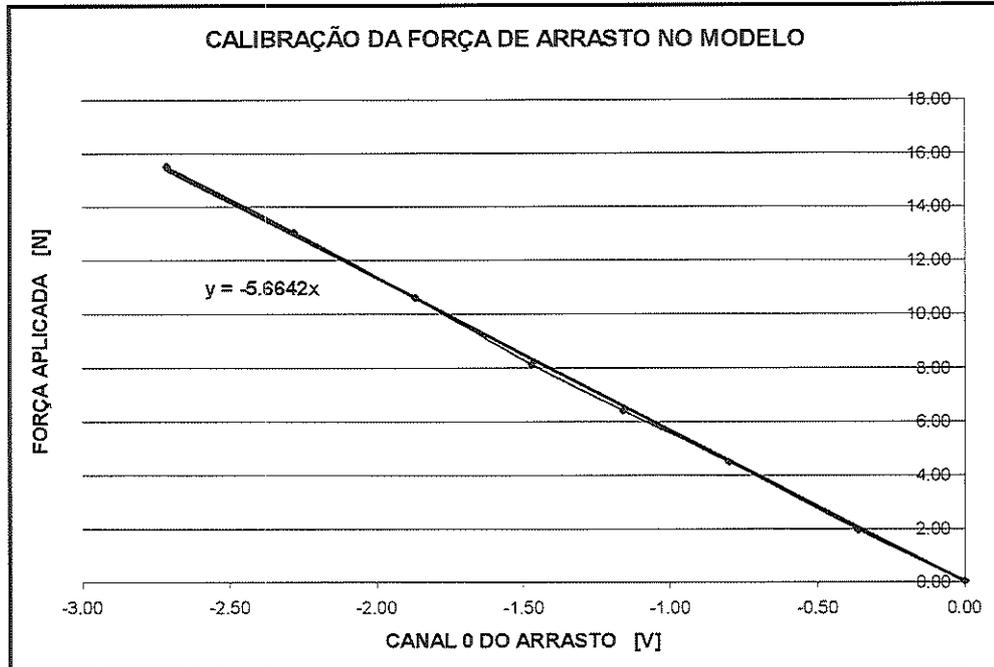
WILDI, J. (1996). *Wind Tunnel Testing of Racing Cars - The Importance of the Road Simulation Technique*. Swiss Federal Aircraft Factory, Aerodynamics and Flight Mechanics Department. Emmen. Switzerland.

## APÊNDICE I

CURVAS E EQUAÇÕES OBTIDAS DA CALIBRAÇÃO DA  
BALANÇA AERODINÂMICA

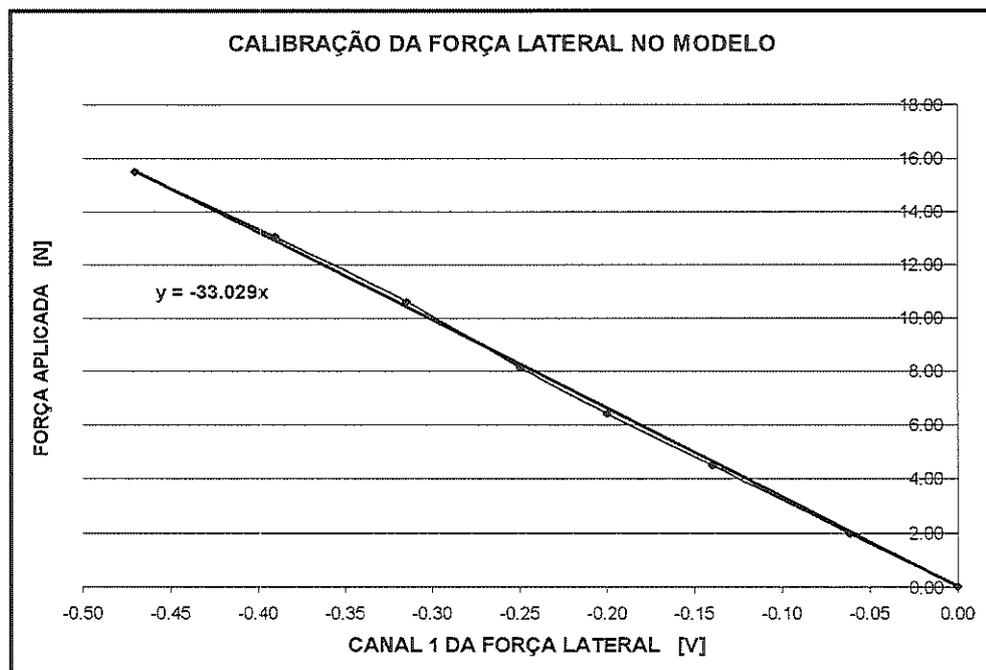
1) Curva de calibração da força de arrasto no modelo e equação obtida:

Equação:  $y = -5.6642x$



2) Curva de calibração da força lateral no modelo e equação obtida:

Equação:  $y = -33.029x$



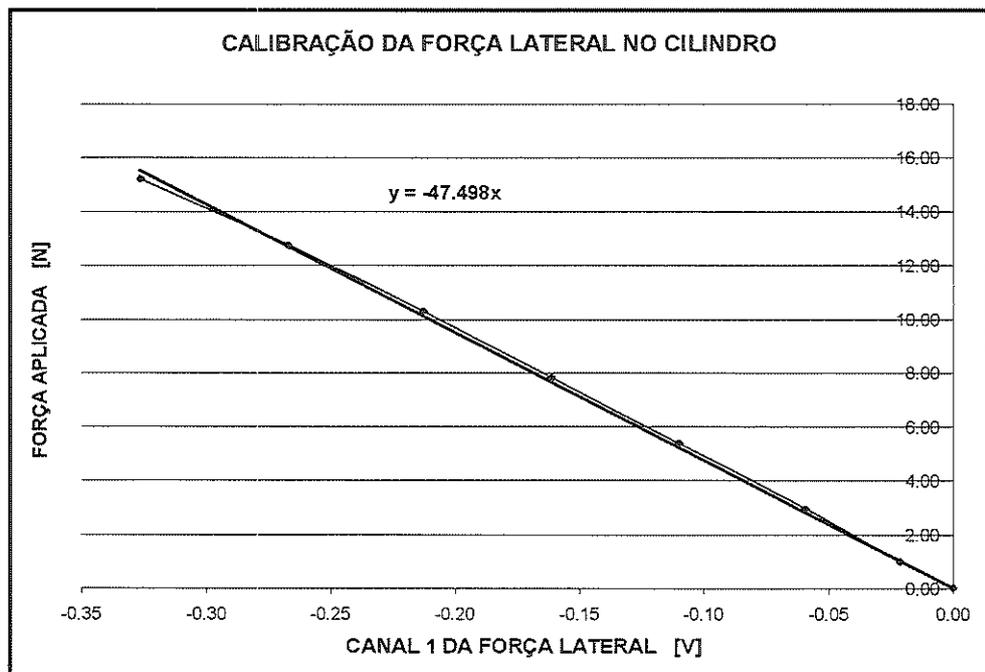
3) Calibração da força de arrasto na haste cilíndrica e equação obtida:

Equação:  $y = 1.9107x$



4) Calibração da força lateral na haste cilíndrica e equação obtida:

Equação:  $y = -47.498x$



## APÊNDICE II

### PLANILHA ELETRÔNICA UTILIZADA

TABELA 01 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -5^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.031	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.050	-0.019	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.056	-0.025	-0.006	0.099	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.004
2	-0.095	-0.064	-0.045	0.743	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.553
3	-0.104	-0.073	-0.054	0.892	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.607
4	-0.168	-0.137	-0.118	1.949	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.521
5	-0.171	-0.140	-0.121	1.998	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.333
6	-0.239	-0.208	-0.189	3.121	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.124
7	-0.298	-0.267	-0.248	4.096	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	2.956
8	-0.374	-0.343	-0.324	5.351	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.163
9	-0.463	-0.432	-0.413	6.821	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.586
10	-0.509	-0.478	-0.459	7.580	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.298
11	-0.567	-0.536	-0.517	8.538	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	7.161
12	-0.646	-0.615	-0.596	9.843	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	8.418
13	-0.686	-0.655	-0.636	10.504	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	8.841
14	-0.812	-0.781	-0.762	12.584	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	10.875
15	-0.860	-0.829	-0.810	13.377	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	11.620
16	-0.927	-0.896	-0.877	14.484	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	12.631
17	-1.001	-0.970	-0.951	15.706	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	13.806
18	-1.073	-1.042	-1.023	16.895	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	14.947
19	-1.118	-1.087	-1.068	17.638	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	15.643
20	-1.179	-1.148	-1.129	18.645	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	16.508

TABELA 02 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -5^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.012	0.000	0.000	0.01	0.000	0.000	0.000
0	-1.418	-1.406	11.946	1.781	0.708	1.354	10.592
1	-1.442	-1.43	12.150	1.782	0.709	1.354	10.796
2	-1.453	-1.441	12.243	1.819	0.724	1.383	10.861
3	-1.475	-1.463	12.430	1.832	0.729	1.393	11.038
4	-1.500	-1.488	12.643	1.837	0.731	1.396	11.246
5	-1.569	-1.557	13.229	1.844	0.734	1.402	11.827
6	-1.657	-1.645	13.977	1.865	0.742	1.418	12.559
7	-1.776	-1.764	14.988	1.88	0.748	1.429	13.558
8	-1.860	-1.848	15.701	1.881	0.748	1.430	14.271
9	-1.956	-1.944	16.517	1.924	0.766	1.463	15.054
10	-2.083	-2.071	17.596	1.960	0.780	1.490	16.106
11	-2.199	-2.187	18.582	1.961	0.780	1.491	17.091
12	-2.397	-2.385	20.264	1.966	0.782	1.495	18.769
13	-2.455	-2.443	20.757	2.045	0.814	1.555	19.201
14	-2.576	-2.564	21.785	2.053	0.817	1.561	20.223
15	-2.757	-2.745	23.323	2.108	0.839	1.603	21.719
16	-2.877	-2.865	24.342	2.115	0.842	1.609	22.733
17	-3.091	-3.079	26.160	2.129	0.848	1.620	24.541
18	-3.267	-3.255	27.656	2.154	0.858	1.639	26.017
19	-3.346	-3.334	28.327	2.178	0.867	1.657	26.670
20	-3.555	-3.543	30.103	2.195	0.874	1.670	28.433

TABELA 03 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -4^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.021	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.034	-0.013	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.053	-0.032	-0.019	0.314	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.219
2	-0.079	-0.058	-0.045	0.743	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.553
3	-0.131	-0.110	-0.097	1.602	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	1.317
4	-0.148	-0.127	-0.114	1.883	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.455
5	-0.212	-0.191	-0.178	2.940	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	2.275
6	-0.292	-0.271	-0.258	4.261	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	3.263
7	-0.345	-0.324	-0.311	5.136	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.996
8	-0.405	-0.384	-0.371	6.127	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.940
9	-0.467	-0.446	-0.433	7.151	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.916
10	-0.561	-0.540	-0.527	8.703	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	7.421
11	-0.617	-0.596	-0.583	9.628	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.251
12	-0.717	-0.696	-0.683	11.280	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.855
13	-0.775	-0.754	-0.741	12.238	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.575
14	-0.844	-0.823	-0.810	13.377	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	11.667
15	-0.895	-0.874	-0.861	14.219	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	12.462
16	-0.987	-0.966	-0.953	15.739	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.886
17	-1.063	-1.042	-1.029	16.994	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	15.094
18	-1.104	-1.083	-1.070	17.671	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.724
19	-1.213	-1.192	-1.179	19.471	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	17.476
20	-1.260	-1.239	-1.226	20.247	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	18.110

TABELA 04 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -4^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.005	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.466	-1.461	12.413	1.781	0.708	1.354	11.060
1	-1.491	-1.486	12.626	1.782	0.709	1.354	11.271
2	-1.500	-1.495	12.702	1.819	0.724	1.383	11.320
3	-1.541	-1.536	13.050	1.832	0.729	1.393	11.658
4	-1.578	-1.573	13.365	1.837	0.731	1.396	11.968
5	-1.638	-1.633	13.875	1.844	0.734	1.402	12.473
6	-1.737	-1.732	14.716	1.865	0.742	1.418	13.298
7	-1.856	-1.851	15.727	1.880	0.748	1.429	14.298
8	-1.930	-1.925	16.356	1.881	0.748	1.430	14.926
9	-2.087	-2.082	17.690	1.924	0.766	1.463	16.227
10	-2.171	-2.166	18.403	1.960	0.780	1.490	16.913
11	-2.284	-2.279	19.363	1.961	0.780	1.491	17.872
12	-2.463	-2.458	20.884	1.966	0.782	1.495	19.389
13	-2.578	-2.573	21.861	2.045	0.814	1.555	20.306
14	-2.786	-2.781	23.628	2.053	0.817	1.561	22.067
15	-2.896	-2.891	24.563	2.108	0.839	1.603	22.960
16	-3.055	-3.05	25.914	2.115	0.842	1.609	24.305
17	-3.293	-3.288	27.936	2.129	0.848	1.620	26.317
18	-3.336	-3.331	28.302	2.154	0.858	1.639	26.663
19	-3.559	-3.554	30.196	2.178	0.867	1.657	28.539
20	-3.716	-3.711	31.530	2.195	0.874	1.670	29.860

TABELA 05 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -3^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.005	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.010	-0.005	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.039	-0.034	-0.029	0.479	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.384
2	-0.095	-0.090	-0.085	1.404	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	1.214
3	-0.120	-0.115	-0.110	1.817	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	1.532
4	-0.146	-0.141	-0.136	2.246	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.819
5	-0.203	-0.198	-0.193	3.187	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	2.522
6	-0.266	-0.261	-0.256	4.228	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	3.230
7	-0.346	-0.341	-0.336	5.549	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	4.409
8	-0.418	-0.413	-0.408	6.738	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	5.551
9	-0.481	-0.476	-0.471	7.779	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	6.544
10	-0.556	-0.551	-0.546	9.017	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	7.735
11	-0.618	-0.613	-0.608	10.041	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.664
12	-0.698	-0.693	-0.688	11.362	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.937
13	-0.774	-0.769	-0.764	12.617	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.955
14	-0.873	-0.868	-0.863	14.252	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	12.543
15	-0.907	-0.902	-0.897	14.814	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	13.057
16	-0.993	-0.988	-0.983	16.234	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	14.382
17	-1.057	-1.052	-1.047	17.291	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	15.391
18	-1.092	-1.087	-1.082	17.869	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.922
19	-1.154	-1.149	-1.144	18.893	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.898
20	-1.213	-1.208	-1.203	19.868	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	17.730

TABELA 06 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -3^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.004	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.526	-1.522	12.932	1.781	0.708	1.354	11.578
1	-1.527	-1.523	12.940	1.782	0.709	1.354	11.586
2	-1.572	-1.568	13.322	1.819	0.724	1.383	11.940
3	-1.596	-1.592	13.526	1.832	0.729	1.393	12.134
4	-1.632	-1.628	13.832	1.837	0.731	1.396	12.436
5	-1.646	-1.642	13.951	1.844	0.734	1.402	12.549
6	-1.737	-1.733	14.724	1.865	0.742	1.418	13.307
7	-1.869	-1.865	15.846	1.880	0.748	1.429	14.417
8	-1.963	-1.959	16.644	1.881	0.748	1.430	15.214
9	-2.015	-2.011	17.086	1.924	0.766	1.463	15.623
10	-2.148	-2.144	18.216	1.960	0.780	1.490	16.726
11	-2.266	-2.262	19.219	1.961	0.780	1.491	17.728
12	-2.465	-2.461	20.910	1.966	0.782	1.495	19.415
13	-2.560	-2.556	21.717	2.045	0.814	1.555	20.161
14	-2.724	-2.720	23.110	2.053	0.817	1.561	21.549
15	-2.829	-2.825	24.002	2.108	0.839	1.603	22.399
16	-2.989	-2.985	25.362	2.115	0.842	1.609	23.753
17	-3.177	-3.173	26.959	2.129	0.848	1.620	25.340
18	-3.237	-3.233	27.469	2.154	0.858	1.639	25.830
19	-3.439	-3.435	29.185	2.178	0.867	1.657	27.528
20	-3.608	-3.604	30.621	2.195	0.874	1.670	28.951

TABELA 07 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -2^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.025	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.028	-0.003	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.035	-0.010	-0.007	0.116	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.021
2	-0.096	-0.071	-0.068	1.123	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.933
3	-0.097	-0.072	-0.069	1.140	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.855
4	-0.155	-0.130	-0.127	2.097	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.670
5	-0.156	-0.131	-0.128	2.114	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.449
6	-0.245	-0.220	-0.217	3.584	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.586
7	-0.285	-0.260	-0.257	4.244	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.104
8	-0.359	-0.334	-0.331	5.466	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.279
9	-0.422	-0.397	-0.394	6.507	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.272
10	-0.515	-0.490	-0.487	8.043	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.760
11	-0.601	-0.576	-0.573	9.463	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.086
12	-0.671	-0.646	-0.643	10.619	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.194
13	-0.758	-0.733	-0.730	12.056	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.394
14	-0.816	-0.791	-0.788	13.014	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	11.304
15	-0.893	-0.868	-0.865	14.285	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	12.528
16	-0.987	-0.962	-0.959	15.838	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.985
17	-1.066	-1.041	-1.038	17.143	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	15.243
18	-1.113	-1.088	-1.085	17.919	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.971
19	-1.207	-1.182	-1.179	19.471	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	17.476
20	-1.268	-1.243	-1.240	20.479	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	18.341

TABELA 08 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -2^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	X modelo (N)	senal (V)	senal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.072	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.437	-1.365	11.598	1.781	0.708	1.354	10.244
1	-1.470	-1.398	11.878	1.782	0.709	1.354	10.524
2	-1.476	-1.404	11.929	1.819	0.724	1.383	10.546
3	-1.492	-1.420	12.065	1.832	0.729	1.393	10.672
4	-1.507	-1.435	12.192	1.837	0.731	1.396	10.796
5	-1.599	-1.527	12.974	1.844	0.734	1.402	11.572
6	-1.673	-1.601	13.603	1.865	0.742	1.418	12.185
7	-1.760	-1.688	14.342	1.880	0.748	1.429	12.913
8	-1.837	-1.765	14.996	1.881	0.748	1.430	13.566
9	-1.954	-1.882	15.990	1.924	0.766	1.463	14.527
10	-2.084	-2.012	17.095	1.960	0.780	1.490	15.604
11	-2.172	-2.100	17.842	1.961	0.780	1.491	16.351
12	-2.345	-2.273	19.312	1.966	0.782	1.495	17.817
13	-2.515	-2.443	20.757	2.045	0.814	1.555	19.201
14	-2.560	-2.488	21.139	2.053	0.817	1.561	19.578
15	-2.749	-2.677	22.745	2.108	0.839	1.603	21.141
16	-2.918	-2.846	24.181	2.115	0.842	1.609	22.572
17	-3.115	-3.043	25.855	2.129	0.848	1.620	24.235
18	-3.191	-3.119	26.500	2.154	0.858	1.639	24.862
19	-3.413	-3.341	28.386	2.178	0.867	1.657	26.730
20	-3.587	-3.515	29.865	2.195	0.874	1.670	28.195

TABELA 09 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -1^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.016	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.024	-0.008	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.057	-0.041	-0.033	0.545	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.450
2	-0.060	-0.044	-0.036	0.595	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.405
3	-0.103	-0.087	-0.079	1.305	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	1.020
4	-0.116	-0.100	-0.092	1.519	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.092
5	-0.164	-0.148	-0.140	2.312	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.647
6	-0.266	-0.250	-0.242	3.997	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.999
7	-0.317	-0.301	-0.293	4.839	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.699
8	-0.408	-0.392	-0.384	6.342	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	5.154
9	-0.475	-0.459	-0.451	7.448	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	6.213
10	-0.526	-0.510	-0.502	8.291	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	7.008
11	-0.601	-0.585	-0.577	9.529	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.152
12	-0.651	-0.635	-0.627	10.355	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	8.930
13	-0.743	-0.727	-0.719	11.874	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.212
14	-0.792	-0.776	-0.768	12.684	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	10.974
15	-0.876	-0.860	-0.852	14.071	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	12.313
16	-0.944	-0.928	-0.920	15.194	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.341
17	-0.993	-0.977	-0.969	16.003	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	14.103
18	-1.107	-1.091	-1.083	17.886	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.938
19	-1.138	-1.122	-1.114	18.398	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.403
20	-1.217	-1.201	-1.193	19.702	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	17.565

TABELA 10 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = -1^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	X modelo (N)	senal (V)	senal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.042	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.590	-1.548	13.152	1.781	0.708	1.354	11.799
1	-1.593	-1.551	13.178	1.782	0.709	1.354	11.824
2	-1.628	-1.586	13.475	1.819	0.724	1.383	12.093
3	-1.629	-1.587	13.484	1.832	0.729	1.393	12.091
4	-1.638	-1.596	13.560	1.837	0.731	1.396	12.164
5	-1.676	-1.634	13.883	1.844	0.734	1.402	12.481
6	-1.749	-1.707	14.503	1.865	0.742	1.418	13.086
7	-1.808	-1.766	15.005	1.880	0.748	1.429	13.575
8	-1.929	-1.887	16.033	1.881	0.748	1.430	14.603
9	-2.043	-2.001	17.001	1.924	0.766	1.463	15.538
10	-2.091	-2.049	17.409	1.960	0.780	1.490	15.919
11	-2.263	-2.221	18.871	1.961	0.780	1.491	17.379
12	-2.395	-2.353	19.992	1.966	0.782	1.495	18.497
13	-2.508	-2.466	20.952	2.045	0.814	1.555	19.397
14	-2.623	-2.581	21.929	2.053	0.817	1.561	20.368
15	-2.790	-2.748	23.348	2.108	0.839	1.603	21.745
16	-2.905	-2.863	24.325	2.115	0.842	1.609	22.716
17	-3.034	-2.992	25.421	2.129	0.848	1.620	23.802
18	-3.184	-3.142	26.696	2.154	0.858	1.639	25.057
19	-3.357	-3.315	28.166	2.178	0.867	1.657	26.509
20	-3.580	-3.538	30.060	2.195	0.874	1.670	28.390

TABELA 11 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 0^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.018	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.026	-0.008	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.049	-0.031	-0.023	0.380	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.285
2	-0.060	-0.042	-0.034	0.562	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.372
3	-0.103	-0.085	-0.077	1.272	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.987
4	-0.117	-0.099	-0.091	1.503	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.075
5	-0.184	-0.166	-0.158	2.609	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.944
6	-0.230	-0.212	-0.204	3.369	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.372
7	-0.305	-0.287	-0.279	4.608	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.468
8	-0.376	-0.358	-0.350	5.780	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.593
9	-0.435	-0.417	-0.409	6.755	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.520
10	-0.487	-0.469	-0.461	7.613	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.331
11	-0.612	-0.594	-0.586	9.678	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.300
12	-0.665	-0.647	-0.639	10.553	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.128
13	-0.735	-0.717	-0.709	11.709	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.047
14	-0.790	-0.772	-0.764	12.617	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	10.908
15	-0.842	-0.824	-0.816	13.476	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	11.719
16	-0.961	-0.943	-0.935	15.442	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.589
17	-1.012	-0.994	-0.986	16.284	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	14.384
18	-1.076	-1.058	-1.050	17.341	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.393
19	-1.130	-1.112	-1.104	18.233	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.238
20	-1.206	-1.188	-1.180	19.488	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	17.350

TABELA 12 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em  $X$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 0^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	X modelo (N)	senal (V)	senal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.090	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.622	-1.532	13.016	1.781	0.708	1.354	11.663
1	-1.666	-1.576	13.390	1.782	0.709	1.354	12.036
2	-1.675	-1.585	13.467	1.819	0.724	1.383	12.084
3	-1.688	-1.598	13.577	1.832	0.729	1.393	12.185
4	-1.710	-1.620	13.764	1.837	0.731	1.396	12.368
5	-1.746	-1.656	14.070	1.844	0.734	1.402	12.668
6	-1.751	-1.661	14.113	1.865	0.742	1.418	12.695
7	-1.801	-1.711	14.537	1.880	0.748	1.429	13.108
8	-1.906	-1.816	15.429	1.881	0.748	1.430	13.999
9	-2.015	-1.925	16.356	1.924	0.766	1.463	14.893
10	-2.131	-2.041	17.341	1.960	0.780	1.490	15.851
11	-2.242	-2.152	18.284	1.961	0.780	1.491	16.793
12	-2.330	-2.240	19.032	1.966	0.782	1.495	17.537
13	-2.557	-2.467	20.961	2.045	0.814	1.555	19.405
14	-2.601	-2.511	21.334	2.053	0.817	1.561	19.773
15	-2.770	-2.680	22.770	2.108	0.839	1.603	21.167
16	-2.944	-2.854	24.249	2.115	0.842	1.609	22.640
17	-3.052	-2.962	25.166	2.129	0.848	1.620	23.547
18	-3.208	-3.118	26.492	2.154	0.858	1.639	24.853
19	-3.348	-3.258	27.681	2.178	0.867	1.657	26.024
20	-3.536	-3.446	29.279	2.195	0.874	1.670	27.609

TABELA 13 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 1^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.020	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.036	-0.016	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.046	-0.026	-0.010	0.165	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.070
2	-0.079	-0.059	-0.043	0.710	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.520
3	-0.097	-0.077	-0.061	1.007	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.722
4	-0.123	-0.103	-0.087	1.437	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.009
5	-0.136	-0.116	-0.100	1.652	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	0.987
6	-0.218	-0.198	-0.182	3.006	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.008
7	-0.301	-0.281	-0.265	4.376	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.237
8	-0.376	-0.356	-0.340	5.615	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.428
9	-0.444	-0.424	-0.408	6.738	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.503
10	-0.532	-0.512	-0.496	8.191	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.909
11	-0.616	-0.596	-0.580	9.579	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.201
12	-0.655	-0.635	-0.619	10.223	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	8.798
13	-0.734	-0.714	-0.698	11.527	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	9.865
14	-0.828	-0.808	-0.792	13.080	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	11.370
15	-0.893	-0.873	-0.857	14.153	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	12.396
16	-0.947	-0.927	-0.911	15.045	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.193
17	-1.027	-1.007	-0.991	16.366	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	14.466
18	-1.092	-1.072	-1.056	17.440	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.492
19	-1.139	-1.119	-1.103	18.216	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.221
20	-1.195	-1.175	-1.159	19.141	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	17.003

TABELA 14 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em  $X$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 1^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.075	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.807	-1.732	14.716	1.781	0.708	1.354	13.362
1	-1.821	-1.746	14.835	1.782	0.709	1.354	13.480
2	-1.824	-1.749	14.860	1.819	0.724	1.383	13.478
3	-1.849	-1.774	15.073	1.832	0.729	1.393	13.680
4	-1.862	-1.787	15.183	1.837	0.731	1.396	13.787
5	-1.867	-1.792	15.226	1.844	0.734	1.402	13.824
6	-1.894	-1.819	15.455	1.865	0.742	1.418	14.037
7	-2.015	-1.940	16.483	1.880	0.748	1.429	15.054
8	-2.067	-1.992	16.925	1.881	0.748	1.430	15.495
9	-2.185	-2.110	17.927	1.924	0.766	1.463	16.465
10	-2.251	-2.176	18.488	1.960	0.780	1.490	16.998
11	-2.342	-2.267	19.261	1.961	0.780	1.491	17.770
12	-2.513	-2.438	20.714	1.966	0.782	1.495	19.219
13	-2.621	-2.546	21.632	2.045	0.814	1.555	20.077
14	-2.798	-2.723	23.136	2.053	0.817	1.561	21.574
15	-2.957	-2.882	24.487	2.108	0.839	1.603	22.883
16	-3.098	-3.023	25.685	2.115	0.842	1.609	24.076
17	-3.285	-3.210	27.273	2.129	0.848	1.620	25.654
18	-3.460	-3.385	28.760	2.154	0.858	1.639	27.122
19	-3.621	-3.546	30.128	2.178	0.867	1.657	28.471
20	-3.748	-3.673	31.207	2.195	0.874	1.670	29.537

TABELA 15 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 2^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.015	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.021	-0.006	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.065	-0.050	-0.044	0.727	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.632
2	-0.069	-0.054	-0.048	0.793	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.603
3	-0.089	-0.074	-0.068	1.123	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.838
4	-0.116	-0.101	-0.095	1.569	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.141
5	-0.188	-0.173	-0.167	2.758	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	2.093
6	-0.250	-0.235	-0.229	3.782	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.784
7	-0.327	-0.312	-0.306	5.054	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.914
8	-0.393	-0.378	-0.372	6.144	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.956
9	-0.429	-0.414	-0.408	6.738	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.503
10	-0.508	-0.493	-0.487	8.043	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.760
11	-0.593	-0.578	-0.572	9.447	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.069
12	-0.680	-0.665	-0.659	10.883	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.458
13	-0.724	-0.709	-0.703	11.610	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	9.948
14	-0.780	-0.765	-0.759	12.535	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	10.825
15	-0.847	-0.832	-0.826	13.641	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	11.884
16	-0.893	-0.878	-0.872	14.401	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	12.549
17	-0.999	-0.984	-0.978	16.152	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	14.252
18	-1.030	-1.015	-1.009	16.664	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	14.716
19	-1.066	-1.051	-1.045	17.258	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	15.263
20	-1.131	-1.116	-1.110	18.332	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	16.194

TABELA 16 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em  $X$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 2^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.100	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.770	-1.670	14.189	1.781	0.708	1.354	12.835
1	-1.775	-1.675	14.231	1.782	0.709	1.354	12.877
2	-1.780	-1.680	14.274	1.819	0.724	1.383	12.891
3	-1.831	-1.731	14.707	1.832	0.729	1.393	13.315
4	-1.833	-1.733	14.724	1.837	0.731	1.396	13.328
5	-1.856	-1.756	14.920	1.844	0.734	1.402	13.518
6	-1.911	-1.811	15.387	1.865	0.742	1.418	13.969
7	-1.977	-1.877	15.948	1.880	0.748	1.429	14.519
8	-2.065	-1.965	16.695	1.881	0.748	1.430	15.265
9	-2.125	-2.025	17.205	1.924	0.766	1.463	15.742
10	-2.237	-2.137	18.157	1.960	0.780	1.490	16.666
11	-2.393	-2.293	19.482	1.961	0.780	1.491	17.991
12	-2.561	-2.461	20.910	1.966	0.782	1.495	19.415
13	-2.666	-2.566	21.802	2.045	0.814	1.555	20.246
14	-2.800	-2.700	22.940	2.053	0.817	1.561	21.379
15	-2.956	-2.856	24.266	2.108	0.839	1.603	22.662
16	-3.077	-2.977	25.294	2.115	0.842	1.609	23.685
17	-3.308	-3.208	27.256	2.129	0.848	1.620	25.637
18	-3.353	-3.253	27.639	2.154	0.858	1.639	26.000
19	-3.496	-3.396	28.854	2.178	0.867	1.657	27.197
20	-3.739	-3.639	30.918	2.195	0.874	1.670	29.248

TABELA 17 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 3^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	sinal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.017	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.026	-0.009	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.050	-0.033	-0.024	0.396	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.301
2	-0.067	-0.050	-0.041	0.677	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.487
3	-0.104	-0.087	-0.078	1.288	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	1.003
4	-0.129	-0.112	-0.103	1.701	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.274
5	-0.157	-0.140	-0.131	2.163	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.498
6	-0.224	-0.207	-0.198	3.270	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.273
7	-0.285	-0.268	-0.259	4.277	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.137
8	-0.378	-0.361	-0.352	5.813	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.626
9	-0.426	-0.409	-0.400	6.606	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.371
10	-0.474	-0.457	-0.448	7.399	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.116
11	-0.549	-0.532	-0.523	8.637	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	7.260
12	-0.691	-0.674	-0.665	10.982	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	9.558
13	-0.723	-0.706	-0.697	11.511	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	9.849
14	-0.814	-0.797	-0.788	13.014	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	11.304
15	-0.846	-0.829	-0.820	13.542	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	11.785
16	-0.908	-0.891	-0.882	14.566	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	12.714
17	-0.957	-0.940	-0.931	15.375	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	13.476
18	-1.035	-1.018	-1.009	16.664	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	14.716
19	-1.121	-1.104	-1.095	18.084	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.089
20	-1.131	-1.114	-1.105	18.249	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	16.112

TABELA 18 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em X para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 3^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.145	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.819	-1.674	14.223	1.781	0.708	1.354	12.869
1	-1.847	-1.702	14.461	1.782	0.709	1.354	13.107
2	-1.851	-1.706	14.495	1.819	0.724	1.383	13.112
3	-1.855	-1.710	14.529	1.832	0.729	1.393	13.136
4	-1.915	-1.770	15.039	1.837	0.731	1.396	13.642
5	-1.916	-1.771	15.047	1.844	0.734	1.402	13.645
6	-2.000	-1.855	15.761	1.865	0.742	1.418	14.343
7	-2.009	-1.864	15.837	1.880	0.748	1.429	14.408
8	-2.083	-1.938	16.466	1.881	0.748	1.430	15.036
9	-2.197	-2.052	17.435	1.924	0.766	1.463	15.972
10	-2.251	-2.106	17.893	1.960	0.780	1.490	16.403
11	-2.384	-2.239	19.023	1.961	0.780	1.491	17.532
12	-2.562	-2.417	20.536	1.966	0.782	1.495	19.041
13	-2.674	-2.529	21.487	2.045	0.814	1.555	19.932
14	-2.830	-2.685	22.813	2.053	0.817	1.561	21.251
15	-2.975	-2.830	24.045	2.108	0.839	1.603	22.441
16	-3.076	-2.931	24.903	2.115	0.842	1.609	23.294
17	-3.288	-3.143	26.704	2.129	0.848	1.620	25.085
18	-3.432	-3.287	27.928	2.154	0.858	1.639	26.289
19	-3.613	-3.468	29.466	2.178	0.867	1.657	27.809
20	-3.781	-3.636	30.893	2.195	0.874	1.670	29.223

TABELA 19 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em Y para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 4^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.018	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.026	-0.008	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.055	-0.037	-0.029	0.479	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	0.384
2	-0.062	-0.044	-0.036	0.595	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.405
3	-0.109	-0.091	-0.083	1.371	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	1.086
4	-0.112	-0.094	-0.086	1.420	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	0.993
5	-0.213	-0.195	-0.187	3.088	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	2.423
6	-0.268	-0.250	-0.242	3.997	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.999
7	-0.316	-0.298	-0.290	4.789	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.649
8	-0.376	-0.358	-0.350	5.780	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	4.593
9	-0.442	-0.424	-0.416	6.870	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.635
10	-0.544	-0.526	-0.518	8.555	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	7.272
11	-0.622	-0.604	-0.596	9.843	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	8.465
12	-0.655	-0.637	-0.629	10.388	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	8.963
13	-0.783	-0.765	-0.757	12.502	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	10.839
14	-0.813	-0.795	-0.787	12.997	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	11.287
15	-0.859	-0.841	-0.833	13.757	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	12.000
16	-0.941	-0.923	-0.915	15.111	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	13.259
17	-1.032	-1.014	-1.006	16.614	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	14.714
18	-1.059	-1.041	-1.033	17.060	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	15.113
19	-1.121	-1.103	-1.095	18.084	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	16.089
20	-1.169	-1.151	-1.143	18.877	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	16.739

TABELA 20 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em  $X$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 4^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.184	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-1.962	-1.778	15.107	1.781	0.708	1.354	13.753
1	-1.969	-1.785	15.166	1.782	0.709	1.354	13.812
2	-1.970	-1.786	15.175	1.819	0.724	1.383	13.792
3	-1.977	-1.793	15.234	1.832	0.729	1.393	13.842
4	-1.993	-1.809	15.370	1.837	0.731	1.396	13.974
5	-2.063	-1.879	15.965	1.844	0.734	1.402	14.563
6	-2.138	-1.954	16.602	1.865	0.742	1.418	15.184
7	-2.168	-1.984	16.857	1.880	0.748	1.429	15.428
8	-2.276	-2.092	17.774	1.881	0.748	1.430	16.345
9	-2.370	-2.186	18.573	1.924	0.766	1.463	17.110
10	-2.428	-2.244	19.066	1.960	0.780	1.490	17.576
11	-2.595	-2.411	20.485	1.961	0.780	1.491	18.994
12	-2.715	-2.531	21.504	1.966	0.782	1.495	20.009
13	-2.965	-2.781	23.628	2.045	0.814	1.555	22.073
14	-3.047	-2.863	24.325	2.053	0.817	1.561	22.764
15	-3.229	-3.045	25.872	2.108	0.839	1.603	24.268
16	-3.380	-3.196	27.154	2.115	0.842	1.609	25.546
17	-3.587	-3.403	28.913	2.129	0.848	1.620	27.294
18	-3.722	-3.538	30.060	2.154	0.858	1.639	28.422
19	-3.930	-3.746	31.828	2.178	0.867	1.657	30.171
20	-4.067	-3.883	32.992	2.195	0.874	1.670	31.322

TABELA 21 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas laterais calculadas em  $Y$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 5^\circ$ .

BETA (GRAUS)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y modelo (N)	senal (V)	senal (V)	senal (V)	Y cilindro (N)	força em Y total (N)
0	-0.029	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
0	-0.035	-0.006	0.000	0.000	-0.009	-0.003	0.000	0.000	0.000
1	-0.040	-0.011	-0.005	0.083	-0.011	-0.005	-0.002	0.095	-0.012
2	-0.083	-0.054	-0.048	0.793	-0.013	-0.007	-0.004	0.190	0.603
3	-0.096	-0.067	-0.061	1.007	-0.015	-0.009	-0.006	0.285	0.722
4	-0.139	-0.110	-0.104	1.718	-0.018	-0.012	-0.009	0.427	1.290
5	-0.149	-0.120	-0.114	1.883	-0.023	-0.017	-0.014	0.665	1.218
6	-0.222	-0.193	-0.187	3.088	-0.030	-0.024	-0.021	0.997	2.091
7	-0.297	-0.268	-0.262	4.327	-0.033	-0.027	-0.024	1.140	3.187
8	-0.346	-0.317	-0.311	5.136	-0.034	-0.028	-0.025	1.187	3.949
9	-0.438	-0.409	-0.403	6.656	-0.035	-0.029	-0.026	1.235	5.421
10	-0.482	-0.453	-0.447	7.382	-0.036	-0.030	-0.027	1.282	6.100
11	-0.600	-0.571	-0.565	9.331	-0.038	-0.032	-0.029	1.377	7.954
12	-0.635	-0.606	-0.600	9.909	-0.039	-0.033	-0.030	1.425	8.484
13	-0.722	-0.693	-0.687	11.346	-0.044	-0.038	-0.035	1.662	9.683
14	-0.755	-0.726	-0.720	11.891	-0.045	-0.039	-0.036	1.710	10.181
15	-0.859	-0.830	-0.824	13.608	-0.046	-0.040	-0.037	1.757	11.851
16	-0.862	-0.833	-0.827	13.658	-0.048	-0.042	-0.039	1.852	11.805
17	-0.904	-0.875	-0.869	14.352	-0.049	-0.043	-0.040	1.900	12.452
18	-0.931	-0.902	-0.896	14.797	-0.050	-0.044	-0.041	1.947	12.850
19	-1.023	-0.994	-0.988	16.317	-0.051	-0.045	-0.042	1.995	14.322
20	-1.054	-1.025	-1.019	16.829	-0.054	-0.048	-0.045	2.137	14.691

TABELA 22 – Medidas obtidas do aparelho amplificador HBM - AE 3407-A em V, e as respectivas forças aerodinâmicas de arrasto calculadas em  $X$  para diferentes ângulos de ataque lateral  $\beta$ , com ângulo de ataque fixado em  $\alpha = 5^\circ$ .

BETA (GRAUS)	sinal (V)	sinal (V)	X modelo (N)	sinal (V)	sinal (V)	X cilindro (N)	força em X total (N)
0	-0.154	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
0	-2.012	-1.858	15.786	1.781	0.708	1.354	14.433
1	-2.025	-1.871	15.897	1.782	0.709	1.354	14.542
2	-2.050	-1.896	16.109	1.819	0.724	1.383	14.727
3	-2.054	-1.900	16.143	1.832	0.729	1.393	14.751
4	-2.095	-1.941	16.492	1.837	0.731	1.396	15.095
5	-2.152	-1.998	16.976	1.844	0.734	1.402	15.574
6	-2.169	-2.015	17.120	1.865	0.742	1.418	15.703
7	-2.263	-2.109	17.919	1.880	0.748	1.429	16.490
8	-2.352	-2.198	18.675	1.881	0.748	1.430	17.245
9	-2.340	-2.186	18.573	1.924	0.766	1.463	17.110
10	-2.525	-2.371	20.145	1.960	0.780	1.490	18.655
11	-2.609	-2.455	20.859	1.961	0.780	1.491	19.368
12	-2.814	-2.660	22.600	1.966	0.782	1.495	21.105
13	-2.876	-2.722	23.127	2.045	0.814	1.555	21.572
14	-3.051	-2.897	24.614	2.053	0.817	1.561	23.053
15	-3.187	-3.033	25.770	2.108	0.839	1.603	24.166
16	-3.335	-3.181	27.027	2.115	0.842	1.609	25.418
17	-3.588	-3.434	29.177	2.129	0.848	1.620	27.557
18	-3.708	-3.554	30.196	2.154	0.858	1.639	28.558
19	-3.940	-3.786	32.167	2.178	0.867	1.657	30.510
20	-4.029	-3.875	32.924	2.195	0.874	1.670	31.254