

MARCIO DE OLIVEIRA RAMOS

**ESTUDO DAS MELHORES PRÁTICAS DA AERODINÂMICA
VEICULAR, VISANDO A MELHORIA DE CONSUMO DE
COMBUSTÍVEL E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE POLuentes
APLICADAS A VEÍCULOS DE PASSEIO**

SÃO CAETANO DO SUL
2012

MARCIO DE OLIVEIRA RAMOS

ESTUDO DAS MELHORES PRÁTICAS DA AERODINÂMICA VEICULAR, VISANDO A MELHORIA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE POLuentes APLICADAS A VEÍCULOS DE PASSEIO

Monografia apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Automotiva, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Mestre João Carlos Martins Coelho

SÃO CAETANO DO SUL
2012

Ramos, Márcio de Oliveira

Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular, visando a melhoria de consumo de combustível e redução de emissões de poluentes aplicadas a veículos de passeio / Márcio de Oliveira Ramos – São Caetano do Sul: CEUN, 2012.

70p.

Monografia - Centro Universitário Mauá, São Caetano do Sul, 2012.

1. Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular, visando a melhoria de consumo de combustível e redução de emissões de poluentes aplicadas a veículos de passeio
I. Ramos, Márcio de Oliveira. II. Título.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, proteção e sustento nestes anos de estudo, a minha família, pelo apoio e incentivo e aos professores e mestres que muito contribuíram em nossa formação. A todos aqueles que de forma singular fizeram parte desta fase da vida que completamos.

“Procure conseguir sabedoria e compreensão. Não abandone a sabedoria, e ela protegerá você. Ame-a, e ela lhe dará segurança. Para ter sabedoria, é preciso primeiro pagar o seu preço. Use tudo o que você tem para conseguir a compreensão. Ame a sabedoria e ela o tornará importante; abrace-a e você será respeitado. A sabedoria será para você um enfeite, como se fosse uma linda coroa.” Provérbios. 4:5-8.

Resumo

Este trabalho enfoca a redução no arrasto aerodinâmico dos itens que compõem a carroceria do veículo de passeio (para-choques, grade, capô, para-brisa, porta-malas, painel lateral). Propõe-se a redução do coeficiente de arrasto (C_A) do veículo com a sua otimização e melhores práticas, por meio do estudo da aerodinâmica. A redução do C_A é um grande desafio hoje para a engenharia das montadoras, pois se esta chegando ao limiar entre o maior espaço interno do veículo (desejado pelos consumidores) e a menor área externa possível (o principal fator do arrasto).

Palavras-chave: Aerodinâmica veicular. Redução do arrasto aerodinâmico em veículos. Redução do consumo de combustível.

Abstract

This work focuses the reduction in the aerodynamic drag of the items that compose the body of car passenger (fascia, grille, hood, windshield, trunk, side panel). It is considered reduction of the coefficient of drag (C_D) of the vehicle with optimization and best practices, by means of the study of the aerodynamics. The reduction of the C_D is a great challenge today for the engineering of the automotive engineering; therefore we are arriving at the threshold between the biggest internal space of the vehicle (desired by the costumer) and the less possible external area (drag reduction main factor).

Keywords: *Vehicle aerodynamics.* *Drag reduction in vehicles.* *Reduction of fuel consumption.*

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | HISTÓRIA | 13 |
| 1.2 | OBJETIVO..... | 14 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA DO TEMA | 14 |
| 1.4 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2 | METODOLOGIA | 17 |
| 3 | INTRODUÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 3.1 | VISCOSIDADE | 18 |
| 3.2 | NÚMERO DE REYNOLDS | 18 |
| 3.3 | CAMPOS DE ESCOAMENTO: LINHAS DE CORRENTE, LINHAS DE EMISSÃO, LINHAS DE TRAJETÓRIA..... | 18 |
| 3.4 | ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS IMERSOS | 19 |
| 3.5 | EFEITOS DA GEOMETRIA E DO NUMERO DE REYNOLDS..... | 20 |
| 3.6 | CAMADA LIMITE LAMINAR E TURBULENTA | 22 |
| 3.7 | SEPARAÇÃO | 23 |
| 3.8 | ESCOAMENTOS EXTERNOS EXPERIMENTAIS..... | 25 |
| 3.9 | COEFICIENTE DE ARRASTO..... | 26 |
| 3.10 | ARRASTO DE ATRITO E ARRASTO DE PRESSÃO | 29 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO | 33 |
| 4.1 | O VEÍCULO DE PASSEIO COMO UM CORPO COMPOSTO..... | 33 |
| 4.2 | ESCOAMENTO EM TORNO DE UM VEÍCULO | 34 |
| 4.3 | FRAÇÕES DO ARRASTO E SUAS ORIGENS LOCALIZADAS | 35 |
| 4.4 | OTIMIZAÇÃO DO CAPÔ E REGIÃO FRONTAL | 35 |
| 4.5 | OTIMIZAÇÃO DO PARA-BRISA E COLUNA 'A' | 42 |
| 4.6 | OTIMIZAÇÃO DO TETO | 45 |
| 4.7 | OTIMIZAÇÃO DA REGIÃO TRASEIRA | 46 |
| 4.7.1 | BOAT-TAILING..... | 46 |
| 4.7.2 | CARROCERIA FASTBACK | 50 |
| 4.7.3 | CARROCERIA NOTCHBACK | 54 |
| 4.8 | OTIMIZAÇÃO DO PAINEL LATERAL..... | 58 |
| 5 | CONSUMO DE COMBUSTÍVEL | 61 |
| 5.1 | MODO DE CONDUÇÃO DO VEÍCULO NA REGULAMENTAÇÃO EPA..... | 61 |
| 5.2 | MODO DE CONDUÇÃO DO VEICULO NA REGULAMENTAÇÃO EEC | 61 |
| 5.3 | MODO DE CONDUÇÃO DO VEICULO NA REGULAMENTAÇÃO ABNT | 62 |
| 5.4 | RELAÇÃO ENTRE OTIMIZAÇÃO AERODINÂMICA E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL..... | 63 |
| 6 | CONCLUSÕES | 68 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 69 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.1 - LINHAS DE CORRENTE-TANGENTE AO VETOR VELOCIDADE LOCAL, fonte: Ref[1]..... | 19 |
| FIGURA 3.2 - COMPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS EM TORNO DE PLACA PLANA, fonte: Ref[1]..... | 20 |
| FIGURA 3.3 – ESCOAMENTO SOBRE CORPO ROMBUDO, fonte: Ref[1]..... | 22 |
| FIGURA 3.4 - COMPORTAMENTO DA CAMADA LIMITE, fonte: Ref[2]..... | 23 |
| FIGURA 3.5 - SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO, fonte: Ref[2] | 24 |
| FIGURA 3.6 - FORÇAS E MOMENTOS SOBRE UM CORPO ARBITRÁRIO, fonte: Ref[1] | 25 |
| FIGURA 3.7 - ARRASTO SOBRE UM CILINDRO BIDIMENSIONAL CARENADO, fonte: Ref[1].. | 29 |
| FIGURA 3.8 - ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO CIRCULAR, fonte: Ref[1] | 30 |
| FIGURA 3.9 - DIFERENÇAS ENTRE A SEPARAÇÃO LAMINAR E SEPARAÇÃO TURBULENTA, fonte: Ref[1]..... | 31 |
| FIGURA 3.10: EFEITO DO CARENAMENTO NA REDUÇÃO DO ARRASTO, fonte: Ref[1] | 31 |
| FIGURA 3.11 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS LISOS, fonte: Ref[1] | 32 |
| FIGURA 4.1 - ARRASTO DE UM CARRO COMPARADO A UM CORPO BIDIMENSIONAL, fonte: Ref[2]..... | 33 |
| FIGURA 4.2 - DIREÇÃO DO ESCOAMENTO DO VENTO EM RELAÇÃO AO VEÍCULO, fonte: Ref[2]..... | 34 |
| FIGURA 4.3 - ZONAS DE RECIRCULAÇÃO NA REGIÃO FRONTAL DE UM VEÍCULO, fonte: Ref[2]..... | 34 |
| FIGURA 4.4 - BLOCO REPRESENTANDO A FREnte DO VEÍCULO, fonte: Ref[2] | 35 |
| FIGURA 4.5 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA SEÇÃO LONGITUDINAL, fonte: Ref[2] | 36 |
| FIGURA 4.6 - INFLUÊNCIA DO CONTORNO DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO, fonte: Ref[4]..... | 36 |
| FIGURA 4.7 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NUMA SEÇÃO LONGITUDINAL, fonte: Ref[2]..... | 37 |
| FIGURA 4.8 - OS PARÂMETROS ESSENCIAIS UTILIZADOS PARA OTIMIZAR A REGIÃO FRONTAL DO VEÍCULO, fonte: Ref[2] | 37 |
| FIGURA 4.9 - INFLUÊNCIA DOS RAIOS DE CANTO NO ARRASTO DE BLOCOS QUADRADOS, fonte: Ref[2]..... | 38 |
| FIGURA 4.10 - REDUÇÃO DO ARRASTO COM INCLINAÇÃO DO ÂNGULO α DO CAPÔ E INCLINAÇÃO DO ANGULO λ DO PARA-BRISA, fonte: Ref[3]..... | 39 |
| FIGURA 4.11 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DA REGIÃO FRONTAL NO ARRASTO, fonte: Ref[3]..... | 39 |
| FIGURA 4.12 - OTIMIZAÇÃO DA REGIÃO FRONTAL DO VW GOLF I, fonte: Ref[4] | 40 |
| FIGURA 4.13 - LINHAS DE CORRENTE NO VW GOLF I NUM TUNEL DE VENTO, fonte: Ref[4]40 | |
| FIGURA 4.14 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DE CHANFROS E RAIOS NA REGIÃO DIANTEIRA, fonte: Ref[2] | 41 |
| FIGURA 4.15 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DO REFINAMENTO DO RAIO DO CAPÔ E FORMAS DA GRADE, fonte: Ref[2] | 41 |
| FIGURA 4.16 - MODELO SIMPLIFICADO DO ESCOAMENTO AO REDOR DO PARA-BRISA, fonte: Ref[2]..... | 42 |
| FIGURA 4.17 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DA GEOMETRIA DO PARA-BRISA, fonte: Ref[2].. | 42 |
| FIGURA 4.18 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO ANGULO λ DO PARA-BRISA NO ARRASTO, fonte: Ref[5]..... | 43 |
| FIGURA 4.19 - POSIÇÃO DOS PICOS DE PRESSÃO DO AUDI 100: 100 II, $C_A = 0,42$; 100 III, $C_A=0,30$, fonte: Ref[5] | 44 |
| FIGURA 4.20 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DO ARREDONDAMENTO DAS COLUNAS 'A' E 'C' DO AUDI 100 III, fonte: Ref[5] | 44 |
| FIGURA 4.21 - EFEITO DA CURVATURA DO TETO NO COEFICIENTE DE ARRASTO, fonte: Ref[12]..... | 45 |
| FIGURA 4.22 - OS TRÊS TIPOS MAIS COMUNS DE VEÍCULOS E SEUS ESSENCIAIS PARÂMETROS GEOMETRICOS, fonte: Ref[2] | 46 |
| FIGURA 4.23 - REDUÇÃO DO ARRASTO DE UM CORPO DE REVOLUÇÃO USANDO O MÉTODO BOAT-TAILING, fonte: Ref[7, 8]..... | 47 |
| FIGURA 4.24 - METODO DE BOAT-TAILING APLICADO AO VEICULO DE ENSAIO C111 III DA DAIMLER-BENZ AG, fonte: Ref[15] | 47 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 4.25 - MÉTODO BOAT-TAILING APLICADO NO OPEL CALIBRA COUPE, fonte: Ref[16] | 48 |
| FIGURA 4.26 - LINHAS DE FUMAÇA SEGUEM O CONTORNO BOAT-TAILING DA TRASEIRA DO MERCEDES-BENZ 190, fonte: Ref[2]..... | 48 |
| FIGURA 4.27 - REDUÇÃO DO ARRASTO NO FIAT UNO, fonte: Ref[17]..... | 49 |
| FIGURA 4.28 - REDUÇÃO DO ARRASTO NA REGIÃO DO EIXO TRASEIRO, fonte: Ref[9] | 49 |
| FIGURA 4.29 - EFEITO DO ANGULO DE SAÍDA ϕ NO ARRASTO (. MEDIDA FOR T. MOREL / • MEDIDA FOR A.D. STUART E A.T. JONES), fonte: Ref[10, 11]..... | 50 |
| FIGURA 4.30 - EFEITO DO ANGULO DE SAÍDA ϕ NA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA TRASEIRA DO CORPO CILÍNDRICO, fonte: Ref[11]..... | 50 |
| FIGURA 4.31 – VORTÍCES APÓS SEPARAÇÃO NO ESCOAMENTO NUM CORPO COM SEÇÃO OBLÍQUA, fonte: Ref[2]..... | 51 |
| FIGURA 4.32 - ARRASTO NUM PRISMA CHANFRADO NA TRASEIRA E PRÓXIMO AO SOLO, fonte: Ref[4]..... | 51 |
| FIGURA 4.33 - BOAT-TAILING NO FASTBACK, fonte: Ref[2] | 52 |
| FIGURA 4.34 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO ϕ NO COEFICIENTE DE ARRASTO E O REGIME DE ESCOAMENTO NA TRASEIRA DO VW GOLF I, fonte: Ref[4]..... | 53 |
| FIGURA 4.35 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO ϕ E O COMPRIMENTO l_0 NO ARRASTO, fonte: Ref[2]..... | 53 |
| FIGURA 4.36 - EFEITO DA ALTURA Z NO COEFICIENTE DE ARRASTO, fonte: Ref[2] | 54 |
| FIGURA 4.37 - ESCOAMENTO E ARRASTO DE UM NOTCHBACK: a) ESCOAMENTO PADRÃO ESQUEMÁTICO, b) COEFICIENTE DE ARRASTO C_A VERSUS ANGULO β , fonte: Ref[2] .. | 55 |
| FIGURA 4.38 - ESCOAMENTO NA TRASEIRA DE UM NOTCHBACK: a) ESCOAMENTO PADRÃO ESQUEMÁTICO, b) DISTRIBUIÇÃO UNIVERSAL DE PRESSÃO, fonte: Ref[2] ... | 55 |
| FIGURA 4.39 - AJUSTE DOS TRÊS PARÂMETROS DA TRASEIRA DO AUDI 100 III, fonte: Ref[5] | 56 |
| FIGURA 4.40 - ESTUDO DOS PARÂMETROS PARA UM NOTCHBACK, fonte: Ref[3] | 57 |
| FIGURA 4.41 - ALTURA h DA TRASEIRA OTIMIZADA PARA O OPEL CALIBRA, fonte: Ref[16] | 57 |
| FIGURA 4.42 - EFEITO DO ARCO NO ARRASTO DE UM VEÍCULO NOTCHBACK (VISTA SUPERIOR) , fonte: Ref[5]..... | 58 |
| FIGURA 4.43 - EFEITO DO ARCO NO ARRASTO DE UM VEÍCULO FASTBACK (VISTA SUPERIOR) , fonte: Ref[12]..... | 59 |
| FIGURA 4.44 - EFEITO DO RECUO NOS VIDROS LATERAIS NO ARRASTO, fonte: Ref[5] | 60 |
| FIGURA 5.1 - MODO DE CONDUÇÃO DO VEÍCULO NA REGULAMENTAÇÃO EPA, fonte: Ref[18]..... | 61 |
| FIGURA 5.2 - CICLO URBANO EEC, fonte: Ref[19]..... | 62 |
| FIGURA 5.3 - CICLO DE CONDUÇÃO EUROPEU PARA CERTIFICAÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES, fonte: Ref[19] | 62 |
| FIGURA 5.4 - CICLO DE CONDUÇÃO PARA ENSAIO DE CONSUMO NA CIDADE CONFORME NBR 7024, fonte: Ref[20] | 63 |
| FIGURA 5.5 - CICLO DE CONDUÇÃO PARA ENSAIO DE CONSUMO NA ESTRADA CONFORME NBR 7024, fonte: Ref[20]..... | 63 |
| FIGURA 5.6 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE R , fonte: Ref[13, 14] | 65 |
| FIGURA 5.7 - DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DA REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL, fonte: Ref[13, 14]..... | 66 |
| FIGURA 5.8 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE W PARA CÁLCULO DA REDUÇÃO DA MASSA TOTAL DO VEÍCULO, fonte: Ref[13, 14]..... | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| TABELA 1.1 - EVOLUÇÃO DAS FORMAS AERODINÂMICAS, fonte: Ref[2] | 13 |
| TABELA 1.2 - NÍVEIS DE EMISSÕES PARA A EUROPA, fonte: Ref[23] | 15 |
| TABELA 1.3 - NÍVEIS DE EMISSÕES PARA O BRASIL, fonte: Ref[21, 22] | 15 |
| TABELA 3.1 - VALORES CALCULADOS A PARTIR DAS EQUAÇÕES 3.3, fonte: Ref[1] | 21 |
| TABELA 3.2 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS BIDIMENSIONAIS COM $Re \geq 10^4$, fonte: Ref[1]..... | 27 |
| TABELA 3.3 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS TRIDIMENSIONAIS COM $Re \geq 10^4$, fonte: Ref[1]..... | 28 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| CFD | Computacional Fluids Dynamics |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| EC | European Community |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| PROCONVE | Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| NEDC | New European Driving Cycle |
| M1 | Veículo utilizado para o transporte de no máximo 8 passageiros |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|---------------|--|----------------------|
| A | Área frontal | [m ²] |
| C_A | Coeficiente de arrasto | [adimensional] |
| $C_{A,atr}$ | Coeficiente de arrasto de atrito | [adimensional] |
| $C_{A,press}$ | Coeficiente de arrasto de pressão | [adimensional] |
| C_P | Coeficiente de pressão | [adimensional] |
| Re | Numero de Reynolds | [adimensional] |
| Re_X | Número de Reynolds no sentido X | [adimensional] |
| L | Comprimento | [m] |
| ρ | Massa específica do fluido | [kg/m ³] |
| V | Velocidade do escoamento | [m/s] |
| V_∞ | Velocidade do escoamento | [m/s] |
| μ | Coeficiente de viscosidade dinâmica | [kg/m·s] |
| ν | Coeficiente de viscosidade cinemática | [m ² /s] |
| U | Velocidade do escoamento no sentido X | [m/s] |
| δ | Espessura da camada limite | [m] |
| x | Local da espessura da camada limite | [m] |
| x_{tr} | Local da espessura da transição da camada limite | [m] |
| p_∞ | Pressão do ambiente | [Pa] |
| t | Espessura | [m] |
| b | largura | [m] |
| c | Comprimento | [m] |
| d | Largura | [m] |
| h | Altura | [m] |
| D | Força de arrasto | [N] |
| v_w | Velocidade do vento | [m/s] |
| θ | Ângulo de separação da camada limite | [°] |
| α | Ângulo do vetor V em relação ao vetor U_∞ | [°] |
| β | Ângulo do vetor v_w em relação ao vetor V_∞ | [°] |
| λ | Ângulo do para-brisa com a vertical | [°] |

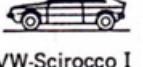
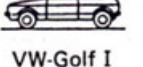
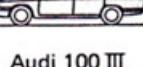
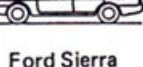
1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRIA

Aerodinâmica e tecnologia veicular se juntaram lentamente: a síntese das duas teve sucesso após muitas tentativas. Naturalmente, projetistas de navios e aeronaves estavam numa condição melhor: eles encontraram as formas na natureza: peixes e pássaros. A partir destas formas naturais, conseguiram alcançar características essenciais. Para veículos não havia coisas desse tipo. Então os projetistas automotivos optaram por tomar as formas de navios e aviões. Mais tarde isso se mostrou ser uma aproximação errada. Somente quando houve um afastamento deste conceito estabeleceu-se um caminho para o desenvolvimento da aerodinâmica veicular.

Outra razão para repetidas falhas no início dos estudos da aerodinâmica com veículos foi começar muito cedo. Os primeiros veículos eram muito lentos. Estradas ruins daquela época faziam as carrocerias aerodinâmicas parecerem ridículas. Para proteger motoristas e passageiros do vento, lama e chuva a forma de carruagem tradicional seria muito melhor. Um breve resumo da história da evolução da aerodinâmica veicular é ilustrado na Tabela 1.1.

TABELA 1.1 - EVOLUÇÃO DAS FORMAS AERODINÂMICAS, fonte: Ref[2]

| Formas básicas | 1900 a 1925 |  |  |  |
|------------------------|-------------|---|--|--|
| Formas aerodinâmicas | 1921 a 1923 |  |  | |
| | 1922 a 1939 |  |  | |
| | 1922 a 1939 |  |  | |
| | Desde 1955 |  |  | |
| Otimização de detalhes | Desde 1974 |  |  | |
| Otimização da forma | Desde 1983 |  |  | |

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo a redução do arrasto aerodinâmico dos itens que compõem a carroceria do veículo de passeio (para-choques, grade, capô, vidro, portamalas, painel lateral). Propõe-se a redução do coeficiente de arrasto (C_A) do veículo com a sua otimização e melhores práticas, por meio do estudo da aerodinâmica. A redução do C_A é um grande desafio hoje para a engenharia das montadoras, pois considera que se esta chegando ao limiar entre o maior espaço interno do veículo (desejado pelos consumidores) e a menor área externa possível (o principal fator para redução do arrasto).

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Com os requisitos de emissões cada vez mais rigorosos, as montadoras buscam alternativas para atender as normas e legislações. Veículos com materiais mais leves, motores híbridos ou elétricos, pneus com menor resistência ao rolamento. Porém, nem todas as alternativas são viáveis, principalmente quando se trata de mercados emergentes, onde o custo se torna alto para a aplicação dessas tecnologias. Uma alternativa que colabora e ao mesmo tempo tem um baixo custo é a otimização aerodinâmica que tem como objetivo diminuir o arrasto aerodinâmico e consequentemente reduzir o consumo de combustível e redução de emissões de CO₂.

Muitos países têm providenciado incentivos aos consumidores para a compra de veículos de baixo consumo, reduzindo os impostos incidentes.

O aumento do custo dos combustíveis também tem motivado os consumidores a adquirir veículos mais eficientes.

As legislações ambientais a cada vez vem se tornando mais severas no que se diz a respeito de emissões de gases.

Os países da América Latina vêm adotando o padrão europeu de emissões.

A Tabela 1.2 mostra os níveis da regulamentação europeia EC 715/2007 [23] para emissões (mg/km) de veículos leves (categoria M1) e a Tabela 1.3 apresenta os níveis de emissão requeridos presentemente no Brasil.

TABELA 1.2 - NÍVEIS DE EMISSÕES PARA A EUROPA, fonte: Ref[23]

| | | Massa de monóxido de carbono (CO) | | Massa total de hidrocarbonetos (THC) | | Massa de hidrocarbonetos não metano (NMHC) | | Massa de óxidos de nitrogênio (NO _x) | | Combinação total de massa hidrocarbonetos e óxidos nitrogênio (THC + NO _x) | | Massa de particulado | |
|--------|-------------|-----------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|--|--------|--|--------|--|--------|------------------------|--------|
| Norma | A partir de | L ₁ (mg/Km) | | L ₂ (mg/km) | | L ₃ (mg/km) | | L ₄ (mg/km) | | L ₂ + L ₄ (mg/km) | | L ₅ (mg/km) | |
| | | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel |
| EURO 5 | Set/2009 | 1000 | 500 | 100 | - | 68 | - | 60 | 180 | - | 230 | 5,0 | 5,0 |
| EURO 6 | Set/2014 | 1000 | 500 | 100 | - | 68 | - | 60 | 80 | - | 170 | 5,0 | 5,0 |

No Brasil o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) define na resolução nº 315 [21] e nº 415 [22] os seguintes níveis de emissões para veículos categoria M1:

TABELA 1.3 - NÍVEIS DE EMISSÕES PARA O BRASIL, fonte: Ref[21, 22]

| | | Massa de monóxido de carbono (CO) | | Massa total de hidrocarbonetos (THC) | | Massa de hidrocarbonetos não metano (NMHC) | | Massa de óxidos de nitrogênio (NO _x) | | Massa de aldeídos (HCO) | | Massa de particulado | |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------------------------|------|--|------|--|------|-------------------------|------|----------------------|------|
| Norma | A partir de | (mg/Km) | | (mg/km) | | (mg/km) | | (mg/km) | | (mg/km) | | (mg/km) | |
| | | Otto | Diesel | GNV | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto | Diesel | Otto |
| CONAMA 315 (L5) | Jan/2009 | 2000 | - | 300 | 50 | - | 120 | 250 | 20 | - | - | 50 | |
| CONAMA 415 (L6) | Jan/2013 (Otto) Jan/2014 (Diesel) | 1300 | - | 300 | 50 | - | 80 | - | 20 | - | - | 25 | |

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

WHITE, 1999, apresenta estudos sobre a camada limite laminar e turbulenta, em escoamentos ao redor de corpos imersos bidimensionais e tridimensionais, seus efeitos com o número de Reynolds e as forças aplicadas a esses corpos imersos. A partir destas análises, apresenta os coeficientes de arrasto para corpos bidimensionais e tridimensionais.

HUCHO, 1998, apresenta um amplo conjunto de informações sobre aerodinâmica veicular ressaltando-se a sua análise referente à otimização da carroceria visando a redução do arrasto.

GILHAUS e RENN, 1986, apresentam a redução do arrasto, através da otimização das formas do para-choque, capô, para-brisa e porta-malas por meio de ensaio em túnel de vento de um modelo em escala 3/8.

JASSEN e HUCHO, 1975, apresentam a otimização destas mesmas formas e da região traseira aplicadas no VW Golf I.

BUCHHEIM, 1983, apresenta a otimização de capô, teto, painel lateral, porta-malas saliente (*notchback*) e colunas, aplicadas no AUDI 100 III por meio de ensaios em túnel de vento e o comportamento da distribuição de pressão ao longo da carroceria.

MAIR e MAULL, 1978, apresentam a técnica "boat-tailing", que consiste em reduzir o arrasto através do afunilamento da carroceria na parte traseira do veículo.

LIEBOLD, 1979, aplica a técnica *boat-tailing* no veículo de ensaio C111 III da Daimler-Benz AG e apresenta os resultados de redução de arrasto.

EMMELMMANN, 1990, apresenta a técnica *boat-tailing* aplicada no Opel Calibra.

POTTHOFF, 1982, apresenta a relação entre o comprimento do assoalho traseiro do veículo e ângulo para a redução do arrasto nesta região através do método *boat-tailing*.

MOREL, 1978 e BEARMAN, 1979, apresentam a otimização da região traseira em carrocerias *fastback*.

SOVRAN, 1983, apresenta a relação entre a redução do arrasto e o consumo de combustível pelo método de ensaio EPA.

A norma EPA, 1972, é o método de ensaio usado nos EUA para avaliar o consumo de combustível em veículos terrestres. É uma referência utilizada pelas montadoras para mostrar ao consumidor o quanto seus veículos são econômicos no consumo de combustível.

A norma 80/1268/EEC, 1993, é o método de ensaio utilizado na Europa para avaliar o consumo de combustível em veículos terrestres. É uma referência utilizada pelas montadoras para mostrar ao consumidor o quanto seus veículos são econômicos no consumo de combustível.

A norma NBR 7024, 2010, o método de ensaio utilizado no Brasil para avaliar o consumo de combustível em veículos terrestres. É uma referência que começou a ser utilizada a pouco tempo pelas montadoras para mostrar ao consumidor o quanto seus veículos são econômicos no consumo de combustível.

O CONAMA, apresenta por meio da Resolução 315, 2002 e da Resolução 415, 2009, os limites de emissões para veículos automotores no Brasil.

A União Européia, por meio da regulamentação EC 715, 2007, estabelece os limites de emissões para veículos automotores na Europa.

2 METODOLOGIA

Por intermédio da redução de área frontal dos componentes como retrovisores, alteração de ângulo de ataque em relação ao escoamento como para-choque, capô, para-brisas e técnicas para evitar o regime turbulento em regiões indesejadas como grades frontais, tampa do porta-malas, laterais do veículo e a otimização das formas da superfície da carroceria, pretendem-se reduzir a resistência ao arrasto aerodinâmico. A pesquisa é feita utilizando-se livros e recuperando-se artigos elaborados a partir dos casos e estudos experimentais. Com as informações analisadas e posteriormente sintetizadas, o passo seguinte é avaliar se as melhores práticas conduzem a uma redução de arrasto aerodinâmico substancial e avaliar se o valor do C_A otimizado leva a uma redução no consumo de combustível e consequentemente a redução de emissão de CO₂.

3 INTRODUÇÃO TEÓRICA

3.1 VISCOSIDADE

A viscosidade se refere às tensões locais em um fluido em movimento com a taxa de deformação por cisalhamento do elemento fluido.

3.2 NÚMERO DE REYNOLDS

O parâmetro primário correlacionando o comportamento viscoso de todos os fluidos newtonianos é o adimensional número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (3.1)$$

Onde V e L são, respectivamente a velocidade e o comprimento característicos do escoamento. A segunda forma de Re é obtida utilizando-se a razão entre μ e ρ denominada viscosidade cinemática:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

Geralmente, a primeira coisa que um engenheiro da área de fluidos deve fazer é estimar a faixa do número de Reynolds do escoamento em estudo. Número de Reynolds Re muito baixo indica a ocorrência de escoamento viscoso no qual os efeitos da inércia são desprezíveis. Números de Reynolds Re baixos e moderados indicam a ocorrência de escoamentos laminares. Número de Reynolds alto provavelmente significa escoamento turbulento. Os valores numéricos para números de Reynolds que caracterizam os escoamentos como laminares ou turbulentos dependem da geometria e do escoamento.

3.3 CAMPOS DE ESCOAMENTO: LINHAS DE CORRENTE, LINHAS DE EMISSÃO, LINHAS DE TRAJETÓRIA

A mecânica dos fluidos é um tema altamente visual. Os padrões de escoamento podem ser visualizados de modos diferentes e podem ser visualizados em esboços ou fotografias e sua observação pode produzir importante informação qualitativa ou muitas vezes quantitativa do escoamento

Quatro tipos básicos de linhas são usados para visualizar escoamentos:

1. Linha de corrente é uma linha tangente em todos os pontos ao vetor velocidade em um dado instante.

2. Linha de trajetória é o caminho real percorrido por uma determinada partícula de fluido.
3. Linha de emissão é a linha formada por todas as partículas que passaram anteriormente por um ponto prescrito
4. Linha de filete é um conjunto de partículas de fluido que formam uma linha em um dado instante

A linha de corrente é conveniente para se calcular matematicamente, enquanto as outras três são muito fáceis de gerar experimentalmente. Observa-se que uma linha de corrente e uma linha de filete são linhas instantâneas enquanto a linha de trajetória e a linha de emissão são geradas no decorrer do tempo.

Em um escoamento permanente, as linhas de corrente, linhas de trajetória e linhas de emissão são coincidentes.

Em mecânica dos fluidos, o resultado matemático mais comum para propósito de visualização é a linha de corrente.



FIGURA 3.1 - LINHAS DE CORRENTE-TANGENTE AO VETOR VELOCIDADE LOCAL, fonte: Ref[1]

3.4 ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS IMERSOS

Escoamentos “externos” em torno de corpos imersos em uma corrente de fluido apresentam efeitos viscosos (cisalhamento e não escorregamento) nas superfícies do corpo em geral, serão aproximadamente não viscosos longe do corpo. Tratam-se de escoamentos não-confinados.

Os escoamentos externos não-confinados são livres para se expandir, não importando a espessura de crescimento das camadas viscosas. Embora a teoria da camada-limite ajude no entendimento de escoamentos externos, corpos com geometrias complexas em geral requerem dados experimentais sobre as forças e momentos causados pelo escoamento, no qual serão abordados mais adiante.

3.5 EFEITOS DA GEOMETRIA E DO NUMERO DE REYNOLDS

Um dos caminhos para a análise das camadas limite consiste em estudar o escoamento não viscoso para determinar a distribuição de pressões ao longo da camada limite. Esta distribuição de pressões pode se constituir em uma das condições de contorno para a análise da camada limite propriamente dita.

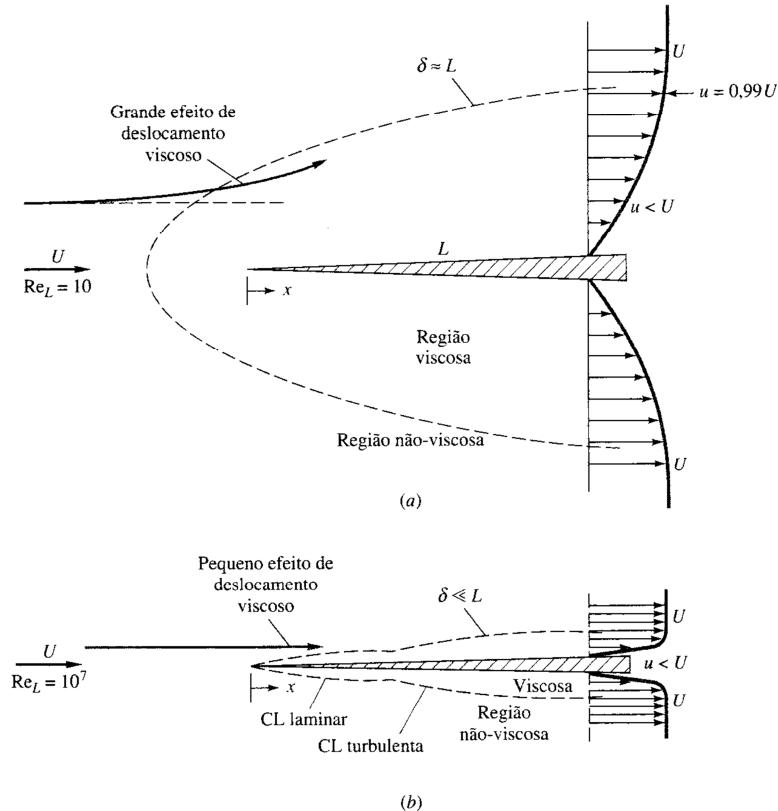


FIGURA 3.2 - COMPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS EM TORNO DE PLACA PLANA, fonte: Ref[1]

Na FIGURA 3.2, fluido com velocidade de corrente livre uniforme U move-se paralelamente a uma placa plana aguda de comprimento L . Se o número de Reynolds UL/ν é baixo, a região viscosa é muito ampla e se estende bem a montante e para os lados da placa. A placa retarda bastante a corrente de aproximação e pequenas variações nos parâmetros do escoamento causam grandes mudanças na distribuição de pressões ao longo da placa. Não existe teoria simples para análise de escoamentos externos com números de Reynolds em torno de 1 a 1000. Em geral esses escoamentos com camadas cisalhantes espessas são estudados experimentalmente ou por modelagem numérica em CFD.

Conforme Prandtl salientou pela primeira vez em 1904, um escoamento com alto número de Reynolds (FIGURA 3.2b) é muito mais acessível a um tratamento de camada limite. As camadas viscosas, tanto laminar como turbulenta, são bastante delgadas, mais

delgadas até que a representação dos desenhos. Define-se a espessura da camada limite δ como sendo o lugar geométrico dos pontos onde a velocidade u paralela à placa atinge 99% da velocidade externa U .

As equações para a avaliação da espessura da camada limite sobre uma placa plana são:

$$\frac{\delta}{x} \approx \begin{cases} \frac{5,0}{Re_x^{1/2}} & \text{Laminar (a)} \\ \frac{0,16}{Re_x^{1/7}} & \text{Turbulento (b)} \end{cases} \quad (3.3)$$

Onde $Re_x = Ux / \nu$ é o número de Reynolds local do escoamento ao longo da superfície da placa. A equação para escoamento turbulento aplica-se para Re_x maior do que 10^6 , aproximadamente. Porém, a maioria dos autores sugerem $5 \cdot 10^5$ para placas planas hidráulicamente lisas.

TABELA 3.1 - VALORES CALCULADOS A PARTIR DAS EQUAÇÕES 3.3, fonte: Ref[1]

| Re_x | 10^4 | 10^5 | 10^6 | 10^7 | 10^8 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $(\delta/x)_{lam}$ | 0,050 | 0,016 | 0,005 | - | - |
| $(\delta/x)_{turb}$ | - | - | 0,022 | 0,016 | 0,011 |

Os vazios indicam que a equação não se aplica. Em todos os casos, essas camadas-limite são tão delgadas que seu efeito de deslocamento sobre a camada não viscosa externa é desprezível. Logo a distribuição de pressões ao longo da placa pode ser calculada usando-se a teoria não-viscosa, como se a camada limite nem mesmo estivesse presente. Esse campo de pressões externo “dirige” então o escoamento da camada limite, atuando como uma função forçante da equação da quantidade de movimento ao longo da superfície.

Para corpos esbeltos, tais como placas e aerofólios paralelos a corrente de aproximação, conclui-se que essa hipótese de interação desprezível entre a camada-limite e a distribuição de pressões externa é uma excelente aproximação.

Para um corpo rombudo, porém, mesmo a números de Reynolds muito altos, há uma discrepância no conceito da justaposição viscosa / não-viscosa. A FIGURA 3.3 mostra dois esboços de escoamento redor de um corpo rombudo bi ou tri dimensional. No esboço idealizado (FIGURA 3.3a), há uma camada limite delgada em torno do corpo e uma esteira viscosa estreita na traseira. A teoria da justaposição seria excelente para esse cenário, mas ele é falso. No escoamento real (FIGURA 3.3b), a camada limite é

delgada no lado frontal do corpo, onde a pressão decresce ao longo da superfície (gradiente de pressão favorável). Mas, na parte traseira, a camada limite depara-se com um aumento de pressão (gradiente de pressão adverso) e entra em colapso, ou se separa, formando uma ampla esteira pulsante ou turbulenta. O escoamento principal é defletido por essa esteira, de modo que o escoamento externo é bem diferente daquele previsto pela teoria não-viscosa com a inclusão de uma camada-limite delgada.

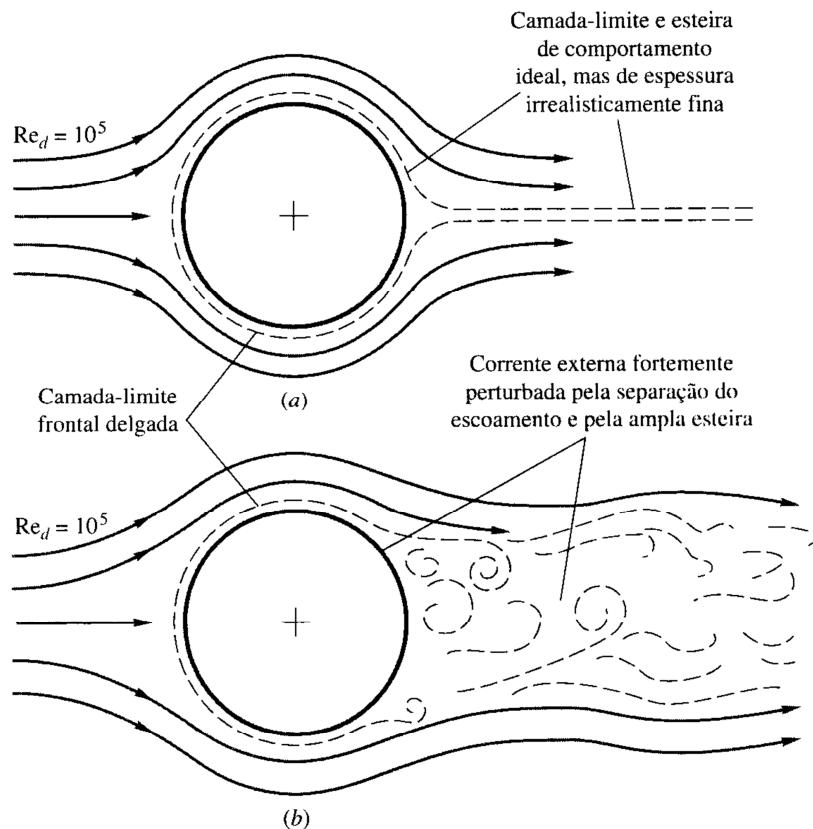


FIGURA 3.3 – ESCOAMENTO SOBRE CORPO ROMBUDO, fonte: Ref[1]

3.6 CAMADA LIMITE LAMINAR E TURBULENTA

Apesar da fina espessura da camada limite na parede, o escoamento viscoso tem uma forte influência no desenvolvimento de todo campo de escoamento. A ocorrência do arrasto num escoamento incompressível bidimensional pode ser explicada somente por esses efeitos viscosos. O escoamento na camada limite ao longo de uma placa plana é ilustrado na FIGURA 3.4.

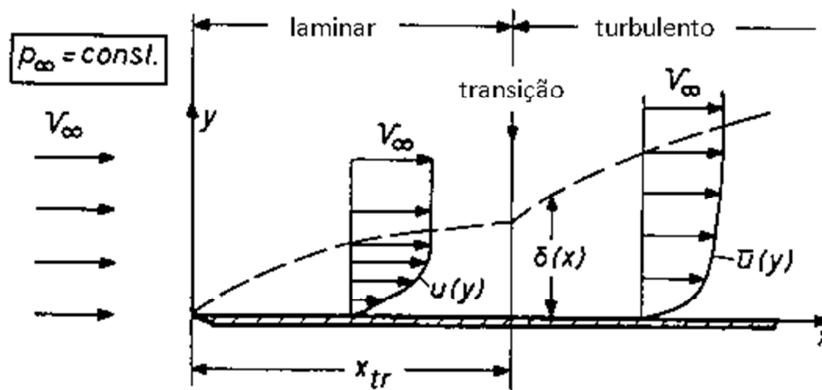


FIGURA 3.4 - COMPORTAMENTO DA CAMADA LIMITE, fonte: Ref[2]

O escoamento externo fora da camada limite apresenta linhas de corrente tendendo ao paralelismo com velocidade, V_∞ , e pressão, p_∞ (constantes). O escoamento viscoso na camada limite satisfaz a condição de “não-escorregamento” ao longo da superfície da placa. Na parte frontal da placa o escoamento do fluido na camada limite é laminar. Neste caso, a espessura da camada limite cresce conforme equação 3.4 proposta por Blasius [1].

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{5,0}{Re_x^{1/2}} \quad (\text{Solução de Blasius}) \quad (3.4)$$

O estado laminar do escoamento da camada limite é estável contra as perturbações somente para determinadas condições.

Na distância $x = x_{tr}$ da aresta frontal da placa ocorre uma transição para o chamado regime turbulento da camada limite. Na região da camada limite turbulenta o escoamento é praticamente instável. A transição entre dois regimes de escoamento na camada limite é governada pelo valor do número de Reynolds. Para placas planas lisas, a transição ocorre em torno de:

$$Re = \frac{V_\infty \cdot x_{tr}}{\nu} = 5 \cdot 10^5 \quad (3.5)$$

Devido ao processo de mistura na camada limite turbulenta, os perfis de velocidade mostram altas velocidades próximas à parede se comparadas as do escoamento laminar.

3.7 SEPARAÇÃO

A separação do escoamento é causada por uma perda excessiva de quantidade de movimento próximo à parede em uma camada limite que tenta mover-se para jusante contra um aumento de pressão $\partial p / \partial x > 0$, que é chamado de *gradiente adverso de pressão*. Este comportamento é mostrado na FIGURA 3.5.

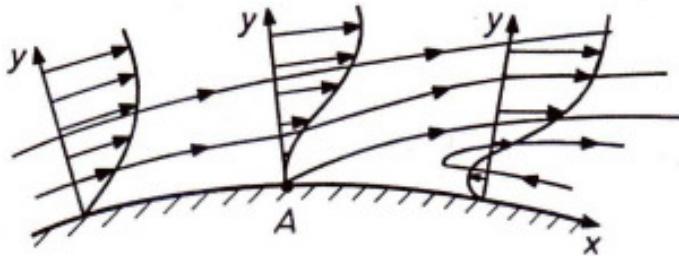


FIGURA 3.5 - SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO, fonte: Ref[2]

O caso oposto de pressão decrescente, $\partial p / \partial x < 0$ é chamado de gradiente favorável e nesse caso a separação do escoamento não usualmente observado.

Em um gradiente adverso de pressão um ponto de inflexão ocorre na camada limite a uma distância da parede que cresce com a intensidade do gradiente adverso. Para um gradiente fraco, o escoamento não se separa de fato, mas é vulnerável à transição para a turbulência a um Re_x tão baixo quanto 10^5 . Para um gradiente moderado [1], a separação ocorre em um local no qual o cisalhamento na parede é exatamente zero (Equação 3.7). Este fenômeno é chamado *separação*.

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_w = 0 \quad (3.7)$$

Camadas limite turbulentas podem resistir mais a gradientes de pressão adversos sem separação do que as camadas limite laminares. Isto ocorre porque nos escoamentos turbulentos a quantidade de movimento das partículas próximas à parede é maior do que nos escoamentos laminares. Para uma diminuição de pressão na direção do escoamento não há tendência de separação.

Desde que nenhuma separação do escoamento ocorra, os efeitos de viscosidade no fluido são restritos à camada limite. Além desta camada, o escoamento pode ser considerado como não viscoso. Na camada limite a velocidade diminui do valor do escoamento externo não viscoso na borda externa da camada limite a zero na parede, onde o fluido preenche a condição de não escorregamento.

Quando há separação do escoamento, a camada limite é dispersa e o escoamento é totalmente governado pelos efeitos viscosos. Atualmente, a teoria da camada-limite é aplicável apenas até o ponto de separação, após o qual ela perde a validade [1]. Novas técnicas estão hoje desenvolvidas para analisar os fortes efeitos de interação causados pelos escoamentos com separação.

3.8 ESCOAMENTOS EXTERNOS EXPERIMENTAIS

A teoria da camada-limite é muito interessante e esclarecedora e propicia uma grande compreensão qualitativa e quantitativa do comportamento dos escoamentos viscosos, mas por causa da separação do escoamento, a teoria geralmente não permite um cálculo quantitativo de todo o campo de escoamento. Em particular, não existe atualmente uma teoria satisfatória para as forças sobre um corpo arbitrário imerso em uma corrente escoando a um número de Reynolds arbitrário. Logo a experimentação é uma das chaves para o tratamento dos escoamentos externos e outra é a análise computacional.

Qualquer corpo de qualquer formato, quando imerso em uma corrente de fluido, experimenta forças e momentos oriundos do escoamento. Se um corpo tem forma e orientação arbitrárias, o escoamento irá exercer forças e momentos em relação a todos os três eixos de coordenadas, como mostra a FIGURA 3.6.

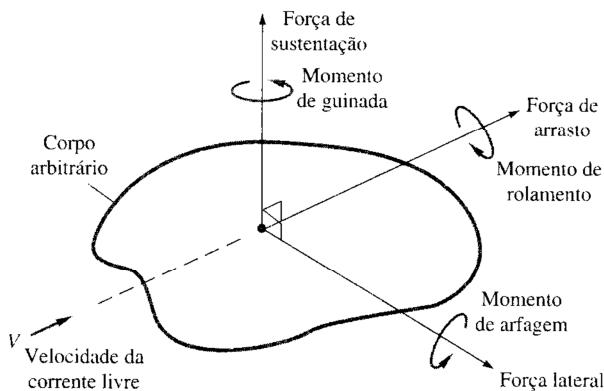


FIGURA 3.6 - FORÇAS E MOMENTOS SOBRE UM CORPO ARBITRÁRIO, fonte: Ref[1]

É costume escolher um eixo paralelo à corrente livre e positivo a jusante. A força sobre o corpo segundo esse eixo é chamada de *arrasto* e o momento em torno desse eixo é o *momento de rolamento*. O arrasto é uma força que deve ser superada se o corpo tiver de se mover contra a corrente causando perdas.

Uma segunda força, bastante importante, é perpendicular ao arrasto e geralmente realiza uma tarefa útil, tal como sustentar o peso do corpo. É chamada *sustentação*. O momento em torno do eixo de sustentação é chamado de *momento de guinada*.

O terceiro componente que não representa perda nem ganho é a força lateral e em torno de seu eixo atua o *momento de arfagem*.

Quando o corpo tem simetria em relação ao plano de arrasto-sustentação, como por exemplo, casos especiais de aviões, navios e carros se movimentando diretamente

em uma corrente, a força lateral, a guinada e o rolamento desaparecem, e o problema se reduz a um caso bidimensional de duas forças: arrasto e sustentação, e um momento, o de arfagem.

Uma simplificação final ocorre para veículos de passeio, no qual existe um plano de simetria longitudinal e vertical. A corrente livre sendo paralela a esse plano, o corpo sofrerá na maior parte arrasto e também sustentação, no qual a parcela é bem menor.

3.9 COEFICIENTE DE ARRASTO

No escoamento com baixas velocidades em torno de corpos geometricamente semelhantes, com orientação e rugosidade relativa idênticas, o coeficiente de arrasto deve ser uma função do número de Reynolds do corpo

$$C_A = f(Re) \quad (4.1)$$

O número de Reynolds é baseado na velocidade da corrente livre V e em um comprimento característico L do corpo.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (4.2)$$

Para cilindros, esferas e discos, o comprimento característico é o diâmetro.

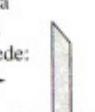
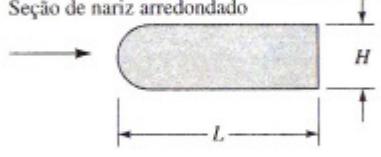
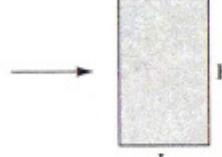
Os coeficientes de arrasto são definidos por meio do uso de uma área característica que pode diferir dependendo do formato do corpo:

$$C_A = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (4.3)$$

A principal contribuição para a origem da força de arrasto é a parte traseira do corpo. É sempre importante encontrar uma forma frontal apropriada para dividir o escoamento, e é também, muito importante projetar uma superfície traseira na qual traga a divisão das linhas de corrente suavemente juntas. Formas otimizadas são corpos aerodinâmicos que tem uma parte traseira mais fina, que não são apropriadas para veículos de passeio.

A TABELA 3.2 fornece alguns dados de arrasto baseados na área frontal para corpos bidimensionais de diversas seções transversais com $Re \geq 10^4$. Os corpos com quinas vivas, que tendem a provocar a separação do escoamento, não importando o caráter da camada limite, são insensíveis ao numero de Reynolds. Os cilindros elípticos, sendo suavemente arredondados, apresentam o efeito de transição de laminar para turbulento das FIGURAS 3.8 e 3.9 e, portanto são bastante sensíveis ao regime laminar ou turbulento da camada-limite.

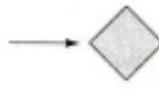
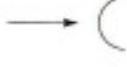
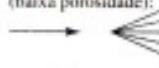
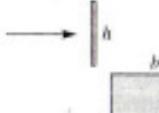
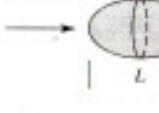
TABELA 3.2 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS BIDIMENSIONAIS COM $Re \geq 10^4$,
fonte: Ref[1]

| Forma | C_A baseado na área frontal | Forma | C_A baseado na área frontal | Forma | C_A baseado na área frontal |
|---|---|---|--|---|--|
| Cilindro quadrado: | 2,1 | Semicilindro: | 1,2 | Placa: | 2,0 |
|  | |  | |  | |
|  | 1,6 |  | 1,7 | Placa fina normal a uma parede: | 1,4 |
| Semitubo: | 1,2 | Triângulo equilátero: | 1,6 |  | |
|  | |  | | | |
|  | 2,3 |  | 2,0 |  | 1,0 ↑ 0,7 |
| <hr/> | | | | | |
| Forma | C_A baseado na área frontal | | | | |
| Seção de nariz arredondado |  | $L/H:$ | 0,5 | 1,0 | 2,0 |
| | | $C_A:$ | 1,16 | 0,90 | 0,70 |
| | | | 4,0 | 0,68 | 0,64 |
| Seção de nariz chato: |  | $L/H:$ | 0,1 | 0,4 | 0,7 |
| | | $C_A:$ | 1,9 | 2,3 | 2,7 |
| | | | 1,2 | 2,0 | 2,5 |
| | | | 2,5 | 1,4 | 3,0 |
| | | | 3,0 | 1,3 | 6,0 |
| | | | | | 0,9 |
| Cilindro elíptico: | | Laminar | Turbulento | | |
| 1:1 → |  | 1,2 | 0,3 | | |
| 2:1 → |  | 0,6 | 0,2 | | |
| 4:1 → |  | 0,35 | 0,15 | | |
| 8:1 → |  | 0,25 | 0,1 | | |

Alguns coeficientes de arrasto de corpos tridimensionais estão listados na Tabela 3.3 e na FIGURA 3.11b. Novamente, pode-se concluir que as quinas vivas sempre causam separação do escoamento e um alto arrasto, que é insensível ao número de Reynolds. Corpos arredondados como o elipsoide têm arrasto que depende do ponto de separação, de modo que tanto o número de Reynolds como o caráter da camada-limite são importantes. Em geral, o comprimento do corpo irá diminuir o arrasto de pressão,

fazendo o corpo relativamente mais esbelto, porém, mais cedo ou mais tarde, o arrasto de atrito irá alcançá-lo. Para o cilindro de face achatada da Tabela 3.3, o arrasto de pressão decresce com L/d , mas o atrito aumenta tal que um arrasto mínimo ocorre em torno de $L/d = 2$.

TABELA 3.3 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS TRIDIMENSIONAIS COM $Re \geq 10^4$, fonte: Ref[1]

| Corpo | C_A baseado na área frontal | Corpo | C_A baseado na área frontal | | |
|---|-------------------------------|---|--|-------|--|
| Cubo: | | Cone: | | | |
|  | 1,07 |  | $\theta:$ 10° 0,30 20° 0,40 30° 0,55 40° 0,65 50° 0,80 75° 1,05 90° 1,15 $C_A:$ 0,30 0,40 0,55 0,65 0,80 1,05 1,15 | | |
|  | 0,81 | Cilindro curto, escoamento laminar: | $L/D:$ 1 0,64 2 0,68 3 0,72 5 0,74 10 0,82 20 0,91 40 0,98 ∞ 1,20 $D:$ 0,64 0,68 0,72 0,74 0,82 0,91 0,98 1,20 | | |
| Concha: | | Antena parabólica plana [23]: | | | |
|  | 1,4 |  | Porosidade: 0 1,42 0,1 1,33 0,2 1,20 0,3 1,05 0,4 0,95 0,5 0,82 $C_A:$ 0,95 0,92 0,90 0,86 0,83 0,80 | | |
|  | 0,4 | Pessoa mediana: |  $C_A A \approx 0,836 \text{ m}^2$ ↑ $C_A A = 0,112 \text{ m}^2$ | | |
| Disco: | | Pinheiros e abetos (árvores) [24]: | | | |
|  | 1,17 |  | $U, \text{ m/s}$: 10 1,2 ± 0,2 20 1,0 ± 0,2 30 0,7 ± 0,2 40 0,5 ± 0,2 $C_A:$ 1,2 ± 0,2 1,0 ± 0,2 0,7 ± 0,2 0,5 ± 0,2 | | |
| Pára-quedas (baixa porosidade): | | | | | |
|  | 1,2 | | | | |
| Corpo | Razão | C_A baseado na área frontal | C_A baseado na área frontal | | |
| Placa retangular: | | | Cilindro de face achatada: | | |
|  | b/h | 1 1,18 5 1,2 10 1,3 20 1,5 ∞ 2,0 |  | L/d | 0,5 1,15 1 0,90 2 0,85 4 0,87 8 0,99 |
| Ellipsóide: | | | Laminar Turbulento | | |
|  | L/d | 0,75 0,5 0,2 1 0,47 0,2 2 0,27 0,13 4 0,25 0,1 8 0,2 0,08 | | | |

3.10 ARRASTO DE ATRITO E ARRASTO DE PRESSÃO

A teoria da camada-limite pode prever o ponto de separação, mas não pode avaliar com precisão a distribuição de pressões (em geral, baixas) na região de descolamento. A diferença entre a alta pressão na região frontal e a baixa pressão na região traseira descolada traz uma grande contribuição para o arrasto chamada de *arrasto de pressão*. De maneira geral, o arrasto de pressão é causado pela distribuição de pressões ao longo do corpo.

Esse arrasto é acrescentado ao efeito integrado da tensão cisalhante, isto é, ao arrasto de atrito do corpo (frequentemente, menor que o de pressão).

$$C_A = C_{A,press} + C_{A,atr} \quad (3.8)$$

A contribuição relativa dos arrastos de atrito e de pressão depende da forma do corpo, em especial da sua espessura. A FIGURA 3.7 (para $Re = 10^6$) mostra dados de arrasto para um cilindro carenado e de largura bastante grande normal ao plano da Figura. Para espessura zero, o corpo é uma placa plana e o arrasto de atrito é 100% do total. Para espessura igual ao comprimento da corda, simulando um cilindro circular, o arrasto de atrito é apenas 3% do total. Na FIGURA 3.7a é mostrada o efeito da razão de espessura sobre o percentual de arrasto de atrito. Os arrastos de atrito e pressão são aproximadamente iguais para a espessura $t/c = 0,25$. Note que o C_A na FIGURA 3.7b parece bem diferente quando baseado na área frontal em vez de basear-se na área planificada que é a escolha para esse formato de corpo. As duas curvas na FIGURA 3.7b representam exatamente os mesmos dados de arrasto.

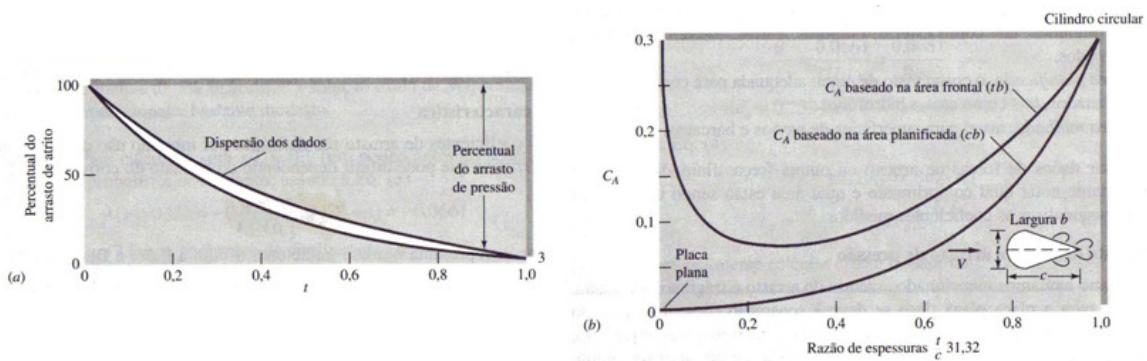


FIGURA 3.7 - ARRASTO SOBRE UM CILINDRO BIDIMENSIONAL CARENADO, fonte: Ref[1]

A FIGURA 3.8 ilustra o efeito significativo do escoamento separado. A distribuição de pressões teóricas não viscosas sobre um cilindro é mostrada pela linha tracejada.

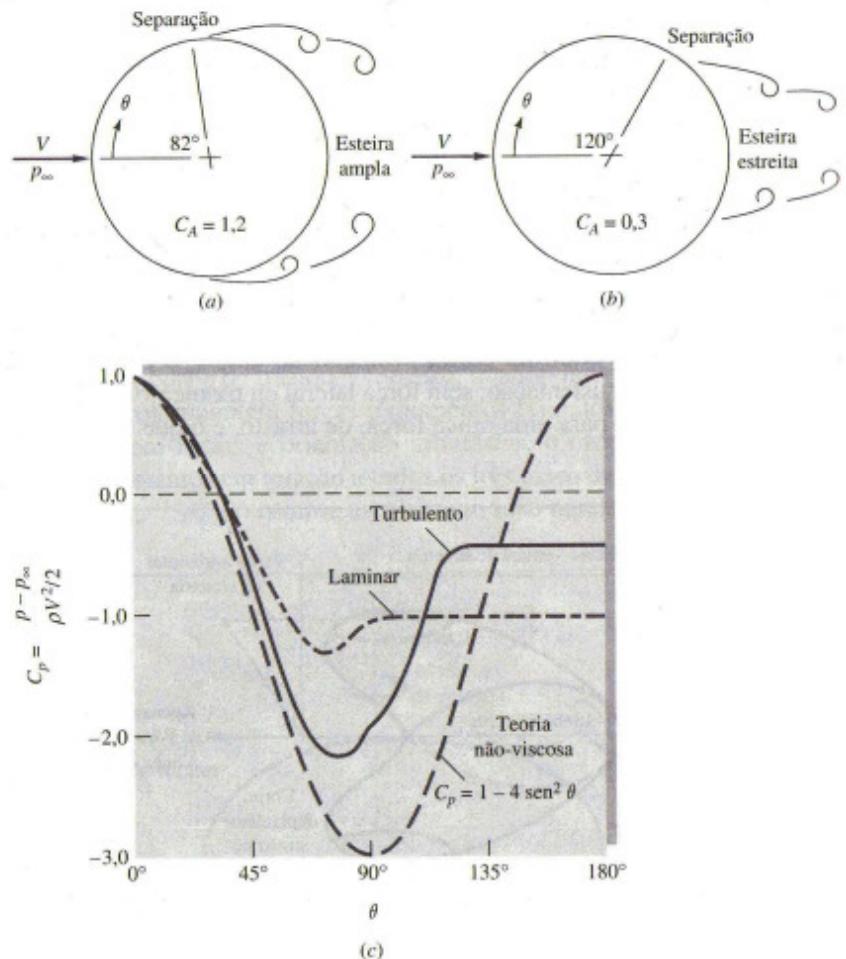


FIGURA 3.8 - ESCOAMENTO EM TORNO DE UM CILINDRO CIRCULAR, fonte: Ref[1]

O escoamento laminar é muito vulnerável ao gradiente adverso de pressão na traseira do cilindro e a separação mostrada na FIGURA 3.8a ocorre em $\theta = 82^\circ$, o que certamente não poderia ter sido previsto partindo-se da teoria não viscosa. A ampla esteira e a pressão muito baixa na região de separação laminar causam um grande arrasto, $C_A = 1,2$ [1].

A camada-limite turbulenta na FIGURA 3.8b é mais resistente, e a separação é retardada até $\theta = 120^\circ$, ocasionando uma esteira resultante menor. Uma pressão traseira maior e um arrasto 75% menor, $C_A = 0,3$. Isso explica a queda brusca do arrasto na transição.

Na FIGURA 3.8c é mostrada as distribuições de pressões teóricas e reais sobre a superfície do cilindro.

A mesma diferença marcante entre separação laminar vulnerável e a separação turbulenta resistente pode ser vista no caso de uma esfera, FIGURA 3.9. O escoamento laminar (FIGURA 3.9a) separa-se em torno de 80° , $C_A = 0,5$, enquanto o escoamento turbulento (FIGURA 3.9b) separa-se em torno de 120° , $C_A = 0,2$. Aqui os números de

Reynolds são exatamente os mesmos e a camada-limite turbulenta é induzida por uma porção com rugosidade de areia no nariz da esfera.

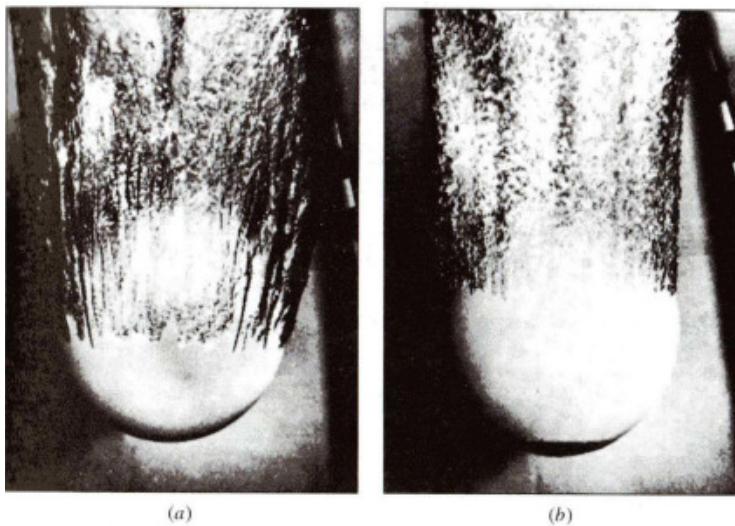


FIGURA 3.9 - DIFERENÇAS ENTRE A SEPARAÇÃO LAMINAR E SEPARAÇÃO TURBULENTA, fonte: Ref[1]

Em geral não se pode ressaltar suficientemente a importância do uso de linhas aerodinâmicas (carenamento) nos corpos para a redução de arrasto para números de Reynolds > 100 [1]. Isso está ilustrado na FIGURA 3.10.

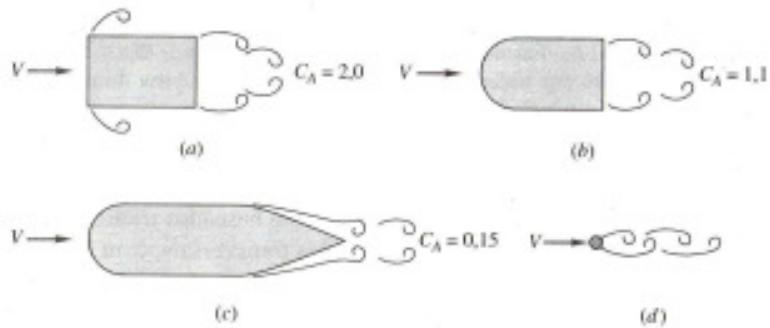


FIGURA 3.10: EFEITO DO CARENAMENTO NA REDUÇÃO DO ARRASTO, fonte: Ref[1]

O prisma de seção transversal retangular (a) tem separação forçada em todas as quinas e um arrasto muito alto. O arredondamento do seu nariz (b) produz uma redução em torno de 45%, mas o C_A é ainda alto. Uma carenagem adicional na traseira, com um bordo de fuga agudo (c) reduz o arrasto em mais 85% atingindo-se um valor de coeficiente de arrasto bem reduzido para a espessura dada. Servindo como contraste significativo, o cilindro circular (d) tem apenas um oitavo da espessura e um trezentos avos da seção transversal de (c), e ainda assim tem o mesmo arrasto. Para veículos de alto desempenho e outros corpos móveis, a palavra de ordem é redução de arrasto,

havendo nesse sentido uma pesquisa intensa e contínua, visando tanto a aplicações aerodinâmicas como as hidrodinâmicas.

O arrasto de alguns corpos representativos de grande envergadura (quase bidimensionais) está mostrado em função de Reynolds na FIGURA 3.11.

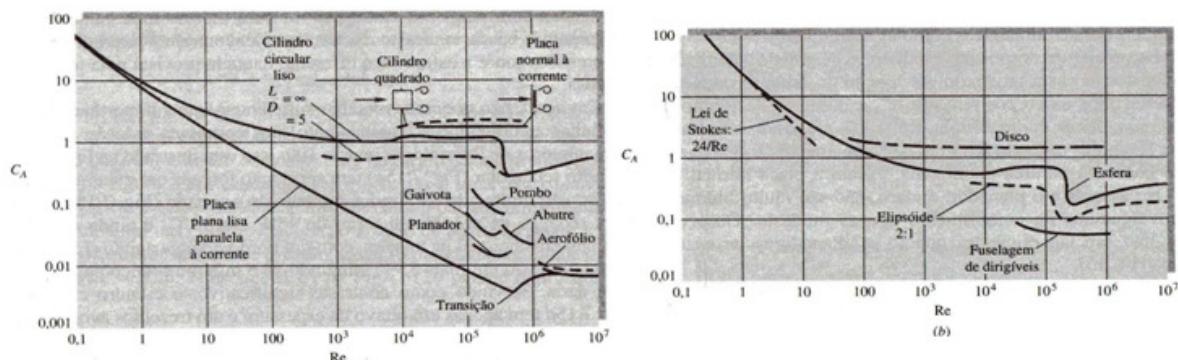


FIGURA 3.11 - COEFICIENTES DE ARRASTO DE CORPOS LISOS, fonte: Ref[1]

Todos os corpos têm alto C_A a números de Reynolds muito baixos (escoamentos muito lentos), $Re \leq 1,0$, reduzindo para altos números de Reynolds segundo seu grau de carenamento. Todos os valores de C_A estão baseados na área planificada, exceto a placa paralela ao escoamento. Os pássaros e o planador, é claro, não são bidimensionais, tendo envergaduras de comprimento apenas modesto. Observe que os coeficientes de arrasto, apresentados na FIGURA 3.11, dos pássaros são superiores aos dos planadores ou aerofólios modernos. Note-se a independência do número de Reynolds dos corpos rombudos a altos Re .

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 O VEÍCULO DE PASSEIO COMO UM CORPO COMPOSTO

Ainda impossível determinar o arrasto de veículos analiticamente com precisão, entretanto, com a utilização de CFD consideráveis avanços foram feitos recentemente.

A massa de dados experimentais publicados é agora enorme (*papers SAE*, ensaios em túneis de vento) e com a ajuda destas informações, é possível estimar o arrasto de particularidades geométricas de qualquer configuração. Esta estimativa pode ser baseada tanto em experiência e intuição do engenheiro ou em processos formais discutidos mais adiante. Entretanto, como no passado, o experimento permanece como uma excelente forma de obtenção de dados quantitativos confiáveis para arrasto.

A razão para a dificuldade de solução de problemas para arrasto de veículos se torna evidente quando, conforme seu arrasto, veículos de passeio são classificados comparando-os com corpos bidimensionais. O resultado é mostrado na FIGURA 4.1, na qual, a proposta da presente comparação o efeito da proximidade do solo é ignorada.

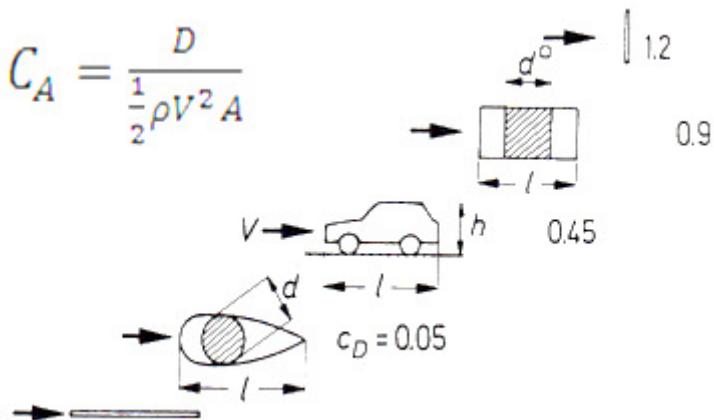


FIGURA 4.1 - ARRASTO DE UM CARRO COMPARADO A UM CORPO BIDIMENSIONAL, fonte: Ref[2]

Apesar de ser composto, o corpo de revolução (com dimensões próximas ao veículo, $d \approx h/l$) tem quase exclusivamente arrasto de atrito: $C_{A,atr} = 0,05$. Em sua mais pura forma, arrasto de atrito ocorre em casos de placa plana alinhada com o escoamento. Estudos teóricos sobre arrasto de atrito têm progredido consideravelmente [2].

Diferente de um corpo de revolução, um bloco de seção quadrada sujeito ao escoamento perpendicular a uma das suas faces apresenta arrasto similar a um arrasto apenas de pressão com $C_A = 0,9$. O exemplo extremo seria uma placa plana perpendicular ao escoamento. Atualmente, apesar de muitos sucessos no constante esforço para melhorar a aerodinâmica de veículos e “transformar” suas propriedades

aerodinâmicas de um bloco (rombudo) para um corpo de revolução, o carro ainda está mais próximo de um bloco.

Muitas empresas e laboratórios têm túneis de vento automotivos, alguns em escala natural e/ou com pisos móveis para aproximar a semelhança cinemática real. Simples alterações parciais na forma podem exercer uma grande influência sobre as forças aerodinâmicas.

4.2 ESCOAMENTO EM TORNO DE UM VEÍCULO

Geralmente, o escoamento em torno de um carro em movimento é assimétrico com respeito a seu eixo longitudinal porque a ocorrência de vento na direção do movimento do veículo é rara.

A velocidade do veículo V e a velocidade natural do vento v_w são combinadas de forma a gerar a velocidade relativa do escoamento U_∞ com a rotação do ângulo β como mostrado na FIGURA 4.2. Para simplificação, o escoamento simétrico é considerado em primeiro lugar.

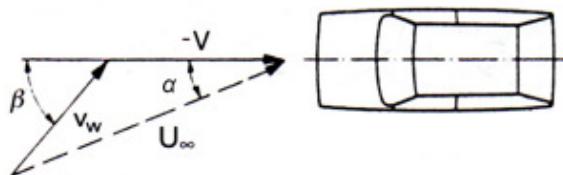


FIGURA 4.2 - DIREÇÃO DO ESCOAMENTO DO VENTO EM RELAÇÃO AO VEÍCULO, fonte: Ref[2]

Conforme ilustrado na FIGURA 4.3 a área frontal do capô, nas laterais dos para-lamas, na frente do para-brisa e na frente do aerofólio, o escoamento separado reata com a superfície mais adiante. Nessas regiões ocorrem a recirculação.

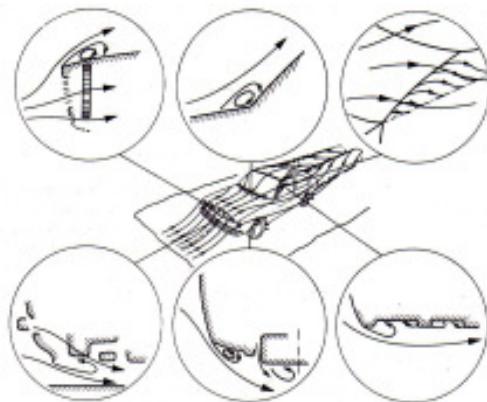


FIGURA 4.3 - ZONAS DE RECIRCULAÇÃO NA REGIÃO FRONTAL DE UM VEÍCULO, fonte: Ref[2]

4.3 FRAÇÕES DO ARRASTO E SUAS ORIGENS LOCALIZADAS

A determinação dos componentes de arrasto é feita por um engenheiro aerodinâmico utilizando o túnel de vento. O engenheiro rastreia os “pontos fracos” no escoamento em torno do veículo. Ele tenta aproximar o escoamento ideal modificando a geometria. Medir o arrasto por meio de uma balança é o típico caminho para validar a medição. Entretanto, a balança não diz nada sobre a localização do arrasto e meios simples de visualização tais como a ponta de fumaça não dão mais que uma ideia muito grosseira do escoamento. O resultado da comparação “antes/depois” é interpretada como uma contribuição do arrasto de um detalhe específico sobre investigação. Entretanto, “entender” o escoamento requer ir além de uma aproximação pragmática. Componentes de arrasto não devem ser somente correlacionados as modificações geométricas, eles devem pelo menos ser explicados qualitativamente.

Nos capítulos seguintes, as frações de arrasto são tratadas em uma sequência que segue um escoamento da região frontal para a traseira, que é o mesmo procedimento do desenvolvimento de um veículo num túnel de vento. Fazendo assim, os principais efeitos de interferência, a saber as consequências de toda a ação corretiva em condições de escoamento serão esclarecidos.

4.4 OTIMIZAÇÃO DO CAPÔ E REGIÃO FRONTAL

A região frontal do veículo pode ser grosseiramente aproximada com um bloco paralelepípedico. As linhas de corrente em torno deste bloco são mostradas na FIGURA 4.4.

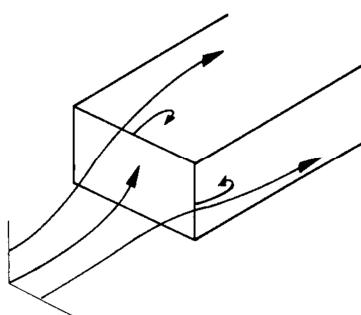


FIGURA 4.4 - BLOCO REPRESENTANDO A FRENTE DO VEÍCULO, fonte: Ref[2]

Para uma simplificação adicional, a tomada de ar para resfriamento do motor é adotada como fechada. O ponto de estagnação é formado na face vertical frontal. Por

causa de uma proximidade do solo, o ar tende a fluir sobre e em torno do veículo melhor que por baixo dele; as linhas de corrente próximas do região frontal são portanto direcionadas para cima. O escoamento é significativamente defletido ao pontos de intersecção entre a face frontal e capô e laterais.

Sem medidas especiais, este escoamento será separado, com o resultado que as distribuições de pressão próximas às arestas da região dianteira irão se afastar do escoamento teórico. O pico do coeficiente de pressão manométrica negativa (pressão menor que ao longo do escoamento) do escoamento real na aresta principal do capô e laterais é menor que o teórico. A separação do escoamento é mostrada na FIGURA 4.5.

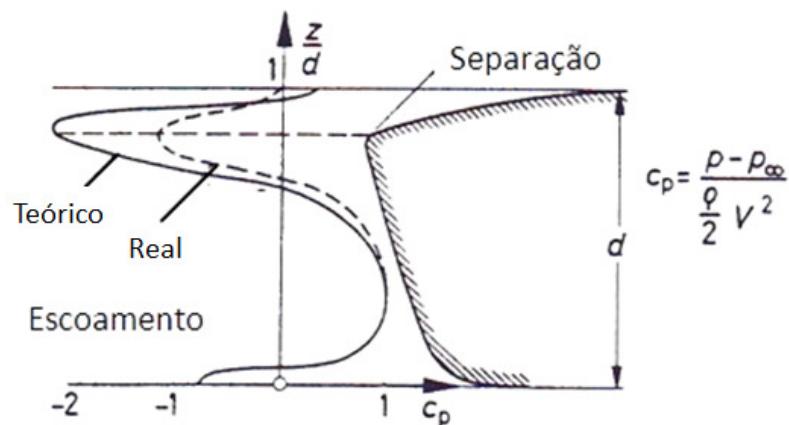


FIGURA 4.5 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA SEÇÃO LONGITUDINAL, fonte: Ref[2]

A força de pressão na região frontal é, portanto maior que num escoamento teórico, e um componente de arrasto é gerado. O Volkswagen Van II foi alterado de canto vivo ($r/b = 0$), com separação de escoamento de alto arrasto ($C_A = 0,45$) para um canto arredondado ($r/b = 0,085$), sem separação do escoamento e $C_A = 0,40$. A diferença correspondente é mostrada em uma seção horizontal na FIGURA 4.6.

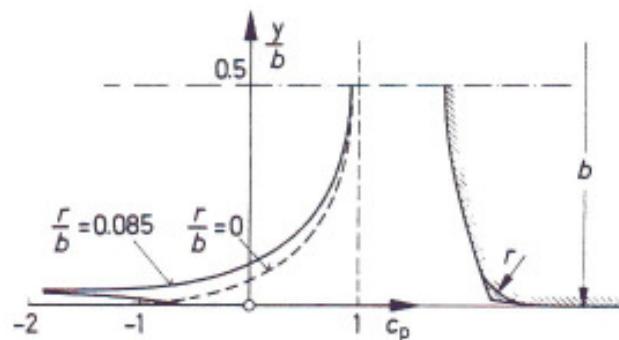


FIGURA 4.6 - INFLUÊNCIA DO CONTORNO DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO, fonte: Ref[4]

A FIGURA 4.7 mostra a distribuição de pressão influenciada pela geometria com cantos vivos (a) e cantos arredondados (b).

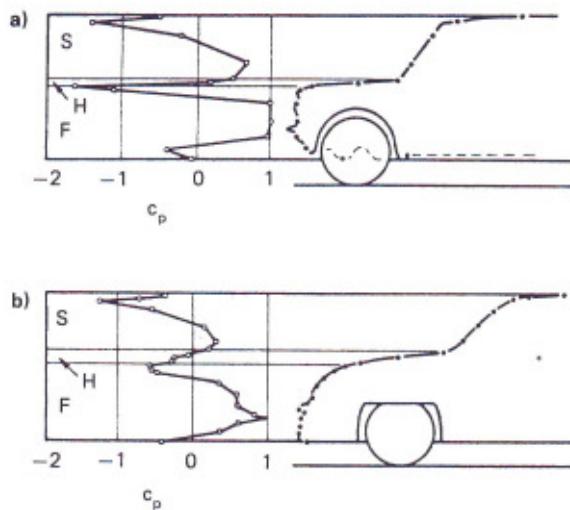


FIGURA 4.7 - DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NUMA SEÇÃO LONGITUDINAL, fonte: Ref[2]

A FIGURA 4.8 mostra como as separações na região frontal são evitadas na prática por meio de várias modificações da forma inicial. Na seção longitudinal, os parâmetros essenciais são a inclinação do capô, a inclinação da região frontal do para-choque e os raios de transição para o capô e assoalho. Estes parâmetros individuais são harmonizados empiricamente, tomando em consideração, naturalmente, o para-choque dianteiro e a abertura de tomada de ar, no qual não são mostrados aqui. Resultados sistemáticos são agora conhecidos para alguns parâmetros identificados na FIGURA 4.8, que são os raios, o ângulo do capô e o ângulo da face frontal.

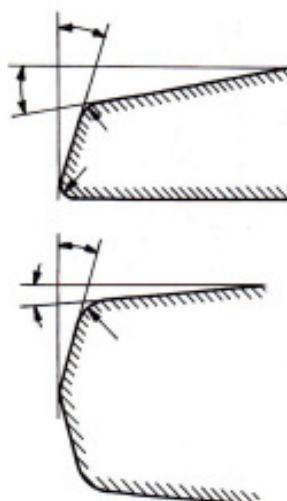


FIGURA 4.8 - OS PARÂMETROS ESSENCIAIS UTILIZADOS PARA OTIMIZAR A REGIÃO FRONTAL DO VEÍCULO, fonte: Ref[2]

Se o raio de uma “aresta” frontal é aumentado, o arrasto do corpo é reduzido rapidamente. Então, após passar certo valor, o arrasto permanece constante e usualmente este fenômeno é denominado “saturação”. Nesta situação, a separação não ocorre mais, e o escoamento real se aproxima do teórico. Quando aplicado ao veículo, esta observação significa que somente um mínimo arredondamento das arestas frontais é exigido para prevenir uma separação do escoamento, desse modo minimizando o arrasto na região frontal.

Quando se transfere os valores numéricos da FIGURA 4.9 elaborada por HUCHO [2] em 1920, para o problema em consideração aqui, deve ser lembrado que eles se aplicam ao bloco quadrado, onde as deflexões num veículo real são menores.

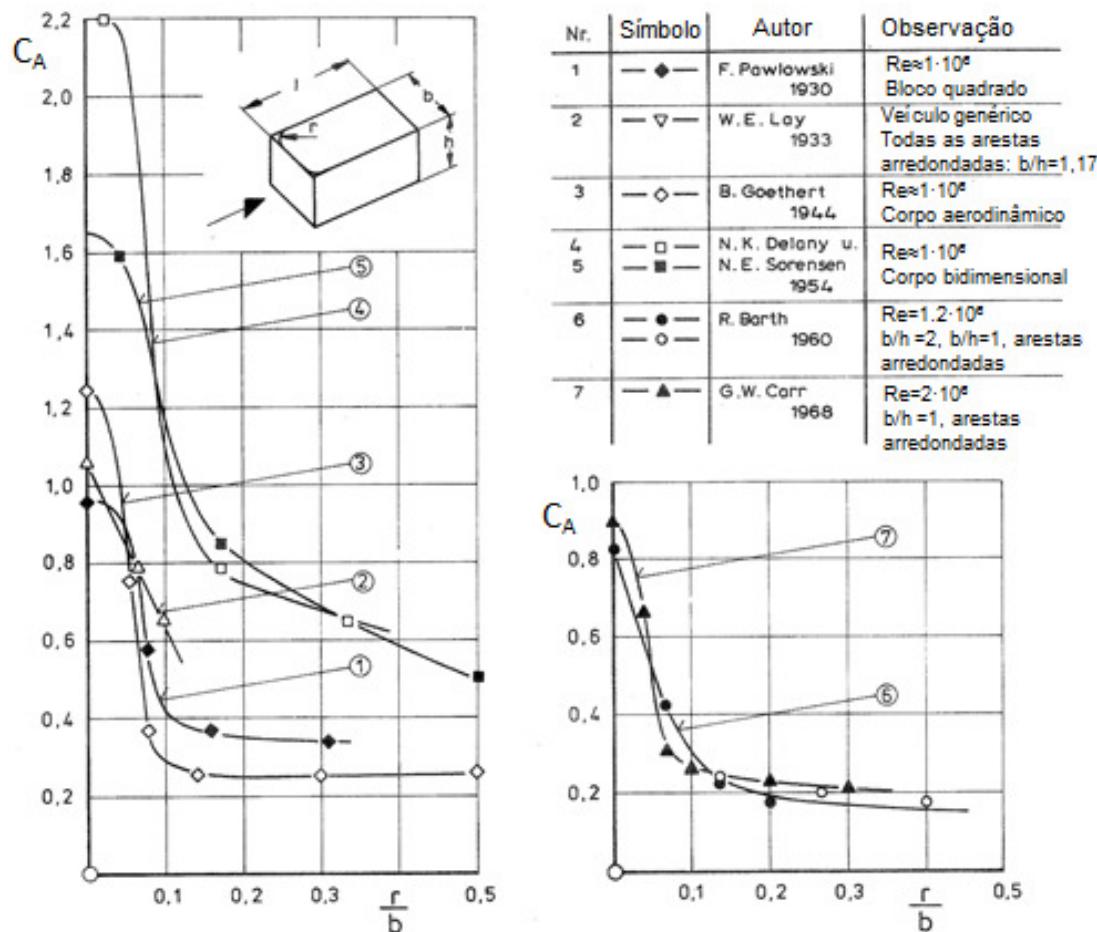


FIGURA 4.9 - INFLUÊNCIA DOS RAIOS DE CANTO NO ARRASTO DE BLOCOS QUADRADOS, fonte: Ref[2]

O segundo parâmetro geométrico que foi estudado em detalhe é a inclinação do ângulo do capô. O efeito da inclinação do capô (mostrado na FIGURA 4.10) no arrasto é também sujeito ao efeito de saturação. Não há nenhuma diminuição adicional no arrasto

mesmo após uma inclinação moderada. O fato é confirmado por medições tomadas por GILHAUS e RENN [3].

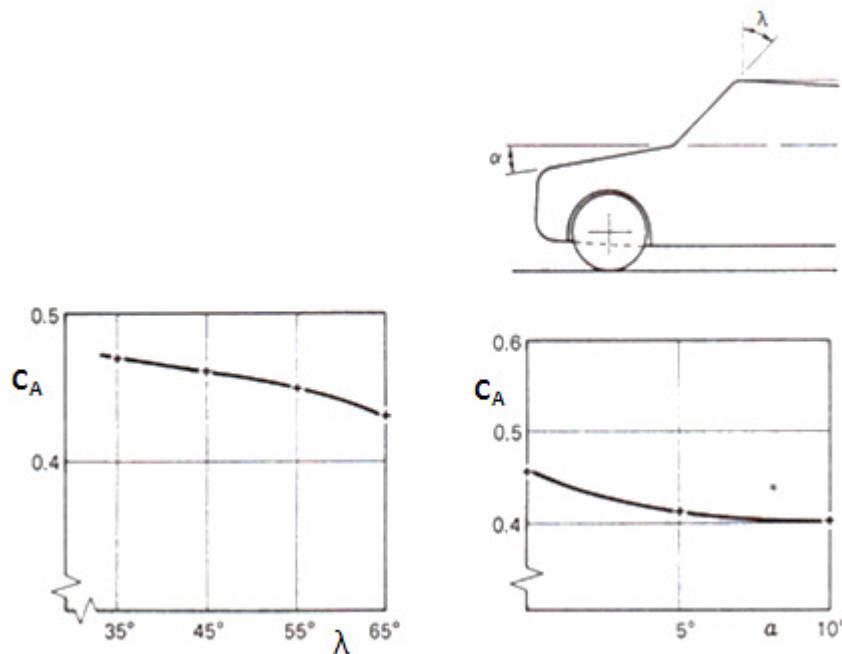


FIGURA 4.10 - REDUÇÃO DO ARRASTO COM INCLINAÇÃO DO ÂNGULO α DO CAPÔ E INCLINAÇÃO DO ANGULO λ DO PARA-BRISA, fonte: Ref[3]

O efeito de redução de arrasto da inclinação do capô depende principalmente da melhoria do escoamento de ar em outras regiões (ex: grelha entre capô e para-brisa, e a junção do para-brisa e teto).

O terceiro parâmetro examinado separadamente é o ângulo de inclinação da face frontal. Seu efeito sobre o arrasto é mostrado na FIGURA 4.11, baseado no trabalho de GILHAUS e RENN [3]. O fato que este efeito é tão leve se deve, provavelmente, ao grande raio de canto frontal usado neste modelo.



FIGURA 4.11 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DA REGIÃO FRONTAL NO ARRASTO, fonte: Ref[3]

A FIGURA 4.12 mostra mais uma maneira: ela detalha o desenvolvimento do VW Golf I, mostrado por JANSSEN e HUCHO [4]. Com referência a proposta de G.W. Carr, um ensaio preliminar foi executado para determinar a máxima redução de arrasto da região frontal. Para esta proposta, a região frontal foi coberta com uma moldura projetada somente em considerações aerodinâmicas, sem considerar nenhum requisito funcional ou estilístico. Isto é chamado de “nariz otimizado” feito de duas partes para que os efeitos dos raios nas junções com capô e laterais possam ser isolados.

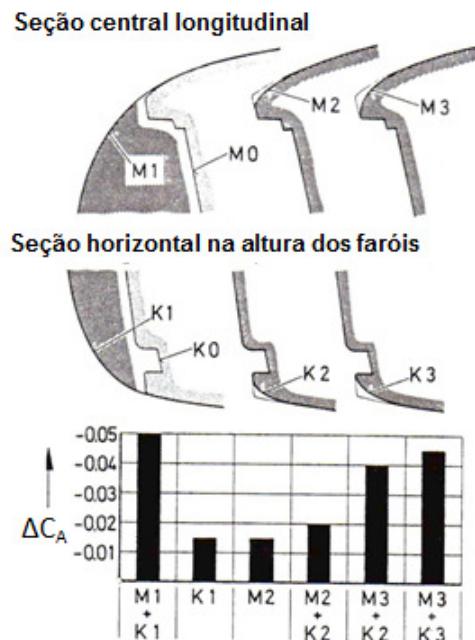


FIGURA 4.12 - OTIMIZAÇÃO DA REGIÃO FRONTAL DO VW GOLF I, fonte: Ref[4]

Esta moldura montada mostra uma melhoria no arrasto de $\Delta C_A = 0,05$ alcançado e um escoamento sem separação. Com incrementos progressivos, o raio de transição da região frontal do veículo real, esta possibilidade foi quase totalmente alcançada. Apesar de arestas que aparecem “pontudas” ao olho, o nariz do VW Golf I permanece com uma corrente de ar sem separação do escoamento, como mostrado na FIGURA 4.13.



FIGURA 4.13 - LINHAS DE CORRENTE NO VW GOLF I NUM TUNEL DE VENTO, fonte: Ref[4]

O nariz otimizado neste experimento foi apresentado intuitivamente. Em ensaios seguintes seu contorno foi alterado. Com mostrado na FIGURA 4.11, o coeficiente de arrasto é influenciado ligeiramente pela forma frontal contando que não haja nenhuma separação do escoamento. Também, com regra geral, pode ser concluído que é melhor um ponto de estagnação mais baixo [4].

O escoamento em torno da aresta pode ser melhorado chanfrando a aresta ao invés de arredondá-la. Um exemplo disto é mostrado na FIGURA 4.14.

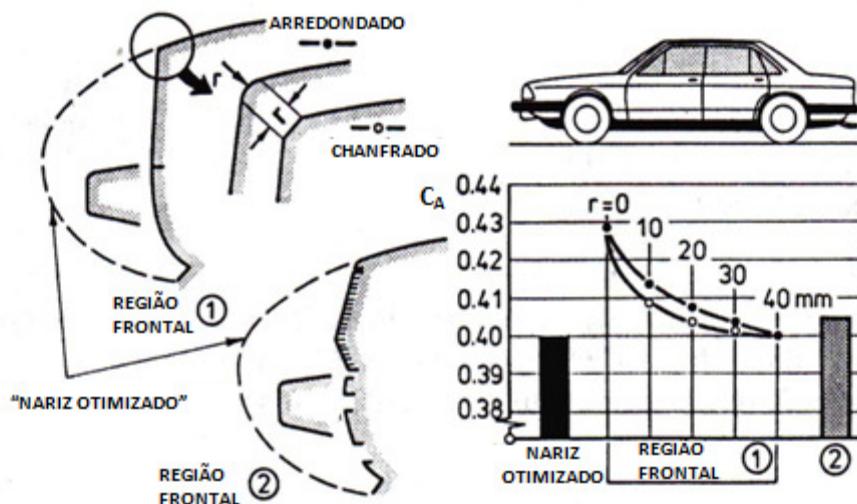


FIGURA 4.14 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DE CHANFROS E RAIOS NA REGIÃO DIANTEIRA, fonte: Ref[2]

O fato é que é possível alcançar baixos arrastos como mostrados na FIGURA 4.15. A melhoria no arrasto demonstrado na otimização do nariz foi totalmente alcançada por meio de mudanças nos raios do capô e posição da grade.

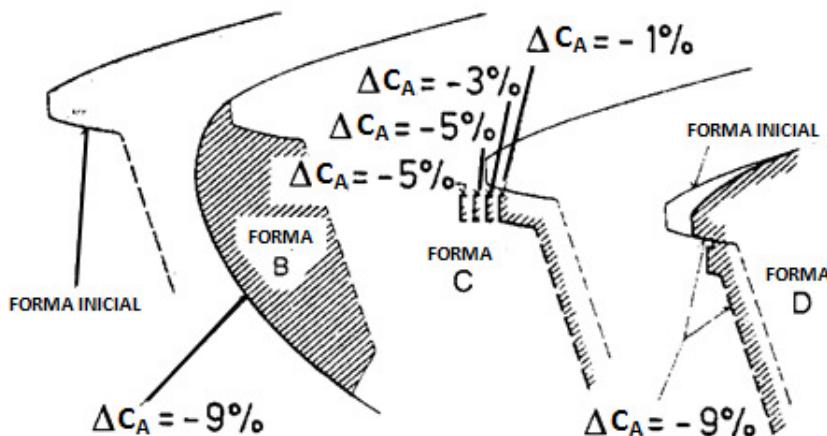


FIGURA 4.15 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DO REFINAMENTO DO RAIOS DO CAPÔ E FORMAS DA GRADE, fonte: Ref[2]

4.5 OTIMIZAÇÃO DO PARA-BRISA E COLUNA ‘A’

Um esquema do escoamento em torno do para-brisa é mostrado na FIGURA 4.16. A separação provavelmente ocorre em três diferentes pontos:

- na base do para-brisa, no espaço côncavo formado pela sua junção com o capô
- no topo do para-brisa, na junção com o teto
- nas colunas ‘A’.

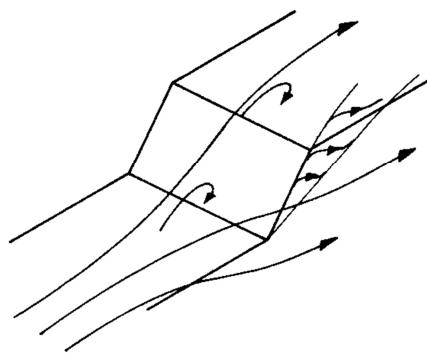


FIGURA 4.16 - MODELO SIMPLIFICADO DO ESCOAMENTO AO REDOR DO PARA-BRISA, fonte: Ref[2]

Enquanto as primeiras duas separações são do tipo “quase bidimensional”, a terceira é totalmente tridimensional.

Os principais parâmetros que descrevem a geometria do para-brisa estão destacados na FIGURA 4.17.

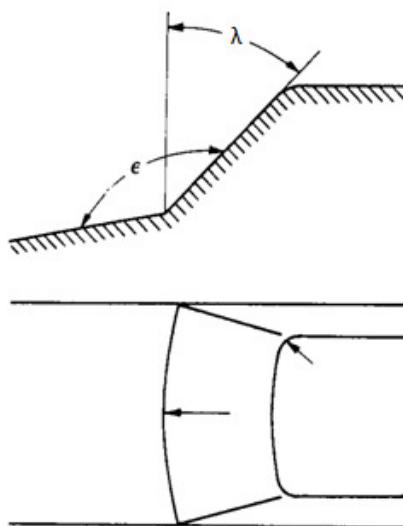


FIGURA 4.17 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DA GEOMETRIA DO PARA-BRISA, fonte: Ref[2]

Dois deles, inclinação do para-brisa e raio na coluna 'A', tem sido analisado em detalhes, não somente considerando o arrasto e também o ruído causado pelo escoamento.

Com o aumento da inclinação do ângulo λ , o arrasto é reduzido, mas não tanto como suposto. Esta assertiva foi confirmada por BUCHHEIM [5] e GILHAUS e RENN [3] que mostraram que a função $C_A(\lambda)$ é assintótica. Para ângulos grandes, como $\lambda > 60^\circ$, quase não há mais nenhuma melhoria no arrasto como mostrado na FIGURA 4.18; isto deve ser acrescentado devido a grande ângulos de para-brisa podem causar severos problemas no que se diz respeito a visibilidade (dupla refração) e alta temperatura dentro do compartimento de passageiros.

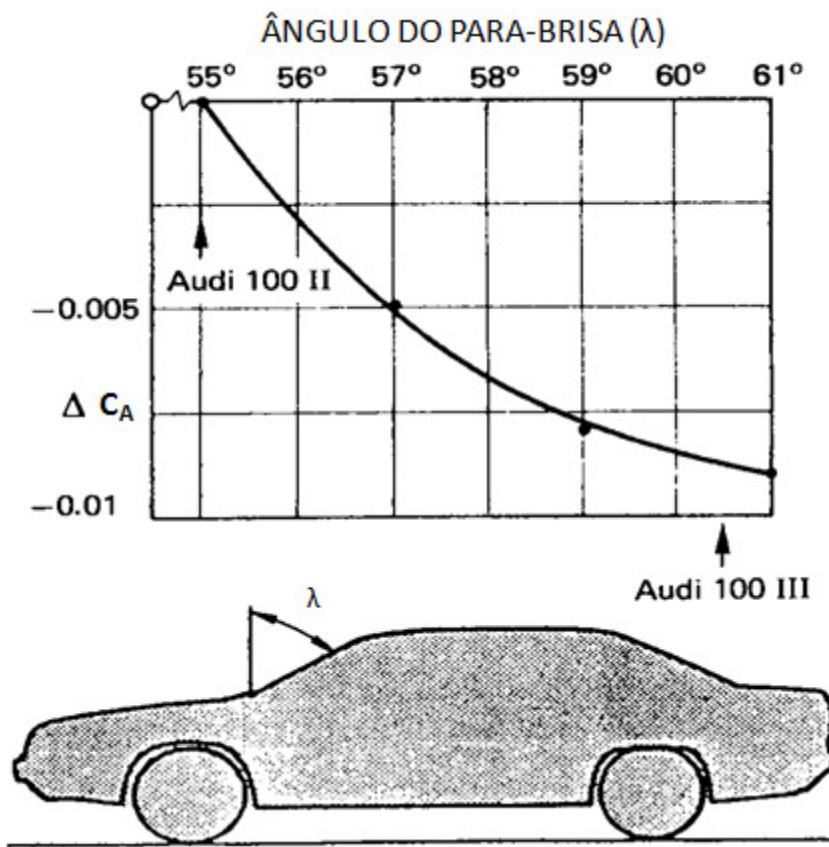


FIGURA 4.18 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO ANGULO λ DO PARA-BRISA NO ARRASTO, fonte: Ref[5]

O efeito da inclinação do para-brisa no arrasto é indireto. Como mostrado na FIGURA 4.19, o maior ângulo de inclinação produz um pico menos marcado de pressão manométrica negativa na junção com o teto.

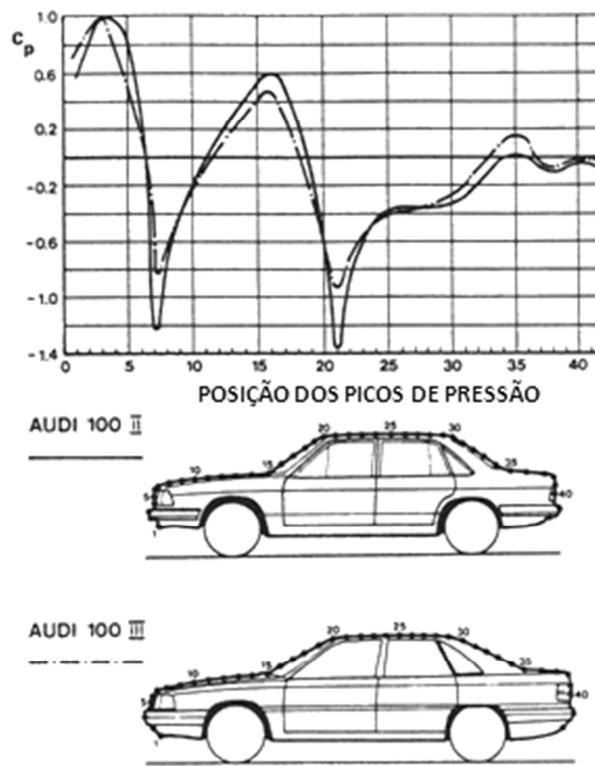


FIGURA 4.19 - POSIÇÃO DOS PICOS DE PRESSÃO DO AUDI 100: 100 II, $C_A = 0,42$; 100 III, $C_A=0,30$, fonte: Ref[5]

O subsequente gradiente de pressão manométrica negativa é menos íngreme e pode ser superado pela camada limite com um perda menor. Consequentemente, isto permite uma recuperação melhor mais adiante no vidro traseiro. Além disso, com o maior ângulo do para-brisa o ar é menos forçado para a coluna 'A' e os vórtices gerados dissipam menos energia. Este fato contribui para uma melhor recuperação da pressão ao longo do trajeto, no qual reforçado mais adequadamente por meio dos arredondamentos das colunas 'A', como mostrado na FIGURA 4.20.

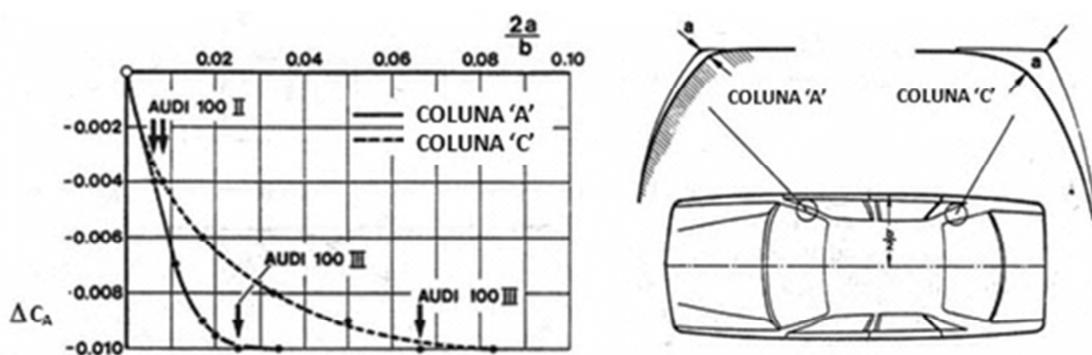


FIGURA 4.20 - REDUÇÃO DO ARRASTO POR MEIO DO ARREDONDAMENTO DAS COLUNAS 'A' E 'C' DO AUDI 100 III, fonte: Ref[5]

4.6 OTIMIZAÇÃO DO TETO

O coeficiente de arrasto pode ser reduzido curvando o teto na direção longitudinal; entretanto, se a curvatura é muito grande, novamente o C_A pode ser aumentado, como mostrado na FIGURA 4.21. O efeito favorável da curvatura depende muito dos raios de dobra de junção com o para-brisa e com o vidro traseiro, para que picos de pressão negativa nestes locais não sejam grandes e os correspondentes gradientes de pressão sejam razoavelmente pequenos.

O projeto do teto deve assegurar que a área frontal do veículo permanece constante para evitar que o arrasto absoluto ($C_A \cdot A$) não aumente, apesar da redução do coeficiente de arrasto, como mostrado no gráfico (a) da FIGURA 4.21. Desde que os ângulos de visão do motorista não sejam reduzidos, o para-brisa e o vidro traseiro têm que se incorporados a curvatura longitudinal; como resultado, vidros ficam mais curvados e assim mais caros.

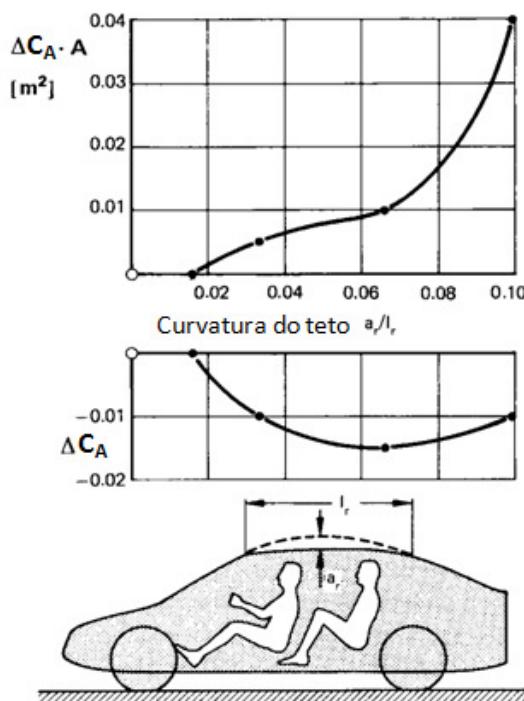


FIGURA 4.21 - EFEITO DA CURVATURA DO TETO NO COEFICIENTE DE ARRASTO, fonte: Ref[12]

4.7 OTIMIZAÇÃO DA REGIÃO TRASEIRA

Três tipos de traseiras são comuns nos veículos: *squareback*, *fastback* e *notchback*. Estes são mostrados de maneira simplificada na FIGURA 4.22.

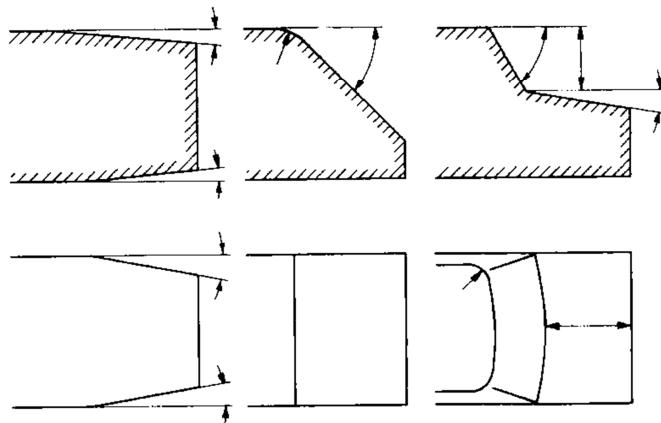


FIGURA 4.22 - OS TRÊS TIPOS MAIS COMUNS DE VEÍCULOS E SEUS ESSENCIAIS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS, fonte: Ref[2]

Os principais parâmetros dominantes para cada forma estão mostrados. Um exemplo, “*boat-tailing*”, no qual é desenhado somente no *squareback*, pode também ser aplicado nas suas variações.

O escoamento separa-se na traseira do veículo devido ao seu término. Dois tipos de separação ocorrem, caracterizadas por termos “quase bidimensionais” e “tridimensionais”. Ambas as formas de separação são governadas por parâmetros específicos. Para separação quase bidimensional, este parâmetro é os *boat-tailing*, no qual é definido por ângulos no teto da região traseira. A dependência de dois tipos de separação definindo os parâmetros de forma é mostrada separadamente a seguir.

4.7.1 BOAT-TAILING

Um dos alvos do desenvolvimento das formas é tornar a pressão estática na extremidade traseira do veículo, chamada pressão base, o tão alta possível, e na base dele, onde a pressão atua à menor possível. Isto requer desenhá-la criando um afunilamento da região traseira, uma técnica chamada “*boat-tailing*”. Estudos mais profundos sobre este assunto foram elaborados por MAULL [6] e MAIR [7,8]. A FIGURA 4.24 mostra a extensão que o arrasto de um corpo de revolução pode ser reduzido por estreitamento. O ângulo ideal de estreitamento de 22° dado neste diagrama deve ser

tomado somente como uma referência; o específico ângulo ideal depende de como o escoamento se comporta anteriormente. Estendendo a região traseira encontra o efeito de saturação; com o aumento do comprimento, o efeito positivo no arrasto se torna progressivamente mais fraco. Se a região traseira é cortada, há um potencial muito pequeno de redução no arrasto.

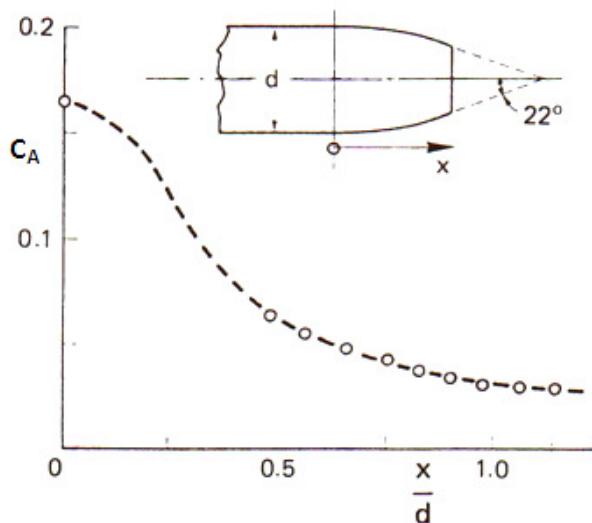


FIGURA 4.23 - REDUÇÃO DO ARRASTO DE UM CORPO DE REVOLUÇÃO USANDO O MÉTODO BOAT-TAILING, fonte: Ref[7, 8]

Estes resultados foram aplicados em um veículo de ensaio por LIEBOLD [15]. Resultados obtidos por LIEBOLD são apresentados na FIGURA 4.24. Nos veículos de ensaio, há liberdade na escolha do comprimento da região traseira.

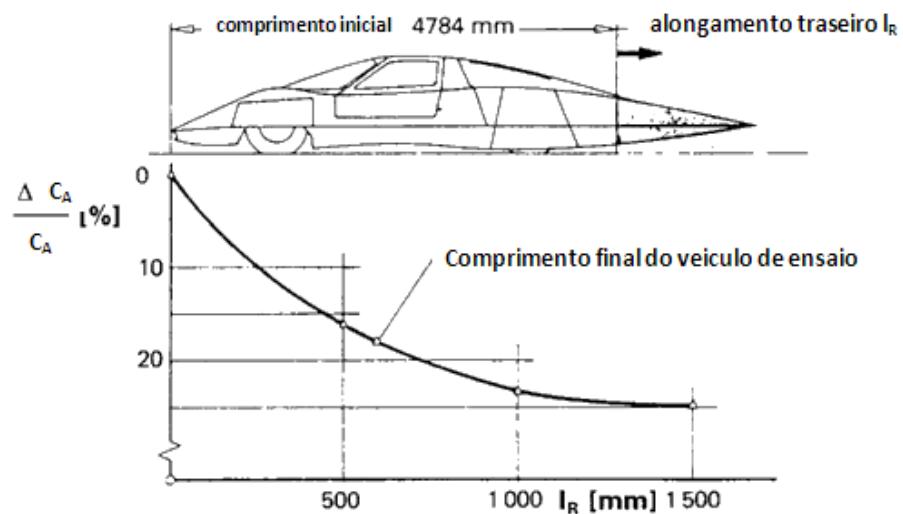


FIGURA 4.24 - METODO DE BOAT-TAILING APLICADO AO VEICULO DE ENSAIO C111 III DA DAIMLER-BENZ AG, fonte: Ref[15]

A extensão no qual o arrasto pode ser reduzido por afunilamento das laterais de um veículo real é mostrado na FIGURA 4.25 e as linhas de fumaça do escoamento na FIGURA 4.26 mostram como o escoamento de fato segue o contorno afunilado.

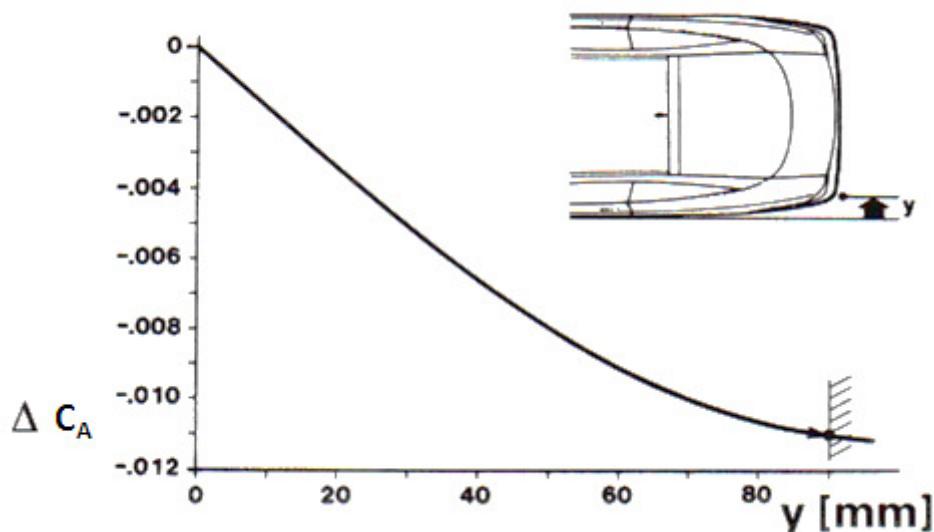


FIGURA 4.25 - MÉTODO BOAT-TAILING APLICADO NO OPEL CALIBRA COUPE, fonte: Ref[16]

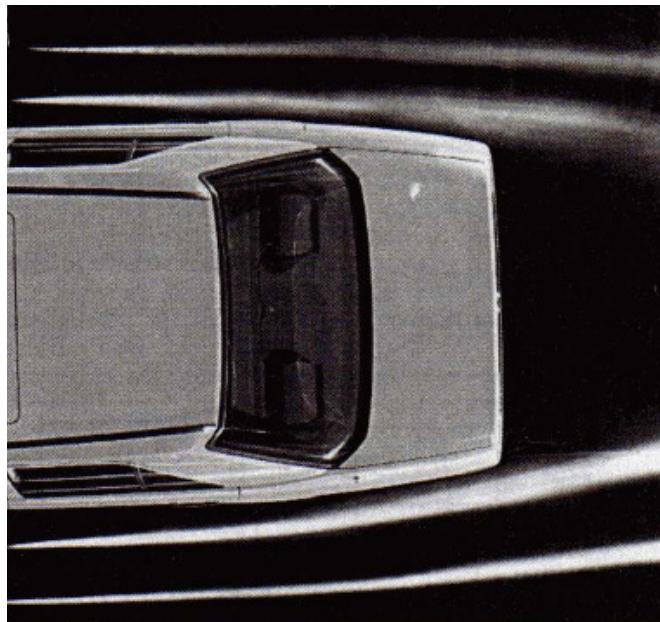


FIGURA 4.26 - LINHAS DE FUMAÇA SEGUEM O CONTORNO BOAT-TAILING DA TRASEIRA DO MERCEDES-BENZ 190, fonte: Ref[2]

Uma aplicação muito efetiva do *boat-tailing* para veículos *squareback* é baixar a extremidade traseira do teto mostrada na FIGURA 4.27. Como resultado obteve-se a redução do arrasto no Fiat Uno por meio do aumento da inclinação da região traseira do

teto (valor otimizado em $\varphi = 10^\circ$). Em contraposição esta ação reduz o volume do interior e a altura do compartimento de bagagens, um efeito negativo que é raramente tolerado pela engenharia de projetos, principalmente para veículos compactos.

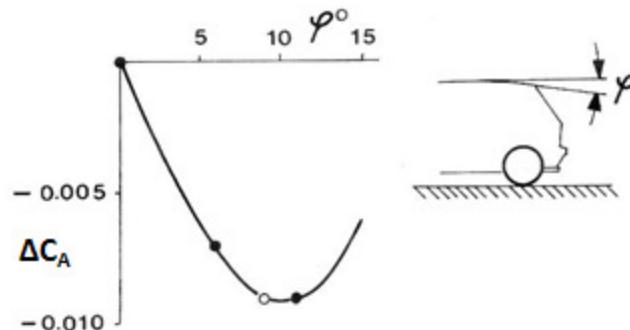


FIGURA 4.27 - REDUÇÃO DO ARRASTO NO FIAT UNO, fonte: Ref[17]

Aplicações *boat-tailing* foram utilizadas com sucesso no assoalho. Embora um assoalho plano seja uma boa condição para o sistema de exaustão. POTTHOFF [9] demonstrou que difusores mais longos (l_w) com um pequeno ângulo são mais efetivos na redução do arrasto do que ângulos maiores e menores comprimentos na saída. Mostrado na FIGURA 4.28.

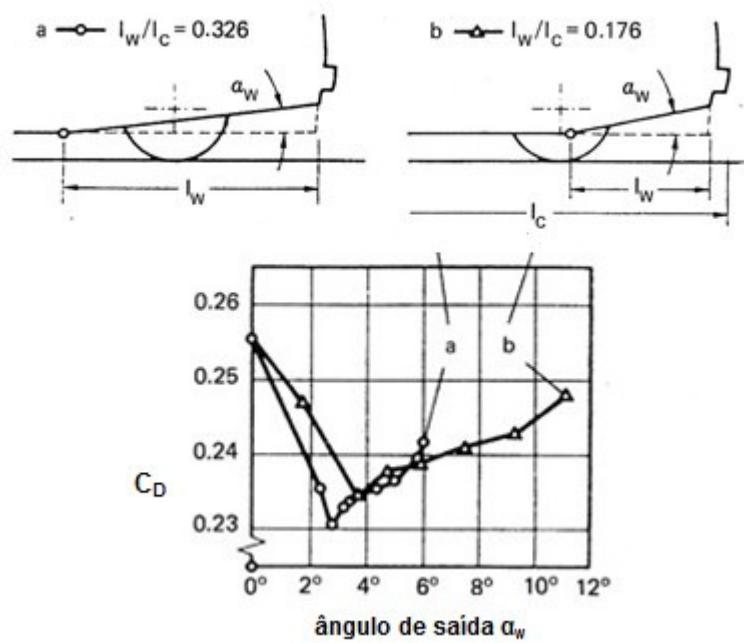


FIGURA 4.28 - REDUÇÃO DO ARRASTO NA REGIÃO DO EIXO TRASEIRO, fonte: Ref[9]

4.7.2 CARROCERIA FASTBACK

Resultados obtidos para um corpo cilíndrico num escoamento, excluindo o efeito do solo, são mostrados na FIGURA 4.29. Os trabalhos de MOREL [10] e BEARMAN [11] coincidem em mostrar que o arrasto e a sustentação crescem bruscamente com o aumento do ângulo φ . No ângulo crítico de aproximadamente $\varphi = 50^\circ$, ambas as forças rapidamente são reduzidas. O fato é que os resultados dos ensaios que medem diferentes valores para este ângulo crítico podem ser influenciados por uma ligeira diferença no ângulo de ataque.

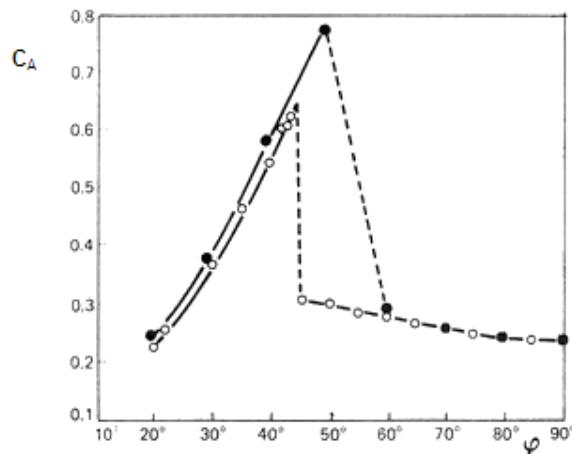


FIGURA 4.29 - EFEITO DO ANGULO DE SAÍDA φ NO ARRASTO (□ MEDIÇÃO FEITA FOR T. MOREL / ■ MEDIÇÃO FEITA FOR A.D. STUART E A.T. JONES), fonte: Ref[10, 11]

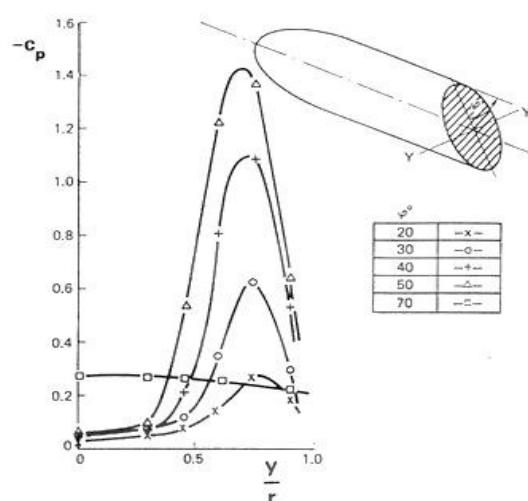


FIGURA 4.30 - EFEITO DO ÂNGULO DE SAIDA φ NA DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA TRASEIRA DO CORPO CILÍNDRICO, fonte: Ref[11]

Observações no escoamento e medições na distribuição de pressão fornecem uma explicação conclusiva para as curvas características destas forças. Já a $\phi = 20^\circ$, os coeficientes de pressão na seção YY (FIGURA 4.30) mostram picos de pressão manométrica negativa na inclinação próxima as suas arestas. Estes picos de pressão são induzidos por vórtices que giram a partir da aresta superior mostrado na FIGURA 4.31.

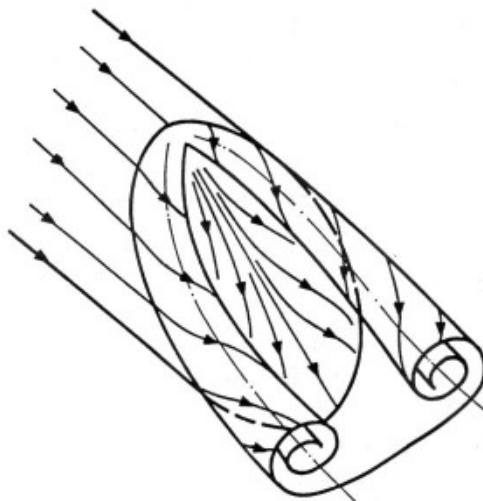


FIGURA 4.31 – VORTÍCES APÓS SEPARAÇÃO NO ESCOAMENTO NUM CORPO COM SEÇÃO OBLÍQUA, fonte: Ref[2]

Essas observações foram qualitativamente confirmadas num corpo em forma de prisma próximo ao solo por MOREL [10]. A FIGURA 4.32 [10] mostra o ângulo crítico ocorrendo somente a $\phi = 30^\circ$ que é o mesmo valor observado por JANSSEN e HUCHO [4] em veículos completos.

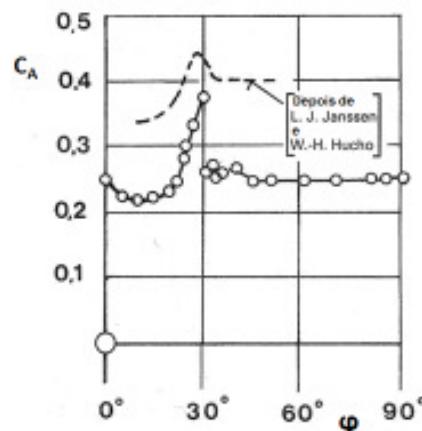


FIGURA 4.32 - ARRASTO NUM PRISMA CHANFRADO NA TRASEIRA E PRÓXIMO AO SOLO, fonte: Ref[4]

Resultados da interação da inclinação e das medições *boat-tailing* estão também disponíveis para um corpo em forma de prisma e ensaiados (FIGURA 4.33). O efeito do *boat-tailing* foi ensaiado para uma inclinação constante de ângulo $\varphi = 25^\circ$. Levantando a traseira do assoalho. (ângulo ω do difusor traseiro) e afunilando as laterais (ângulo θ) resultou numa considerável redução de arrasto.

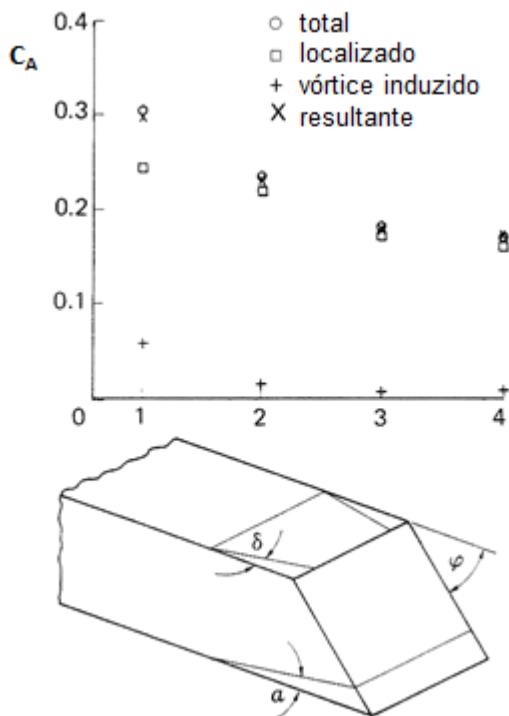


FIGURA 4.33 - BOAT-TAILING NO FASTBACK, fonte: Ref[2]

Na FIGURA 4.33 no ponto 1, $\varphi = 25^\circ$, o assoalho foi levantado para $\alpha = 10^\circ$; no ponto 3 como feito no ponto 2 com o *boat-tailing* lateral com $\delta = 10^\circ$; no ponto 4 com feito no ponto 3, mas com a aresta superior chanfrada da inclinação traseira.

Resultados de estudos mais profundos do escoamento em torno do veículo com a traseira inclinada inspirados em observações feitas durante o desenvolvimento do VW Golf I, como publicado por JANSSEN e HUCHO [4] são reproduzidos na FIGURA 4.34. Originalmente, o modelo desenhado, com $\varphi = 45^\circ$, tinha um extremidade traseira íngreme. O escoamento separava na aresta traseira do teto. O coeficiente de arrasto era $C_A = 0,40$. O ângulo foi modificado para $\varphi = 30^\circ$ e o arrasto aumentou em 10%. O ponto de separação mudou para a aresta inferior da traseira. Vórtices giravam partindo das laterais. Mais uma alteração de ângulo foi feita, para $\varphi = 15^\circ$ e com isso, atingiu-se um arrasto menor. Finalmente, mesmo com ângulos menores, o escoamento mais adequado foi obtido. Na faixa de $28^\circ < \varphi < 32^\circ$, duas condições foram observadas: separação pode ocorrer tanto em cima, quanto em baixo da traseira inclinada.

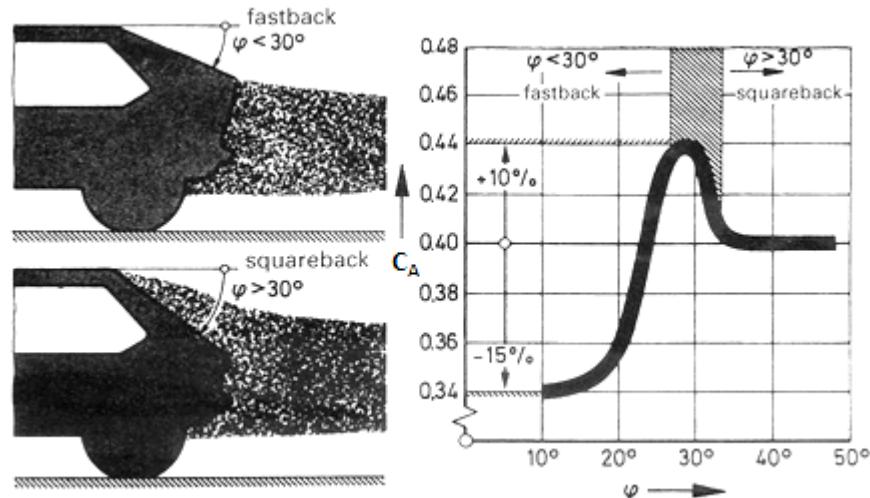


FIGURA 4.34 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO φ NO COEFICIENTE DE ARRASTO E O REGIME DE ESCOAMENTO NA TRASEIRA DO VW GOLF I, fonte: Ref[4]

Em adição ao ângulo φ , o comprimento l_0 da inclinação traseira tem um efeito no arrasto. Conforme BUCHHEIM [12], o “ótimo” ângulo de inclinação, ângulo no qual o mínimo arrasto é obtido, aumenta na proporção ao comprimento l_0 da traseira é mínimo mostrado na FIGURA 4.35. Porém, estes efeitos tornam-se menos significativos se as arestas laterais da inclinação são arredondadas, o que é frequente nos veículos atuais.

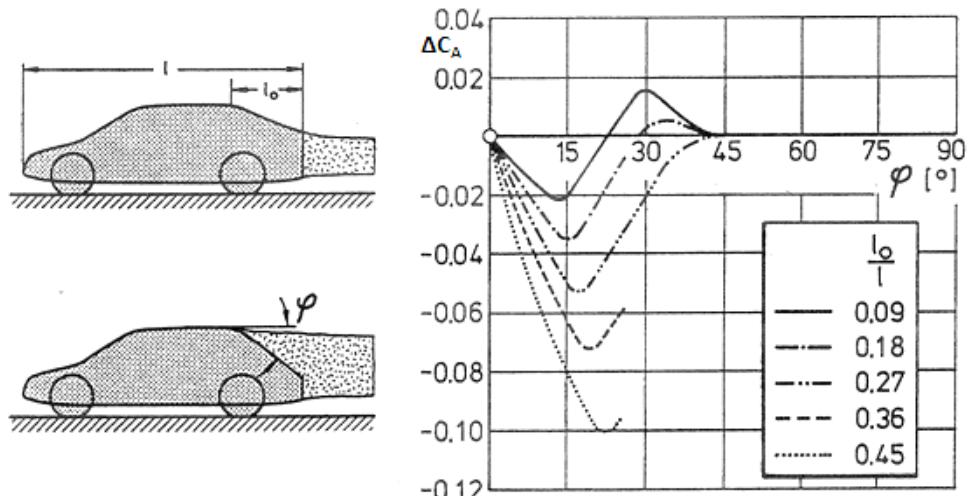


FIGURA 4.35 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO φ E O COMPRIMENTO l_0 NO ARRASTO, fonte: Ref[2]

Se a traseira do veículo termina com um contorno arredondado como mostrado na FIGURA 4.36, a altura traseira z em vez do ângulo φ é o principal fator de influência para o arrasto. O valor mínimo de arrasto ocorre para um determinado valor da altura z . Para

valores maiores ou menores o coeficiente de arrasto é maior. O valor do coeficiente de arrasto passa um valor mínimo de arrasto depende da forma de bordas laterais de inclinação.

Todos esses resultados na influência da inclinação no arrasto podem ser transpostos com dificuldade para formas traseiras arredondadas. O motivo é: com contornos arredondados, as posições das linhas de separação não são fixas como elas são com cantos vivos.

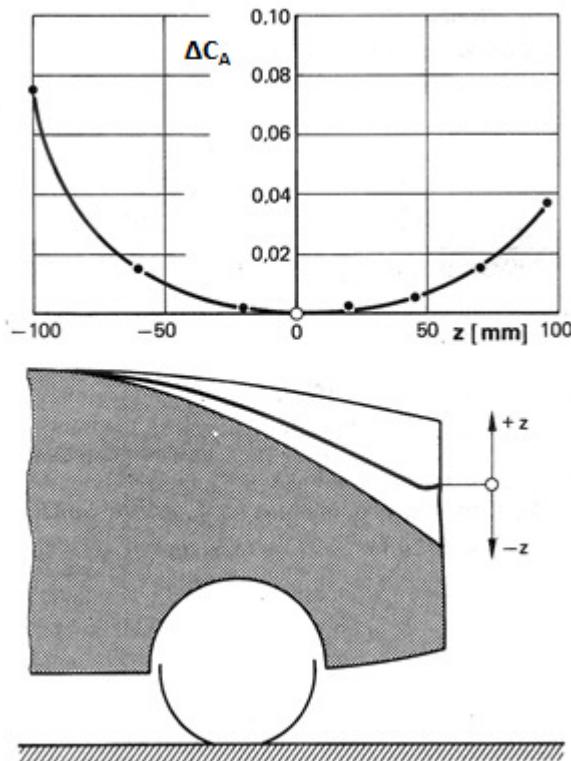


FIGURA 4.36 - EFEITO DA ALTURA Z NO COEFICIENTE DE ARRASTO, fonte: Ref[2]

4.7.3 CARROCERIA NOTCHBACK

A FIGURA 4.37 ilustra o escoamento em torno de um *notchback*. Aqui, também, é possível distinguir dois diferentes tipos de separação do escoamento: bidimensional e tridimensional.

O modelo mais simples para um *notchback* é o degrau traseiro bidimensional. O escoamento tradicional é ilustrado na FIGURA 4.38. O escoamento separa-se na aresta S e forma um vórtice no sentido horário. As linhas de separação no qual dividem a zona de recirculação do escoamento externo, se reatam no ponto R. O comprimento X_R onde o escoamento reata é três a cinco vezes a altura do degrau, o valor exato depende da

espessura da camada limite turbulenta a frente do degrau chegando a uma distribuição de pressão constante dentro da zona de recirculação atrás do corpo composto.

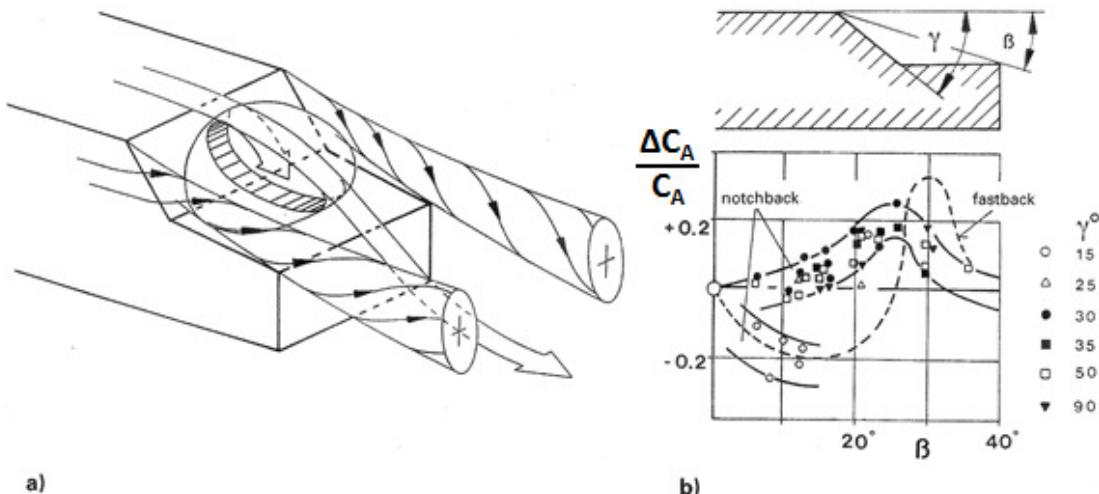


FIGURA 4.37 - ESCOAMENTO E ARRASTO DE UM NOTCHBACK: a) ESKOAMENTO PADRÃO ESQUEMÁTICO, b) COEFICIENTE DE ARRASTO C_A VERSUS ANGULO β , fonte: Ref[2]

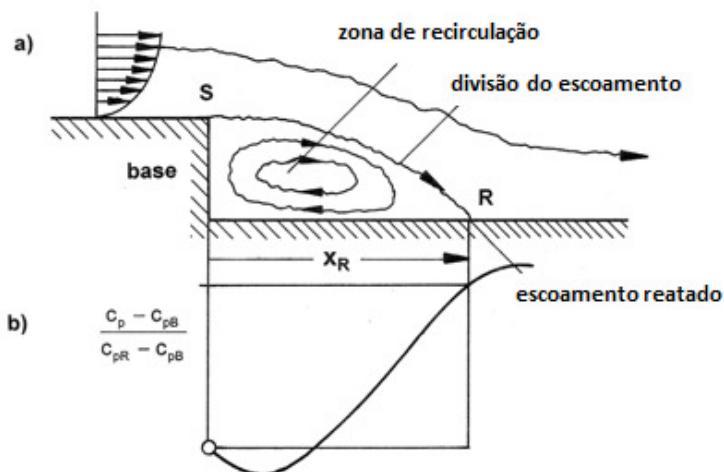


FIGURA 4.38 - ESCOAMENTO NA TRASEIRA DE UM NOTCHBACK: a) ESKOAMENTO PADRÃO ESQUEMÁTICO, b) DISTRIBUIÇÃO UNIVERSAL DE PRESSÃO, fonte: Ref[2]

Porém, o comprimento do porta-malas nos carros de passeio é somente em torno de duas vezes a altura do degrau (e o ângulo na posição S é maior que 90°). Se para configurações específicas o escoamento contudo reata na porta-malas, a razão pode ser devido aos vórtices laterais. Assim como um *fastback*, dois vórtices são gerados nas colunas “C” e induzidos a uma descida sobre a parte traseira do veículo “puxando” o escoamento sobre o teto para o porta-malas. O vidro traseiro de um *notchback*, como a

descida de um *fastback*, pode ser comparada a uma asa retangular. Com o mesmo ângulo de inclinação φ , a descida induzida na seção central longitudinal do *notchback* é consequentemente mais fraca, e o efeito dos vórtices laterais no escoamento sobre a traseira do veículo é menos caracterizada. Dependendo da geometria (altura do degrau, comprimento do porta-malas e ângulo do vidro traseiro) o escoamento pode "tocar" o porta-malas próximo ao seu término. Se isto é justificado para chamar de reatar o escoamento é uma questão aberta. Em algum caso, este escoamento padrão causa aumento de pressão dentro do *notchback*. Elevando o ângulo de saída no eixo traseiro, o arrasto é reduzido.

Os principais parâmetros descrevendo a geometria de um *notchback* já foram identificados na FIGURA 4.22; eles são: a altura z do *notchback*, seu comprimento x e o ângulo de inclinação γ do vidro traseiro. O efeito dessas três variáveis no arrasto foram estudadas no desenvolvimento do Audi 100 III por BUCHHEIM [5]; os resultados são mostrados na FIGURA 4.39. Para todos os três parâmetros, o efeito de saturação pode ser observado. As setas indicam os valores selecionados são comparados ao antecessor deste carro, o Audi 100 II. Resultados similares foram alcançados em um estudo de parâmetro feito por GILHAUS e RENN [3] (FIGURA 4.40). As situações ótimas específicas dependem fortemente da geometria individual, como pode ser concluído do desenvolvimento do Opel Calibra, um *coupe* esporte mostrado na FIGURA 4.41.

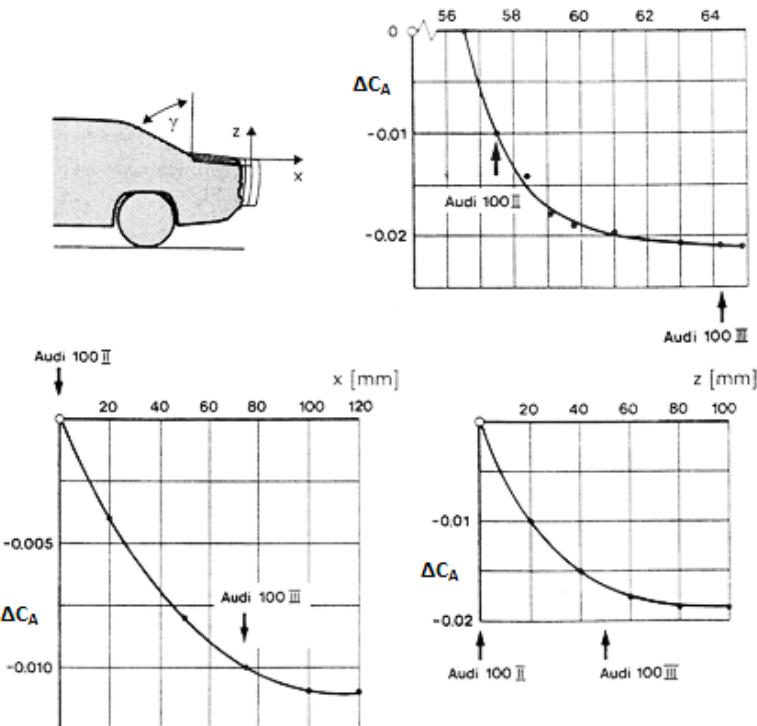


FIGURA 4.39 - AJUSTE DOS TRÊS PARÂMETROS DA TRASEIRA DO AUDI 100 III, fonte: Ref[5]

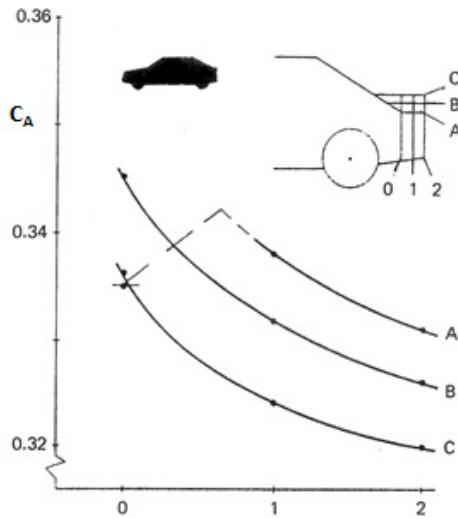
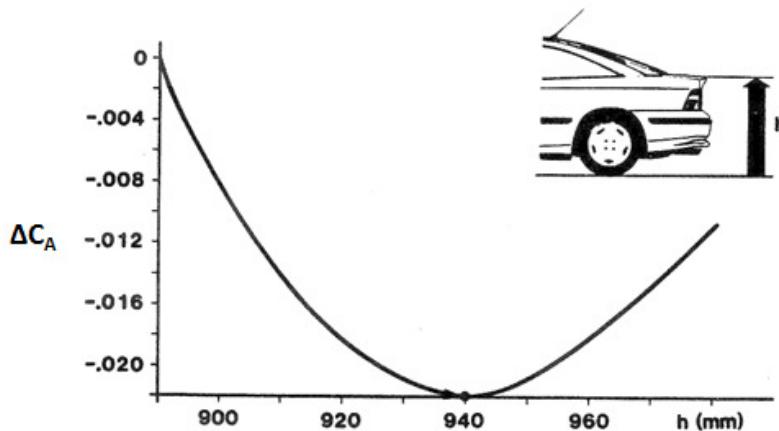


FIGURA 4.40 - ESTUDO DOS PARÂMETROS PARA UM NOTCHBACK, fonte: Ref[3]

FIGURA 4.41 - ALTURA h DA TRASEIRA OTIMIZADA PARA O OPEL CALIBRA, fonte: Ref[16]

Até agora, não foi possível especificar uma única combinação ótima para os três parâmetros sob discussão. A razão para isso é que outras variáveis geométricas também afetam as características do escoamento nesta região. Uma delas é o raio de junção entre o teto e o vidro traseiro; outra é a geometria no término do porta-malas, no qual pode ser arredondada ou com canto vivo; a terceira é o desenho das colunas C, seus ângulos, raios e bordas. Todos esses parâmetros “secundários” podem ser responsáveis numa combinação dos parâmetros da altura z e do comprimento x num único parâmetro, pela introdução do ângulo β definido na FIGURA 4.37. Em vista dos dados medidos mostrados na FIGURA 4.37, é possível dizer que o arrasto ocorre possivelmente quando o ângulo β atinge valores da ordem de 25º.

4.8 OTIMIZAÇÃO DO PAINEL LATERAL

A forma inicial para uma vista em planta de um carro é um retângulo. Porém, uma melhora considerável no escoamento em torno de um veículo é alcançada fazendo as laterais se sobressaírem e deste modo estreitar as regiões dianteiras e traseiras. O ângulo entre início da dianteira e para-lamas é deste modo mais obtuso, e a junção com a região traseira é mais suave. No Audi 100 III, o aumento da largura da lateral foi um sucesso, mostrado na FIGURA 4.42.

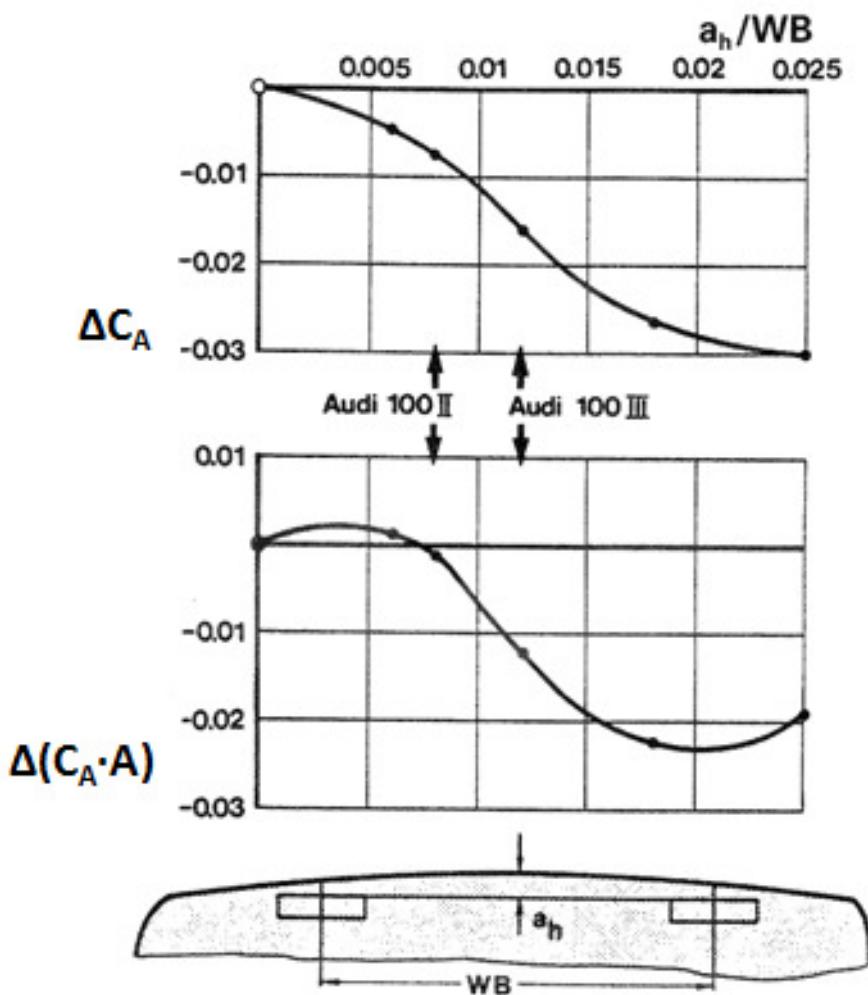


FIGURA 4.42 - EFEITO DO ARCO NO ARRASTO DE UM VEÍCULO NOTCHBACK (VISTA SUPERIOR), fonte: Ref[5]

Porém, o exemplo na FIGURA 4.43, mostra que o sucesso não ocorre sempre. Numa pesquisa da Volkswagen em 2000, o incremento das larguras seria justificado somente se eles fossem alcançados sem o aumento da área da secção transversal. Exemplo disso seria retendo as laterais e afunilando as extremidades, como mostrado na FIGURA 4.43.

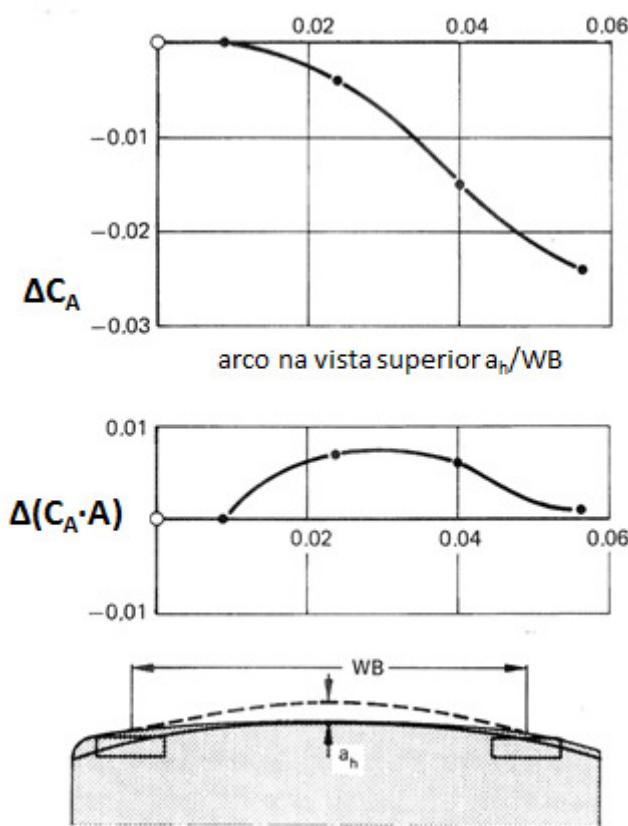


FIGURA 4.43 - EFEITO DO ARCO NO ARRASTO DE UM VEÍCULO FASTBACK (VISTA SUPERIOR) , fonte: Ref[12]

Porém, este recurso aplicado nas laterais é limitado por requisitos de design e funcionais. A distância entre eixos (WB) deve ser a maior possível. Exemplo disto seriam as rodas posicionadas o mais próximas possível das extremidades, e elas devem ser encapsuladas pela carroceria. Mas desta forma, o veículo não apresentaria formas enxutas.

O efeito favorável do arredondamento da coluna C é mostrado na FIGURA 4.20. Este efeito é baseado no fato que, assim como o *boat-tailing*, a pressão “perdida” é recuperada. Em termos de projeto, o arredondamento da coluna C é limitado pelo requisito adequação de espaço para a cabeça dos passageiros traseiros e pela necessidade de reduzir “pontos-cegos” ao mínimo para visibilidade traseira.

O escoamento do ar ao longo dos painéis laterais é perturbado em três pontos: caixas de roda, retrovisores e os recuos dos vidros laterais. Em contraste, as maçanetas das portas não afetam significativamente de forma negativa a aerodinâmica.

Na FIGURA 4.44, mostra que não é necessário haver um alinhamento perfeito dos vidros com a carroceria. A profundidade do recuo de 5 mm é permitido sem efeitos adversos no arrasto, embora requisitos severos possam ser necessários por motivos acústicos, neste caso, o ruído causado pelo escoamento do ar. O efeito do alinhamento é

maior para os vidros dianteiros, e progressivamente menos intenso conforme avança nos vidros traseiros.

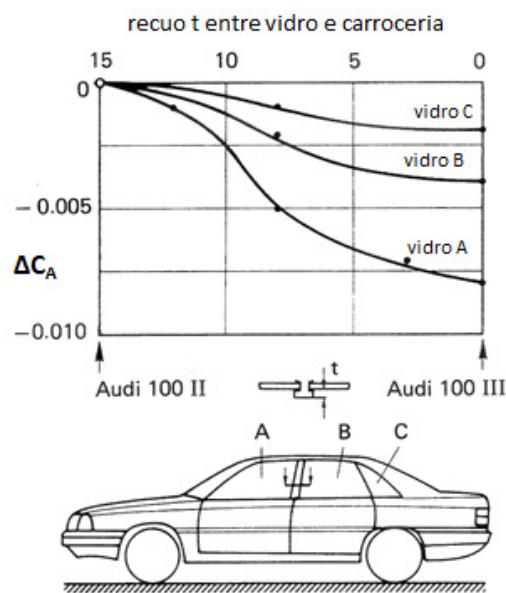


FIGURA 4.44 - EFEITO DO RECUO NOS VIDROS LATERAIS NO ARRASTO, fonte: Ref[5]

5 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

5.1 MODO DE CONDUÇÃO DO VEÍCULO NA REGULAMENTAÇÃO EPA

Nos EUA, a determinação de economia de combustível é baseada em ciclos desenvolvidos pela EPA [18], um dos quais, o urbano, foi previamente desenvolvido para certificação de emissões. Ambos, o ciclo urbano e estrada são mostrados na FIGURA 5.1. Estes ciclos representam os hábitos dos americanos. De ambos, um consumo de combustível combinado $FE_{combinado}$ (também conhecido como composto) é formado conforme a equação na FIGURA 5.1. Condução urbana pondera 55% e estrada 45%.

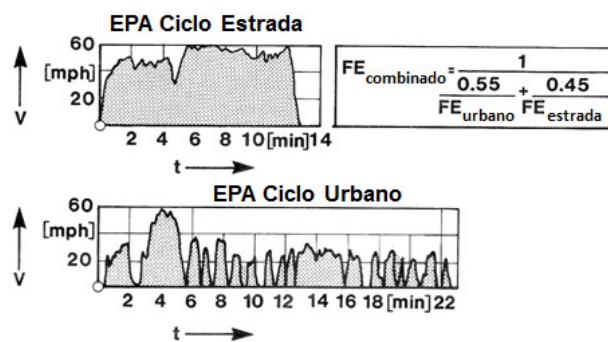


FIGURA 5.1 - MODO DE CONDUÇÃO DO VEÍCULO NA REGULAMENTAÇÃO EPA, fonte: Ref[18]

Este procedimento é do ponto de vista técnico, dificultado por um inconveniente: os veículos testados numa determinada massa, portanto para um dado veículo, a massa deste veículo testado não é a mesma massa do veículo real. Os dados de consumo oficiais são medidos com esta restrição. Como resultado, a redução de massa torna-se eficaz e o consumo somente será alcançado com as mesmas condições do teste.

Frequentemente, simulações computacionais de consumo de combustível são realizadas sem esta restrição. Quando comparados aos dados dos testes oficiais, diferenças são evidentes e são uma fonte de confusão.

5.2 MODO DE CONDUÇÃO DO VEICULO NA REGULAMENTAÇÃO EEC

Na Comunidade Européia, o modo de condução NEDC [19] é feito em duas partes:

- Ciclo urbano da Regulamentação 80/1268/EEC, repetido quatro vezes

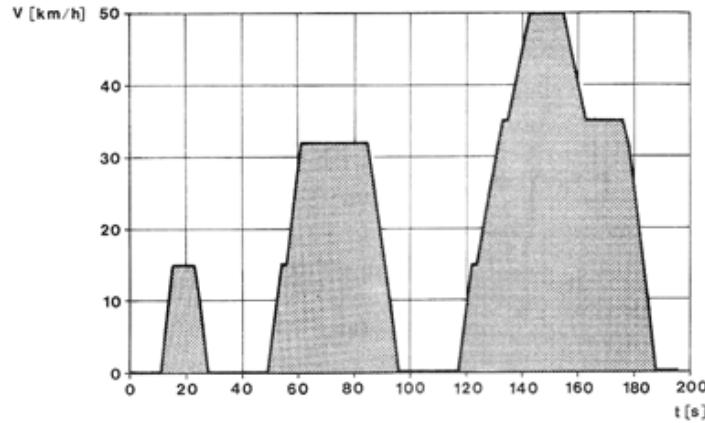


FIGURA 5.2 - CICLO URBANO EEC, fonte: Ref[19]

- Ciclo de alta velocidade.

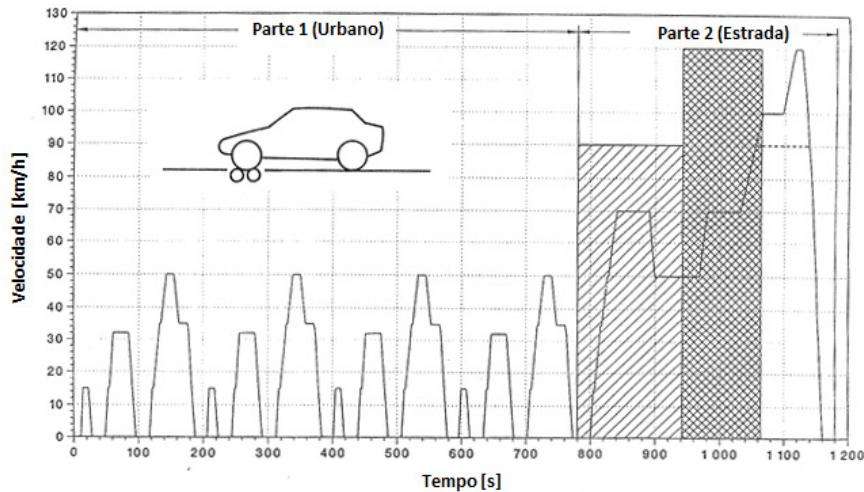


FIGURA 5.3 - CICLO DE CONDUÇÃO EUROPEU PARA CERTIFICAÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E EMISSÕES, fonte: Ref[19]

5.3 MODO DE CONDUÇÃO DO VEICULO NA REGULAMENTAÇÃO ABNT

No Brasil, o INMETRO realiza as medições de consumo de combustível. Utiliza a norma ABNT NBR 7024 [20], que define ciclos tanto urbano quanto na estrada.

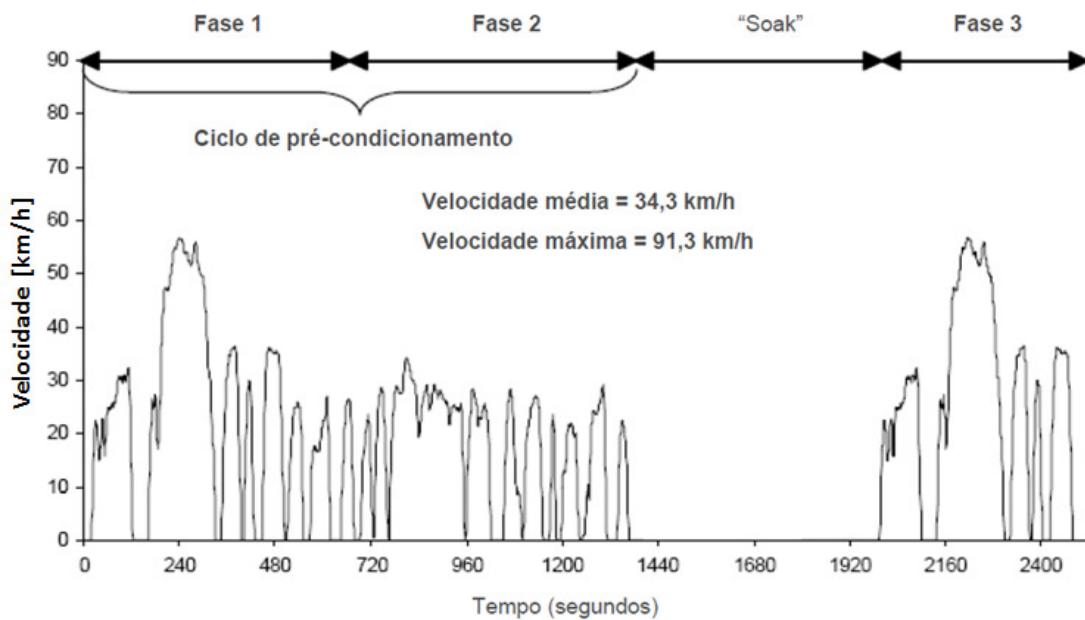


FIGURA 5.4 - CICLO DE CONDUÇÃO PARA ENSAIO DE CONSUMO NA CIDADE CONFORME NBR 7024, fonte: Ref[20]

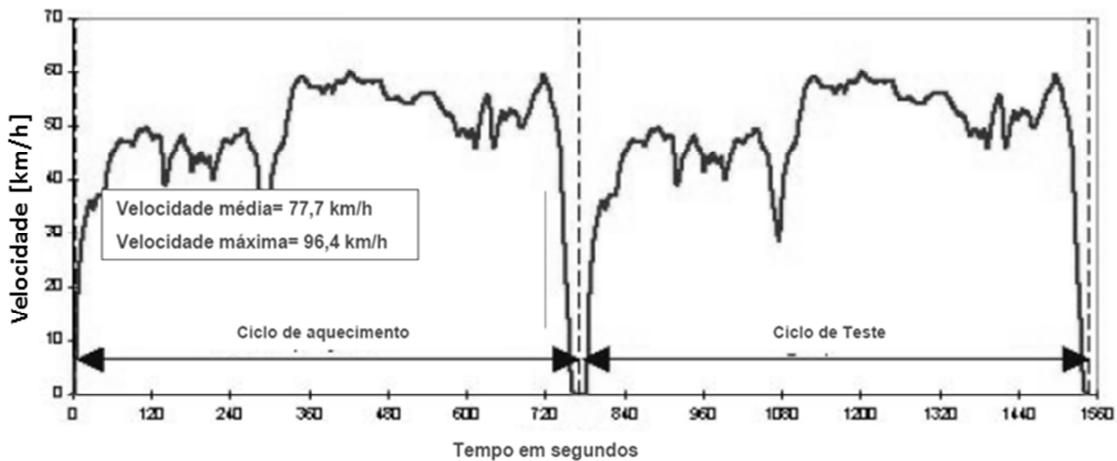


FIGURA 5.5 - CICLO DE CONDUÇÃO PARA ENSAIO DE CONSUMO NA ESTRADA CONFORME NBR 7024, fonte: Ref[20]

Os valores médios de consumo de combustível são calculados conforme item 6.7 da norma NBR 7024.

5.4 RELAÇÃO ENTRE OTIMIZAÇÃO AERODINÂMICA E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Informações mais detalhadas considerando o impacto da porcentagem das mudanças no arrasto aerodinâmico e redução de massa no consumo de combustível

foram elaboradas por SOVRAN [13,14]. A FIGURA 5.6 mostra o impacto das mudanças do arrasto aerodinâmico no consumo de combustível para o EPA Estrada (H), Urbano (U) e composto (C). O parâmetro de controle para as curvas é o coeficiente de resistência a rolagem dos pneus, r_0 . Estes gráficos são válidos para qualquer veículo conduzido dentro do procedimento de condução EPA.

Para determinação do impacto da redução de 30% de no arrasto, há alguma variáveis do veículo a serem usadas:

- Coeficiente de arrasto do veículo: $C_A = 0,40$
- Área frontal: $A = 2 \text{ m}^2$
- Massa: $M = 1333 \text{ kg}$
- Coeficiente de resistência a rolagem dos pneus: $r_0 = 0,009$
- Consumo de combustível composto: $m_C = 31 \text{ mpg}$

Com estes dados, para aplicação nos gráficos das FIGURAS 5.6 e 5.8, é necessário o resultado do produto $C_A \cdot A$ dividido pela massa total do veículo:

$$\frac{(C_A \cdot A)}{M} = \frac{0,4 \cdot 2 [\text{m}^2]}{1333 [\text{kg}]} = 6 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right] \quad (5.1)$$

A partir desse valor, projeta-se uma reta na curva $r_0 = 0,009$ (que pertence ao grupo de consumo combinado C), com isso resulta-se num valor de 0,307 do coeficiente de redução do consumo de combustível (R).

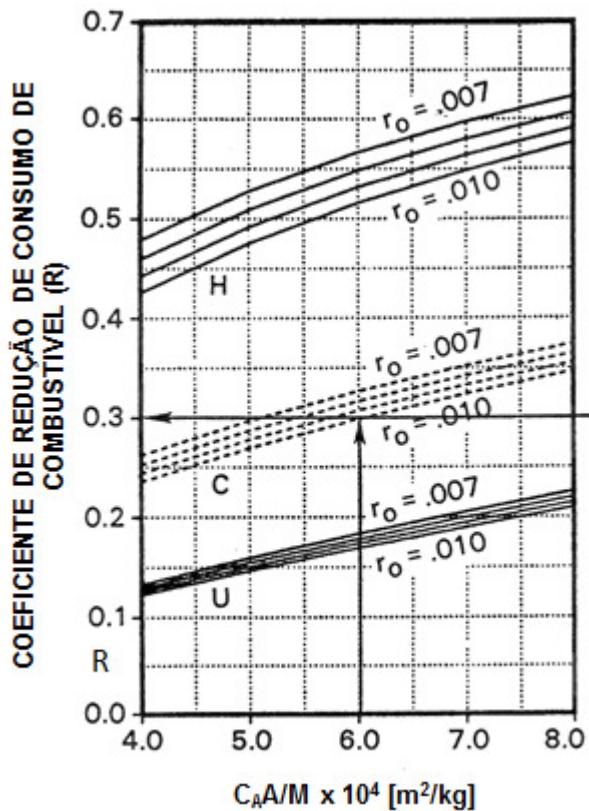


FIGURA 5.6 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE R , fonte: Ref[13, 14]

Aplica-se esse valor do coeficiente R na seguinte equação para determinar qual é a redução do consumo de combustível (R_c) na com a redução de 30% de $C_A \cdot A$:

$$R_c = R \cdot \left(\frac{\%C_A \cdot A}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{m_c} \right) \quad (5.2)$$

Substituindo as variáveis:

$$R_c = 0,307 \cdot \left(\frac{30\%}{100} \right) \cdot \left(\frac{1}{31 [mpg]} \right) = 2,97 \cdot 10^{-3} \left[\frac{gal}{milha} \right]$$

Para uma redução de 30% no arrasto, haverá uma redução do veículo dado de aproximadamente 0,003 galões por milha.

Por intermédio do gráfico da FIGURA 5.7, determina-se qual é a redução no consumo de combustível em milhas por galão a partir do coeficiente R .

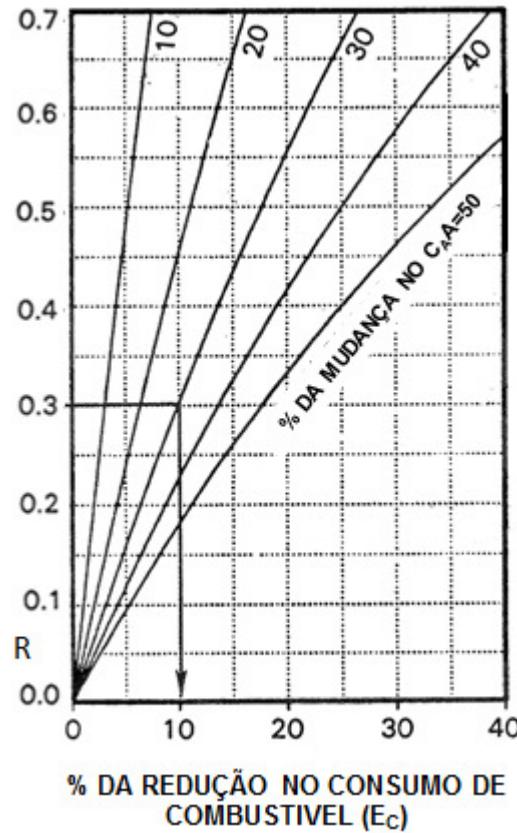


FIGURA 5.7 - DETERMINAÇÃO DA PORCENTAGEM DA REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL, fonte: Ref[13, 14]

Com o valor $R = 0,307$, projeta-se uma reta na curva de redução de 30%, com isso resulta-se num valor de 10,2% de redução no consumo de combustível (E_c).

Aplica-se este valor na equação 5.3 para determinar o consumo final (C_F) em milhas por galão:

$$C_F = \left(\frac{E_c}{100} \right) \cdot m_c \quad (5.3)$$

Substituindo as variáveis:

$$C_F = \left(\frac{10.2}{100} \right) \cdot 31[\text{mpg}] = 3,16 [\text{mpg}]$$

Com isso a partir do consumo inicial de 31 mpg, o consumo final de combustível será igual a 27,84 mpg.

Por intermédio do gráfico da FIGURA 5.8, é possível fazer uma equivalência da redução de massa que seria necessária para alcançar essa mesma redução no consumo de combustível.

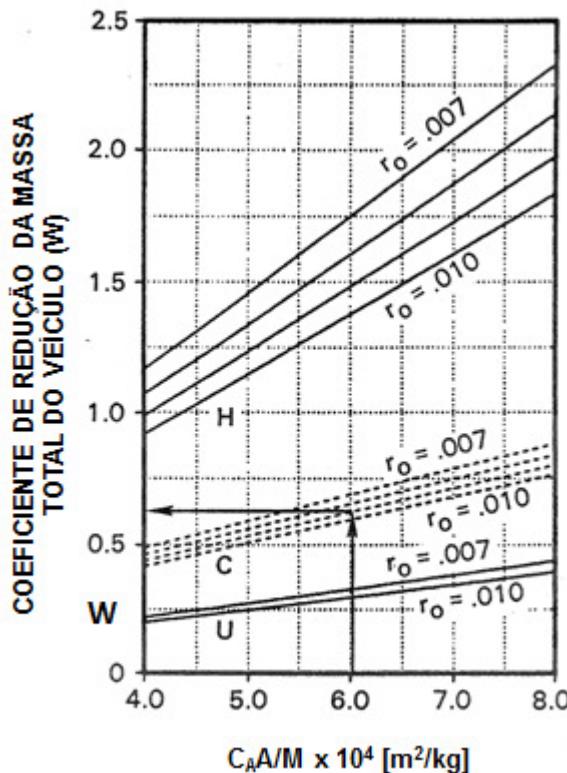


FIGURA 5.8 - DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE W PARA CÁLCULO DA REDUÇÃO DA MASSA TOTAL DO VEÍCULO, fonte: Ref[13, 14]

Com $C_A \cdot A = 6 \cdot 10^{-4}$ projeta-se uma reta na curva $r_0 = 0,009$, com isso resulta-se num valor de 0,624% no coeficiente de redução de massa (W).

Aplica-se este valor na equação 5.4 para determinar a redução de massa (W_F) em quilogramas:

$$W_F = W \cdot \left(\frac{\% C_A \cdot A}{100} \right) \cdot M \quad (5.4)$$

Substituindo as variáveis:

$$W_F = 0.624 \left(\frac{30}{100} \right) \cdot 1333 [kg] = 250 [kg]$$

Para se conseguir o mesmo consumo de combustível sem alterações na aerodinâmica, seria necessário reduzir 250 kg na massa total do veículo.

6 CONCLUSÕES

Nos dias de hoje, a preocupação com o meio ambiente, principalmente com o ar que respiramos, se tornou prioridade na sociedade. Com base nisso, órgãos do governo veem promovendo leis que fazem com que os fabricantes de veículos de passeio desenvolvam veículos menos poluentes, por consequência, mais econômicos.

É necessário levar em consideração que há outros fatores que afetam o desempenho do veículo no que se diz a respeito de emissões, como a massa do veículo e a potência do motor. A otimização aerodinâmica em termos de custos é a que requer menos investimento, pois não há necessidade de reinventar novos conceitos de geração de energia ou materiais mais leves e resistentes, que apresentam custo muito alto.

A redução no arrasto se tornou uma das prioridades no desenvolvimento de veículos, pois a consequência disso são veículos mais eficientes no consumo de combustível,

Foi mostrado o quanto evoluíram as formas desde o início. Nos anos 20, o C_A de um veículo de passeio, como o Ford T era de aproximadamente 0,8 e hoje o Mercedes-Benz Classe B foi desenvolvido com $C_A = 0,26$.

A tendência é que a cada tentativa de redução do coeficiente de arrasto o desenvolvimento fique mais complexo, pois chegará ao limite entre a menor área externa do veículo e a maior área interna dos ocupantes. Requisitos de segurança veicular também devem ser levados em consideração, já que afetam diretamente tanto as dimensões externas quanto as internas do veículo.

A Aerodinâmica Veicular é uma ferramenta de extrema importância para o desenvolvimento de veículos, pois veículos mais eficientes e menos poluentes vêm se tornando cada vez mais exigência não somente dos órgãos governamentais, mas também do consumidor. Com isso, os veículos se tornam cada vez menos poluentes devidos a serem mais econômicos no consumo de combustível.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WHITE, Frank M.. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rhode Island: McGraw-Hill, 1999. 570 p.
- [2] HUCHO, Wolf-Heinrich et al. (Ed.). **Aerodynamics of Road Vehicles**. 4. ed. Warrandale: SAE International, 1998. 918 p.
- [3] GILHAUS, A. RENN, V., **Drag and Driving-Stability-Related Aerodynamic Forces and their Interdependence-Results of Measurements on 3/8-Scale Basic Car Shapes**, Warrandale: SAE Paper No 860211, SAE International, 1986.
- [4] JASSEN, L.J.; HUCHO, Wolf-Heinrich. **Aerodynamische Entwicklung von VW Golf und Scirocco**. Stuttgart: ATZ, 1975.
- [5] BUCHHEIM, R.; LEIE, B.; LUCKOFF, H.-J.. **Der Neue Audi 100-Ein Biespiel für Konsequente Aerodynamische Personenwagen-Entwicklung**. Stuttgart: ATZ, 1983.
- [6] MAULL, D.J.. **Mechanisms of Two and Three-Dimensional Base Drag**. In: SOVRAN, G.; MOREL, T.; MASON, W.T.. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum, 1978. p.137-159.
- [7] MAIR, W.A.. **Drag-Reducing Techniques for Axi-Symmetric Bluff Bodies**. In: SOVRAN, G.; MOREL, T.; MASON, W.T.. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum, 1978. p.161-187.
- [8] MAIR, W.A.. **Reduction of Base Drag by Boat-tailed Afterbodies in Low-Speed Flow**. Aeronautical quartely. London, v. 20, 1969. p.29-36.
- [9] POTTHOFF, J.. **The Aerodynamic Layout of UNICAR Research Vehicle**. In: VEHICLE AERODYNAMICS, 1982, Wolfsburg.
- [10] MOREL, T.. **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.. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. New York: Plenum, 1978. p.191-226.
- [11] BEARMAN, P.W.. **Bluff Bodies Flows Applicable To Vehicle Aerodynamics**. In: Aerodynamics of Transportation, 1979, Niagara Falls. p.1-11.
- [12] BUCHHEIM, R.; DEUTENBACH, K.-R.; LUCKOFF, H.-J.. **Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars**, Warrendale; SAE Paper No 810185, SAE, 1981.
- [13] SOVRAN, G. BOHN, M.S.. **Formula for Tractive Energy Requirements of Vehicles During the EPA-Schedules**, Warrendale; SAE Paper No 810184, SAE, 1981.
- [14] SOVRAN, G.. **Tractive Energy Based Formula for the Impact of Aerodynamics on Fuel Economy over the EPA-Schedules**, Warrendale; SAE Paper No 830304, SAE, 1983.
- [15] LIEBOLD, H.. **Aus der Entwicklung des C111 III**, Automobil-Industrie, No 2, 1979, p 29-36.

- [16] EMMELMANN, H-J., BERNEBURG, H., SCHULZE, J. **The Aerodynamic Development of the Opel Calibra**, Warrendale; SAE Paper No 900317, SAE, 1990.
- [17] MAIOLI, M..**Function Versus Appearance, The Interaction Between Customer, Stylist and Enginner in Vehicle Design**, Int. Journal of Vehicle Design, Vol. 5, 1983, P 305-316.
- [18] QUALITY, Office Of Transportation And Air. **Fuel Economy Test Methods**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fueleconomy/regulations.htm#test>>. Acesso em: 04 maio 2012.
- [19] NEDC (New European Driving Cycle). **93/116/EEC**, 1993.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7024**, Rio de Janeiro, ABNT, 2010.
- [21] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares-PROCONVE. **Resolução Nº 315**, de 29 de outubro de 2002.
- [22] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências. **Resolução Nº 415**, de 24 de setembro de 2009.
- [23] REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. **EC Nº 715/2007**, on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, 2007.