



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**Análise Experimental Aerodinâmica de Perfil
Veicular Utilizando Corpo de Ahmed**

**Autor: Bruno Baldini Ribeiro Araujo
Orientador: Jhon Nero Vaz Goulart
Co Orientador: Saleh Barbosa Khalil**



Brasília, DF
2017



Bruno Baldini Ribeiro Araujo

Análise Experimental Aerodinâmica de Perfil Veicular Utilizando Corpo de Ahmed

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientador: Dr. Jhon Nero Vaz Goulart

Co Orientador: Dr. Saleh Barbosa Khalil

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Baldini Ribeiro Araujo, Bruno

Análise Experimental Aerodinâmica de Perfil Veicular
utilizando Corpo de Ahmed / Bruno Baldini Ribeiro
Araujo. Brasília: UnB, 2017. 103 p.: il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Jhon Nero Vaz
Goulart

1. Corpo de Ahmed. 2. Aerodinâmica Veicular. 3. Corpo
Rombudo I. Nero Vaz Goulart, Jhon. II. Análise Experimental
Aerodinâmica de Perfil Veicular Utilizando Corpo de Ahmed.

CDU Classificação



**Análise Experimental Aerodinâmica de Perfil Veicular Utilizando Corpo de
Ahmed
Bruno Baldini Ribeiro Araujo**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação __/__/2017) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Jhon Nero Vaz Goulart, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr. Luciano Gonçalves Noieto, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof^a. Dra. Suzana Moreira Ávila, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2017

Esse trabalho é dedicado à minha mãe, Emi, meu pai, José, e a todos os amigos e família que estiveram ao meu lado durante os momentos bons e ruins.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida.

Agradeço à minha mãe e ao meu pai, que me apoiaram sem medir esforços durante todos os momentos de minha vida. Agradeço aos meus amigos Lucas Matheus, Vinícius Brum, Hebert Severino, Lucas Emerick, Higor Barbosa, Brytne Holanda, Fábio Telles, Cloves Júnior e João Lopes pela paciência e apoio durante os experimentos realizados.

Agradeço ao professor Renato por disponibilizar equipamentos e tornar possível a realização deste trabalho.

E finalmente, agradeço aos professores da Faculdade do Gama, em especial a meus orientadores Jhon Nero e Saleh Khalil pelo excelente trabalho, com todo o apoio, dedicação, paciência e maestria ao ensinar.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”(**Arthur Schopenhauer**)

RESUMO

Este trabalho objetiva a análise das características de distribuição de pressão e arrasto de forma em um perfil rombudo veicular 2D. O modelo estudado é o corpo de Ahmed, desenvolvido por Syed Ahmed em 1984. O trabalho tem como base o ensaio experimental em laboratório do elemento em questão, com rebaiços de 25°, 40°, 50° e 90°, variando-se a posição de cada corpo em um túnel de vento pré-caracterizado, de forma a se obter as diferenças da distribuição de pressão para cada ponto. As alturas ensaiadas foram de 0mm, 25mm e 50mm em relação ao solo, adquirindo pressões em diversos pontos dos corpos. O experimento foi realizado com uma abordagem de captação de pressão estática (rebaixo de 25°) e pressão flutuante (rebaixo de 25°, 40°, 50° e 90°). Os resultados obtidos se mostraram diretamente proporcionais aos observados na literatura (Morel,1979), apontando uma crescente tendência ao descolamento da base no chão, devido a forças de pressão (o valor mínimo foi encontrado em 0mm e máximo em 50mm). O coeficiente de arrasto relativo ao arrasto de forma se mostrou mínimo na posição 25mm, sendo levemente maior (16%) na posição 0mm e máximo na posição 50mm.

Palavras-chave: Corpo de Ahmed, Aerodinâmica veicular, Corpo rombudo.

ABSTRACT

This work aims the characteristics analysis of pressure distribution and shape drag in a blunt 2D vehicular profile. The model studied is the Ahmed body, developed by Syed Ahmed in 1984. The work is based on the experimental laboratory test of the element in question, with recesses of 25 °, 40 °, 50 ° and 90 °, varying the position of each body in a pre-characterized wind tunnel, in order to obtain differences in the pressure distribution for each point. The heights tested were of 0mm, 25mm and 50mm in relation to the ground, acquiring pressures in several points of the bodies. The experiment was carried out with a static pressure capture approach (25 ° recess) and floating pressure (25 °, 40°, 50 ° and 90 ° recess). The results obtained were directly proportional to those observed in the literature (Morel, 1979), indicating a growing tendency to detach the base on the ground due to pressure forces (minimum value was found at 0mm and maximum at 50mm). The trawl drag coefficient was shown to be minimum in position 25mm, slightly higher (16%) in position 0mm and maximum in position 50mm.

Keywords: Ahmed body, Vehicular aerodynamics, Blunt body.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Teardrop (Norman Bel, 2010).....	16
Figura 2 - Modelo Rumppler 1920. (Braid MoodBoard, 2009).....	17
Figura 3 - Evolução da adaptação da geometria veicular. (Hucho et al 1993).....	18
Figura 4 - Diagrama de escoamento sobre corpo de Ahmed para cálculo do número de Reynolds.....	20
Figura 5 - Dimensões originais do corpo de Ahmed.....	20
Figura 6 - Gráfico $CD \times \beta$ obtido experimentalmente. (Morel,1979).	21
Figura 7 - Zonas de escoamento dependentes do ângulo ϕ . (Morel, 1979).....	22
Figura 8 - Dimensões do corpo de Ahmed utilizado por Khalil, sendo $D = 80\text{mm}$ (Khalil 2001).....	23
Figura 9 - Distribuição de pressão ao longo do corpo de Ahmed, com o Reynolds variando de $Re = 91\ 395$ até $Re = 274\ 186$ (Khalil, 2001).	24
Figura 10 - Dados da frequência de desprendimento dos vortex (imagem da direita apresenta o canto superior e imagem da esquerda apresenta canto inferior).....	25
Figura 11 - Evolução do arrasto em função do tempo observado por Bruneau (2010).....	25
Figura 12 - Modelo de analisado por Thacker.....	26
Figura 13 - Análise de coeficiente de arrasto para rebaixo com canto vivo e arredondado feito por Thacker (2012).....	26
Figura 14 - Posicionamento segundo literatura para simulações numéricas.	27
Figura 15 - Diagrama do túnel de vento utilizado.....	28
Figura 16 - Esquemático de ligação de equipamentos	29
Figura 17 - Malha de captação das velocidades.	30
Figura 18 - Curva de calibração do equipamento Dwymer DM-2000.....	31
Figura 19 - Distribuição de velocidade no bocal de saída da seção 2.	32
Figura 20 - Diagrama da vista frontal do túnel com o corpo de Ahmed posicionado.....	33
Figura 21 - Vista isométrica do CAD finalizado.....	34
Figura 22 - Posição das tomadas de pressão na vista lateral.	35
Figura 23 - Render da vista isométrica do corpo fabricado.....	36
Figura 24 - Render da vista explodida dos segmentos do corpo fabricado.	37
Figura 25 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 25°	37
Figura 26 - Cota Lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 40°	38
Figura 27 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 50°	38
Figura 28 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 90°	38
Figura 29 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 25°	39
Figura 30 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 40°	39
Figura 31 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 50°	39
Figura 32 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 90°	39
Figura 33 - Dados de coeficiente de pressão para $L = D$. $Re = 90\ 000$	41
Figura 34 - Dados de coeficiente de pressão para $L = 0,5D$. $Re = 90\ 000$	42
Figura 35 - Dados de coeficiente de pressão para $L = 0D$. $Re = 90\ 000$	42
Figura 36 - Túnel de vento e equipamento de experimento.	43
Figura 37 - Aparato de captação.....	44
Figura 38 - Distribuição de pressão em $0D$ para o rebaixo de 25°	45
Figura 39 - Distribuição de pressão em $0,5D$ para o rebaixo de 25°	46
Figura 40 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 25°	46
Figura 41 - Distribuição de pressão em $0D$ para o rebaixo de 40°	47
Figura 42 - Distribuição de pressão em $0,5D$ para o rebaixo de 40°	47

Figura 43 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 40°	48
Figura 44 - Distribuição de pressão em 0D para o rebaixo de 50°	48
Figura 45 - Distribuição de pressão em 0,5D para o rebaixo de 50°	49
Figura 46 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 50°	49
Figura 47 - Distribuição de pressão em 0D para o rebaixo de 90°	50
Figura 48 - Distribuição de pressão em 0,5D para o rebaixo de 90°	50
Figura 49 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 90°	51
Figura 50 - Flutuação de pressão em função do tempo em um ponto, para o corpo de 90° na posição 0D.	52
Figura 51 - Curva de potência do espectro FFT do ponto frontal. Corpo com rebaixo 90°, posição 0D.	53
Figura 52 - Efeito da razão entre altura e comprimento na porcentagem de arrasto de fricção (White, 1999).	54
Figura 53 - Aproximações feitas para cálculo de arrasto, com pontos de pressão utilizados. .	55
Figura 54 – Diagrama básico para equação 10.	55
Figura 55 - Valores do coeficiente de arrasto para as posições 0mm, 25mm e 50mm.	56
Figura 56 - Valores de coeficiente de arrasto para os ângulos de rebaixo 25°, 40°, 50° e 90° nas posições 0D, 0,5D e D.	57
Figura 57 - Experimento de visualização de escoamento em túnel de vento. Ahmed (1983)..	59
Figura 58 - Sistema de medição de forças aerodinâmicas em corpos 3D. Joseph (2011).....	60

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
SUMÁRIO	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 CORPO DE AHMED	16
2.1.1 HISTÓRIA	16
2.1.2 VARIAÇÕES DA GEOMETRIA	20
2.1.3 LIMITAÇÕES DA APROXIMAÇÃO	22
2.1.4 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NO CORPO DE AHMED	22
2.1.5 POSICIONAMENTO DO CORPO NO INTERIOR DO TÚNEL DE VENTO	27
3. METODOLOGIA	27
3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	27
3.2 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DO TÚNEL DE VENTO	29
3.2.1 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE.....	31
3.2.2 ESCOLHA DE SEÇÃO PARA POSICIONAMENTO	32
3.2 CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO CORPO DE AHMED.....	33
3.2.1 LIMITAÇÕES DO PROJETO	33
3.2.2.1 DESENVOLVIMENTO DO CORPO PARA EXPERIMENTO DE PRESSÃO ESTÁTICA.....	33
3.2.2.2 DESENVOLVIMENTO DO CORPO PARA EXPERIMENTO DE CAPTAÇÃO DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	35
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	40
4.1 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO	40
4.1.1 OBTENÇÃO DE PRESSÃO ESTÁTICA	40
4.1.2 OBTENÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO	43
4.2 DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO.....	52
5 ANÁLISE DE DADOS	53
5.1 CÁLCULO DE ARRASTO DE FORMA POR INTEGRAÇÃO DE PRESSÃO	53
6. CONCLUSÕES FINAIS	58
7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	59
8. ANEXOS	61
9.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

O interesse do ser humano pela movimentação de fluidos é datado desde os primórdios, quando se tem relatos da observação do movimento das águas e da dinâmica do vento, relacionada aos diferentes habitats do homem pré-histórico.

Juntamente com a evolução da sociedade, o campo de pesquisa relacionado à dinâmica dos fluidos se tornou científico pela primeira vez com a abordagem de Arquimedes e Héron (Drachmann, 1968), que por sua vez postularam sobre as leis do paralelogramo para vetores, propondo assim as leis sobre o empuxo. Em paralelo aos desenvolvimentos matemáticos do século III a.C., é possível se observar uma abordagem voltada à engenharia, com o projeto e construção dos aquedutos romanos no século IV a.C.

A partir do século XVI d.C, houve uma grande evolução relacionada ao estudo dos fluidos devido a grandes nomes da ciência. É importante a citação de alguns marcos a partir de 1500, quando Leonardo da Vinci propôs a dedução da equação de conservação de massa, seguido de Edme Mariote que construiu o primeiro túnel de vento rústico para aplicações práticas. É necessário também destacar o grande avanço ocorrido entre no século XVII, devido principalmente a Isaac Newton, com as leis de movimento e a lei dos fluidos lineares (Drachmann, 1968).

A abordagem mais próxima do que é conhecido hoje, inicia-se em 1800 quando Osborne Reynolds, através da experimentação do escoamento em tubos, introduziu o valor adimensional de Reynolds. De forma quase paralela, Navier e Stokes, realizaram análises que mostraram a possibilidade da adição de termos viscosos às equações de movimento propostas por Newton no século XVII.

O enorme número de proposições e descobertas na área da dinâmica dos fluidos a partir de 1500, permitiu avanços na área de aerodinâmica, possibilitando que em 1906 Santos Dumond realizasse o seu primeiro voo com a aeronave 14 Bis, na França. A partir do desenvolvimento de tal tecnologia, diversas áreas iniciaram pesquisas e observações da relação entre o escoamento sobre corpos e o desempenho de seus produtos. Entre as maiores indústrias que iniciaram tais pesquisas estava a automotiva.

Para melhor ilustrar o enorme desenvolvimento da área no setor automotivo, é interessante observar o artigo de Ludvigsen (1970), no qual o autor apresenta desenvolvimento do estudo aerodinâmico veicular no período de 1920 até 1970, separado em quatro frentes: Alemanha, Grã-Bretanha Itália e Estados Unidos.

Os 4 países possuíam a tecnologia de túnel de vento, e por conta da primeira guerra mundial se viram obrigados a investir em pesquisas sobre o escoamento do ar em carros e aviões. Este fato alavancou as pesquisas sobre a área na época, levando à criação de modelos veiculares conceito, com a utilização de novas técnicas de fabricação e projetos, idealizadas durante o período.

Durante estudos, as observações feitas em um corpo de prova eram de fato sobre a distribuição de pressão sobre o mesmo. Analisava-se também a sustentação criada a partir da diferença de pressão definida pelo escoamento e a resistência aerodinâmica, ou arrasto, criada pelo corpo em questão.

O arrasto se relaciona de forma direta ao consumo de combustível de um veículo segundo Hucho Et. Al. (1993), independentemente de sua natureza. É possível se quantificar o mesmo presente em um automóvel através da observação da quantificação do arrasto em seu corpo rombudo. Considerando esta possibilidade, o quão crítico é a influência do rebaixo traseiro, presente na geometria de um veículo, no arrasto gerado?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho em questão é a análise inicialmente histórica dos estudos sobre corpos rombudos utilizando o corpo de Ahmed. Esse trabalho também objetiva a análise experimental da distribuição de pressão em quatro corpos de Ahmed 2D para diferentes alturas deste em relação ao solo e para 4 diferentes angulações de rebaixo traseiro (25°, 40°, 50° e 90°). Assim como o conhecimento da distribuição de pressão, o coeficiente de arrasto do corpo para diferentes posições em relação ao solo também foi analisado. Os resultados serão comparados com a literatura e avaliados em aplicações práticas.

É também definido como meta neste trabalho a elaboração de material que possibilite o estudo de alunos futuros da Universidade de Brasília na área da aerodinâmica veicular. Por este motivo define-se como ponto crítico a criação de materiais de ensaio com boa qualidade e acabamento, além programas de softwares padrões que possibilitem análises rápidas de casos próximos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CORPO DE AHMED

2.1.1 HISTÓRIA

A quantificação da força de arrasto em determinado corpo, é adimensionalizado e mostrado através da equação 1, na qual D é a força de arrasto total que age no corpo, ρ a densidade do ar no local dos ensaios, U a velocidade média do escoamento no túnel utilizado e A referente a área total de ação das forças de arrasto no corpo, que é igual à multiplicação do comprimento do corpo, pela largura nas áreas afetadas (White, 1999).

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad \text{Eq. 1}$$

O pioneiro na observação e proposição de solução para a diminuição do arrasto em carros foi Edmund Rumpler, em 1921, que analisando carros convencionais da época, chegando à conclusão de que a média de arrasto obtida em modelos regulares era de 0.54.

Com o objetivo de reduzir o arrasto, realizou testes em um túnel de vento francês, utilizando geometrias inspiradas em perfis dinâmicos de aeronaves e navios, ao invés de geometrias quadradas, com pontos abertos e possuindo cantos “vivos”. A conclusão do estudo se deu através da concepção do modelo “*Tear Drop*”, figura 1, como é visto em Ludvigsen (1970). Nesse modelo conceito, toda a geometria de um veículo tradicional da época, figura 2, era aproximada a um perfil, mantendo-se todas as características internas, de motor e suspensão. O resultado foi um veículo com $C_D = 0.30$, muito mais eficiente quando comparado aos regulares da época.

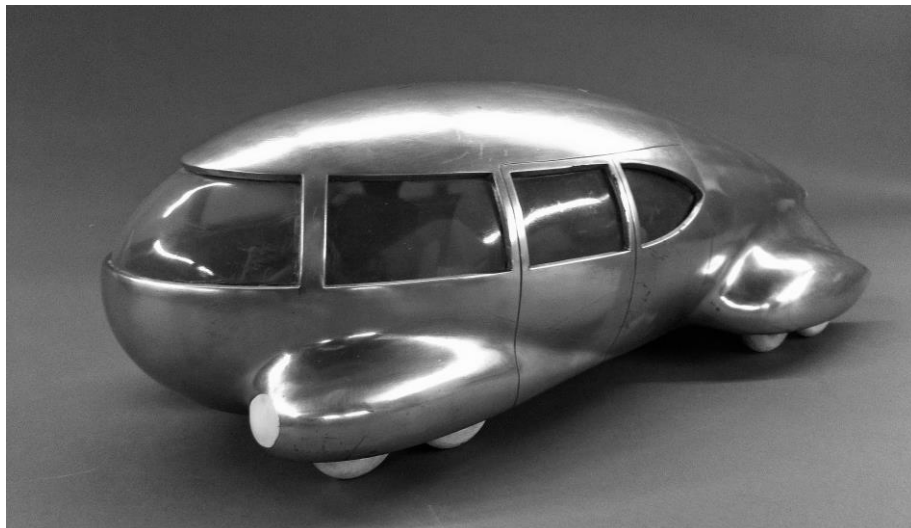


Figura 1 - Modelo Teardrop (Norman Bel, 2010)

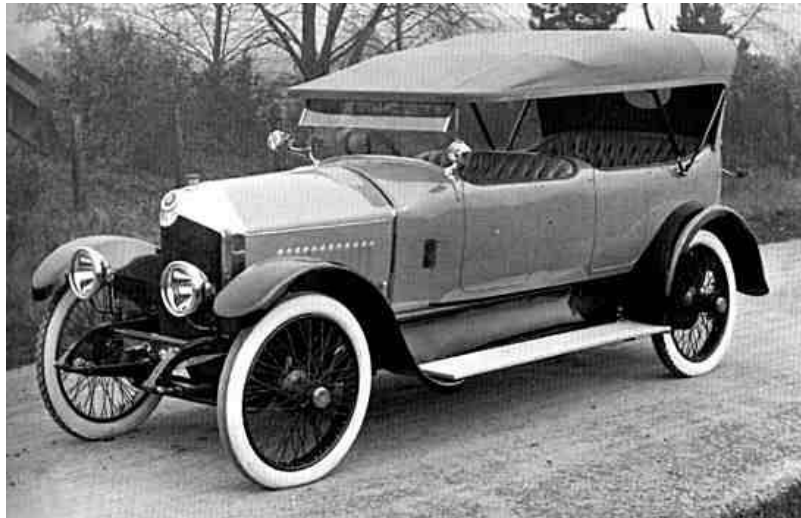


Figura 2 - Modelo Rumpler 1920. (Braid MoodBoard, 2009)

As conclusões de Rumpler ecoaram pelos polos de pesquisa aerodinâmica da época e inspiraram diversos protótipos. Todos partiam das mesmas conclusões e princípios, levando grandes marcas como Mercedes-Benz e Porsche a desenvolverem seus carros conceito em 1932, chegando a alcançarem o C_D de 0.22.

Algumas novas observações para a época foram possíveis através da caracterização de tipos de arrasto com o auxílio de corpos de prova em túneis de vento. Com a diferenciação dos tipos de arrasto, foi possível se observar os mais críticos para a atividade de veículos. As forças de resistência ao movimento mais relevantes para os tipos de estudo na época feitos, são: o arrasto de fricção, e o arrasto de forma.

O arrasto de fricção se dá pelo atrito direto entre o fluido em si durante o escoamento, e a superfície do corpo. Este tipo de arrasto pode ser calculado de acordo com a equação 2, onde τ_w é a tensão de cisalhamento local, ρ a densidade do fluido e U a velocidade média do escoamento. (Anderson, 1985)

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad \text{Eq. 2}$$

O arrasto de forma tem relação direta com o formato do corpo em contato com o escoamento. O valor do arrasto de forma é diretamente proporcional à área de seção transversal do corpo. (Anderson, 1985)

Um estudo feito por Hucho et. al. (1993) descreve segundo um ponto de vista mais moderno (ano de 1993), a evolução aerodinâmica de veículos no período de 1970 e 1993. O estudo afirma que apesar de todo o avanço relacionado à diminuição de arrasto de forma nos carros até 1970, não houve grandes avanços imediatos. Isso se deve, pois, veículos de passeio possuíam baixa potência nos motores, e as estradas estavam em más condições.

A partir de década de 1970, motores mais potentes se tornaram acessíveis, competições de corrida forçaram o desenvolvimento tecnológico, e o consumo de combustível se tornou um problema. Assim, introduziu-se alguns novos pontos de estudo, como o padrão de escoamento para modelos aproximados de perfis veiculares, a redução da parte traseira de veículos (modelos *hatch-backs*), a introdução de otimização de forma, além da aplicação de sistemas adicionais. Tal evolução é ilustrada por Hucho et. al. (1993), figura 3.

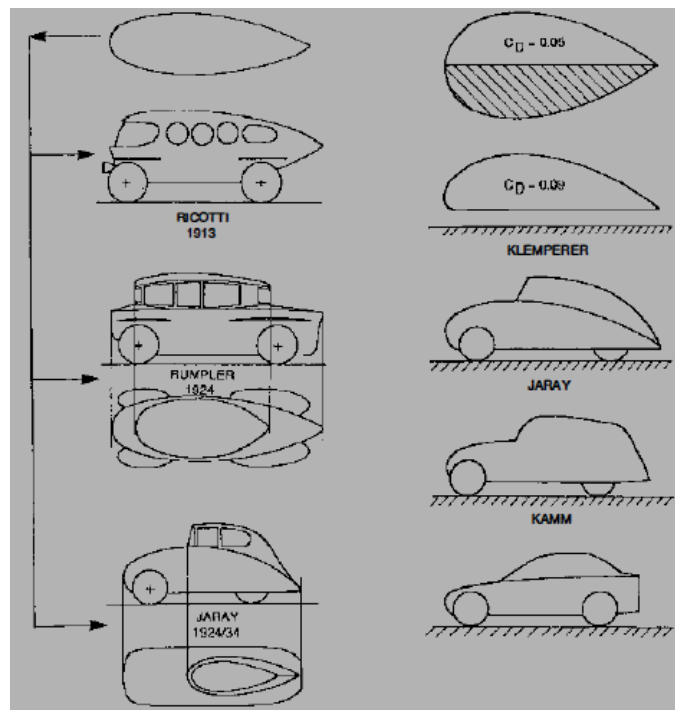


Figura 3 - Evolução da adaptação da geometria veicular. (Hucho et al 1993)

A partir do início da década de 1980, as características de veículos de competição e passeio foram perceptivelmente alteradas, dada a tecnologia mais avançada dentro do maquinário fabril de montadoras. Com tal maior tecnologia foi possível alcançar em carros comerciais, alguns anos mais tarde, valores de coeficiente de arrasto próximos a 0.15.

Anteriormente, tal grandeza foi apenas replicada em laboratório, utilizando corpos de prova dentro de túneis de vento.

Seguindo a linha do tempo, após meados de 1980 algumas características começaram a ser analisadas. A relação da velocidade relativa do solo com o carro quando o mesmo estava em atividade, e a necessidade da adição de componentes complementares. Assim, objetivou melhorar estabilidade de carros de alto desempenho. Como observado por Fukuda Et. Al. (1995), tais adições tiveram como percussores marcas proprietárias de equipes de competição. Estas equipes desenvolviam a tecnologia em pistas profissionais antes de serem aplicadas em seus automóveis comerciais.

É possível observar todos os avanços e componentes propostos idealizados durante o estudo e pesquisa na área aerodinâmica, em carros de altíssimo desempenho, criados na segunda década dos anos 2000. Tais carros necessitam, obrigatoriamente, de diversos dispositivos para garantir a segurança e máxima performance. Como observado por Bearman (1985), veículos que operam em altas velocidades, acabam por criar componentes de sustentação com valores relevantes, levando a desestabilização dos mesmos em curvas.

Sayed R. Ahmed (1981) iniciou suas atividades de pesquisa no campo da aerodinâmica, voltada para o estudo de corpos rombudos veiculares em túnel de vento, utilizando $Re = 4,6 \times 10^6$ com velocidade média de 60 m/s, realizando as medidas através de um tubo de *pitot* direcional.

O cálculo do número de Reynolds foi realizado baseado na equação 3, onde ρ é a densidade do fluido, U a velocidade média do escoamento, C o comprimento do corpo de Ahmed, e μ a viscosidade dinâmica do fluido. O diagrama de escoamento sobre o corpo de Ahmed pode ser visto na figura 4.

$$Re = \frac{\rho UC}{\mu} \quad \text{Eq. 3}$$

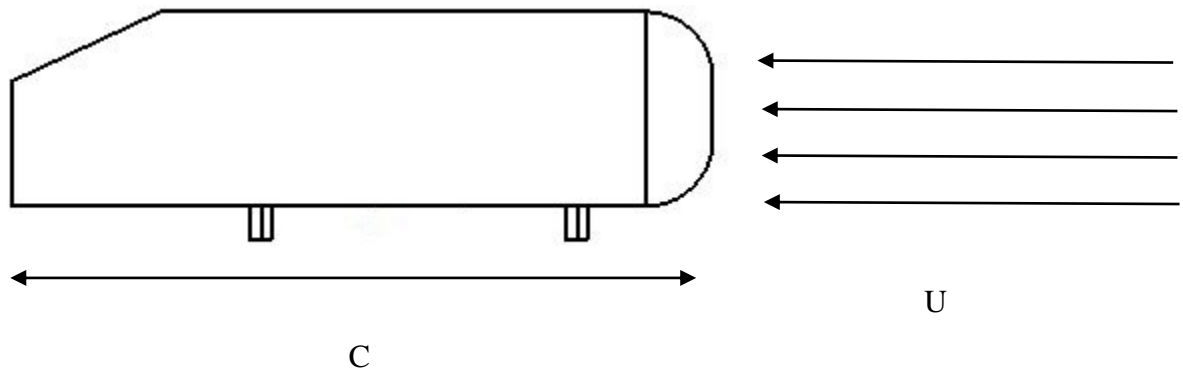


Figura 4 - Diagrama de escoamento sobre corpo de Ahmed para cálculo do número de Reynolds.

O autor verificou a necessidade de se criar um corpo de geometria descomplicada e variável, que se aproximasse às características de um veículo tradicional.

O corpo inicialmente desenvolvido foi chamado de corpo de Ahmed e possuía o comprimento de 1044mm, largura de 389mm e a altura de 288mm, com quatro apoios de 50mm, além de um rebaixo na parte traseira que poderia ser variável através de um ângulo ω . Após o lançamento de seu artigo, a aproximação se tornou referência para a validação de simulações de turbulência utilizando o CFD.

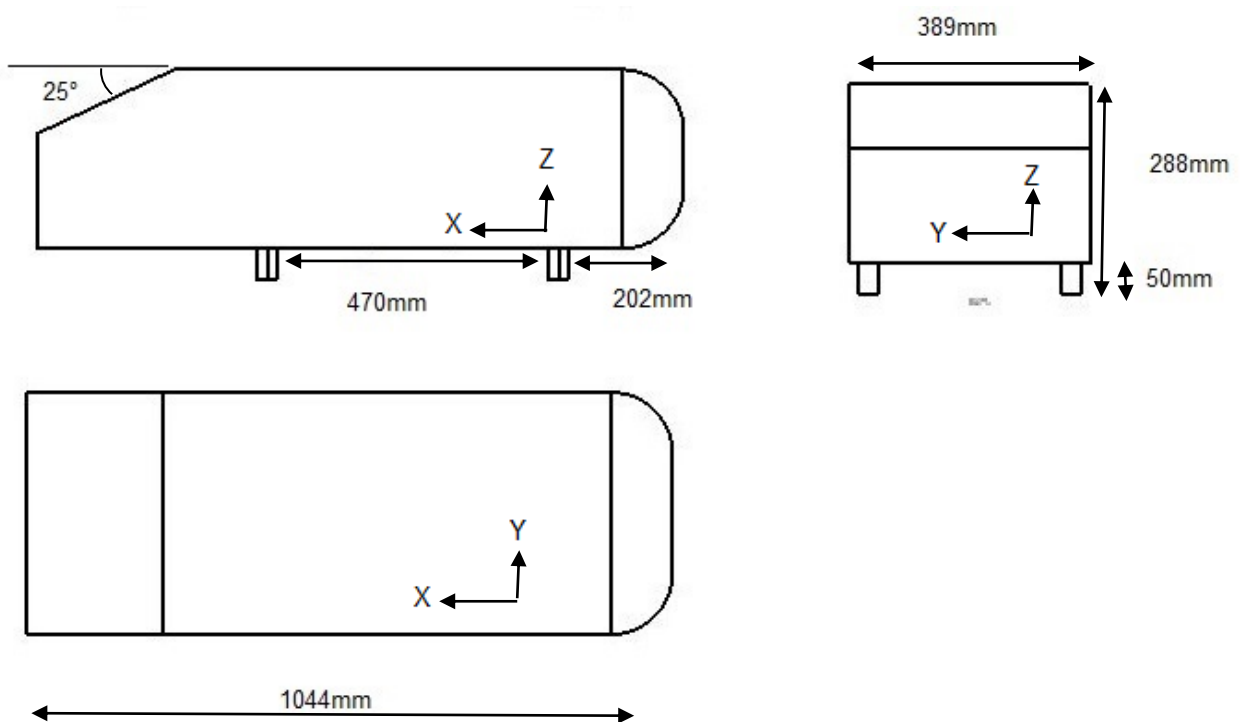


Figura 5 - Dimensões originais do corpo de Ahmed.

2.1.2 VARIAÇÕES DA GEOMETRIA

A necessidade de se adaptar o corpo de Ahmed para a utilização do mesmo em ensaios experimentais em túneis de vento menores é real, por este motivo, o redimensionamento do corpo é necessário. Para tal adaptação é necessário se observar o

estudo inicial de criação do corpo, feito por Ahmed (1981), no qual se justifica as dimensões devido a aproximação de modelos reais. Por esta razão, se houver a necessidade de se reduzir o tamanho do corpo, este deve ser feito conservando-se todas as proporções entre dimensões, mantendo-se atento à variação do número de Reynolds.

Uma das principais características da geometria do objeto é o ângulo de rebaixo traseiro ϕ , que pode ser variado de modo a atingir diferentes resultados. Como visto no estudo de Morel (1979), é possível aproximar o corpo rombudo à geometria de diferentes veículos reais através da variação do ângulo ϕ , possibilitando a análise do efeito do escoamento em diferentes geometrias.

Através do estudo de Morel (1979), no qual um ensaio em túnel de vento utilizando-se um corpo rombudo com características semelhantes ao de Ahmed, variando ϕ de 20° até 90° , foi possível perceber claramente o comportamento do escoamento se dividindo em dois regimes diferentes, possuindo como ponto crítico de transição o ângulo de 42° .

Uma relação de ângulo ϕ e arrasto (C_D) permitiu-se concluir que o menor arrasto se dá nos ângulos de 20° e 90° , e o maior arrasto no ângulo de 42° , como visto na figura 6. Para tais ensaios Morel (1979) utilizou $Re = 94\ 000$, pois segundo seus ensaios, os ângulos crítico e subcrítico se mantêm constantes no intervalo de $Re=22000$ até $Re=112000$.

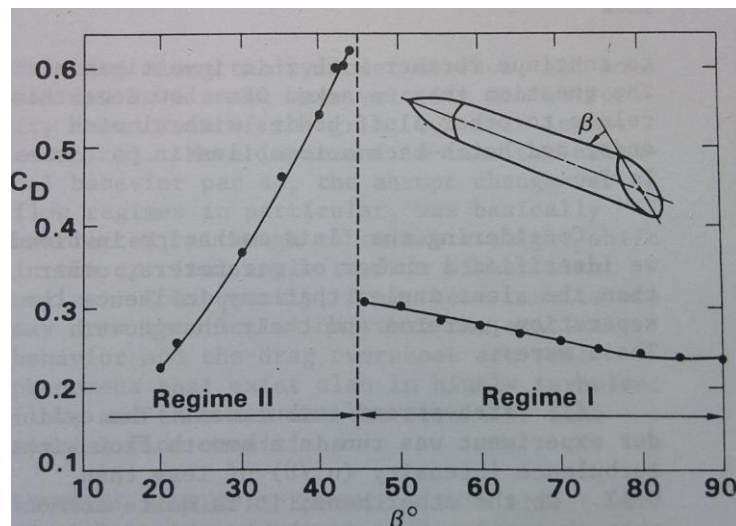


Figura 6 - Gráfico C_D x β obtido experimentalmente. (Morel,1979).

Os dois regimes de escoamento traseiro observados por Morel (1979) possuem características distintas, sendo o regime I caracterizado por um escoamento quasi axisimétrico (o escoamento externo passa por cima da zona de recirculação adjacente à base). O regime II apresentou característica de separação 3-D, formando dois fortes vórtices criados nas extremidades laterais do rebaixo. O fato pode ser observado na figura 7.

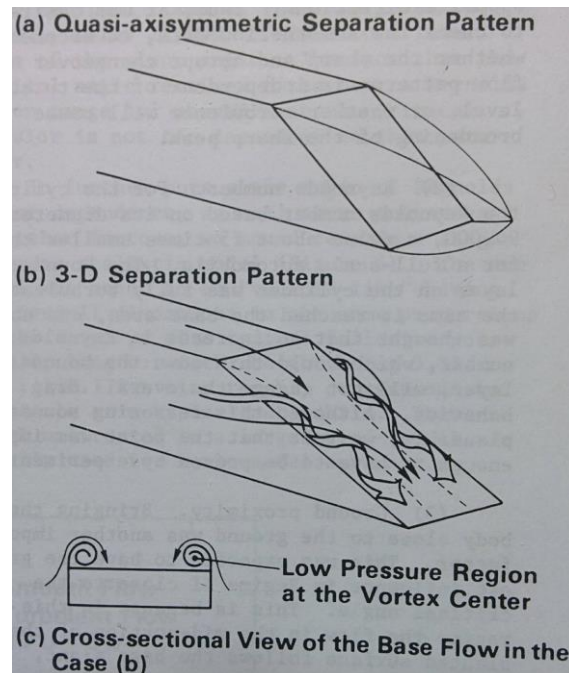


Figura 7 - Zonas de escoamento dependentes do ângulo ϕ . (Morel, 1979).

2.1.3 LIMITAÇÕES DA APROXIMAÇÃO

Apesar da boa aproximação criada por Ahmed (1981), o corpo rombudo de geometria variável não permite a observação do escoamento em alguns pontos característicos e obrigatórios de veículos, como os retrovisores, rodas, detalhes mais pontuais da carroceria e principalmente o efeito interativo do solo com o intradosso do corpo rombudo, como comentado no estudo de Eckert et. al. (1988).

2.1.4 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NO CORPO DE AHMED

A relação entre corpo rombudo e fluido pode ser analisada através da decomposição de forças atuantes no mesmo. Estas forças são divididas em arrasto e sustentação. Tem-se uma parcela da força de arrasto causada pelo arrasto de forma e arrasto de fricção, como discutido na introdução. A força de sustentação é causada pela diferença de pressão entre o intradosso e extradosso do corpo rombudo (Korkischko et. al., 2006).

No trabalho de Khalil (2001), o autor analisa a distribuição de pressão no corpo de Ahmed para 3 diferentes números de Reynolds, entre 7×10^4 a 21×10^4 . As pressões adimensionalizadas são mostradas através do coeficiente de pressão, C_p , equação 4. Onde, P é a pressão no ponto em questão e P_∞ a pressão atmosférica local. O termo ρ é igual a viscosidade do fluido e U a velocidade no ponto.

$$C_p = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad \text{Eq. 4}$$

No trabalho de Khalil (2001), figura 8, é possível observar que a distribuição de pressão em torno do corpo é pouco influenciada pelo número de Reynolds e os maiores gradientes encontram-se logo no início do corpo. A Figura 9 mostra a distribuição de pressão em torno do corpo.

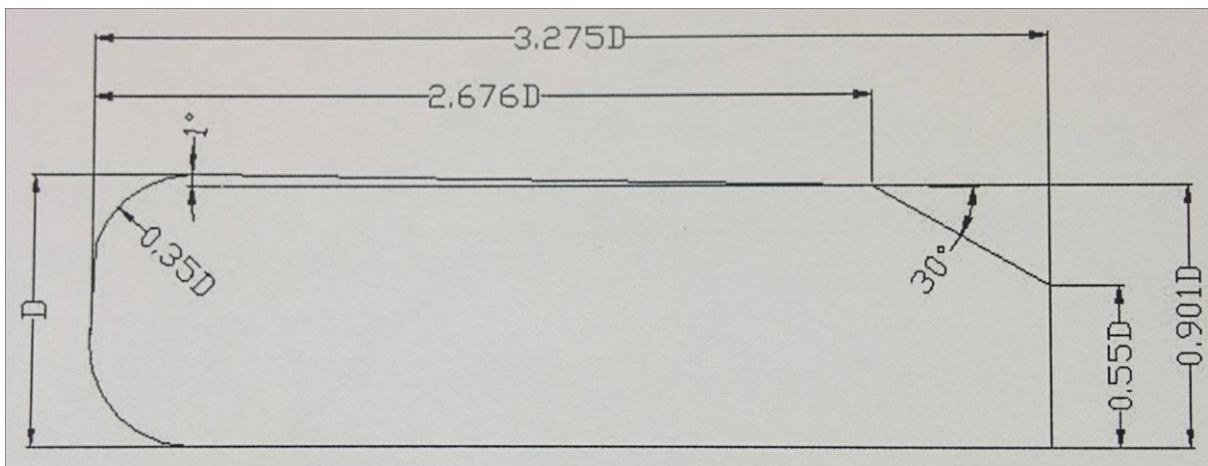


Figura 8 - Dimensões do corpo de Ahmed utilizado por Khalil, sendo $D = 80\text{mm}$ (Khalil 2001).

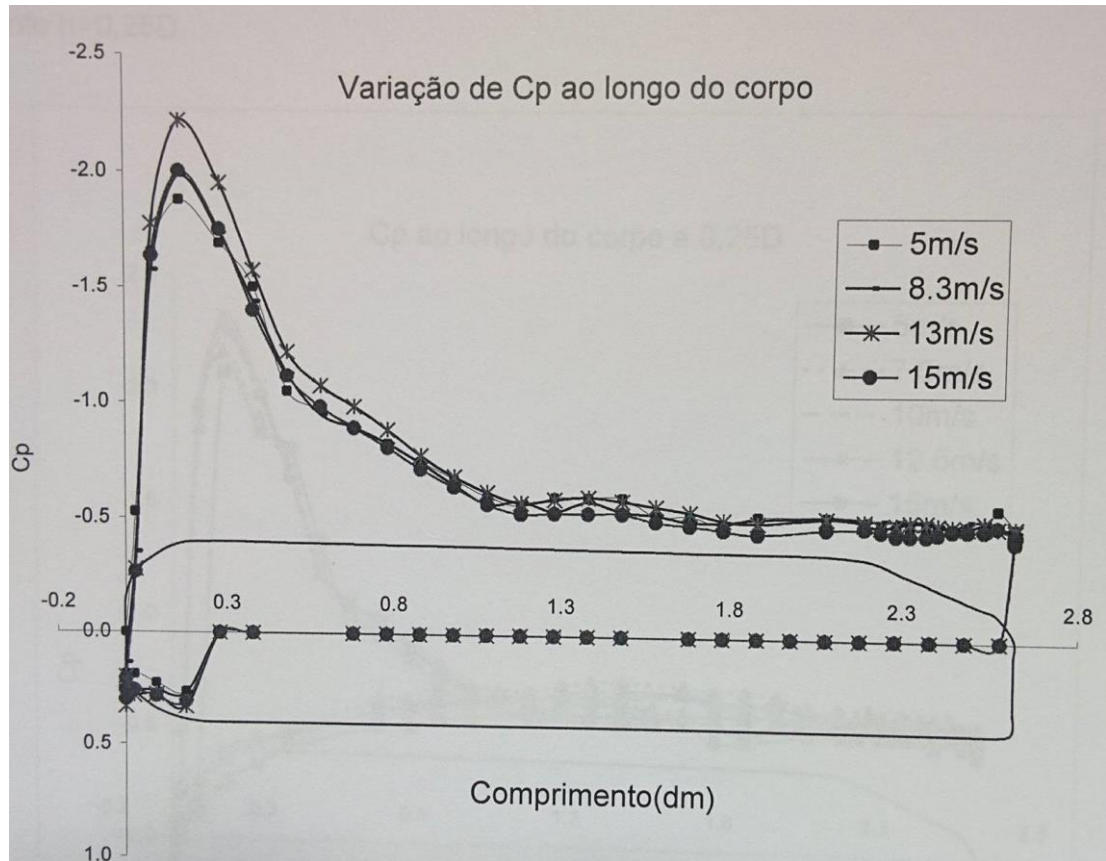


Figura 9 - Distribuição de pressão ao longo do corpo de Ahmed, com o Reynolds variando de $Re = 91\,395$ até $Re = 274\,186$ (Khalil, 2001).

Outros mecanismos de cálculo do arrasto são observados nas pesquisas envolvendo o corpo de Ahmed. Dois métodos propostos devem ser destacados pela diferença na abordagem do problema experimental e na forma de trabalho de dados.

Os métodos observados são dois. O de cálculo de arrasto a partir do número de Strouhal do rebaixo traseiro realizado por Bruneau (2010). O de obtenção da distribuição de pressão através dos valores RMS da flutuação de pressão, Thacker (2012), obtidos com auxílio de aparelho transdutor.

Em seu trabalho, Bruneau (2010), observa a correlação da frequência de despreendimento dos vórtices criados no rebaixo do corpo, como visto na figura 10, e o arrasto gerado pelo corpo de Ahmed original, figura 11. Para analisar tal relação de proporcionalidade, o autor utiliza de transformadas FFT, e as compara com as evoluções do arrasto total do corpo.

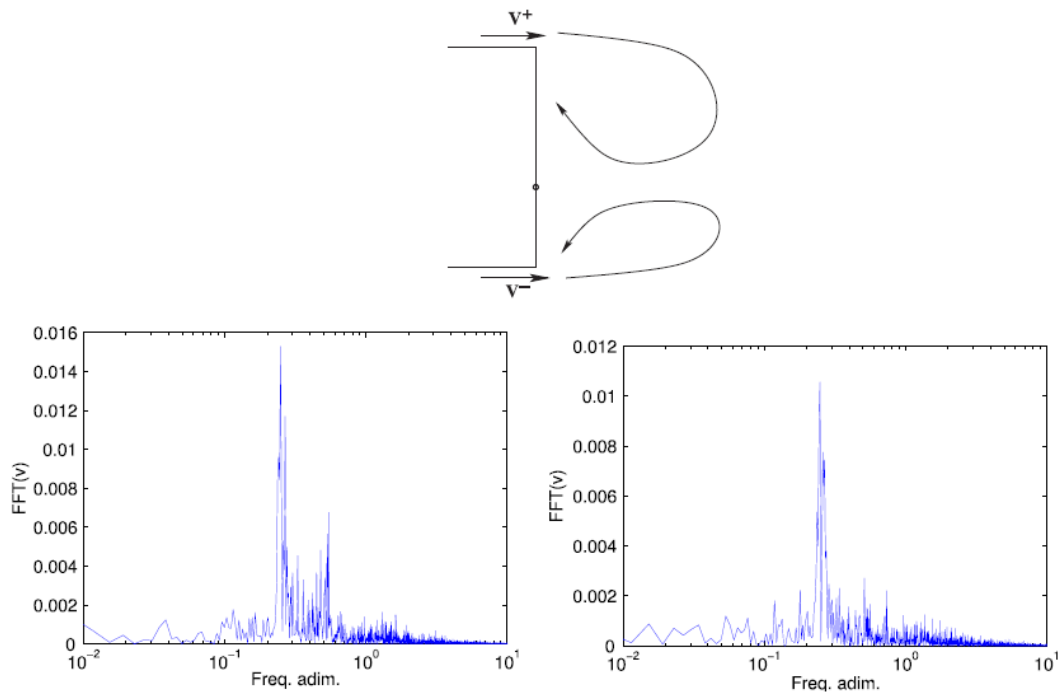


Figura 10 - Dados da frequência de desprendimento dos vortex (imagem da direita apresenta o canto superior e imagem da esquerda apresenta canto inferior).

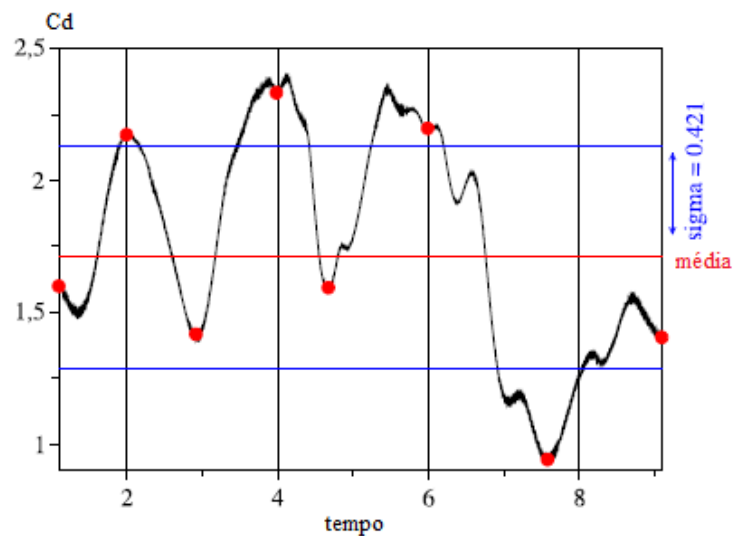


Figura 11 - Evolução do arrasto em função do tempo observado por Bruneau (2010).

Após estabelecer a relação de proporcionalidade através das observações feitas nas figuras 10 e 11, o autor inicia o estudo de controle de arrasto através de soluções ativas. Sabendo a proporcionalidade do número de Strouhal e o arrasto, as análises de efetividade das soluções são feitas através da análise das diferentes frequências de desprendimentos obtidas em relação ao tempo.

Outra abordagem destacada foi utilizada por Thacker Et. Al. (2012), na qual o autor utiliza transdutores de pressão para medir a flutuação de pressão ao redor do corpo de Ahmed. O método experimental utilizado foi o de obter a flutuação de pressão em diferentes pontos do corpo, partindo em seguida do valor RMS para cada ponto. No trabalho abordado o autor não estuda a variação da distribuição ou do arrasto gerado em função do rebaixo traseiro.

O estudo de Thacker (2012) se faz através da comparação do arrasto total gerado em um indivíduo com o rebaixo apresentando canto vivo e outro com borda arredondada, figura 12, para um corpo de Ahmed de dimensões originais, figura 5.

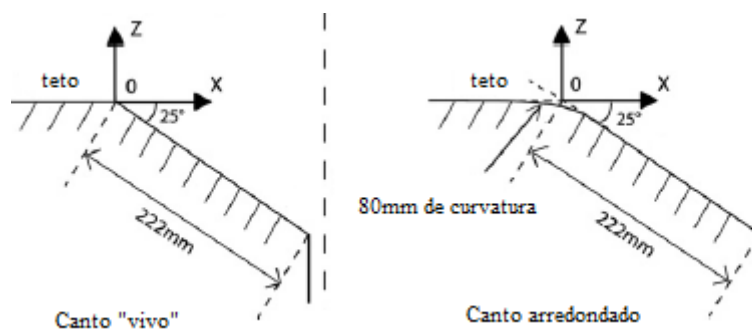


Figura 12 - Modelo de analisado por Thacker

O autor observa uma diferença considerável no arrasto do corpo para diferentes Reynolds, justificando o uso de cantos arredondados como sistema passivo na diminuição do arrasto, figura 13.

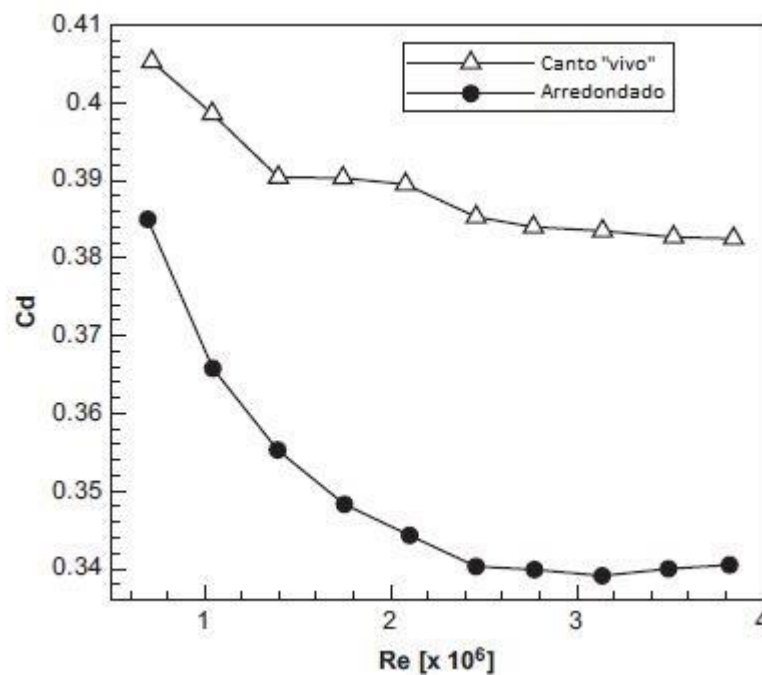


Figura 13 - Análise de coeficiente de arrasto para rebaixo com canto vivo e arredondado feito por Thacker (2012)

2.1.5 POSICIONAMENTO DO CORPO NO INTERIOR DO TÚNEL DE VENTO

Para a realização de ensaios experimentais ou numéricos algumas regras em comum são observadas em diversos artigos, todas com o objetivo de garantir a qualidade do experimento e tornar a aproximação mais próxima da realidade.

A posição do corpo de Ahmed segundo Franck Et. Al. (2004) e Bruneau Et. Al. (2010), deve respeitar duas limitações de posicionamento no túnel de vento para simulações numéricas. É necessário posicionar o objeto a no mínimo $5L$ da saída do túnel, sendo L o comprimento da parede superior do túnel. O corpo deve também estar distante, no mínimo $2L$ do bocal de entrada de ar, figura 14.

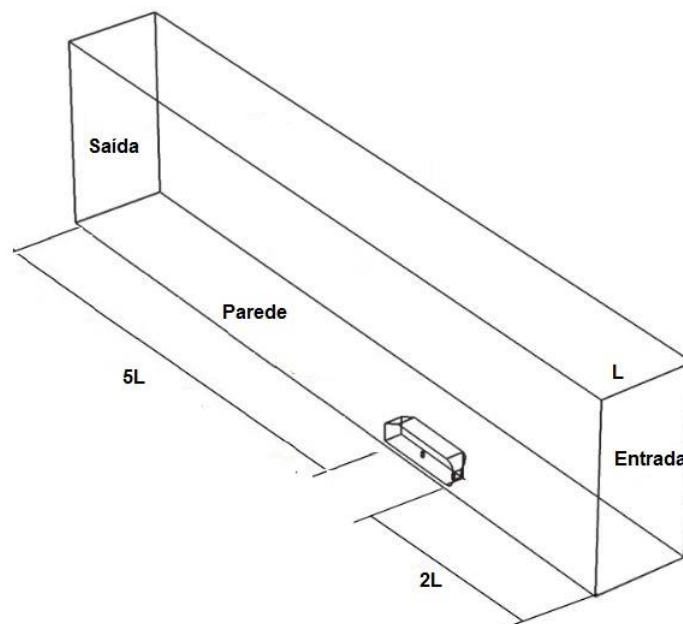


Figura 14 - Posicionamento segundo literatura para simulações numéricas.

Segundo a literatura, é interessante se observar a distância entre a base do objeto e a parede do túnel de forma a evitar interferência entre ambos. Para tal correção, os estudos de Bruneau Et. Al. (2010) e Franck Et. Al. (2004) utilizaram um fator de distância igual a 5% da altura do corpo de Ahmed.

3. METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Os experimentos realizados neste trabalho foram desenvolvidos no túnel de vento da Faculdade do Gama da Universidade de Brasília (UnB), localizado no laboratório de termo

fluidos, prédio UED. O túnel possui seção de testes de acrílico transparente de seção retangular 150x200mm.

O diagrama da figura 15 é representação do túnel utilizado no experimento. É necessário relatar que o túnel é dividido em quatro seções de 1000mm feitas em acrílico transparente, formando um total de 4000mm úteis, podendo ser adaptado através da remoção das seções finais.

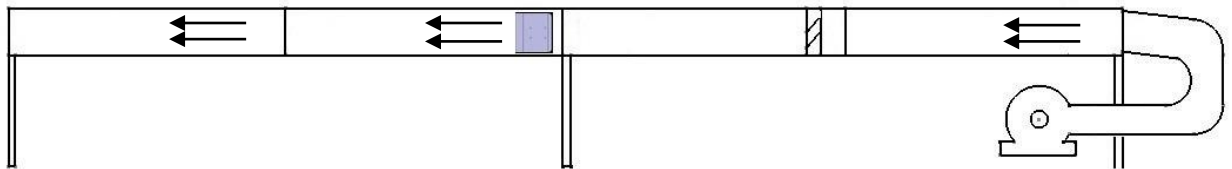


Figura 15 - Diagrama do túnel de vento utilizado.

O túnel é composto por diferentes seções e o escoamento chega a seção de teste através de um ventilador de centrifugo, passando por um conjunto de estruturas em formato de colmeia e telas que tem o objetivo de filtrar e homogeneizar o escoamento antes de sua chegada a seção de testes.

O túnel de vento é alimentado por um motor da marca VOGES Vtop modelo VCD-1005062250, potência 0,75kW, 60Hz, 220V e rotação máxima de 3415 rpm. O Controle do mesmo é feito através de um equipamento inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-08 Vector Inverter, 200/ 240V AC 60 Hz.

Para a escolha do posicionamento do corpo de Ahmed dentre as 4 seções existentes no túnel de vento, se optou por seguir as restrições baseadas nas teorias para ensaios encontrados na literatura, discutidos na seção 2.1.5. Com a escolha da seção fez-se uma análise de distribuição de velocidade na saída da seção 2 do canal

Para o experimento de captação da flutuação de pressão, utilizou-se o mesmo túnel de vento, motor e inversor. O conjunto de equipamentos de aquisição de dados, porém, foi outro. Utilizou-se um condicionador de sinal da marca ENDEVCO modelo 136, uma placa de captura NI 9158 16 bits e um transdutor ENDEVCO modelo 8510B-1.

O esquemático de ligação utilizado para a realização dos ensaios pode ser observado no diagrama da figura 16. O condicionador de sinal foi configurado de acordo com as especificações de calibração do sensor ENDEVCO. O ganho no sinal do transdutor aplicado através do equipamento foi de 970mV. Toda a configuração da placa de aquisição NI 9158 foi realizada com o software *LabView* 2011 com licença estudantil

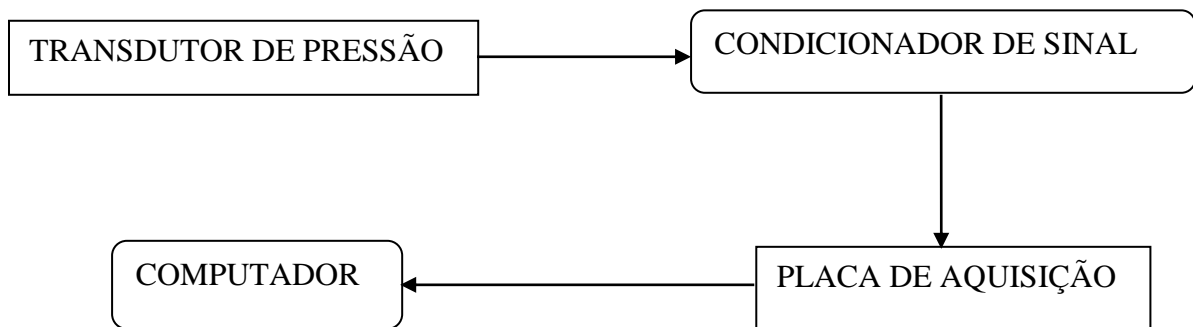


Figura 16 - Esquemático de ligação de equipamentos

3.2 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE DO TÚNEL DE VENTO

Para a caracterização do túnel de vento empregado nos ensaios de pressão estática, utilizou-se um tubo de Pitot de 1,5mm de diâmetro externo conectado a um sensor de pressão diferencial da marca Dwyer, modelo DM-2000 com capacidade de leitura de corrente entre 4 e 20 mA, alimentado por um transformador 110/220VAC – 10/35VDC. O sensor é ligado em série a um multímetro de bancada da marca Minipa, modelo mdm-8145a. Os dados de pressão dinâmica foram lidos movendo o tubo de Pitot com o auxílio de uma mesa coordenada X, Y, Z, ao longo de uma malha cartesiana, tal como mostrado na Fig. 17. A leitura dos dados foi realizada alimentando o sensor com pressão dinâmica de um tubo de Pitot, e pressão estática obtida no túnel.

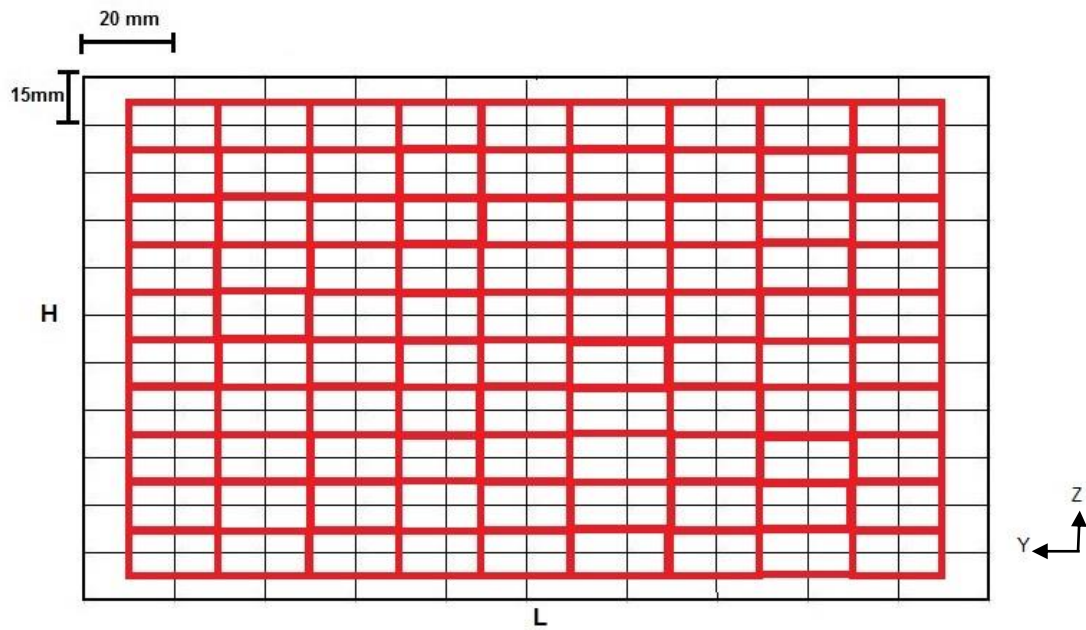


Figura 17 - Malha de captura das velocidades.

Para cada ponto foi lido um valor de corrente foi fornecido pelo sensor Dwyer, gerando uma curva de mapeamento de intensidade da diferença de pressão ΔP .

$$\Delta P = 29,308(mA - 4,0) \quad \text{Eq. 5}$$

A pressão estática no interior do túnel, P_{local} , foi subtraída da pressão total utilizando-se um anel de pressão. O anel de pressão faz a média da leitura de 04 pontos de pressão estática em torno da seção 3 do túnel.

Os dados foram tratados, gerando a equação de calibração do sensor, equação 5, onde ΔP é a variação da pressão em Pascal, e I é a corrente no sensor, em milliamper. O gráfico de calibração utilizado é visto na figura 18, dado que 4mA é a leitura inicial do equipamento.

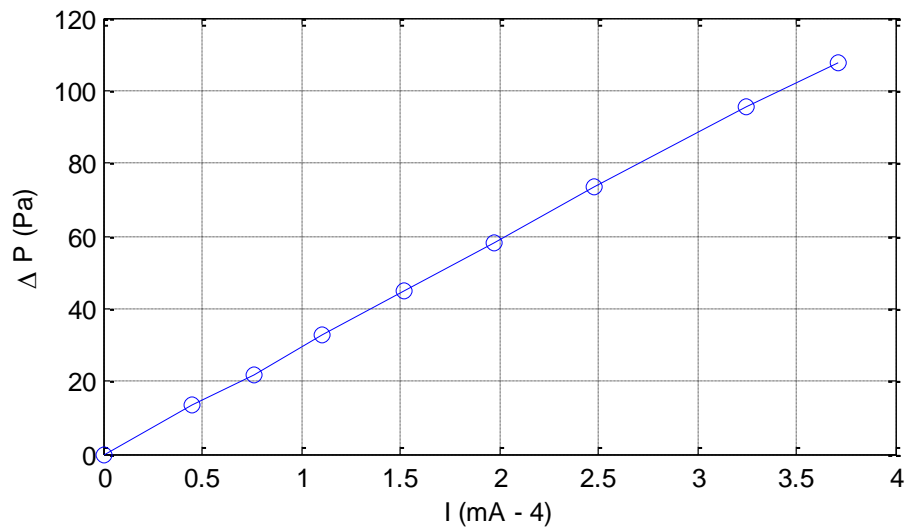


Figura 18 - Curva de calibração do equipamento Dwyer DM-2000.

3.2.1 DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE

Com os pontos de velocidade foi possível: 1) determinar uma distribuição de velocidade a montante do corpo; 2) determinar a velocidade média na seção do canal, U_m .

Na Figura 19 a distribuição de velocidade na seção de teste é mostrada. Os eixos do canal foram adimensionalizados por sua altura e largura, H_f e L_f , respectivamente. De forma a tornar a análise dos eixos adimensional, os mesmos foram transformados de acordo com as equações 6 e 7.

$$H^* = \frac{H}{H_f} \quad \text{Eq. 6}$$

$$L^* = \frac{L}{L_f} \quad \text{Eq. 7}$$

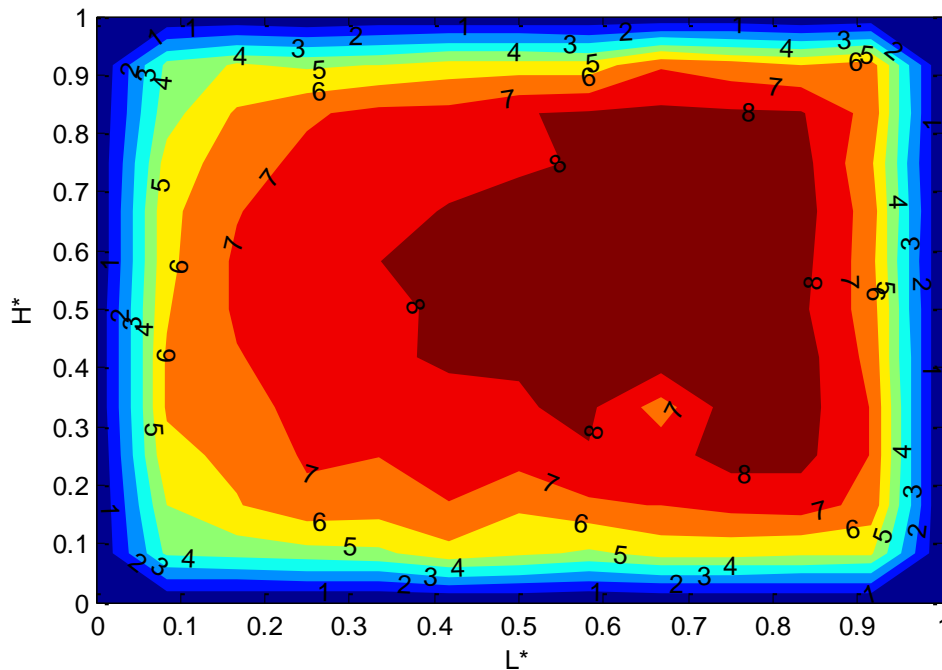


Figura 19 - Distribuição de velocidade no bocal de saída da seção 2.

A velocidade média do túnel foi calculada através da integral das velocidades das áreas na malha. Levou-se em consideração que a malha determinada é suficientemente detalhada para possibilitar o cálculo da velocidade média. O resultado obtido é de 7,06 m/s. A equação 8 apresenta o método utilizado para o cálculo. As áreas da malha utilizadas para cálculo podem ser observadas em vermelho na figura 17.

$$U_m = \frac{1}{A_H} \int U_A dA \quad \text{Eq. 8}$$

3.2.2 ESCOLHA DE SEÇÃO PARA POSICIONAMENTO

O corpo de Ahmed foi posicionado com sua face na entrada do bocal de saída da seção 2, estando o restante de seu corpo na seção 3 do túnel, de forma a respeitar as condições de aquisição observadas por Bruneau Et Al (2010) e Franck Et Al (2004).

O corpo de ensaio foi alocado na parede direita da do túnel, figura 20. Tal decisão tem como base a distribuição levemente deslocada da velocidade, vista na figura 19, e a maior facilidade de posicionamento sem o comprometimento excessivo das paredes do túnel do

laboratório com peças de encaixe que exigem furos. Tal decisão é justificada pelo túnel ser de uso comum a alunos.

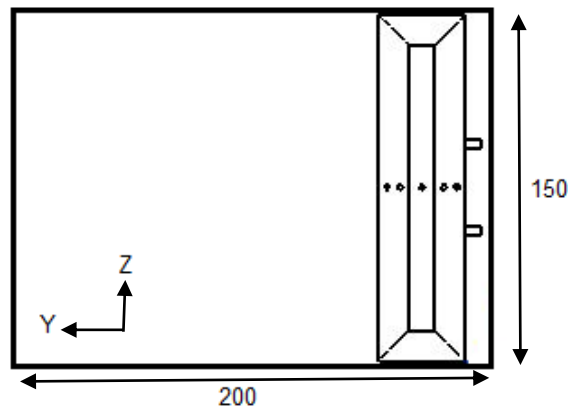


Figura 20 - Diagrama da vista frontal do túnel com o corpo de Ahmed posicionado.

3.2 CONCEPÇÃO E FABRICAÇÃO DO CORPO DE AHMED

3.2.1 LIMITAÇÕES DO PROJETO

Para a elaboração do projeto do corpo de Ahmed analisou-se as limitações presentes no túnel de vento. Com o posicionamento de acordo com a distribuição de velocidade vista, a largura do corpo fica limitado a 150mm, valor total da altura do túnel no eixo y.

3.2.2 ELABORAÇÃO DO CAD

3.2.2.1 DESENVOLVIMENTO DO CORPO PARA EXPERIMENTO DE PRESSÃO ESTÁTICA

Utilizou-se o corpo de Ahmed original como base, de forma a se manter todas as razões de proporção entre a dimensões, figura 21. O ângulo de rebaixo 25° foi escolhido de forma a se manter o valor do ensaio realizado por Ahmed (1984) na primeira seção de experimentos.

Após a elaboração do CAD básico da primeira estrutura com rebaixo de 25° , realizou-se uma análise da geometria do corpo de Ahmed. Observou-se os pontos principais e determinou-se os locais para tomadas de pressão. As características que foram levadas em consideração para a determinação, foram a quantidade de pontos em regiões críticas (frontal e rebaixo) e a relação entre número de pontos e a possível fragilização da estrutura do corpo.

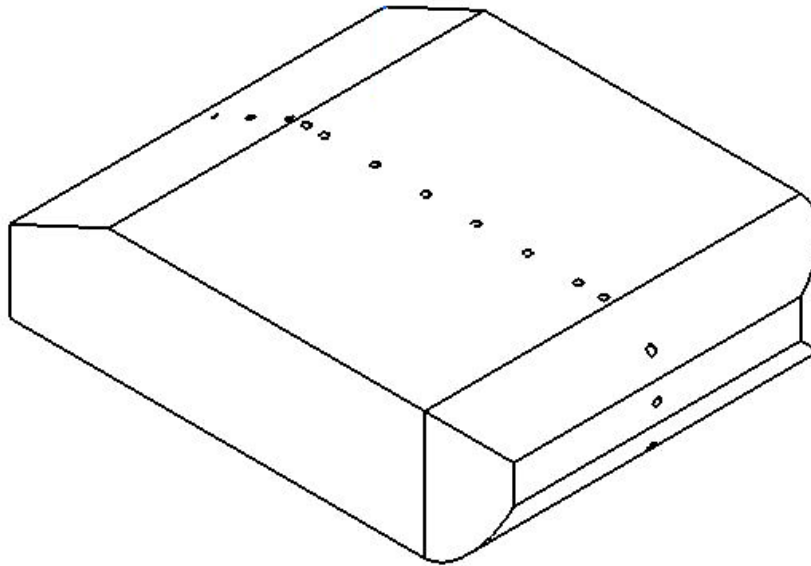


Figura 21 - Vista isométrica do CAD finalizado.

A primeira proposição feita para a fabricação do objeto de estudo foi a impressão 3-D, porém foi descartada devido ao seu custo, que girava em torno de R\$ 600,00, impossibilitando a fabricação através deste método.

Sem a opção de um método automatizado para fabricação, definiu-se a utilização da modelagem manual de isopor, através de desenhos técnicos elaborados com ajuda computacional.

Utilizou-se um isopor de densidade número 5, cortando-o de acordo com a largura necessária para o túnel (149mm). Colou-se as vistas elaboradas no programa CATIA V5R19 e iniciou-se o trabalho de lixar, utilizando uma lixa para massa especial A257. Com as vistas validadas e cotas conferidas fez-se as marcações dos pontos de tomada de pressão e cobriu-se todo o corpo com fita adesiva. Os furos e fixação dos tubos foram feitos posteriormente utilizando de silicone à base de acetona.

Foram produzidos dois exemplares do corpo de Ahmed. Após fabricação e retrabalho de ambos, utilizou-se de tubos capilares de cobre utilizados em refrigeração de 1 milímetro de diâmetro interno, adaptados em cada ponto de aquisição, de forma a se obter diversos tubos captação do diferencial de pressão. Aproveitando-se do fato de que ambos os corpos produzidos possuem a mesma geometria devido a utilização de gabarito CAD, utilizou-se um para tomadas de pressão na parte superior, frontal e traseira, enquanto o outro para tomada de pressão na parte posterior.

Utilizou-se dos mesmos equipamentos e montagem apresentada no mapeamento do túnel de vento, de forma que a agulha de Pitot foi substituída por capilares utilizados nos pontos de tomada de pressão.

Com base nas observações feitas sobre o posicionamento dos pontos de pressão, decidiu-se por utilizar o passo de 10mm entre os dois primeiros e 20mm entre os subsequentes da parte superior, sendo também 20mm para a parte inferior. As posições dos tubos de tomada podem ser vistas na figura 22.

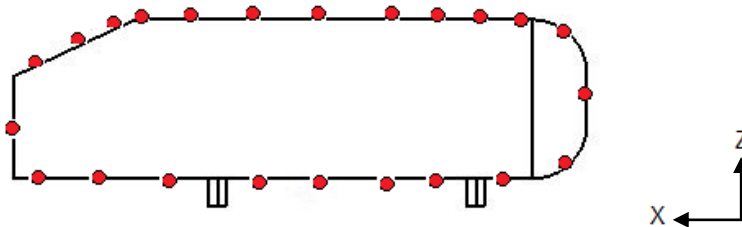


Figura 22 - Posição das tomadas de pressão na vista lateral.

3.2.2.2 DESENVOLVIMENTO DO CORPO PARA EXPERIMENTO DE CAPTAÇÃO DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

Assim como para o primeiro corpo concebido, estes foram baseados nas dimensões originais do corpo de Ahmed. Os valores de cotas se mantiveram os mesmos para o rebaixo de 25°.

Dado o novo equipamento utilizado neste novo objetivo experimental, os corpos de Ahmed tiveram de ser concebidos de maneira diferente à primeira proposição. A nova proposta de elaboração é a divisão do corpo em quatro segmentos, dois de isopor e um de acrílico transparente com 4mm de espessura, sendo a parte frontal do segmento de 30mm, feita de nylon.

O segmento de acrílico possui 30mm e se encaixa no meio dos dois de material isopor, possibilitando a tomada de pressão utilizando apenas 1 corpo. As figuras 23 e 24 apresentam a vista de *render* isométrica e explodida.

Todo o projeto foi feito no programa SolidWorks 2017 com licença estudantil. O segmento de acrílico foi dividido em placas, recortadas utilizando-se de equipamento de corte a laser, posteriormente montadas utilizando-se cola com base em cianoacrilato. Os segmentos

de isopor foram usinados manualmente utilizando-se lixa fina de madeira, com o auxílio de vistas obtidas através de CAD. O segmento frontal de nylon foi fabricado com uma máquina CNC, utilizando-se o arquivo CAD Solidworks.

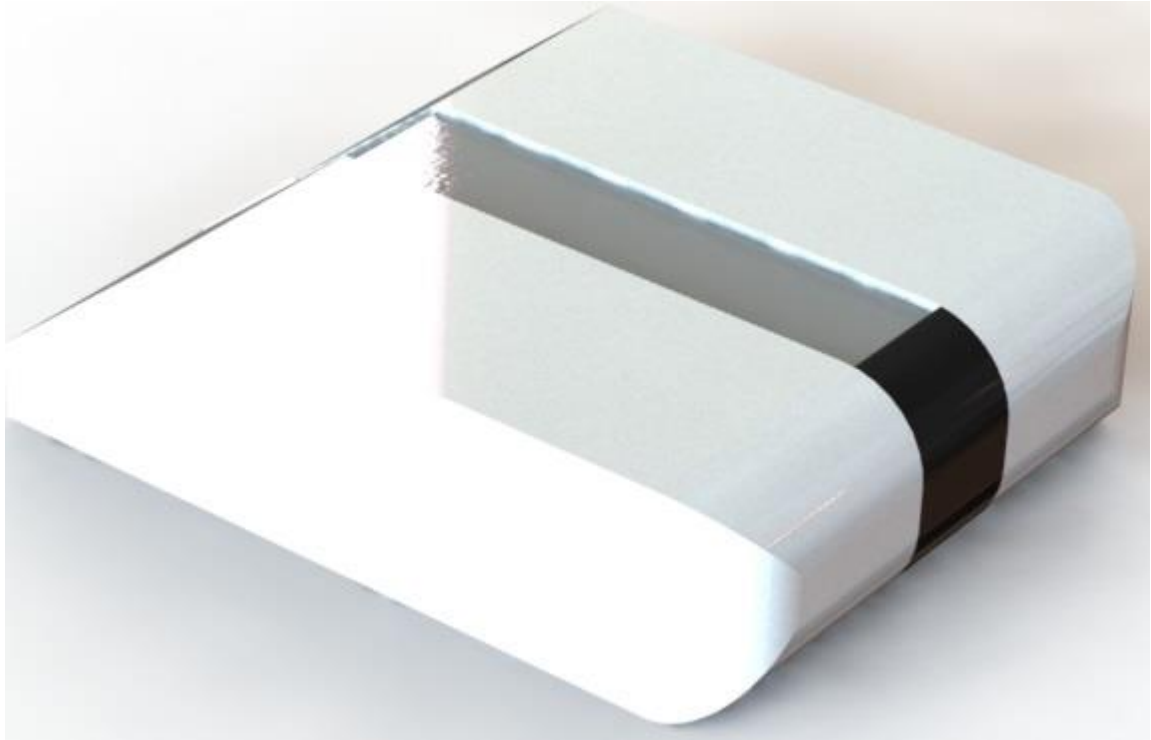


Figura 23 - Render da vista isométrica do corpo fabricado.

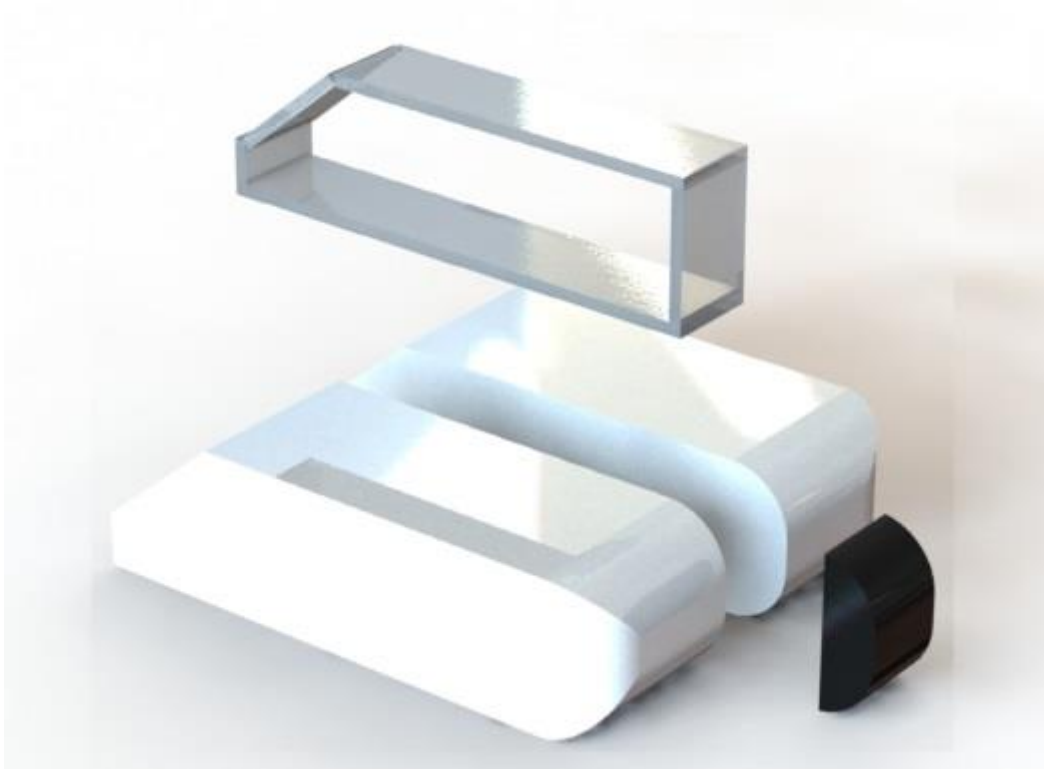


Figura 24 - Render da vista explodida dos segmentos do corpo fabricado.

Foram fabricados quatro corpos de Ahmed, com os rebaixos respectivos de 25° , 40° , 50° e 90° . Para todos procurou-se manter a proporcionalidade para com o corpo de Ahmed original, de forma a caber no túnel de vento disponível no laboratório utilizado, com 149mm de espessura e 181mm de comprimento. As figuras **25 a 28** mostram as vistas laterais com as cotas para cada um.

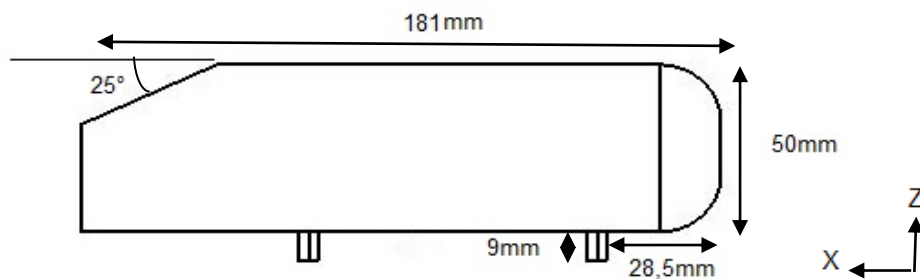


Figura 25 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 25° .

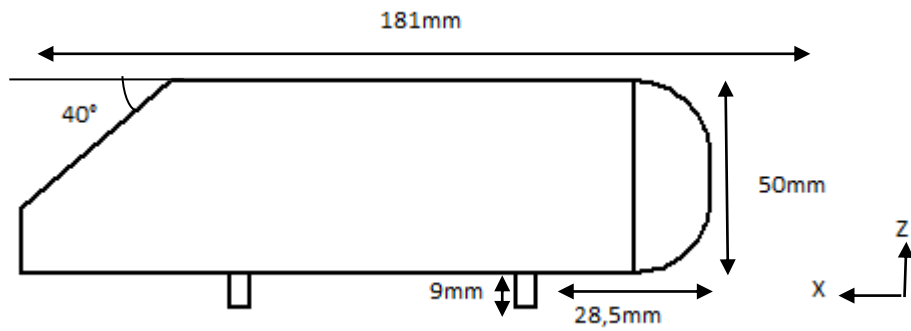


Figura 26 - Cota Lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 40°

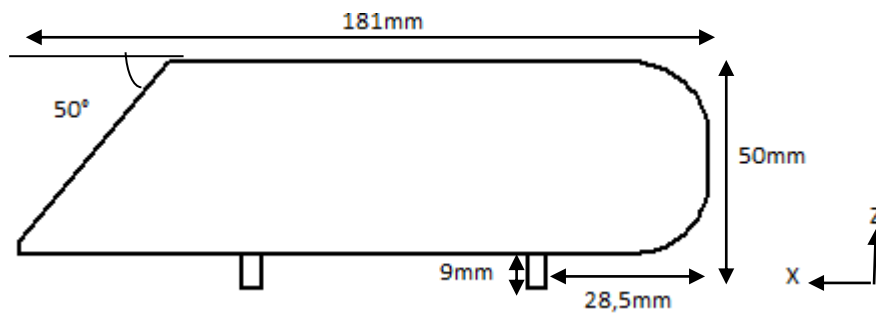


Figura 27 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 50°

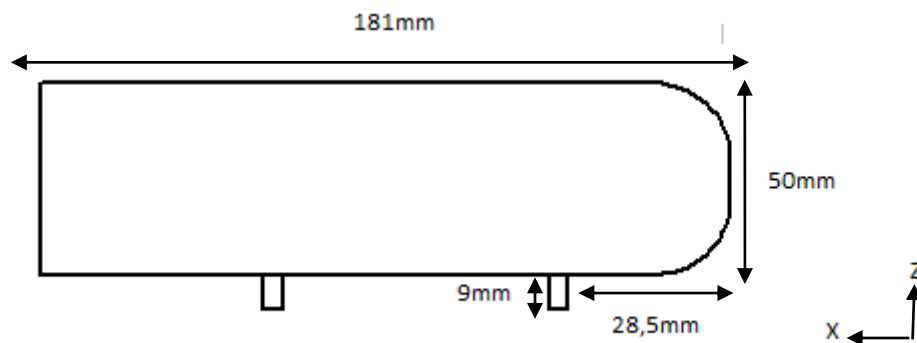


Figura 28 - Cota lateral para corpo de Ahmed com rebaixo de 90°

Para a determinação dos pontos de pressão dos corpos, teve-se de levar em consideração os materiais envolvidos, limitações de entrada de ferramenta nas superfícies e dobras de mangueiras. As figuras 29 a 32 mostram os pontos determinados para a captação da flutuação de pressão em cada corpo.

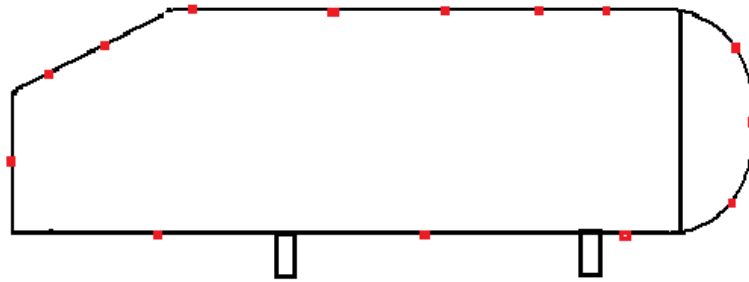


Figura 29 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 25°.

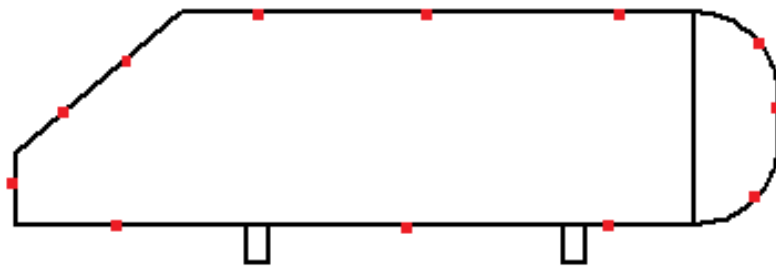


Figura 30 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 40°.

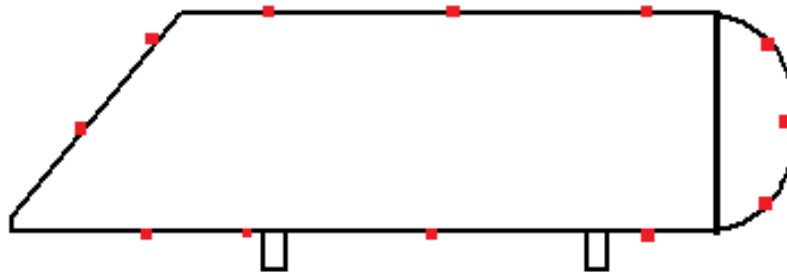


Figura 31 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 50°.

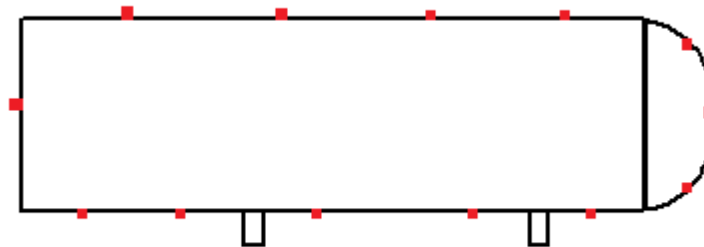


Figura 32 - Posicionamento para tomadas de pressão para rebaixo de 90°.

Para os corpos de 25°, 40° e 50° de rebaixo, posicionou-se dois pontos de tomada na angulação traseira, distantes 10mm um do outro. Na parte inferior optou-se por 3 pontos de pressão com distância de 15mm entre eles, com exceção do corpo de rebaixo 25°, que não apresentou fragilização ao se iniciar os furos, possibilitando assim o posicionamento 4 pontos. O corpo com rebaixo de 90° permitiu o posicionamento de 4 tomadas na parte superior e 4 na inferior, iniciando do ponto 20mm a partir do bico, equidistantes 15mm.

Após tentativas falhas do posicionamento de 6 pontos de tomada de pressão no nariz do corpo, utilizando-se furadeira de bancada e máquina fresa, decidiu-se por realizar apenas 3 pontos. A primeira tentativa de adição resultou na quebra do primeiro modelo de bico, devido ao ângulo de entrada da ferramenta.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO

4.1.1 OBTENÇÃO DE PRESSÃO ESTÁTICA

Cada capilar para tomada de pressão foi ligado separadamente no sensor, sendo o valor lido no multímetro de bancada por 10 segundos, com o objetivo de se esperar a estabilização dos valores.

Os valores de pressão estática foram obtidos com a utilização de um anel de integração de pressão montado no túnel de vento. O anel foi montado no ponto de aquisição de pressão nos ensaios. O objetivo da montagem foi de captar, durante os experimentos, a pressão estática mais precisa possível, levando em consideração a característica geométrica do corpo e as diferentes posições de tomada de pressão dinâmica.

O corpo de Ahmed foi ensaiado em três posições no túnel de vento, iniciando-se com o corpo apoiado na parede L do túnel 0D, e evoluindo até D, com o passo de 0,5, sendo D = 50mm (altura do corpo).

Os resultados adquiridos e trabalhados são apresentados a seguir nas figuras 33, 34 e 35. Utilizou-se das equações 5 e 9 para tornar a análise adimensional, através do coeficiente de pressão e da resultante C^* . Onde C é o valor da coordenada de comprimento do corpo de Ahmed e C_f é o maior valor da coordenada de comprimento do corpo.

$$C^* = \frac{C}{C_f} \quad \text{Eq. 9}$$

Os erros envolvidos na aquisição dos valores de pressão estática das figuras 33 a 35 se dão devido ao multímetro. O mesmo apresenta um erro igual ao menor valor mostrado em seu display, 0,01 V. O cálculo do erro pode ser visto nos anexos.

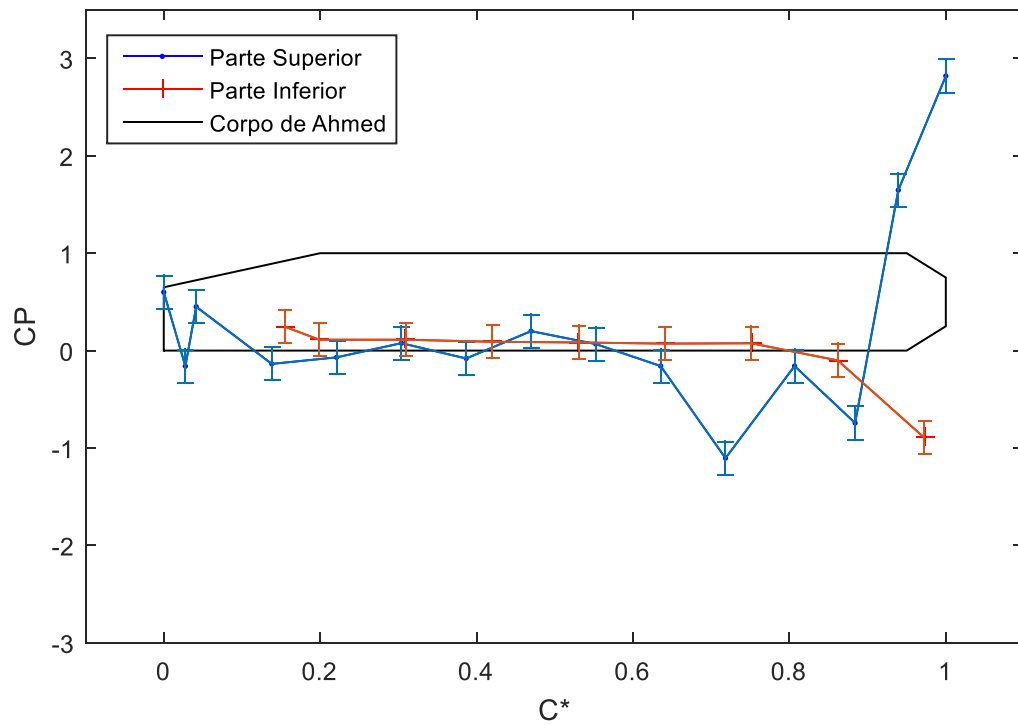


Figura 33 - Dados de coeficiente de pressão para $L = D$. $Re = 90\ 000$.

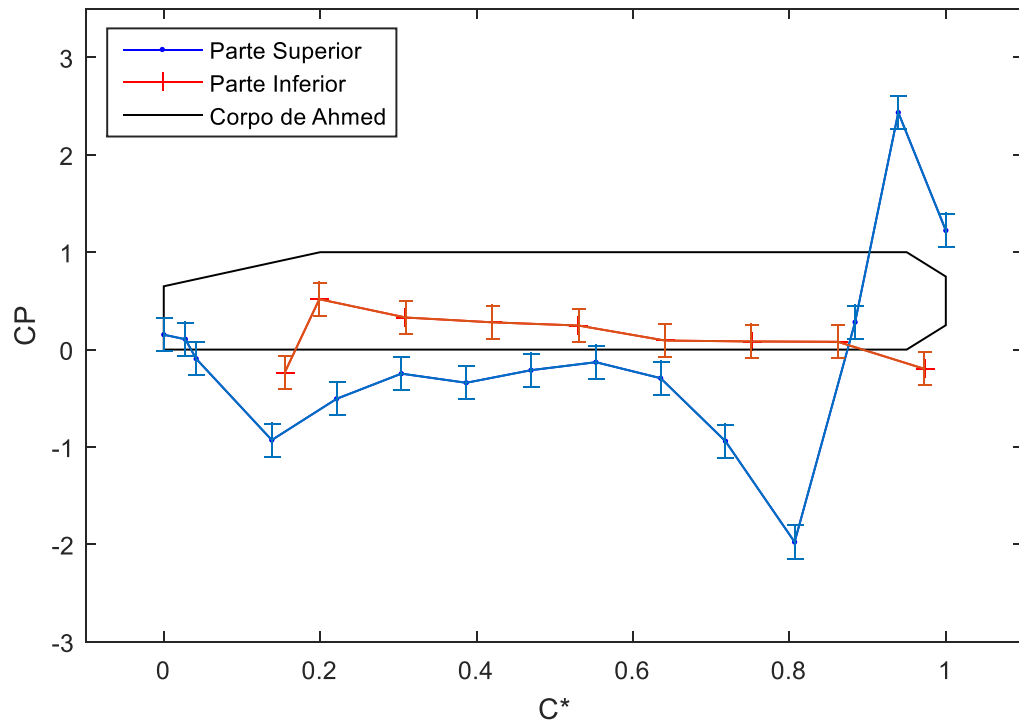


Figura 34 - Dados de coeficiente de pressão para $L = 0,5D$. $Re = 90\ 000$.

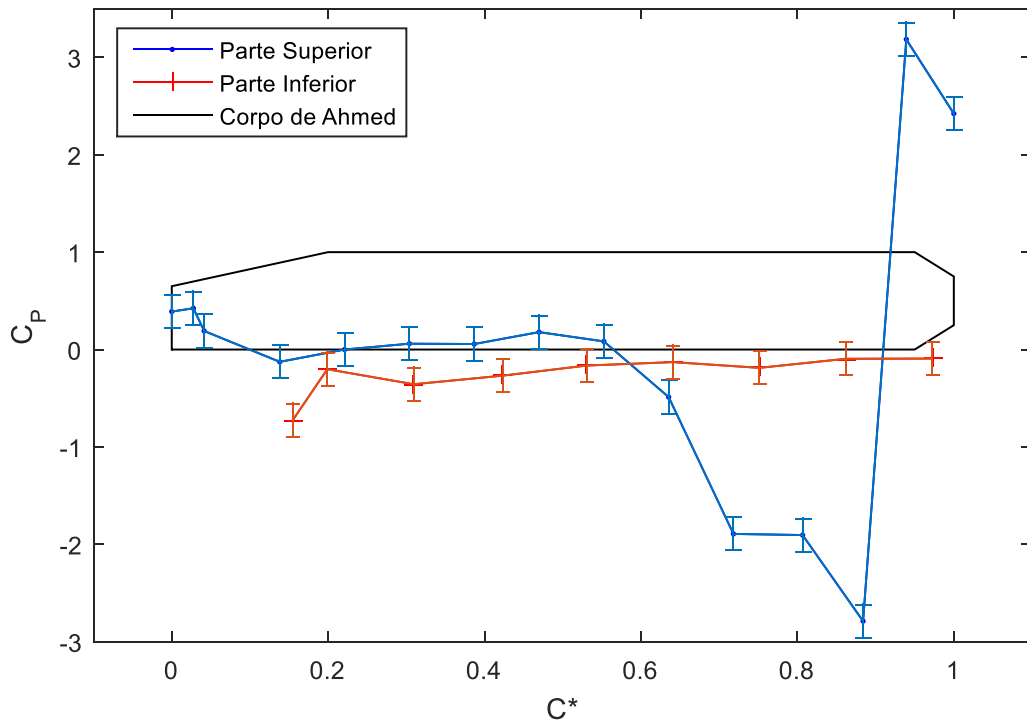


Figura 35 - Dados de coeficiente de pressão para $L = 0D$. $Re = 90\ 000$.

Os dados observados mostram uma tendência clara à pressão negativa exercida no corpo, proporcional ao aumento da distância do mesmo com o solo. Tal fato em situações

reais com um veículo de passeio, traria a tendência de afastar carro do solo, causando grave problema de desestabilização em altas velocidades.

Os gráficos podem ser validados quando comparados com o resultado obtido por Khalil (2001), visto na figura 9, no qual o comportamento apresentado é análogo. Os pontos de pressão máxima e mínima se repetem, sendo que a flutuação de pressão apresenta a mesma ordem de grandeza em sua variação. A análise quantitativa leva à observação de um coeficiente de pressão levemente superior ao observado por Khalil (2001), o que deve ser relacionado diretamente às diferenças nos equipamentos utilizados e métodos de ensaios.

4.1.2 OBTENÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

Antes de se iniciar o experimento, testou-se o transdutor de pressão, de forma a verificar o ganho gerado pelo condicionador de sinal. Com a validação do funcionamento de todo o esquemático experimental, iniciou-se os procedimentos, figura 36 e 37.

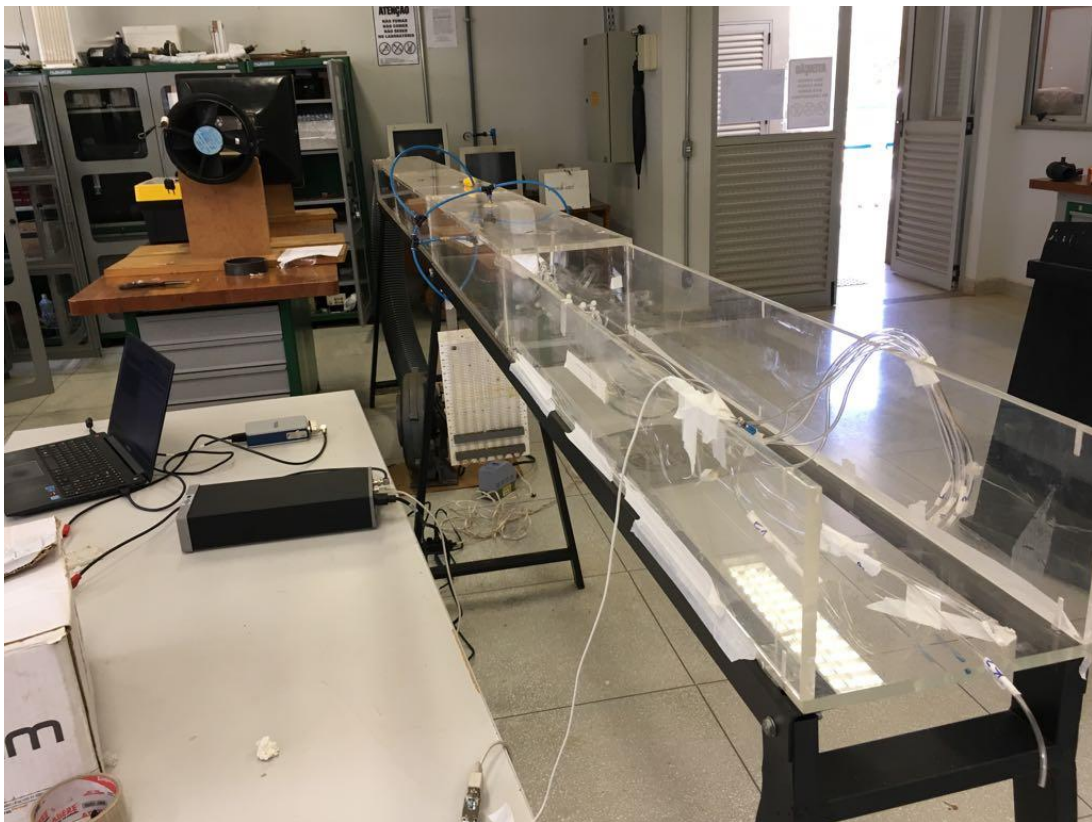


Figura 36 - Túnel de vento e equipamento de experimento.

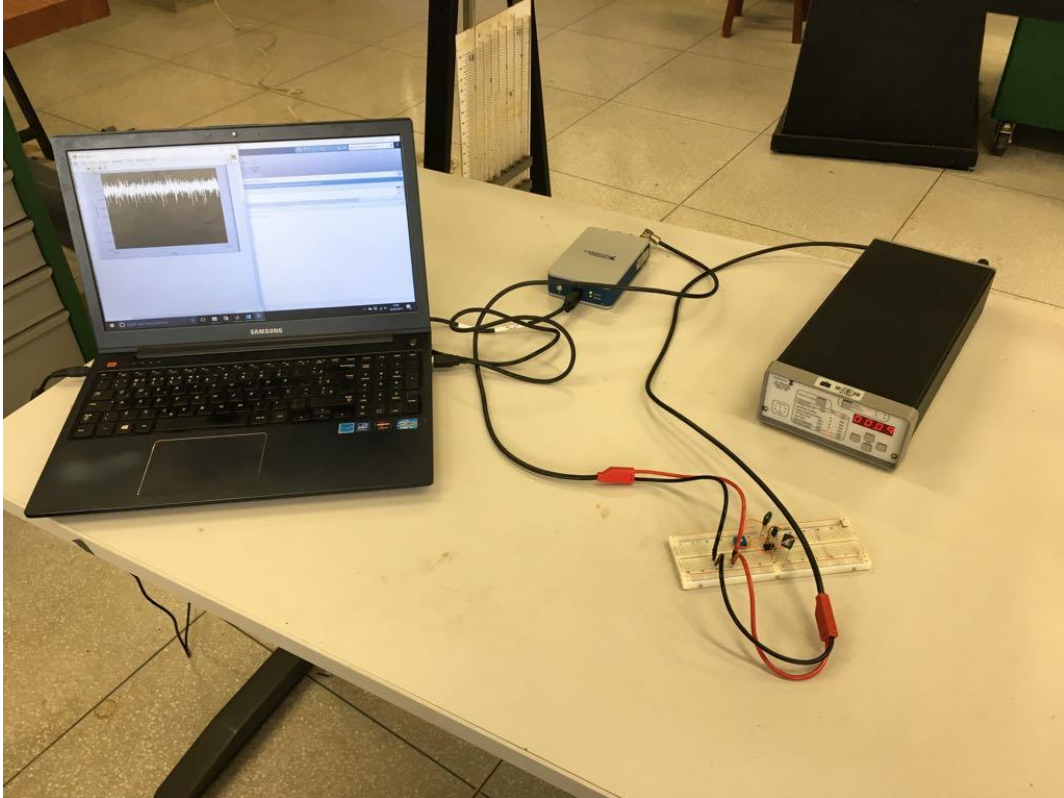


Figura 37 - Aparato de captação.

O experimento foi dividido em 3 ensaios, um para cada corpo. Durante a execução das tomadas de pressão, optou-se por mover ou fazer ajustes no túnel de vento apenas no início ou final das tomadas, de forma a se manter as condições constantes.

No início de cada ensaio foi tomada a pressão sem filtro para o primeiro ponto antes de se aplicar o mesmo, com o objetivo de se obter o ganho da placa para cada posição. Em seguida a série de tomadas de pressão tomou como diretriz aguardar verificar o encaixe da mangueira no transdutor e aguardar 10 segundos para estabilização, gravando logo após os dados através do software LabView 2011 licença estudantil.

Para cada ponto de pressão presente no corpo de Ahmed, foi configurado a frequência de captação de 2048 Hz no transdutor. Tal configuração foi baseada em trabalhos utilizando o transdutor ENDEVCO. Os passos se repetiram para cada ponto de pressão tomado.

Assim como os ensaios realizados para a obtenção da pressão estática, cada um dos corpos com rebaixos de 25° , 40° , 50° e 90° foi testado apoiado na parede L do túnel, partindo de $0D$ até D , com passo de $0,5D$.

O erro instrumental envolvido nas medições se deve à placa de aquisição, ao multímetro e ao transdutor. Os valores de erro da placa de aquisição se dão pela conversão da

informação analógica para digital em sua característica 16bits e range de aquisição de ± 20 V. O multímetro apresenta a incerteza de medição igual ao menor valor passível de leitura, 0,01V. O transdutor apresenta erro de aquisição igual ao menor valor da calibração de sua sensibilidade, 1mv. O cálculo de erro total envolvido pode ser visto nos anexos.

Os resultados são mostrados nas figuras 38 a 49.

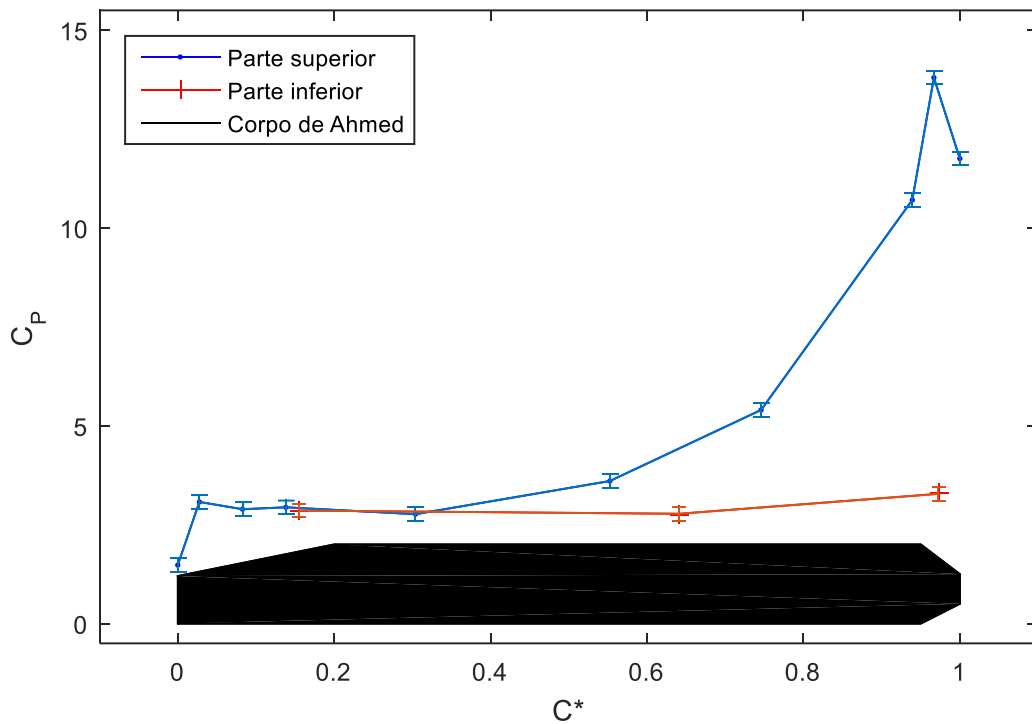


Figura 38 - Distribuição de pressão em OD para o rebaixo de 25°.

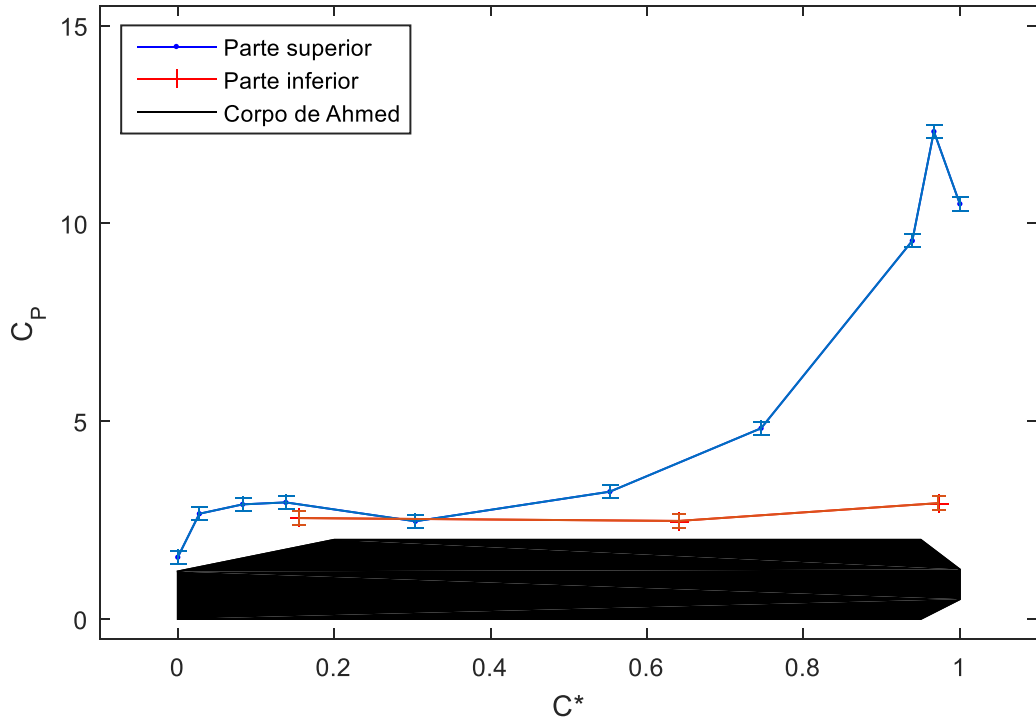


Figura 39 - Distribuição de pressão em $0,5D$ para o rebaixo de 25° .

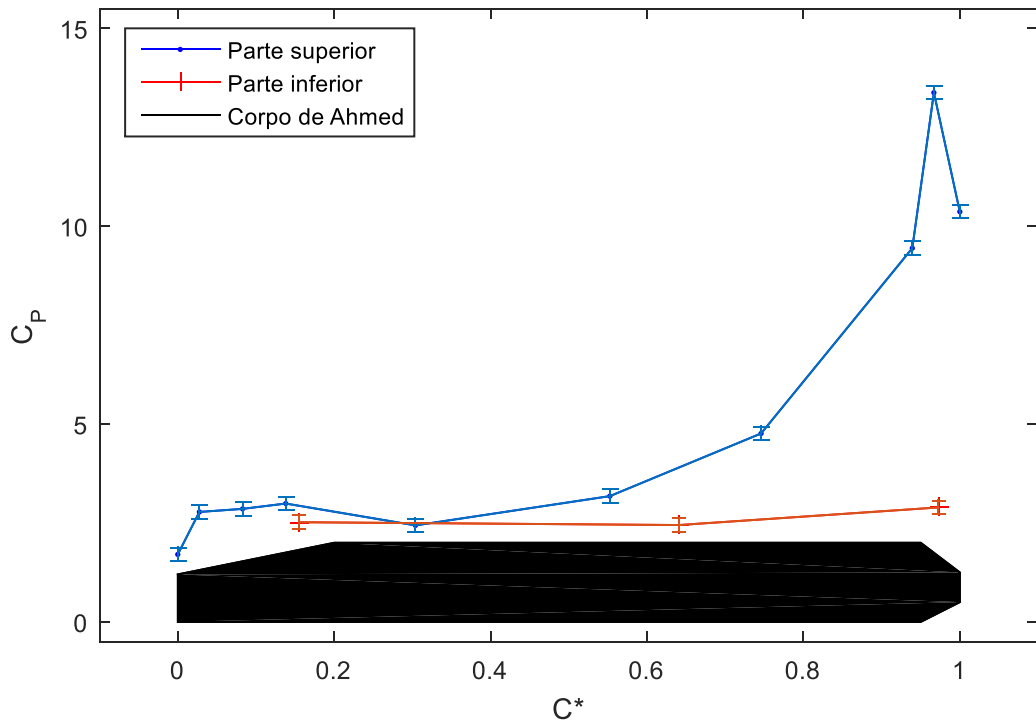


Figura 40 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 25° .

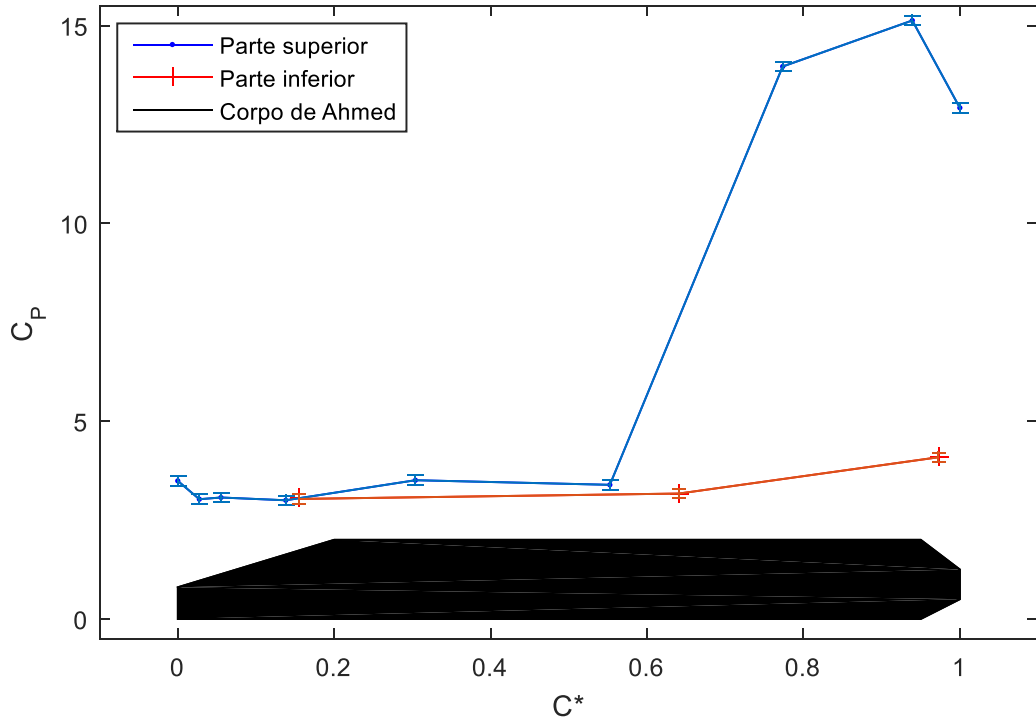


Figura 41 - Distribuição de pressão em 0D para o rebaixo de 40°.

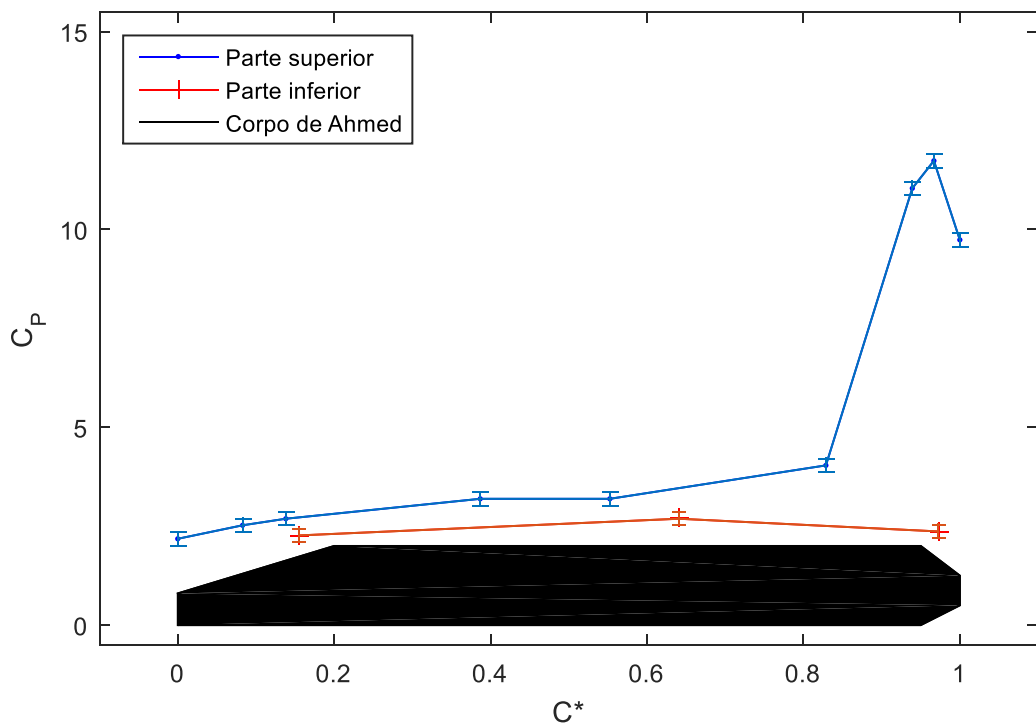


Figura 42 - Distribuição de pressão em 0,5D para o rebaixo de 40°.

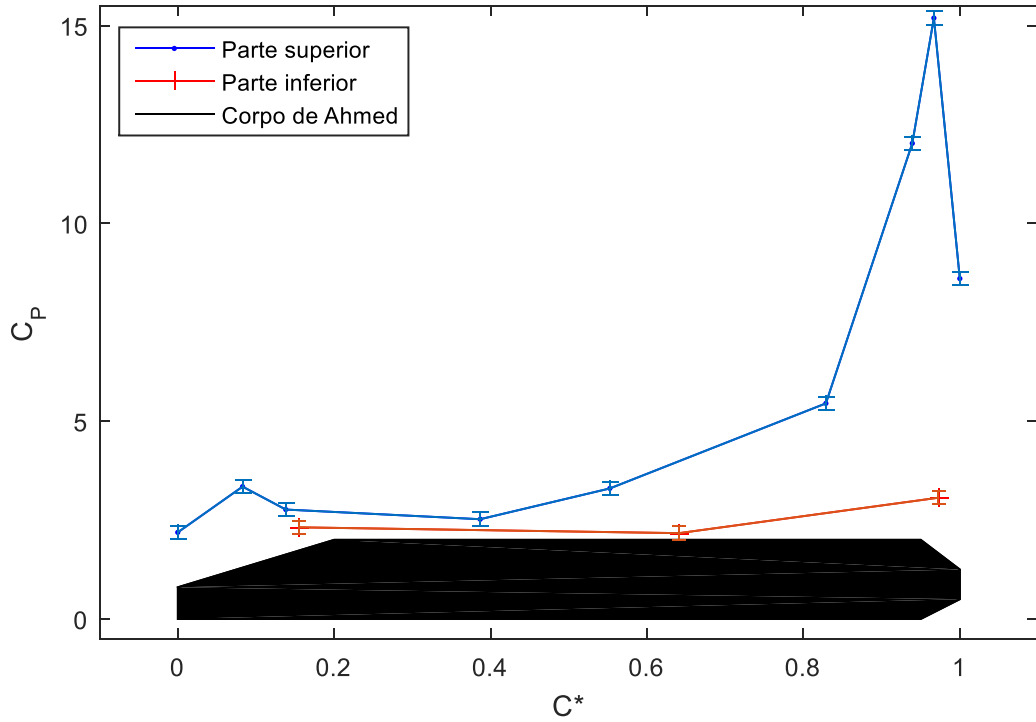


Figura 43 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 40°.

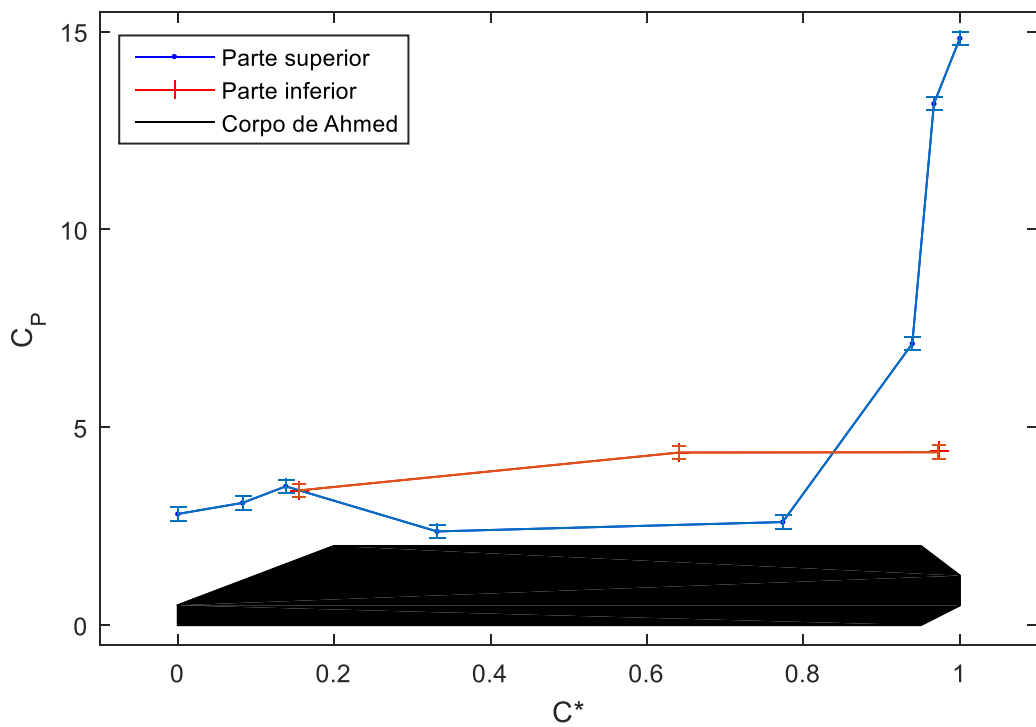


Figura 44 - Distribuição de pressão em 0D para o rebaixo de 50°.

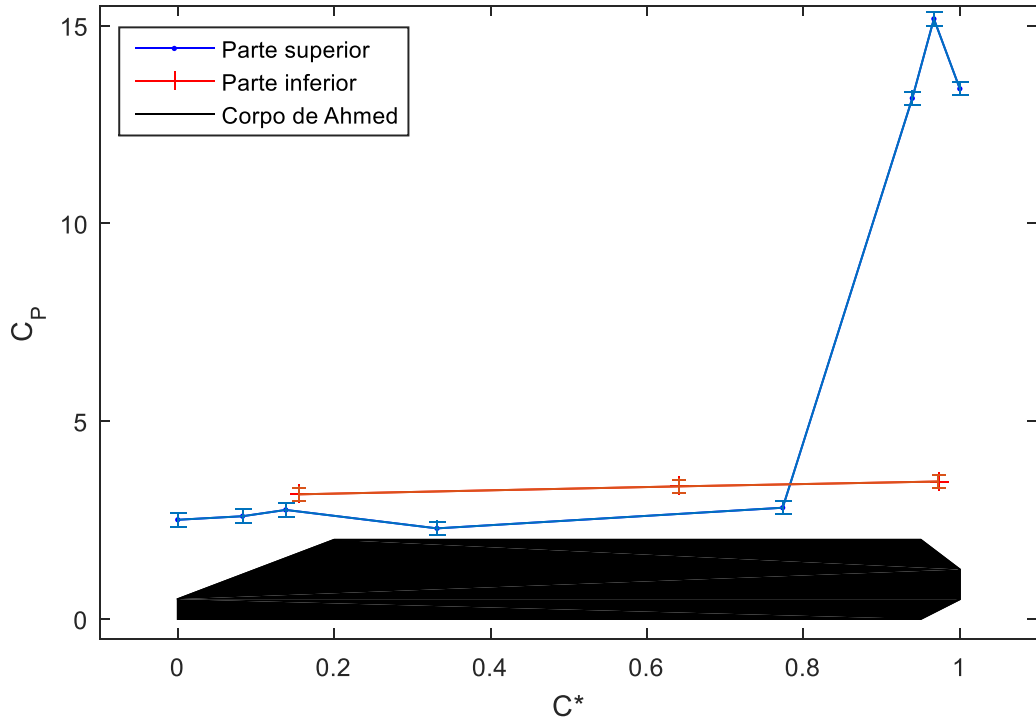


Figura 45 - Distribuição de pressão em $0,5D$ para o rebaixo de 50° .

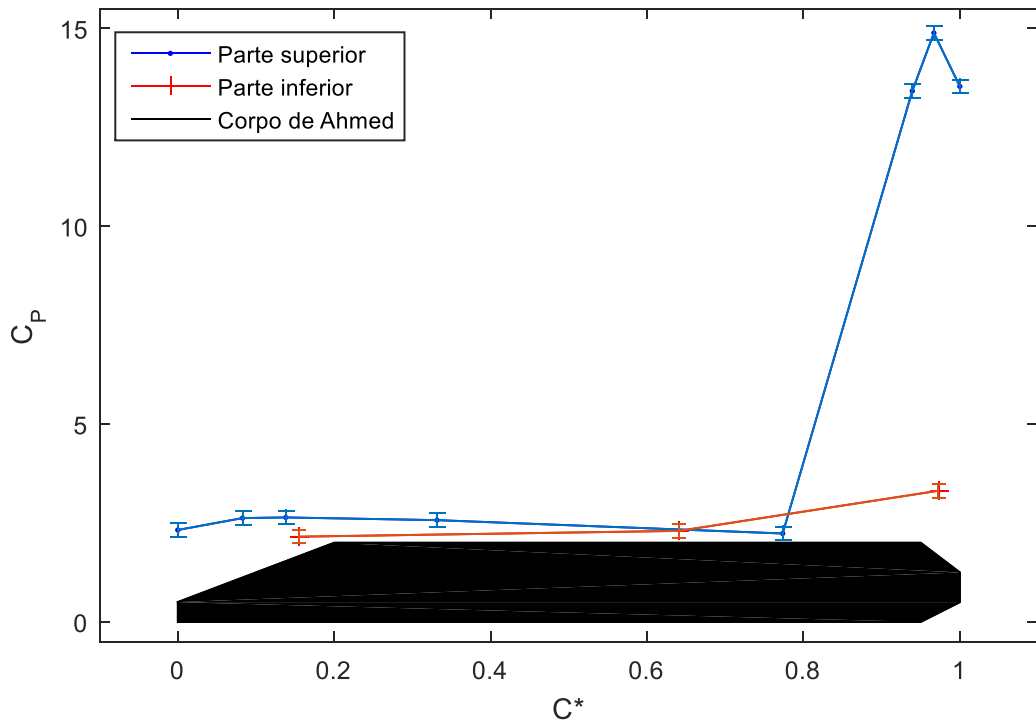


Figura 46 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 50° .

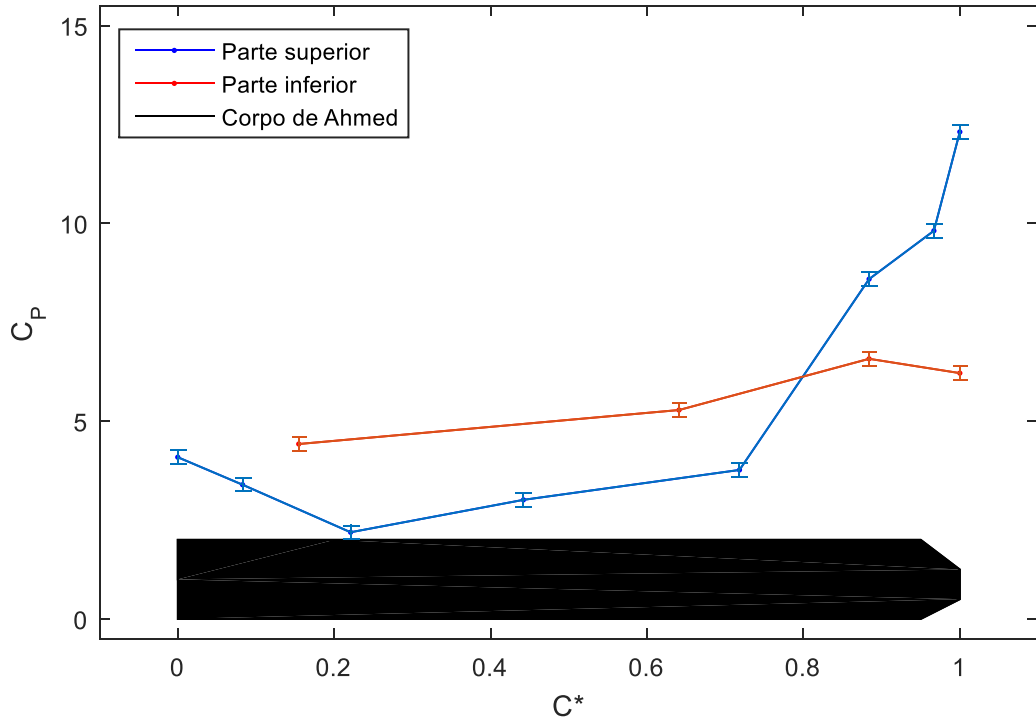


Figura 47 - Distribuição de pressão em OD para o rebaixo de 90°.

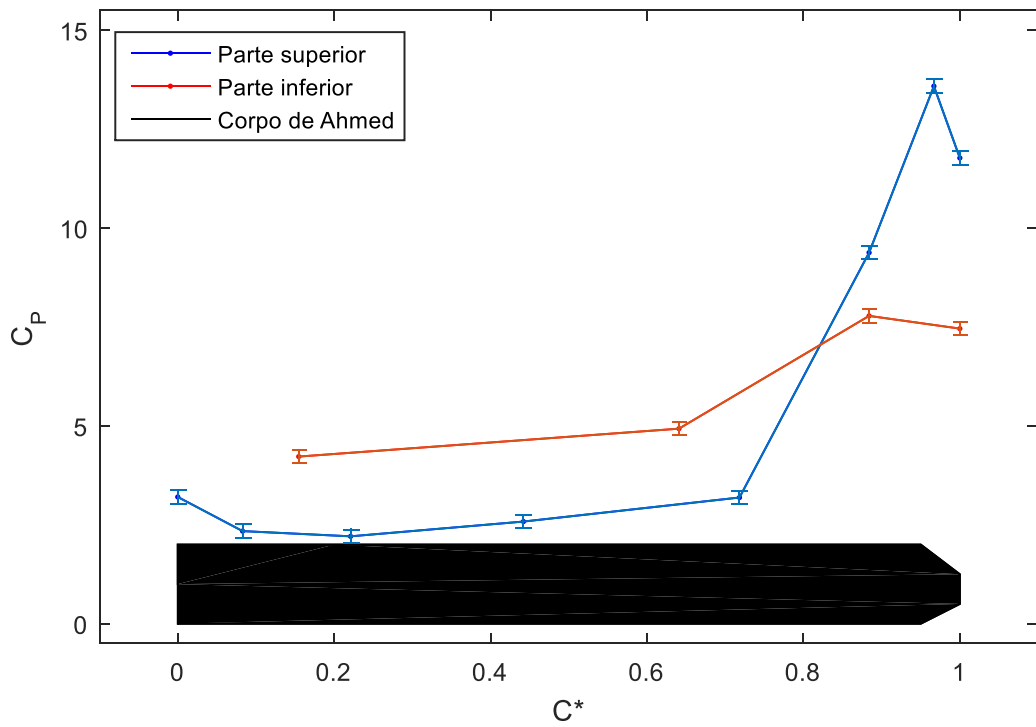


Figura 48 - Distribuição de pressão em 0,5D para o rebaixo de 90°.

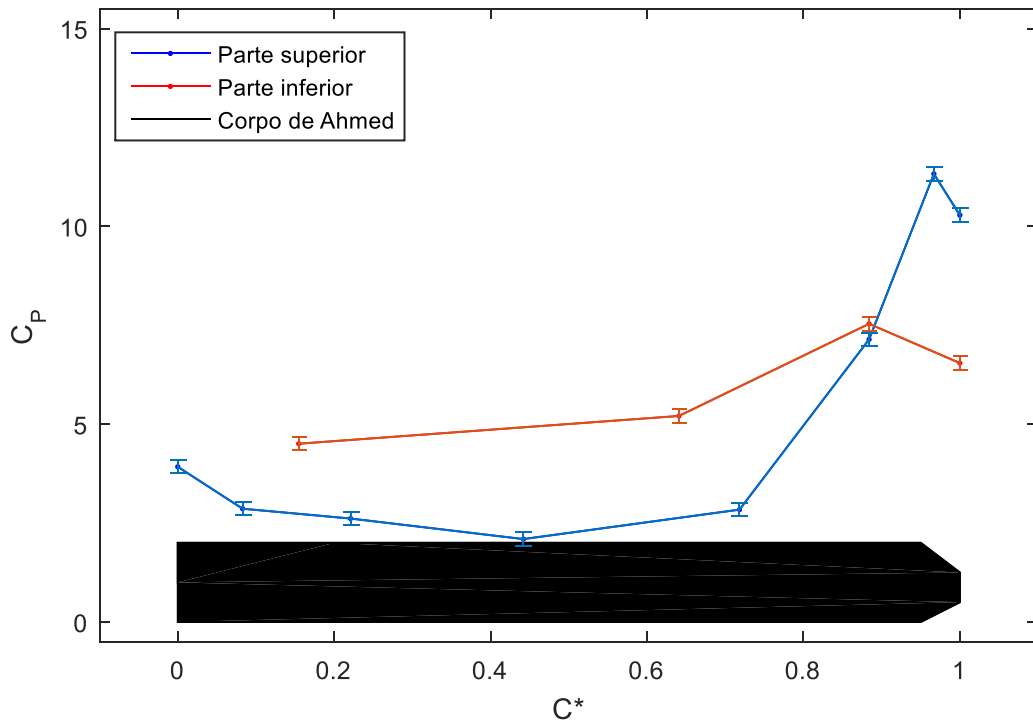


Figura 49 - Distribuição de pressão em D para o rebaixo de 90°.

É possível perceber que a flutuação de pressão em torno do corpo de Ahmed não apresenta caráter uniforme. As pressões da parte inferior do corpo mostram uma distribuição constante mesmo para diferentes rebaixos. O fator causador de dissonância na ordem de grandeza das pressões do intradosso é a variação da altura do corpo no túnel (posição H/D), de acordo com Khalil (2001).

A distribuição da pressão ao longo da parte frontal se mostra próxima para todos os rebaixos, fator que embasado pela não variação da geometria de bico. A maior diferença entre os corpos ensaiados é percebida na região dos rebaixos. As pressões flutuam de acordo com a mudança da geometria, apresentando picos maiores e de maior continuidade nos ângulos de 40° e 50°, como observado por Ahmed (1984). A distribuição concorda com o observado por Varela Et. Al. (2016), apresentando estabilização da distribuição ao longo do corpo.

Na parte inferior do corpo é observado uma tendência de distribuição mais uniforme quando comparados os diferentes rebaixos. Como observado por Khalil (2001), com o distanciamento da parede do túnel, o fluxo de ar que passa na parte inferior tende a se igualar com a superior. Desta forma, as maiores diferenças podem ser percebidas ao se analisar diferentes alturas de posicionamento. A pressão na parte inferior apresenta a tendência de aumentar de forma diretamente proporcional ao aumento da altura do corpo.

4.2 DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DE FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO

Os resultados obtidos através do transdutor de pressão ENDEVCO permitiram uma análise dos sinais de pressão no corpo de Ahmed. A flutuação de pressão permite observar a variação em um mesmo ponto ensaiado durante um período de tempo, figura 50. As respostas obtidas foram analisadas através do valor eficaz presente nas mesmas.

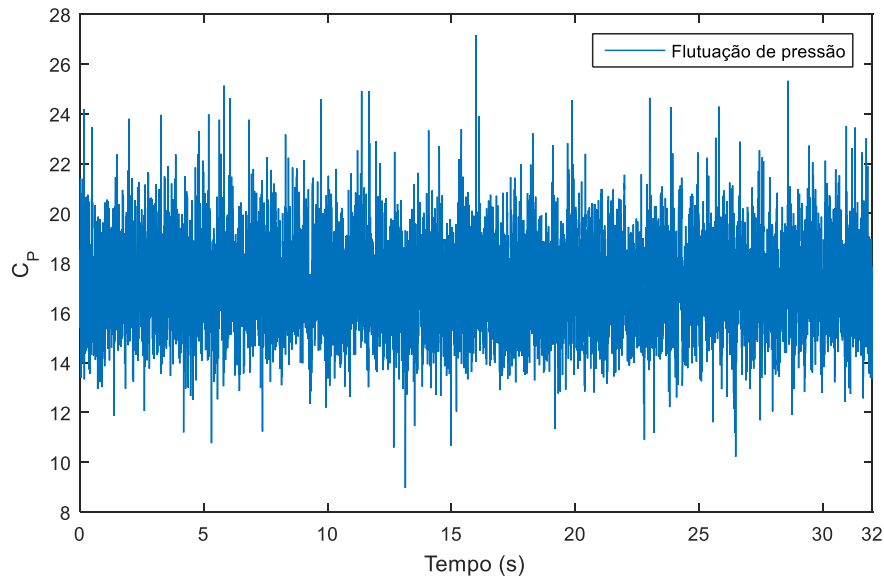


Figura 50 - Flutuação de pressão em função do tempo em um ponto, para o corpo de 90° na posição 0D.

Com a observação de altos valores de pico nos pontos da parte frontal do corpo, visto na figura 48, foi feito um novo experimento para melhor observação do caso. O novo ensaio consistiu em diminuir o comprimento do tubo de tomada para o ponto desejado, seguido pela remoção das mangueiras de todos os outros pontos. Em seguida obteve-se novos resultados.

Para se melhor analisar o comportamento de pontos específicos, utiliza-se a função potência de espectro. Tal algoritmo possibilita a análise do comportamento em um ponto do corpo em função da frequência, facilitando a observação de fenômenos específicos. A figura 51 apresenta o comportamento encontrado. Foram ensaiadas para três rotações diferentes do motor do túnel de vento, 2400rpm, 3000rpm e 3600rpm.

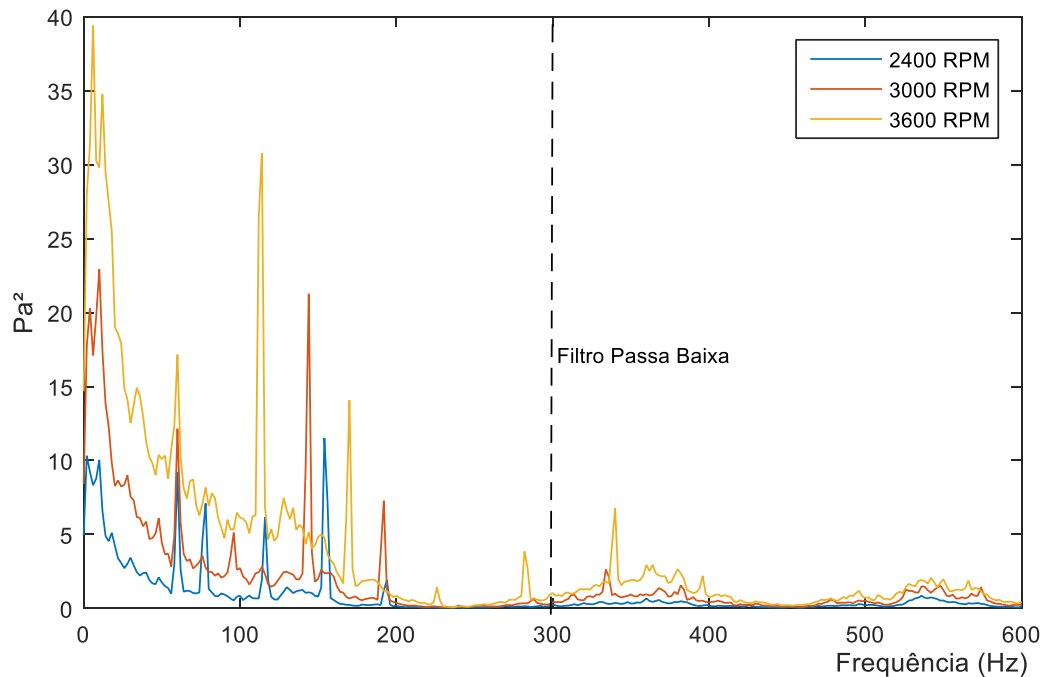


Figura 51 - Curva de potência do espectro FFT do ponto frontal. Corpo com rebaixo 90°, posição 0D.

O primeiro pico se apresenta na frequência de 60Hz. Este deve ser associado à instalação da rede elétrica do laboratório onde foi ensaiado. Em seguida é observado uma série de picos, que variam na frequência de acordo com a velocidade. Estes eventos representam a frequência de acontecimentos do problema. Esta frequência se mostra inversamente proporcional à velocidade do escoamento.

As frequências respectivas para cada velocidade foram de 154Hz, 144Hz e 114Hz. Os valores são associados à uma alta frequência de desprendimento de vórtices. Para se melhor analisar os valores obtidos, utilizou-se o valor adimensional para descrição de fluxos oscilantes, número de Strouhal, através da equação 10. Onde f é a frequência do evento, D a altura do corpo e U_m a velocidade relativa ao escoamento.

5 ANÁLISE DE DADOS

5.1 CÁLCULO DE ARRASTO DE FORMA POR INTEGRAÇÃO DE PRESSÃO

Como visto na literatura, o arrasto total em um corpo rombudo pode ser decomposto em arrasto de forma e arrasto de fricção. A porcentagem de cada arrasto é diretamente

proporcional à razão entre comprimento e altura do corpo para um corpo completamente retangular, sendo expressa através de um gráfico de dados históricos, figura 48 (White, 1999).

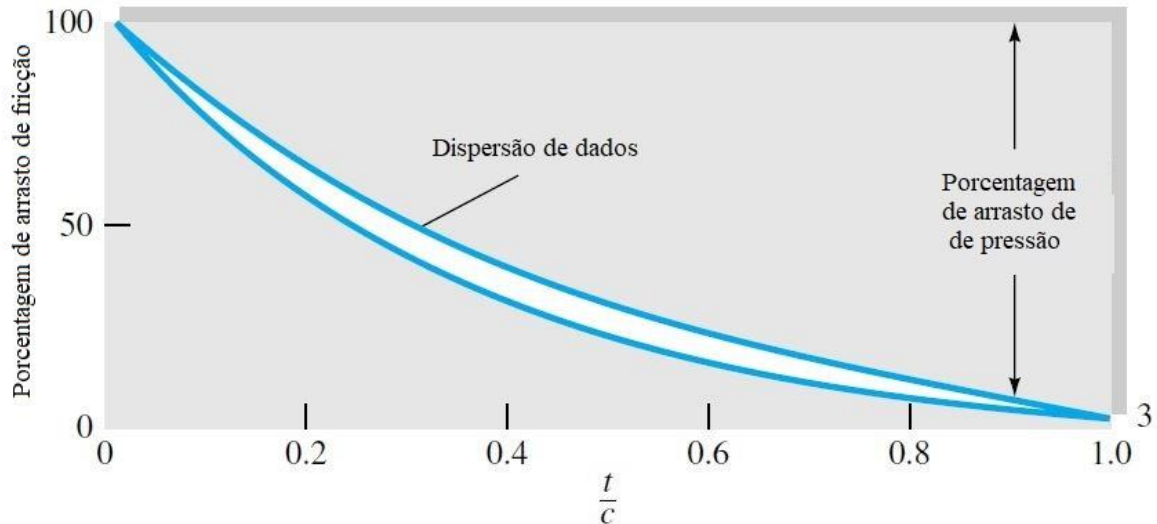


Figura 52 - Efeito da razão entre altura e comprimento na porcentagem de arrasto de fricção (White, 1999).

A figura 52 aborda valores para uma placa retangular perfeita, não sendo o caso exato analisado no trabalho. Para o corpo rombudo utilizado (corpo de Ahmed), através de aproximações, a relação entre altura e comprimento é de aproximadamente 0,3. Segundo o gráfico, a porcentagem do arrasto de forma é maior que 60% do arrasto total, sendo ponto majoritário na análise.

Partindo dos valores de pressão adquiridos através dos ensaios, é possível obter os valores nominais da força de arrasto exercida no escoamento do veículo. Considera-se que os pontos de pressão utilizados oferecem valores que podem ser considerados constantes ao longo da área do corpo. Assim, permite-se que o cálculo da força de arrasto total seja dado por uma integral do arrasto em função da pressão nas áreas representadas por cada tomada de pressão. A equação 11 permite a visualização da interpretação aplicada a um cilindro. Sendo R o raio, L o comprimento, P a pressão e θ o ângulo no qual o ponto analisado está.

$$F_D = - \int_0^{\pi} \Delta P(\theta) L R \cos(\theta) n d\theta \quad \text{Eq. 11}$$

A equação é baseada na premissa de que a força de arrasto de forma é causada devido a relação entre o fluido e a área da seção transversal exposta a ele, levando em consideração a angulação de tal área em relação ao vetor velocidade do escoamento. Para o

corpo de Ahmed é necessário utilizar uma aproximação e uma adaptação da relação mostrada na equação 12.

A parte frontal pode ser aproximada como meio cilindro para o cálculo, utilizando o equacionamento clássico, enquanto a parte posterior deve ser corrigida para um triângulo retângulo e um retângulo comum, que pode ser visto na equação 12, figura 53. Os pontos de pressão utilizados foram apenas os de locais que possuem área transversal. O diagrama de aproximação pode ser visto na figura 54.

$$F_D = - \int_S (P - P_\infty) L \cos(\theta) n dS \quad \text{Eq. 12}$$

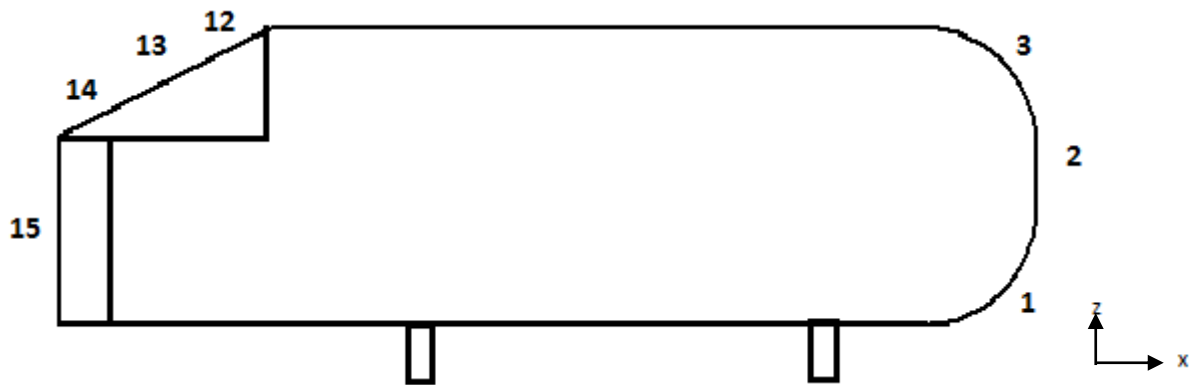


Figura 53 - Aproximações feitas para cálculo de arrasto, com pontos de pressão utilizados.

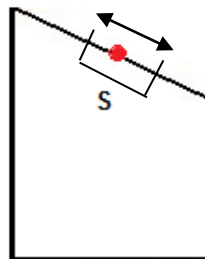


Figura 54 – Diagrama básico para equação 10.

Os dados obtidos de arrasto a partir da integração dos pontos de pressão podem ser observados na figura 55.

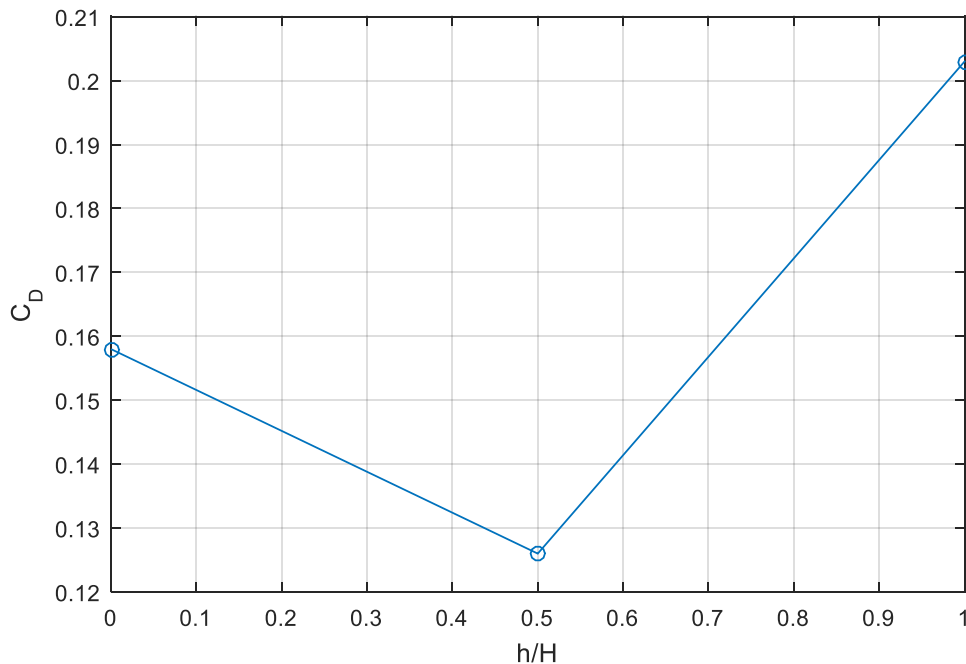


Figura 55 - Valores do coeficiente de arrasto para as posições 0mm, 25mm e 50mm.

É possível observar a tendência a se aumentar consideravelmente o arrasto envolvido no corpo de acordo com que se aproxima o mesmo aos extremos de posicionamento. Tais diferenças devem ser atribuídas ao perfil de escoamento do túnel, e a relação do escoamento com o solo. O arrasto próximo ao solo apresenta valor 16% menor que o da posição mediana, sendo ambos menores que o da posição $H=50\text{mm}$. Analisando as forças de arrasto de forma observados, a posição ótima de funcionamento para um veículo com tais características seria a de $H=0$.

A decisão de se escolher o posicionamento próximo ao solo se baseia na observação das figuras 55. O ponto próximo ao solo apresenta uma distribuição de pressão que causa menor tendência à desestabilização do veículo, ainda assim, produzindo um valor de arrasto total menor que o máximo (no ponto $H=50\text{mm}$).

Observou-se que como apresentado na introdução, se o corpo de Ahmed analisado se tratasse de um veículo de passeio real, poderia ser utilizado no ponto $H=25\text{mm}$, desde que adicionado de sistemas de estabilização modernos. O interesse de se colocar o veículo no ponto médio seria a diminuição do arrasto de forma, diminuindo assim, o consumo de combustível do mesmo.

Com os resultados obtidos através do ensaio de flutuação de pressão, foi possível determinar a relação entre os rebaixos e o arrasto gerado, visto na figura 56.

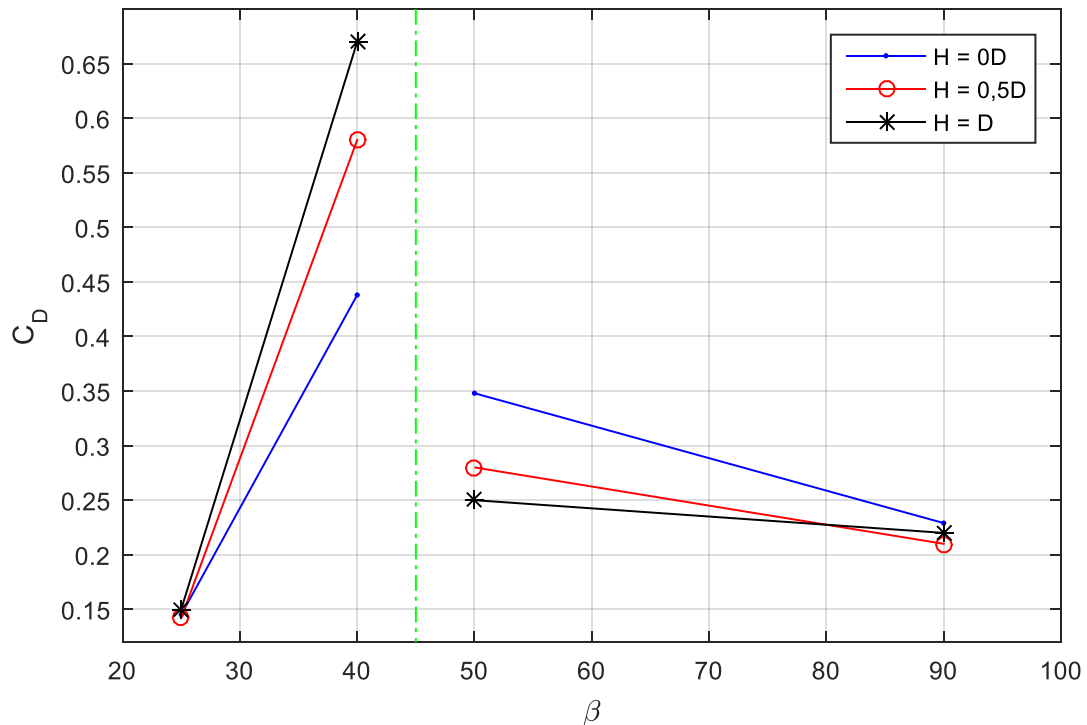


Figura 56 - Valores de coeficiente de arrasto para os ângulos de rebaixo 25°, 40°, 50° e 90° nas posições 0D, 0,5D e D.

Na figura 56 é possível perceber o mínimo no rebaixo 25°. Foi observado uma leve discrepância nos valores de coeficiente de arrasto para 25°, quando comparado com os resultados obtidos a partir do ensaio de pressão estática.

A discrepância apresentada, apesar de leve deve ser relacionada com a diferença entre os corpos utilizados. O corpo concebido para o segundo experimento apresentava melhor acabamento.

O gráfico da figura 56 apresenta mínimos de arrasto nos pontos 25° e 90°, sendo os máximos em 40° e 50°. Tais conclusões se mostram de acordo com as observadas nos experimentos de Ahmed (1983) e Morel (1979). As diferenças de valores encontrados, deve ser relacionado à instrumentação utilizada, e à adição do arrasto de forma. Principalmente pelo fato dos mesmos realizarem ensaios com corpos 3D.

A relação do consumo de combustível de um veículo de uso comum se deve a diversos fatores, entre eles a aerodinâmica do perfil rombudo de acordo com Hucho Et. Al. (1987). Tal influência pode ser observada nos resultados obtidos. Veículos que apresentarem características de rebaixo traseiro com angulação próximas a 40°, enfrentarão maiores efeitos negativos de arrasto, consumindo assim, mais combustível.

É importante destacar que veículos com maior tecnologia agregada, utilizam de sistemas passivos para a diminuição do arrasto gerado por características de seu perfil. Como é observado por Thacker (2012) e Bruneau (2010), algumas alterações simples na geometria do rebaixo, trazem a diminuição do arrasto agregado às angulações citadas. Tais controles passivos podem ser o arredondamento dos cantos vivos do rebaixo ou a adição de superfícies conhecidas como “*spoilers*”.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Os objetivos inicialmente propostos para este trabalho, eram de avaliar a distribuição de pressão em um corpo de Ahmed 2-D, de forma experimental, variando-se sua posição em relação ao solo para diferentes rebaixos traseiros (25°, 40°, 50° e 90°). Em seguida, a proposta objetivava a comparação dos dados com a literatura e avaliação em situações práticas, além do cálculo de arrasto de forma no corpo.

Nos estudos de corpos rombudos genéricos, como o corpo de Ahmed, é necessário se ressaltar a importância da análise geométrica, de forma a se manter as proporções necessárias. As condições de simulação devem ser observadas quanto ao posicionamento, tanto em situações de ensaio numérico quanto experimental, de forma a não se perder informações.

Os resultados de pressão estática obtidos apresentaram boa concordância com a literatura avaliada. Os valores de coeficiente de pressão observados no trabalho de Khalil (2001), apresentaram a mesma ordem de grandeza e distribuição gráfica.

Os resultados da flutuação de pressão em torno do corpo, utilizando o transdutor de pressão, apresentaram discrepância dos dados apresentados por Khalil (2001) e Ahmed (1983) apenas nos pontos de tomada frontal. Esta discrepância é associada ao equipamento utilizado, como observado nas análises FFT feitas nos pontos em questão.

Os valores de coeficiente de arrasto encontrados possuem valores próximos aos propostos no trabalho de Morel (1979), para mesmo rebaixo. Para rebaixos variados obteve-se uma distribuição gráfica esperada, porém levemente discrepante nos valores pontuais devido às diferenças no método de cálculo de arrasto.

É importante observar que valores de arrasto para o corpo de Ahmed não podem ser comparados com veículos de uso comum. Tais automóveis possuem retrovisores, detalhes na carroceria, espaços abertos e itens expostos, fatos que acarretam o aumento do arrasto e torna mais complexa a análise.

Através de resultados observados é possível se associar a variação do ângulo de rebaixo traseiro de um veículo ao seu arrasto gerado. Desta forma, automóveis de passeio com características próximas, tendem a apresentar maior eficiência quando possuem geometria dentro dos ângulos de rebaixo geradores de mínimo arrasto (25° ou 90°).

7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Ao longo do estudo de artigos de simulações experimentais e numéricas envolvendo o tema corpo de Ahmed, algumas propostas de trabalhos futuros foram desenvolvidas. As propostas foram divididas em três áreas diferentes de pesquisas envolvendo corpos rombudos.

Ahmed (1983), Korkichko Et. Al. (2006) entre outros, utilizam juntamente da abordagem experimental e numérica para avaliação de forças, as técnicas de visualização. As propostas apesar de diferentes têm como objetivo a observação do escoamento em corpos de Ahmed 3D, figura 57. A principal característica analisada por tais autores neste tipo de estudo é o padrão de escoamento da parte traseira.

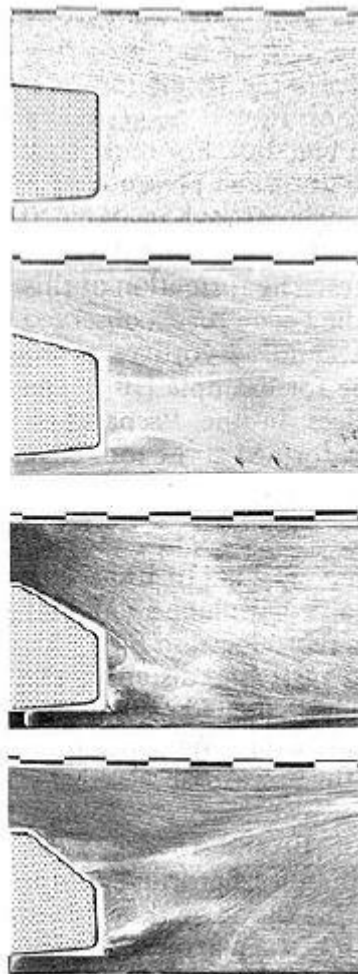


Figura 57 - Experimento de visualização de escoamento em túnel de vento. Ahmed (1983)

Joseph (2011), apresentam um estudo da distribuição de pressão e da atuação das forças aerodinâmicas em corpos de Ahmed 3D. As propostas experimentais para este tipo de estudo necessitam do desenvolvimento de balanças de extensômetros a serem instaladas dentro do túnel de vento, figura 58. Este tipo de estudo permite a aquisição com precisão das forças de arrasto, sustentação e momento associadas a diferentes rebaixos traseiros de corpos rombudos.

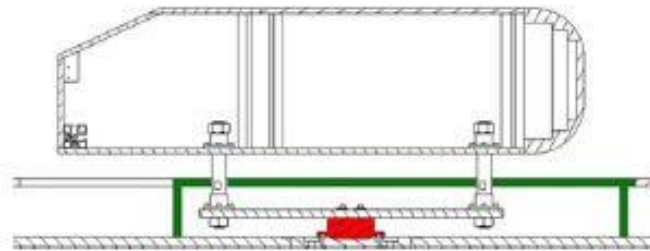


Figura 58 - Sistema de medição de forças aerodinâmicas em corpos 3D. Joseph (2011)

Bruneau (2010) explora de maneira diferente a análise do arrasto envolvido no corpo rombudo de Ahmed. A proposta utiliza técnica de anemometria de fio quente para a obtenção do número de Strouhal em função do tempo no rebaixo traseiro. O autor em seguida compara os resultados em transformadas FFT obtidos com o arrasto total do corpo em função do tempo, associando de forma direta a frequência de desprendimentos e o desenvolvimento de arrasto no corpo.

Uma das formas de extensão do estudo e que apresenta maior possibilidade de aplicação prática é abordada por Thacker (2012), Han (1989) e Morel (1979). Os autores utilizam experimentos com corpo de Ahmed 3-D para desenvolver e propor sistemas ativos e passivos de diminuição de arrasto. Os ensaios seguem comparando os resultados entre diferentes sistemas de controle, de forma a determinar os mais eficientes.

8. ANEXOS

O cálculo do erro associado ao coeficiente de pressão nas figuras 33 a 46 foi realizado de acordo com a equação 13.

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\partial X_i}{\partial Y_i} + \delta Y_i} \quad \text{Eq. 13}$$

Os erros envolvidos nas figuras 33 a 36 foram o erro do multímetro da leitura de dados no mapeamento do túnel de vento e da leitura de dados dos valores de tomada de pressão do corpo de Ahmed.

$$\delta P = \sqrt{2 \left(\frac{\partial P}{\partial V} \delta V \right)^2}$$

$$\delta P = \sqrt{2(0,44)^2}$$

$$\delta P = 0,630$$

Aplicando a equação 5 para adimensionalizar o erro:

$$\delta C_p = 0,159$$

Os erros considerados nas figuras 37 a 46 a foram o da placa de aquisição, o do multímetro usado para leitura de dados no mapeamento do túnel de vento e o da sensibilidade do transdutor. Considerando que $1\text{mV} = 22,465 \text{ Pa}$. Aplicado à equação 11, os cálculos são vistos abaixo.

$$\delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial Pa} \delta Pa \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V_m} \delta V_m \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V_T} \delta V_T \right)^2}$$

$$\delta P = \sqrt{(0,0134)^2 + (0,44)^2 + (0,0445)^2}$$

$$\delta P = 0,623Pa$$

Utilizando a equação 5 para adimensionalizar o erro:

$$\delta C_p = 0,158$$

9.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Syed R. Ahmed. **Wake structure of typical automobile shapes.** J. Fluids Eng. Vol. 103, 1981.
- Wolf-Heindrich Hucho, **Aerodynamics of Road Vehicles.** Vol.1, Ed. 2, Elsevier Ltd., 1987, páginas 398 – 436.
- Karl E. Ludvigsen. **The Time Tunnel – An Historical Surve of Automotive Aerodynamics.** Mobility Systems Co., SAE Paper n. 70035.,1970.
- P. W. Bearman, **Some Observations on Road Vehicle Wakes.** Dept. of Aeronautics Imperial College. SAE Paper n. 84301, 1985.
- Saleh Barbosa Khalil. **Estudo de escoamento em torno de um corpo rombudo bidimensional.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2001.
- Thomas Morel. **Aerodynamic Drag Bluff Bod Shapes Characteristic of Hatch-Back Cars.** General Motors Research Labs, SAE Paper n. 780267, 1979.
- Ivan Korkischko, Julio Romano Meneghini. **Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed.** Dissertação (Graduação), Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2006.
- Charles-Henri Bruneau, Emmanue Creuse, Delphine Depeyras, Patrick Gilliéron, Iraj Mortazavi. **Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body.** Elsevier journal Ltd, Computers and Fluids, 2010.
- Bruna Pretti Casotti, Marcelo Goldenstein. **Panorama do setor automotivo: as mudanças estruturais das indústrias e as perspectivas para o Brasil.** Jornal BNDES Governo Federal do Brasil n. 28, Biblioteca Digital, 2009.
- Geraldo Claret Plauska, Vitorvani Soares. **Experimento e aprendizagem: Uma aula introdutória à mecânica dos fluidos.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Rio de Janeiro, 2013.
- K. V. S. Pavan. **CFD modelling of flow around Ahmed Body.** Institute of technology Hyderabad, CD-adapco Bangalore, 2012.
- K. Gasjevic, G, Aguilar, E. F. Matthys. **On two distinct types of drag-reducing fluids, diameter, and turbulent profiles.** Department of Mechanical and Environmental Engineering, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Elsevier Ltd., Aug. 2000.

John D. Anderson Jr. **Introduction to Flight**. 3^a Ed., McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 1989, pag 178 – 229.

Frank M White. **Fluid Mechanics**. 4^a Ed. WC/McGraw-Hill, 1999, pag. 451 – 456.

Thacker. **Effects of Suppressing the 3D separation on the rear slant on the flow structures around an Ahmed body**. Elsevier journal Ltd, Computers and Fluids, 2012., pag. 237 – 243.

Joseph Pierric. **Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference body using pulsed jets**. Springer-Verlag, 2011

Dolir Jose Climaco Varela. **Análise Experimental do Escoamento ao Redor do Corpo de Ahmed**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2016