

RODRIGO VICENTE CRUZ

VITOR HUGO QUEIROZ DE CARVALHO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO
AERODINÂMICO DE UM MODELO AUTOMOTIVO
PADRÃO EM DERRAPAGEM COM A INSERÇÃO DE
UM CILINDRO SOBRE A LATERAL DO CORPO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2018

RODRIGO VICENTE CRUZ

VITOR HUGO QUEIROZ DE CARVALHO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE
UM MODELO AUTOMOTIVO PADRÃO EM DERRAPAGEM COM A
INSERÇÃO DE UM CILINDRO SOBRE A LATERAL DO CORPO**

Projeto de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de graduação em
Engenharia Aeronáutica da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
**BACHAREL em ENGENHARIA
AERONÁUTICA.**

Orientador: João Marcelo Vedovoto

UBERLÂNDIA – MG

2018

RODRIGO VICENTE CRUZ

VITOR HUGO QUEIROZ DE CARVALHO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE UM
MODELO AUTOMOTIVO PADRÃO EM DERRAPAGEM COM A INSERÇÃO DE
UM CILINDRO SOBRE A LATERAL DO CORPO**

Projeto de conclusão de curso **APROVADO**
pelo Colegiado do Curso de Graduação em
Engenharia Aeronáutica da Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Marcelo Vedovoto
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Odenir de Almeida
Universidade Federal de Uberlândia

Msc. Eng. Pedro Ricardo Corrêa Souza
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2018

...sempre aos nossos pais

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, Julice e Avenor, Rosângela e Nildomar, pelo apoio constante e inabalável, por confiarem na nossa capacidade e serem fonte de motivação. Aos nossos irmãos, João Pedro e Nildomar Júnior, pelos exemplos de dedicação. Aos demais familiares, por sempre estarem ao nosso lado, não importando a distância.

Ao nosso orientador da fase de pesquisa, Prof. Dr. Jacques Borée (ISAE-ENSMA) pela oportunidade oferecida, pelo conhecimento deslumbrante compartilhado e sua dedicação. Ao meu orientador da fase de redação, Prof. Dr. João Marcelo Vedovoto por seus conselhos e disponibilidade.

Aos nossos professores, que contribuíram muito para o crescimento técnico e meu amadurecimento, tanto pessoal, quanto profissional.

Aos nossos amigos, sempre companheiros e que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e à École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechniques.

CRUZ, R. V.; CARVALHO, V. H. Q. **Estudo experimental do desempenho aerodinâmico de um modelo automotivo padrão em derrapagem com a inserção de um cilindro sobre a lateral do corpo.** 2018. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo determinar os ganhos de desempenho que se pode obter com a inserção de um cilindro, como perturbação do escoamento, na lateral exposta ao vento de um veículo *hatch* em derrapagem. Todo o trabalho foi baseado em ensaios experimentais de visualização, medição de esforços e também da pressão estática na traseira do modelo. Os estudos foram iniciados a partir dos ensaios de visualização com o intuito de compreender melhor os fenômenos ao nível parietal e orientar o início dos ensaios de esforços subsequentes. Assim, os parâmetros de desempenho foram determinados a partir das medidas de esforços com o uso de uma balança aerodinâmica e os ensaios de pressão foram realizados para auxiliar a compreensão dos resultados encontrados sem que se fosse necessário utilizar técnicas de visualização de escoamento mais avançadas.

Palavras Chave: *desempenho aerodinâmico de veículos em derrapagem, aerodinâmica veicular experimental, ganho de desempenho em aerodinâmica veicular*

CRUZ, R. V.; CARVALHO, V. H. Q. **Experimental investigation of the aerodynamic performance of a standard automotive model in crosswind condition with an additional cylinder fixed on its side.** 2018. 37f. Graduation Project - Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG, Brazil.

ABSTRACT

The present work was aimed at the definition of the gains in performance of a vehicle in crosswind conditions with an additional cylinder installed on its side, influencing the boundary layer and the recirculation bubble dynamics in the downstream region by means of perturbations. The work, including all its contents, is based on experimental investigations operated by applying three different approaches: flow visualization, efforts measure supported by a wind-tunnel balance and wall pressure evaluation accomplished through static pressure sensors installed in the back of the model. Initially, the flow visualizations have been investigated to get informations on the near-wall region and orientate the further tests accordingly. Thus, the performance parameters have been determined applying the measures of the wind-tunnel balance, and the pressure measurements have been taken to assist the understanding of the achieved results without the employment of more sophisticated visualization techniques.

Keywords: *automotive aerodynamics performance, experimental automotive aerodynamics, gain of performance in automotive aerodynamics.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – “ <i>La jamais contente</i> ” automóvel que quebrou o recorde de 100 km/h em 1899 [Referência: http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/]	1
Figura 2 – Mapa da velocidade média dos ventos no Brasil. [Referência: https://www.electronica-pt.com/velocidade-vento/].....	4
Figura 3 - Geometria de um corpo padrão de Ahmed <i>hatch</i> . (EULALIE, 2014).....	5
Figura 4 - Distribuição do coeficiente de pressão nos planos de simetria (à esquerda) e horizontal à metade da altura da traseira. (EULALIE, 2014).....	6
Figura 5 - Distribuição do coeficiente de pressão superficial na traseira do veículo. (EULALIE, 2014).....	7
Figura 6 - Vetores de velocidade médios projetados em plano após a bolha de recirculação mostrando as duas estruturas médias contra rotativas longitudinais se desenvolvendo à jusante da bolha de recirculação. (EULALIE, 2014).....	7
Figura 7 - Padrão dos vórtices quando o veículo está submetido a uma rajada lateral. (Volpe, Ferrand, Da Silva, & Le Moyne, 2014).....	8
Figura 8 - Ilustração do túnel de vento com a seção de ensaios destacada em vermelho.	11
Figura 9 - Maquete de ensaios em CAD.....	12
Figura 10 - Vista lateral da maquete em CAD com as cotas de altura e comprimento.	12
Figura 11 - Vista superior da maquete em CAD com a cota de largura.....	13
Figura 12 - Ilustração da distribuição das tomadas de pressão na traseira da maquete.....	13
Figura 13 - Modelo da montagem do aparato de ensaio em CAD com o sistema de eixos.	14
Figura 14 - Montagem do sistema de ensaios no túnel de vento com nível para alinhamento da incidência antes do ensaio.	15
Figura 15 - Constatação do desalinhamento do sistema de posicionamento da maquete e verificação do efeito sobre o escoamento parietal.....	16
Figura 16 - Montagem do cilindro na maquete feita em CAD.....	17
Figura 17 - Fixação do cilindro.	17
Figura 18 - Representação dos 6 esforços medidos pela balança: forças nos três eixos e momento em torno dos três eixos.	19

Figura 19 - Ensaio de visualização para estudo dos fenômenos de descolamento, recolamento e transição da camada limite perturbada pelo cilindro.	22
Figura 20 - Sistema de referência adotado para os sentidos positivo e negativo de rotação da mesa giratória na seção de ensaio.	24
Figura 21 - Esquema das configurações iniciais ensaiadas em túnel de vento: (a) Sem cilindro; (b) com cilindro posicionado à 0 mm da traseira; (c) com cilindro posicionado à 40 mm da traseira; (d) com cilindro posicionado à 130 mm da traseira.	25
Figura 22 - Exemplificação de forças atuantes no cilindro devido ao escoamento incidente. .	26
Figura 23 - Coeficiente de Arrasto do veículo para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.	27
Figura 24 - Comparação da variação de CD entre a configuração limpa e com cilindro posicionado à 40 mm.	28
Figura 25 - Visualização do turbilhão remontante acentuado pela presença do cilindro/obstáculo sobre a lateral do veículo.	29
Figura 26 - Coeficiente de Sustentação na traseira do veículo para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.	30
Figura 27 – Momento N em torno do eixo z para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.	31
Figura 28 - Contornos de pressão estática na face traseira da maquete sem cilindro (esquerda) e com cilindro a 40 mm (direita), para $\beta=[0^\circ;2^\circ;5^\circ]$ de cima para baixo, respectivamente. Os eixos dos gráficos estão em milímetros.	33
Figura 29 - Resultados da evolução do arrasto em função do ângulo de guinada β para diferentes posicionamentos do cilindro na segunda fase de ensaios.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias de recolamento e transição da camada limite perturbada pelo cilindro. 23

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{F}_x	Força na direção \vec{x}
\vec{F}_y	Força na direção \vec{y}
\vec{F}_z	Força na direção \vec{z}
\vec{L}	Momento em torno do eixo \vec{x}
\vec{M}	Momento em torno do eixo \vec{y}
\vec{N}	Momento em torno do eixo \vec{z}
C_D	Coefficiente de arrasto total do veículo
$C_{L_{back}}$	Coefficiente de sustentação na traseira do veículo
C_p	Coefficiente de pressão
p_∞	Pressão ambiente [Pa]
ρ	Massa específica do ar [kg/m ³]
V_∞	Velocidade de campo livre do escoamento [m/s]
β	Ângulo de guinada/derrapagem do veículo [°]
$\Delta\beta$	Varição do ângulo de guinada para os ensaios em túnel de vento [°]

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
CAPÍTULO I.....	1
1.1. Aerodinâmica veicular.....	1
1.2. Objetivo e descrição do trabalho	3
1.4. Justificativa do tema	3
CAPÍTULO II.....	5
CAPÍTULO III	10
3.1. O túnel de vento.....	10
3.2. A maquete de ensaios	11
3.3. Posicionamento e alinhamento do sistema	14
3.4. Escolha e montagem do cilindro no modelo	16
3.5. Instrumentação e procedimentos experimentais.....	17
3.5.1. Visualização parietal.....	18
3.5.2. Medição dos esforços	19
3.5.3. Medição da pressão flutuante	20
CAPÍTULO IV	21
4.1. Avaliação a partir dos ensaios de visualização.....	21
4.1.1. Estudo dos fenômenos de descolamento e recolamento da camada limite	21

4.2. Primeira fase de ensaios com a balança aerodinâmica	23
Coeficiente de Arrasto - CD	25
Sustentação Traseira - CL_{back}	28
Momento de Guinada N (em torno de z)	30
4.3. Avaliação a partir da pressão	31
4.4. Segunda fase de ensaios com a balança aerodinâmica	34
CAPÍTULO V	36
Referências Bibliográficas.....	37

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Aerodinâmica veicular

Os estudos de aerodinâmica automobilística se iniciaram no século XIX, logo após o surgimento dos primeiros veículos, visando a redução do arrasto para atingir velocidades mais elevadas. Como ainda acontece nos dias de hoje, a aerodinâmica veicular era muito explorada por pilotos, que buscavam a todo tempo quebrar recordes de velocidade. Em 1899, um automóvel batizado como *La jamais contente* (“O jamais satisfeito”) (Figura 1), superou a marca dos 100km/h utilizando uma forma aerodinâmica já bem avançada para a época.



Figura 1 – “*La jamais contente*” automóvel que quebrou o recorde de 100 km/h em 1899 [Referência: <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/>]

No entanto, com o passar do tempo, novos obstáculos relacionados a aerodinâmica veicular foram sendo descobertos. Com o aumento da velocidade, problemas de estabilidade foram surgindo. O conforto foi se tornando cada vez mais importante comercialmente, trazendo à tona a problemática de aeroacústica. Devido ao efeito estufa e demais questões ligadas à emissão de poluentes na atmosfera, a redução do arrasto passou a ter como objetivo principal não mais o aumento da velocidade, e sim a redução do consumo. Logo, como consequência de todo esse desenvolvimento, a aerodinâmica se tornou parte fundamental de um projeto automobilístico de sucesso.

O escoamento em torno de um automóvel é classificado como complexo, tridimensional e turbulento. Atualmente, simulações numéricas e ensaios experimentais são os meios utilizados para se estudar esse escoamento. Quando simulações numéricas são escolhidas, a modelagem RANS é a preferida devido às dimensões do problema, que encarecem muito as demais opções de simulação. Já quando ensaios experimentais são preferidos, deve-se escolher a escala que será utilizada no estudo. A escala real é mais precisa devido à impossibilidade de reprodução de pequenos detalhes em maquetes pequenas, mas necessariamente mais cara também em função das dimensões do problema.

Para facilitar os estudos, o escoamento em torno de um automóvel é comumente segmentado em função da problemática que envolve cada região do veículo. Assim, temos as seguintes divisões e os principais pontos a serem avaliados acerca de cada uma delas:

- Frontal: pontos de estagnação, força de sustentação;
- Lateral e teto: força de sustentação, momento lateral e força de arrasto;
- Sob o veículo: forças de sustentação e arrasto;
- Traseiro: momento lateral e bolha de circulação (arrasto).

Apesar dessa divisão, sabe-se que esses quatro escoamentos estão correlacionados e uma pequena alteração na geometria de um veículo pode afetar todo o escoamento ao redor do veículo.

Outro fator que altera globalmente o escoamento em torno de um veículo é a direção do vento relativo. Um veículo simétrico alinhado com o vento relativo terá um escoamento também simétrico quando analisado a partir de uma média temporal. No entanto, o mesmo veículo

submetido a um vento “desalinhado” apresentará um escoamento completamente diferente e assimétrico. Essa condição de vento de través ilustra bem situações cotidianas experimentadas em rodovias, em que o automóvel se encontra em alta velocidade e é, frequentemente, submetido a um vento lateral mais intenso.

O projeto aerodinâmico dos automóveis atuais leva em conta, principalmente, o seu desempenho em condição de atmosfera calma, ou seja, a única componente do vento relativo é dada pela velocidade do veículo. No entanto, sabe-se que esta é uma condição pouco experimentada na prática e que os ventos laterais possuem um impacto significativo sobre o desempenho de automóveis.

1.2. Objetivo e descrição do trabalho

Definiu-se como objetivo deste trabalho a avaliação experimental de um modelo *hatch* de traseira reta submetido a um vento de través, visando reduzir seu arrasto e contribuir para a sua estabilidade a partir do acoplamento de um cilindro na lateral do modelo.

Com a inserção de um cilindro na lateral do veículo exposta ao vento de través, esperava-se inserir energia na camada limite antes do descolamento na traseira. Com isso, pretendia-se a alterar a dinâmica turbilhonar da bolha de recirculação que se desenvolve na esteira do veículo de maneira a reduzir as flutuações de pressão estática superficial na traseira. Para tanto, diferentes posições do cilindro foram testadas.

O trabalho está disposto em 5 capítulos. Após a introdução, será realizada uma revisão bibliográfica, no segundo capítulo, apresentando os estudos que já foram conduzidos sobre esse tema. No terceiro capítulo, serão descritos os ensaios e a metodologia utilizada. Já o quarto capítulo apresentará os resultados encontrados e as avaliações realizadas. Por fim, serão feitas as conclusões no quinto capítulo.

1.4. Justificativa do tema

Com o agravamento dos problemas climáticos decorrentes da poluição atmosférica, os requisitos de emissões são cada vez mais rigorosos e as montadoras de veículos têm se preocupado cada vez mais com a redução do consumo de combustível. Mesmo com o desenvolvimento dos motores elétricos, a redução do arrasto dos veículos representa a redução do consumo de energia elétrica, que por sua vez, também tem sua produção associada a problemas ambientais, além de contribuir para a autonomia do veículo.

Em 1998, um estudo realizado pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica, elaborou um mapa da velocidade média dos ventos no Brasil, mostrado na Figura 2. Ao avaliar o impacto dos ventos de través, chega-se à conclusão de que um vento lateral/perpendicular (caso de condição extrema) de 5m/s aplica sobre um veículo a 110km/h um ângulo de derrapagem aerodinâmica de quase 10°. Logo, a partir das velocidades apresentadas na Figura 2, pode-se concluir que a condição de derrapagem é a mais pertinente para se estudar o arrasto e demais parâmetros de desempenho de um veículo em situações cotidianas.

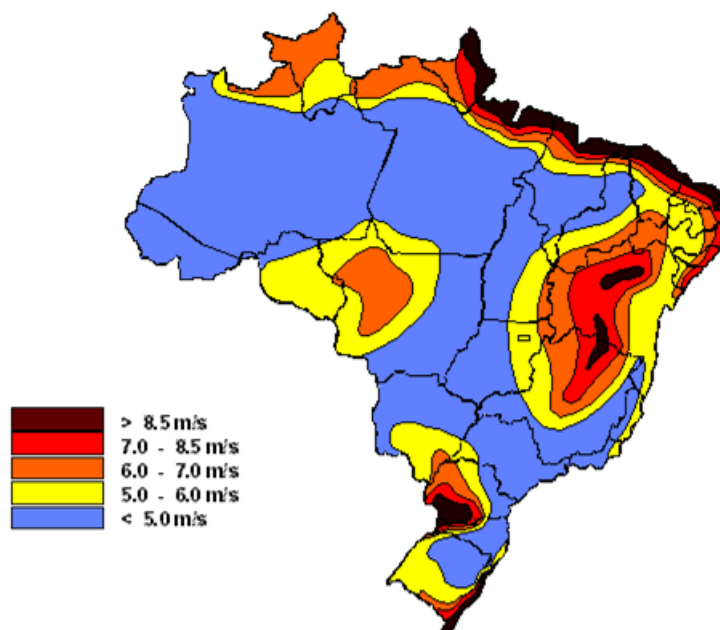


Figura 2 – Mapa da velocidade média dos ventos no Brasil. [Referência: <https://www.electronica-pt.com/velocidade-vento/>].

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentro do contexto de redução de emissão de gases poluentes que agravam o efeito estufa e do aumento de desempenho de veículos, vários autores ao redor do mundo tem se dedicado a estudos de redução do arrasto de veículos em variadas condições de operação. Dentre eles, pode-se citar (Leclerc, 2008) que dedicou seus esforços ao estudo de um controle ativo da dinâmica turbilhonar à jusante de veículos de passeio. A partir desse estudo, o autor concluiu que o controle do escoamento a partir da inserção de um jato de ar no bordo de fuga do veículo, pode reduzir seu arrasto e também o nível de ruído interno.

Um pouco depois, (Eulalie, 2014) analisou soluções de controle que permitiriam a redução do arrasto aerodinâmico e conseqüentemente do consumo de veículos de traseira reta. Para tal, um estudo numérico sobre um Corpo de Ahmed segundo a apresentada na Figura 3 foi utilizada.

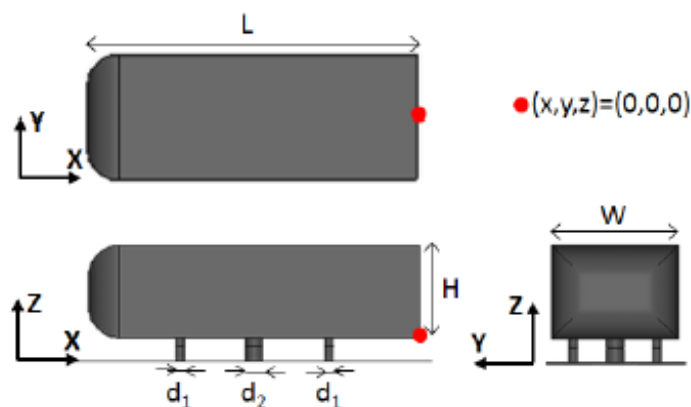


Figura 3 - Geometria de um corpo padrão de Ahmed *hatch*. (Eulalie, 2014)

Seu trabalho foi dividido em duas etapas: em um primeiro momento focou-se na validação da metodologia numérica confrontando-se os resultados obtidos via Simulação a Grandes Escalas (*LES*) com dados experimentais obtidos em ensaios anteriores; passada esta fase de validação, o estudo numérico avança para a segunda fase estudando os efeitos sobre a distribuição de pressão e a dinâmica dos turbilhões na traseira do veículo quando inseridos diferentes métodos de controle de escoamento (por exemplo, geradores de vórtice posicionados sobre o teto do veículo, ligeiramente à montante do ponto de deslocamento).

Os resultados numéricos da primeira fase do estudo permitiram mapear os turbilhões e a dinâmica à jusante da traseira. As análises foram realizadas tanto no plano Z quanto no plano Y (utilizando-se o mesmo sistema de referência de eixos da Figura 3). Na Figura 4 são apresentados os contornos do coeficiente de pressão nos planos de simetria (figura à esquerda, plano Y) e em um plano à metade da altura da traseira (figura à direita, plano Z). Em ambas é possível visualizar a estrutura toroidal tridimensional que se desenvolve à jusante da traseira, a bolha de recirculação. Nota-se ainda que no plano de simetria, os turbilhões não apresentam uma configuração simétrica (resultado de um movimento flutuante à baixa frequência (Wassen, Eichinger, & Thiele, 2010)); já no plano Z, um padrão quase simétrico é visível. Este turbilhão contra rotativo toroidal é o responsável pela distribuição de pressão característica obtida na Figura 5.

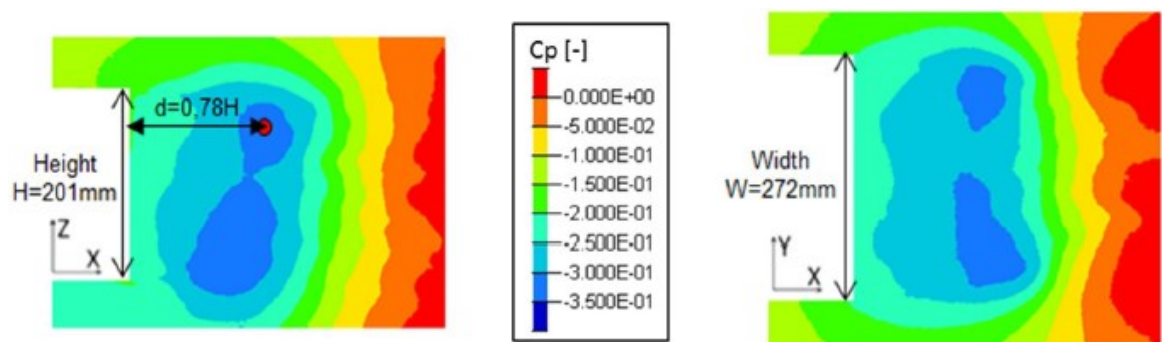


Figura 4 - Distribuição do coeficiente de pressão nos planos de simetria (à esquerda) e horizontal à metade da altura da traseira. (Eulalie, 2014)

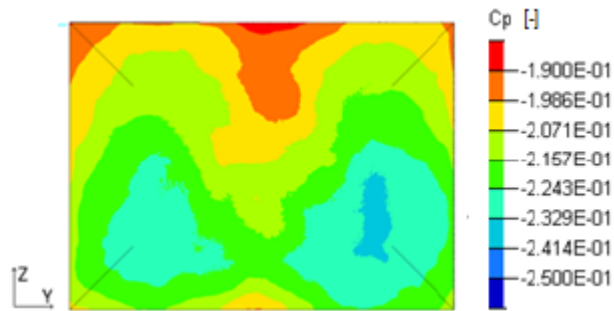


Figura 5 - Distribuição do coeficiente de pressão superficial na traseira do veículo. (Eulalie, 2014)

A visualização dos vetores de velocidade em um plano à jusante da bolha de recirculação, colocam em evidência a segunda estrutura característica desta configuração de escoamento; na Figura 6, dois turbilhões contra rotativos de característica bidimensional se propagam por uma distância considerável após a zona de interação da bolha de recirculação com a traseira do veículo.

Os resultados da fase final de seu estudo, para análise da redução de arrasto proporcionada pela inserção de dispositivos de controle do escoamento mostraram uma redução de até 10% sobre o valor do arrasto aerodinâmico.

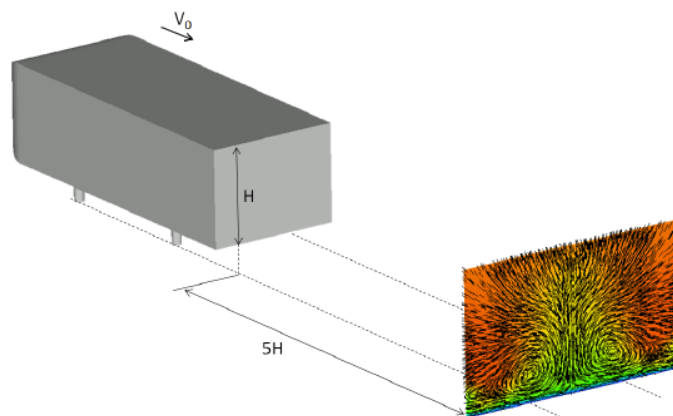


Figura 6 - Vetores de velocidade médios projetados em plano após a bolha de recirculação mostrando as duas estruturas médias contra rotativas longitudinais se desenvolvendo à jusante da bolha de recirculação. (Eulalie, 2014)

Através de seu trabalho, (Eulalie, 2014) mostrou ainda que para um corpo padrão de Ahmed, a distribuição de pressão sobre a traseira do veículo chega a ser responsável, sozinha, por até 80% do arrasto aerodinâmico do veículo. Ainda que a geometria aqui estudada não seja a de um corpo padrão de Ahmed, (Roumeas, Gilliéron, & Kourta, 2009) mostrou em seu estudo numérico que a maneira segundo a qual se desenvolve o escoamento à jusante do corpo de Ahmed de traseira reta está ligado principalmente aos descolamentos massivos ligados à traseira. Isso permite dizer que o estudo por ele desenvolvido se aplica igualmente a inúmeros veículos de geometria similar, incluindo a geometria analisada neste texto.

Ainda no mesmo ano, (Volpe, Ferrand, Da Silva, & Le Moyne, 2014) também desenvolveu suas análises sobre um corpo padrão de Ahmed, mas em uma situação de derrapagem. O foco deste estudo foi sobre os esforços aerodinâmicos que podem aparecer sobre o corpo e as alterações sobre a dinâmica típica do escoamento bem descrita por (Eulalie, 2014) quando o veículo é submetido a uma rajada lateral. As análises foram conduzidas experimentalmente em túnel de vento utilizando-se uma balança aerodinâmica para medida da força de arrasto e PIV para obtenção do campo de velocidade.

Os resultados mostraram que as flutuações medidas pela balança são reflexo do desbalanço de pressão entre a lateral exposta ao vento lateral incidente e o lado oposto; estes esforços representam ainda uma condição perigosa para o condutor e passageiros uma vez que o veículo pode mesmo ser desviado de sua trajetória original graças à ação de uma força lateral e/ou alterações no momento de guinada. A Figura 7 deixa evidente como a rajada lateral pode alterar a dinâmica turbilhonar característica deste tipo de escoamento.

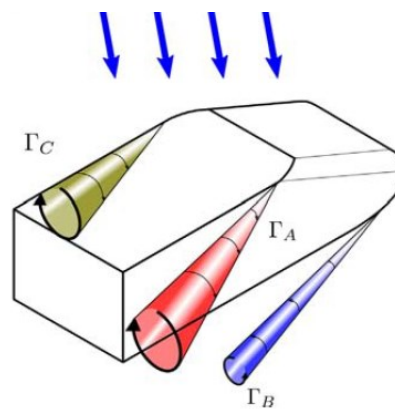


Figura 7 - Padrão dos vórtices quando o veículo está submetido a uma rajada lateral. (Volpe, Ferrand, Da Silva, & Le Moyne, 2014)

Portanto, as referências aqui apresentadas não só motivam o presente estudo, como fornecem base importante para sua realização e serão devidamente citadas ao longo do presente trabalho para justificar algumas escolhas e conclusões realizadas.

CAPÍTULO III

MODELO EXPERIMENTAL

3.1. O túnel de vento

Os ensaios experimentais deste trabalho foram realizados na École National Supérieure de Mécanique et d'Aérotechniques (ENSMA – Poitiers/FR) no túnel de vento de circuito fechado *S BOIS* (*Soufflerie à retour S BOIS*). Sua construção em madeira, como sugere o nome, data dos anos 1942-1943. Seu grupo moto propulsor é composto por um motor elétrico Leroy Somer, capaz de fornecer 96 kW de potência com suas 10 pás.

As principais características deste túnel de vento são:

- Tipo: circuito fechado;
- Velocidade máxima: 90 m/s (subsônico) - $Re = \frac{1,225 \cdot 30 \cdot 0,13}{1,75 \cdot 10^{-5}} = 2,73 \cdot 10^5$
- Seção de ensaios octogonal com 1,2 m² de seção, com distância entre faces opostas de 1,2 m e 2,55 m de comprimento;
- Baixa taxa de turbulência: < 0,2%;
- Baixa razão de bloqueio: ~5%

A Figura 8 apresenta uma ilustração deste túnel de vento com a seção de ensaios destacada em vermelho.

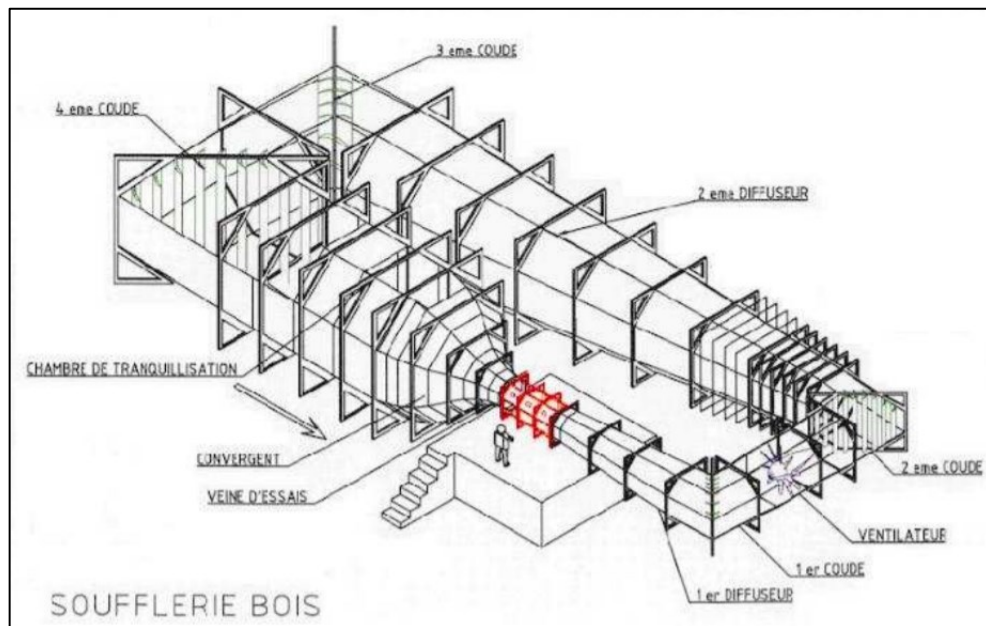


Figura 8 - Ilustração do túnel de vento com a seção de ensaios destacada em vermelho.

O túnel de vento dispunha da seguinte instrumentação:

- Tubo de pitot;
- Sensor de temperatura;
- Balança aerodinâmica com 6 graus de liberdade.

3.2. A maquete de ensaios

Como maquete de ensaio, utilizou-se um modelo simplificado de corpo padrão de traseira reta, como mostrado na Figura 9. A faixa rugosa sobre a dianteira da maquete era utilizada para transicionar o escoamento e evitar o descolamento na passagem do para-brisa para o teto. Sua necessidade foi constatada em estudos anteriores utilizando a mesma maquete e recomendada por (Gouveia de Moraes, 2006).

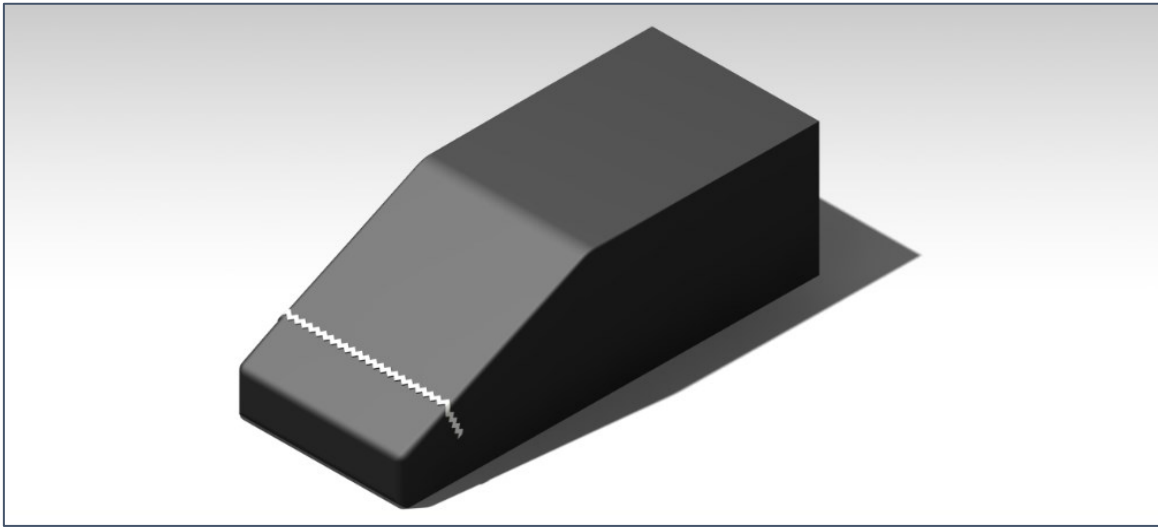


Figura 9 - Maquete de ensaios em CAD.

A maquete possui 400 mm de comprimento, 130 mm de altura e 160 mm de largura, como mostrado na Figura 10 e na Figura 11, respectivamente.

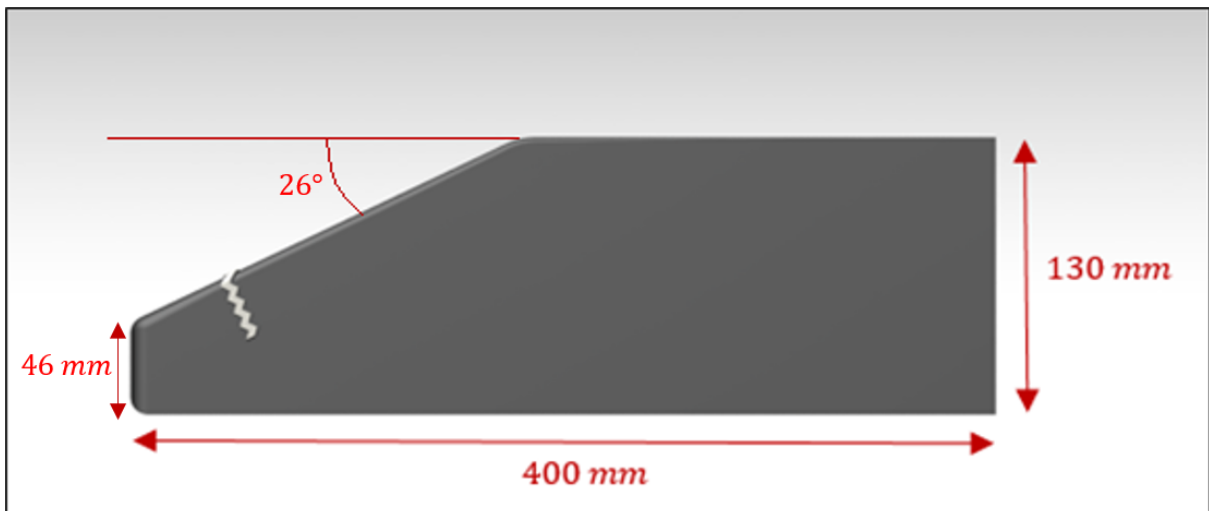


Figura 10 - Vista lateral da maquete em CAD com as cotas de altura e comprimento.



Figura 11 - Vista superior da maquete em CAD com a cota de largura.

Essa maquete possui ainda, como particularidade, um interior oco que possibilita instrumentá-la para realizar medidas de pressão estática, utilizando-se tomadas com captadores de pressão parietal e tubos de adaptação de impedância. Em sua traseira, a maquete possui 20 tomadas de pressão com diâmetro de 0,9 mm, numeradas e distribuídas como mostrado na Figura 12.

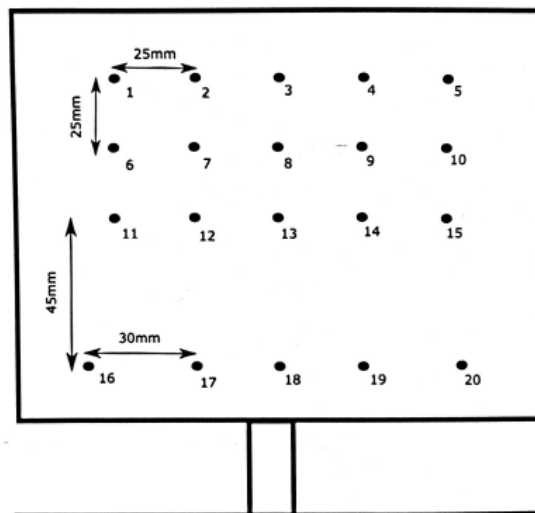


Figura 12 - Ilustração da distribuição das tomadas de pressão na traseira da maquete.

3.3. Posicionamento e alinhamento do sistema

Para a realização do experimento, posicionou-se uma mesa na seção de ensaios para representar o efeito do solo (*splitter-plate*), semelhante à ilustração em CAD da Figura 13, que também apresenta o sistema de eixos adotado. A escolha do sistema de eixos foi dada em função da balança aerodinâmica, que será apresentada na seção 3.4.

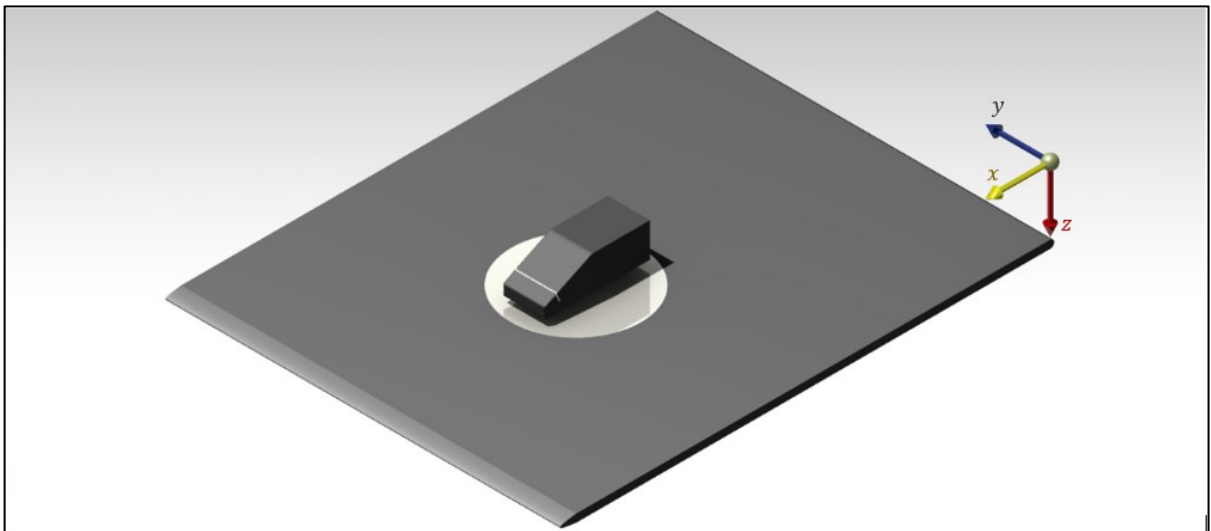


Figura 13 - Modelo da montagem do aparato de ensaio em CAD com o sistema de eixos.

Na Figura 14, tem-se uma foto do sistema real tirada através de uma parede de vidro que permite o acompanhamento visual do ensaio e dá acesso à seção de ensaio. A imagem foi capturada no momento do ajuste do sistema.

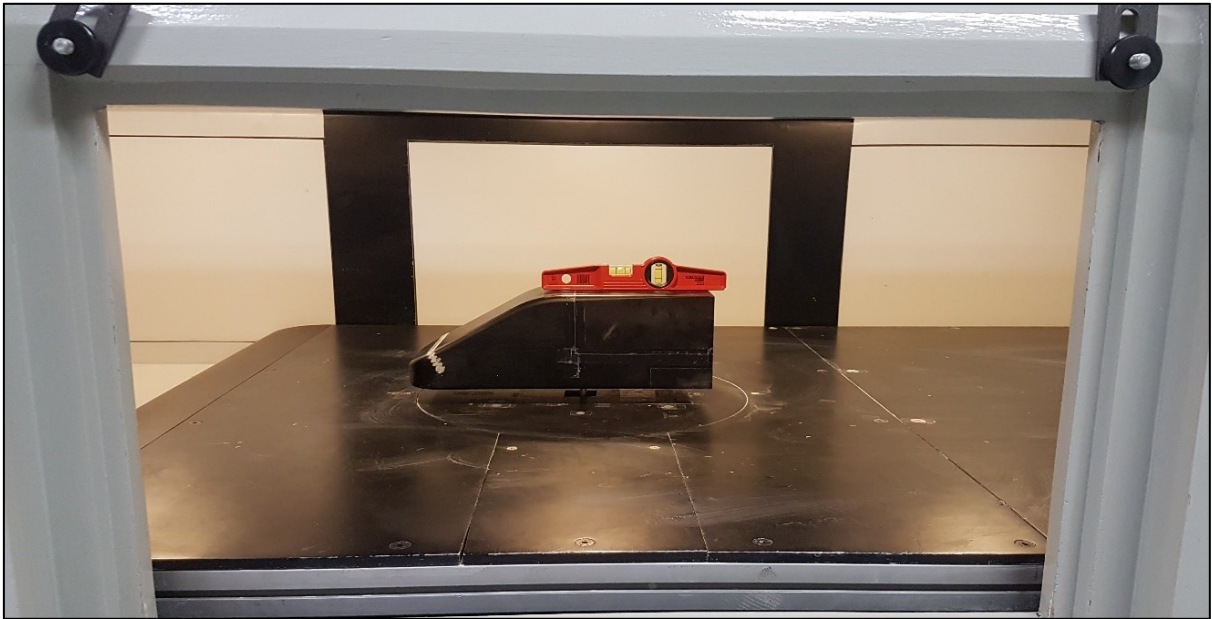


Figura 14 - Montagem do sistema de ensaios no túnel de vento com nível para alinhamento da incidência antes do ensaio.

Buscou-se realizar todos os ensaios com ângulos de arfagem (rotação em torno de \vec{y}) e rolagem (rotação em torno de \vec{x}) nulos. No entanto, durante a etapa de alinhamento, constatou-se ainda um problema de alinhamento de rolagem no sistema de posicionamento da maquete, confirmado a partir de um ensaio de visualização do escoamento parietal (apresentado em detalhes na seção 4.1), como pode-se constatar a partir da Figura 15. Como se tratava de um desvio pequeno, com solução muito complexa e que demandaria um tempo de reparo muito elevado, deram-se sequência nos ensaios.

Já o ângulo de guinada (rotação em torno de \vec{z}) nulo foi ajustado com o auxílio da balança aerodinâmica anulando o esforço lateral \vec{F}_y .

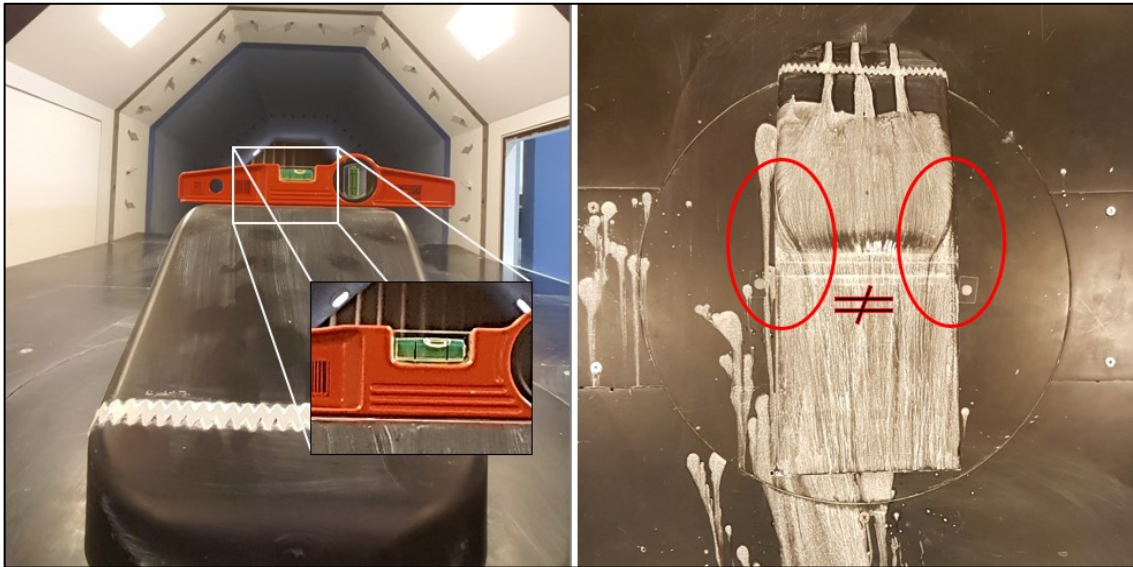


Figura 15 - Constatação do desalinhamento do sistema de posicionamento da maquete e verificação do efeito sobre o escoamento parietal.

3.4. Escolha e montagem do cilindro no modelo

Devido à curta disposição de tempo, determinou-se que seria experimentado apenas um diâmetro de cilindro, variando-se apenas seu posicionamento na direção \vec{x} . Escolheu-se um cilindro oco com 4 mm de diâmetro externo e um comprimento de 130 mm, dimensão igual à altura do veículo. Tal escolha das dimensões foi baseada em investigações prévias da camada limite do caso feitas por (Affejee, 2006).

O cilindro era fixado na vertical na lateral esquerda da maquete. Essa montagem está ilustrada na Figura 16.

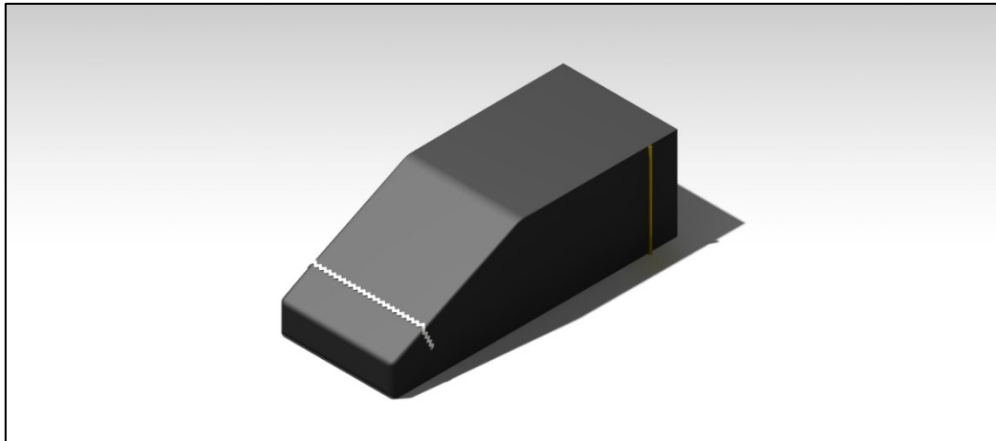


Figura 16 - Montagem do cilindro na maquete feita em CAD.

A fixação do cilindro era feita com fita adesiva de alta fixação tomando cuidado para não posicioná-la de forma a influenciar no experimento, como mostrado na Figura 17

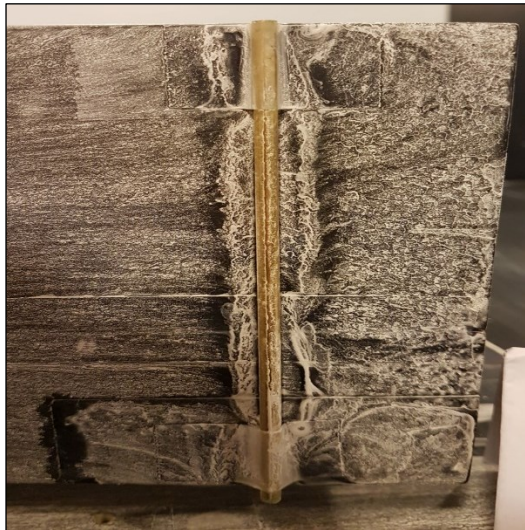


Figura 17 - Fixação do cilindro.

3.5. Instrumentação e procedimentos experimentais

Definiu-se que a velocidade do escoamento nos ensaios deveria ser de aproximadamente 30 m/s, para que o mesmo fosse representativo da velocidade desenvolvida por veículos em rodovias. Com isso, tomando como base a velocidade média dos ventos no Brasil, conforme

apresentado na Figura 2, determinou-se que a faixa de ângulos de guinada β que seria estudada seria de 0° a 10° , segundo a avaliação da velocidade aerodinâmica.

3.5.1. Visualização parietal

A visualização de escoamentos parietais é uma técnica utilizada para auxiliar a compreensão da interação entre um escoamento e um corpo imerso nele. Através dela, pode-se conhecer a direção média do escoamento em contato com o corpo ensaiado e, até mesmo, identificar pontos de descolamento e recolamento do escoamento.

Esta técnica foi utilizada neste trabalho em diversas ocasiões, aplicando-se uma mistura marcadora, a partir da qual era possível visualizar o conjunto de linhas de cisalhamento médias sobre a maquete.

A mistura marcadora utilizada foi desenvolvida e era fabricada no próprio laboratório. A receita utilizada é composta por:

- 20 g de caulim (traçador);
- 100 ml de solvente de limpeza *White-Spirit* (solvente);
- 4 g de ácido oleico (confere viscosidade).

Para cada realização deste ensaio de visualização, realizava-se o seguinte procedimento:

- A maquete era posicionada e devidamente alinhada;
- Aplicava-se, com o auxílio de um pequeno rolo de espuma, uma fina camada da mistura marcadora de forma homogênea sobre toda a superfície de interesse;
- A seção de ensaios era lacrada e o ensaio iniciado o mais rápido possível devido à volatilidade do solvente.

Durante a exposição do corpo coberto pela mistura ao escoamento, a mistura é arrastada na direção do escoamento e a parte líquida se evapora, deixando apenas o marcador (caulim) sobre a maquete.

3.5.2. Medição dos esforços

A balança aerodinâmica disponível propunha medição de forças e momentos nos três eixos, conforme apresentado na Figura 18. Entretanto, o sistema possuía também limitações, podendo ser danificado se aplicado/medido um esforço maior que o especificado tecnicamente. Por isso, tomou-se um cuidado extra para se manipular a maquete quando a mesma se encontrava acoplada ao eixo da balança.

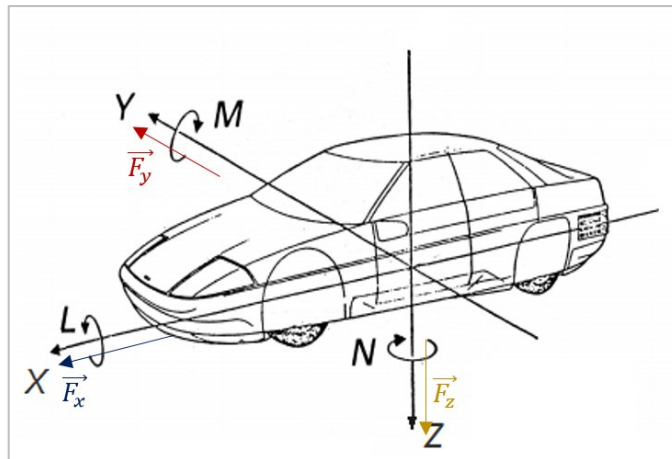


Figura 18 - Representação dos 6 esforços medidos pela balança: forças nos três eixos e momento em torno dos três eixos.

Antes de se iniciar os experimentos propriamente ditos, os seguintes procedimentos padrão de pré-utilização do túnel de vento devem ser executados:

- Alinhamento do modelo para determinação da “posição de zero” do giro da mesa em torno de \vec{z} ;
- Regulagem do amplificador de sinais (um ajuste manual do ponto de zero).

As principais variáveis calculadas a partir das medidas realizadas nos ensaios e o interesse ligado a cada uma delas, eram:

- C_D – Avaliação do desempenho de consumo do veículo;
- $C_{L_{back}}$ – Avaliação da força normal exercida pelos pneus traseiros contra o solo (o próprio software da balança fornecia a opção de se dividir o esforço vertical total do corpo em duas parcelas: porção anterior e posterior do corpo, permitindo avaliar a influência nas duas regiões);

- \vec{N} – Avaliação da estabilidade do veículo, ligada ao esforço de escorregamento gerado pelo momento associado a essa direção (vide Figura 18).

3.5.3. Medição da pressão flutuante

Para a realização das medidas de pressão flutuante, utilizaram-se sensores diferenciais com uma faixa de medição de 0 a 1250 Pa e uma banda passante de 0 Hz a 1,8 kHz. A fabricante, *Sensortechiques*, informa que os sensores utilizados apresentam um erro máximo de 0,25% da escala completa devido a não-linearidades e à histerese, e 2,0% devido a efeitos térmicos. Logo, o erro dos sensores é de $\pm 2,25\%$ da escala completa, ou seja, $\pm 28,13$ Pa.

A aquisição dos sinais de pressão durante os ensaios foi feita utilizando uma placa de aquisição que permitia a medida simultânea de 32 sinais. As medidas foram realizadas com uma frequência de aquisição de 6250 Hz, utilizando um filtro *anti-repliement* com frequência de corte de 2 kHz.

As medidas de pressão flutuante medidas ao longo deste trabalho são baseadas no conhecimento desenvolvido no laboratório onde os ensaios foram realizados, principalmente quanto à calibração dos sensores de pressão. O procedimento de calibração e o funcionamento do sistema são melhor apresentados por (Gouveia de Moraes, 2006) e (Affejee, 2006).

Para cada cenário de interesse, realizaram-se aproximadamente 12.000 medidas, segundo a frequência de aquisição. Em seguida, os dados eram importados no software Scilab para tratamento. A escolha do Scilab se deu pelo fato de se tratar de um software *open source*, com grande semelhança à linguagem e às funcionalidades do Matlab que, no entanto, é um software que exige aquisição de licença.

Os valores fornecidos pelo sistema consistiam na diferença entre a pressão ambiente e a pressão medida em cada ponto. O tratamento dos dados consistia em ler os valores obtidos, adimensionalizá-los na forma de um coeficiente de pressão (C_p), retirar a média destes valores de C_p e produzir gráficos pertinentes para a análise de resultados. A adimensionalização dos resultados de pressão obtidos foi feita a partir da equação (1).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} * \rho * U_\infty^2} \quad (1)$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Avaliação a partir dos ensaios de visualização

Iniciaram-se as avaliações a partir de ensaios de visualização. Essa estratégia buscava reduzir a quantidade de ensaios realizados, visto que ao compreender melhor a dinâmica do escoamento em torno dos automóveis *hatch*, seria possível construir hipóteses com maior chance de êxito. Logo, os primeiros ensaios realizados foram com a maquete “limpa”, com ângulo de guinada nulo e com ângulo de guinada positivo. Além disso, foi ao longo deste ensaio que se constatou o desalinhamento apresentado na seção 3.3.

4.1.1. Estudo dos fenômenos de descolamento e recolamento da camada limite

A hipótese de que a fixação de um cilindro na lateral do veículo poderia contribuir para a sua aerodinâmica em situação de vento de través, foi feita acreditando-se que este obstáculo perturbaria a camada limite do escoamento e, com isso, haveria uma alteração favorável na competição entre os vórtices formados na esteira do veículo, citados e colocados em evidência no trabalho de (Eulalie, 2014). Portanto, realizou-se um ensaio com o cilindro fixado à maquete para observar os fenômenos ligados à camada limite. Neste ensaio, o cilindro foi posicionado afastado da traseira (130 mm) para que houvesse espaço suficiente para que a camada limite recolasse ao corpo e reestabelecesse o regime laminar, possibilitando a medição das distâncias características destes fenômenos.

A Figura 19 apresenta o resultado do ensaio realizado com ângulo de guinada nulo. Com o auxílio da régua posicionada na parte inferior da imagem, verificou-se que o recolamento da camada limite ocorria, aproximadamente, entre 40 e 55 mm de distância do cilindro. Outro traço

característico encontrado na imagem está situado a aproximadamente 100 mm do cilindro, indicando a transição da camada limite turbulenta para aparentemente laminar. Esses traços foram identificados com o auxílio do professor orientador da pesquisa.



Figura 19 - Ensaio de visualização para estudo dos fenômenos de descolamento, recolamento e transição da camada limite perturbada pelo cilindro ($U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$).

Na Figura 19, também podemos notar que os traços característicos do descolamento e recolamento da camada limite são mais evidentes no centro da parede lateral da maquete. Esse fator pode ser explicado pelo escoamento que contorna as extremidades do cilindro e, ao voltar para a lateral do veículo, altera a dinâmica observada na camada limite nas extremidades da parede lateral.

Além disso, realizou-se este mesmo ensaio para os ângulos de guinada de 5° e 10° . Os valores encontrados para as distâncias de recolamento e transição do regime da camada limite não se alteraram significativamente, como pode ser percebido através dos valores da Tabela 1.

Tabela 1 - Distâncias de recolamento e transição da camada limite perturbada pelo cilindro (segundo análise da Figura 19).

Ângulo de guinada	Faixa de recolamento da camada limite	Início da camada limite laminar
0°	38-52 mm	103 mm
5°	37-50 mm	101 mm
10°	35-47 mm	98 mm

4.2. Primeira fase de ensaios com a balança aerodinâmica

Nesta etapa a análise dos resultados passa de um contexto qualitativo para quantitativo. Visou-se aqui avaliar os efeitos da mudança na dinâmica dos turbilhões na esteira causada pela inserção do cilindro sobre a lateral da maquete. Para tal avaliação, dispôs-se do sistema descrito anteriormente na seção 3.5.2 (balança aerodinâmica acoplada ao sistema de aquisição e tratamento de dados).

As referências de rotação negativa e positiva da mesa de ensaio do túnel de vento em torno do eixo \vec{z} são apresentadas na Figura 20. Portanto, para facilitar a compreensão ao longo da análise dos gráficos, valores positivos de β significam uma rotação no sentido horário, expondo o cilindro ao escoamento incidente.

É importante lembrar que, dentre todas as medidas capazes de se obter com este equipamento, são apenas o coeficiente de arrasto C_D (direção \vec{x}), o coeficiente de sustentação na traseira $C_{L_{back}}$ (direção \vec{z}) e o momento \vec{N} em torno do eixo \vec{z} as variáveis de maior interesse.

Como justificado anteriormente, estudou-se o modelo inicialmente em derrapagem para um intervalo do ângulo $\beta = [-10^\circ ; 10^\circ]$. A primeira geometria investigada na fase inicial do procedimento, foi a configuração sem cilindro (vide Figura 21(a)). Os resultados desta primeira fase de ensaios permitiram melhor entendimento do efeito da adição do corpo sobre a lateral do veículo.

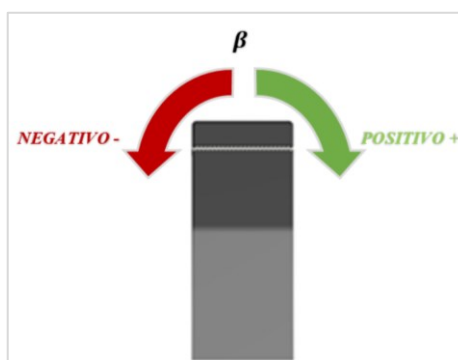


Figura 20 - Sistema de referência adotado para os sentidos positivo e negativo de rotação da mesa giratória na seção de ensaio.

Vários ensaios foram executados com o cilindro posicionado verticalmente à diferentes distâncias da traseira. Os valores desta distância de posicionamento foram escolhidos baseados nas visualizações com marcador apresentadas na etapa anterior. Analisaram-se, inicialmente, as seguintes posições: cilindro posicionado à 0 mm da traseira (Figura 21(b)), a fim de se avaliar o efeito do descolamento gerado pela sua presença quando não há uma distância suficiente de recolamento entre o obstáculo e a bolha de recirculação à jusante; cilindro posicionado à 130 mm (Figura 21(d)), afim de se avaliar o efeito oposto, isto é, quando a distância é grande o suficiente para que o recolamento aconteça antes da traseira do veículo e transicione novamente para regime laminar ; e cilindro posicionado à 40 mm (Figura 21(c)), graças às visualizações com tinta, pode-se identificar que este corresponde aproximadamente à distância de recolamento medida na configuração da Figura 19.

Utilizou-se um intervalo de $\Delta\beta = 1^\circ$ para realização de todos os testes desta primeira fase de ensaios. Como mencionado anteriormente, as primeiras medições foram realizadas para uma configuração limpa, isto é, sem a presença do cilindro. Para todas as medidas efetuadas no túnel de vento ao longo deste estudo, cinco valores em cada posição de guinada foram obtidos a fim de se utilizar a média entre eles e garantir uma maior confiabilidade dos resultados.

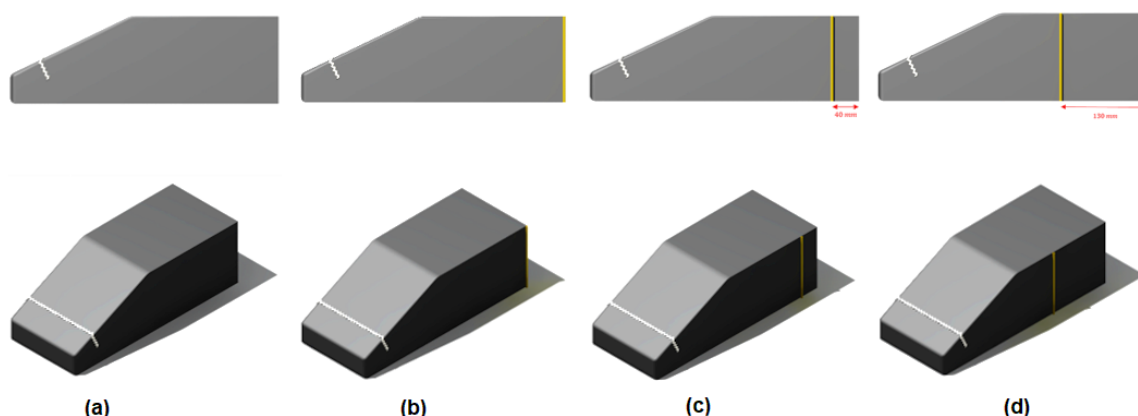


Figura 21 - Esquema das configurações iniciais ensaiadas em túnel de vento: (a) Sem cilindro; (b) com cilindro posicionado à 0 mm da traseira; (c) com cilindro posicionado à 40 mm da traseira; (d) com cilindro posicionado à 130 mm da traseira.

Os resultados desta fase inicial são apresentados e discutidos na seguinte ordem: Coeficiente de Arrasto (C_D), Coeficiente de Sustentação na traseira ($C_{L_{back}}$) e Momento de Guinada (\vec{N}).

Coeficiente de Arrasto - C_D

A Figura 23 apresenta os resultados da variação do coeficiente de arrasto em função do ângulo de guinada experimentado pelo veículo. Para uma configuração sem cilindro, percebe-se aqui que a curva não apresenta um comportamento simétrico em relação ao eixo das ordenadas, de fato, a parcela positiva ($\beta > 0^\circ$) aparenta ser um pouco mais inclinada. Ainda que tal assimetria não seja normal nessa fase do estudo (a configuração encontra-se limpa, ou seja, sem nenhum obstáculo gerador de assimetrias no escoamento), este comportamento já era esperado ao considerar-se o efeito do desalinhamento de rolagem do corpo na própria montagem da balança (explicado na seção 3.3, Figura 15).

Percebe-se que ao adicionar o cilindro a uma distância de 0 mm, isto é, logo à montante da bolha de recirculação da esteira, gera-se um aumento considerável do coeficiente de arrasto para qualquer que seja o ângulo de derrapagem. Procura-se com este estudo alterar a dinâmica da bolha de recirculação e consequentemente a distribuição de pressão superficial responsável

por gerar a força de arrasto sobre a traseira do veículo (Eulalie, 2014), porém busca-se reduzi-la e não aumentá-la. Uma hipótese para tal comportamento foi elaborada após discussão com o orientador: as perturbações/instabilidades geradas pela presença do cilindro como obstáculo na camada limite interagem de maneira instantânea com a bolha de recirculação logo após o descolamento causado pelo obstáculo, o resultado é, portanto, uma alteração na dinâmica dos turbilhões de modo a tornar ainda mais prejudicial a ação da pressão sobre a traseira, acrescentando o valor do coeficiente de arrasto.

Nota-se ainda um deslocamento do ponto de mínimo da curva se comparada à configuração limpa. Isto significa que o valor mínimo do coeficiente de arrasto não se dá mais para a condição alinhada com o vento ($\beta = 0^\circ$). Tem-se que levar em conta que o escoamento em torno do cilindro, também gera esforços (vide Figura 22), seja pela ação da pressão ou fricção, esses esforços influenciam o valor final de C_D , o equilíbrio de esforços laterais na direção \vec{y} , o valor mínimo deste coeficiente e para qual posição angular (valor de β) ele acontecerá.

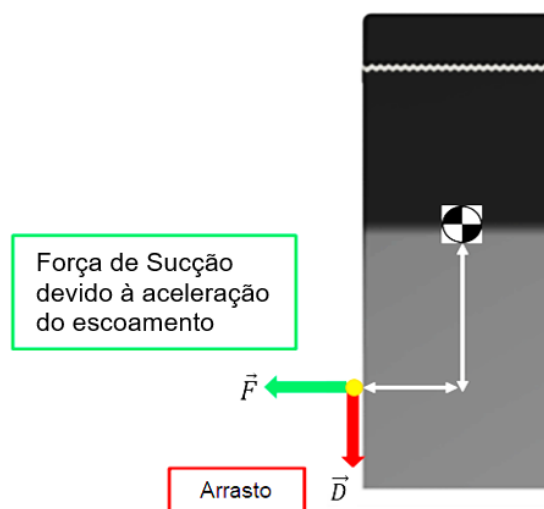


Figura 22 - Exemplificação de forças atuantes no cilindro devido ao escoamento incidente.

O teste seguinte foi realizado com o cilindro posicionado a uma distância de 130 mm da traseira (dimensão da altura do veículo e próprio comprimento do cilindro). Com isto, desejava-se verificar como o coeficiente de arrasto altera quando se tem uma distância de recolamento

suposta suficientemente grande para a esteira sobre a parede lateral. O gráfico da Figura 23 mostra que o valor de mínimo de C_D nesta configuração ainda é maior se comparado à limpa, e acontece para um ângulo de derrapagem de aproximadamente 2° . Mais uma vez atribui-se esse deslocamento do ponto de mínimo às mudanças causadas na dinâmica da bolha de recirculação pela presença do cilindro na camada limite (descolamento, recolamento e energização), porém, até aqui, se tratam de hipóteses, e elas foram investigadas através do uso de captadores de pressão superficial no tópico seguinte. Entretanto, apesar dos valores de C_D apresentarem de maneira geral sempre um valor maior que aqueles obtidos com a configuração limpa, dois fatores são importantes de se ressaltar aqui: para valores de $0^\circ \leq \beta \leq 2^\circ$, chega-se a obter uma redução do arrasto total medido pela balança; e, para $\beta > 2^\circ$ o comportamento da curva se iguala a configuração limpa, de maneira simples, é como se o escoamento incidente não mais enxergasse o cilindro sobre a lateral do corpo quando se tem tamanha distância entre ele e a traseira.

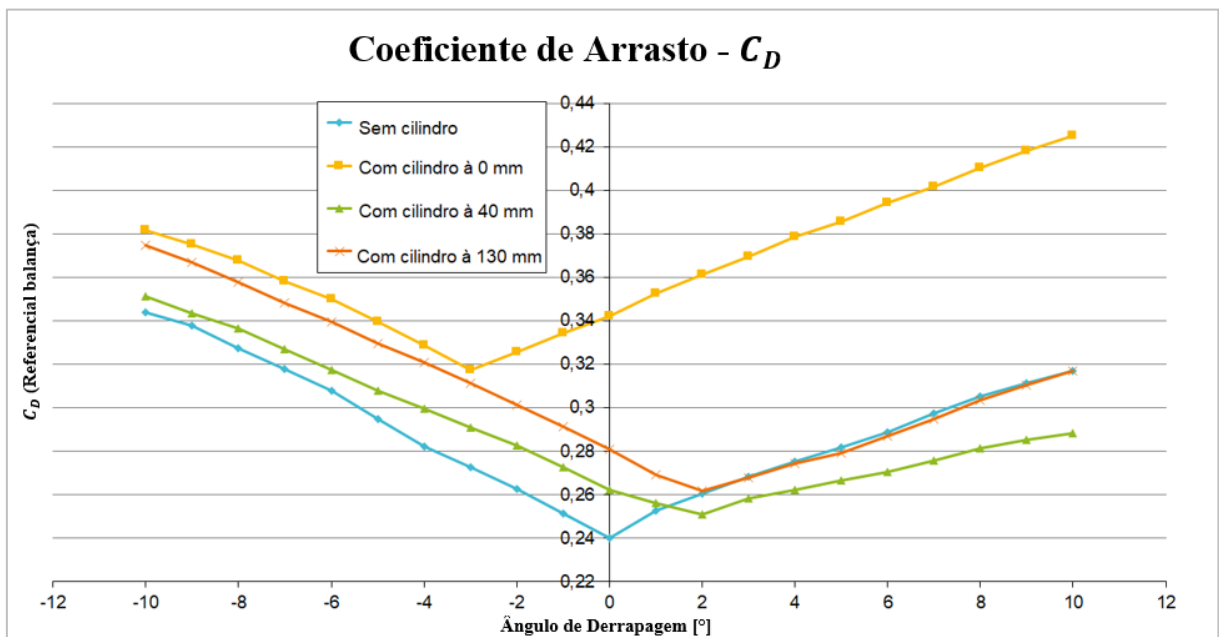


Figura 23 - Coeficiente de Arrasto do veículo para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.

Se com o cilindro posicionado à 130 mm obtiveram-se resultados mais próximos do esperado, decidiu-se testar uma nova configuração, agora com o cilindro posicionado à 40 mm de distância da traseira. Tal valor foi escolhido baseado nos resultados apresentados na Tabela 1. Durante as investigações de visualização do escoamento na seção anterior, constatou-se que

o recolamento e laminarização da camada limite ocorria sempre para valores próximos de 40 mm à jusante do cilindro. Portanto, posicionar o cilindro a essa distância significaria garantir que a camada limite turbulenta, fruto do descolamento causado pelo cilindro, não teria uma distância suficiente para recolocar completamente e chegaria ainda energizada para a interagir com o turbilhão de recirculação.

Os resultados do ensaio mostraram que mais uma vez o ponto de mínimo acontece para $\beta \cong 2^\circ$ e possui um valor maior que na configuração limpa. Entretanto, nota-se que a redução no valor do coeficiente de arrasto é bastante significativa para uma derrapagem positiva maior que 2° . Essa redução torna-se ainda mais evidente ao analisarmos o gráfico da Figura 24: a comparação entre as duas configurações mostra uma redução de até 9% do arrasto total do corpo para um ângulo de guinada de 10° .

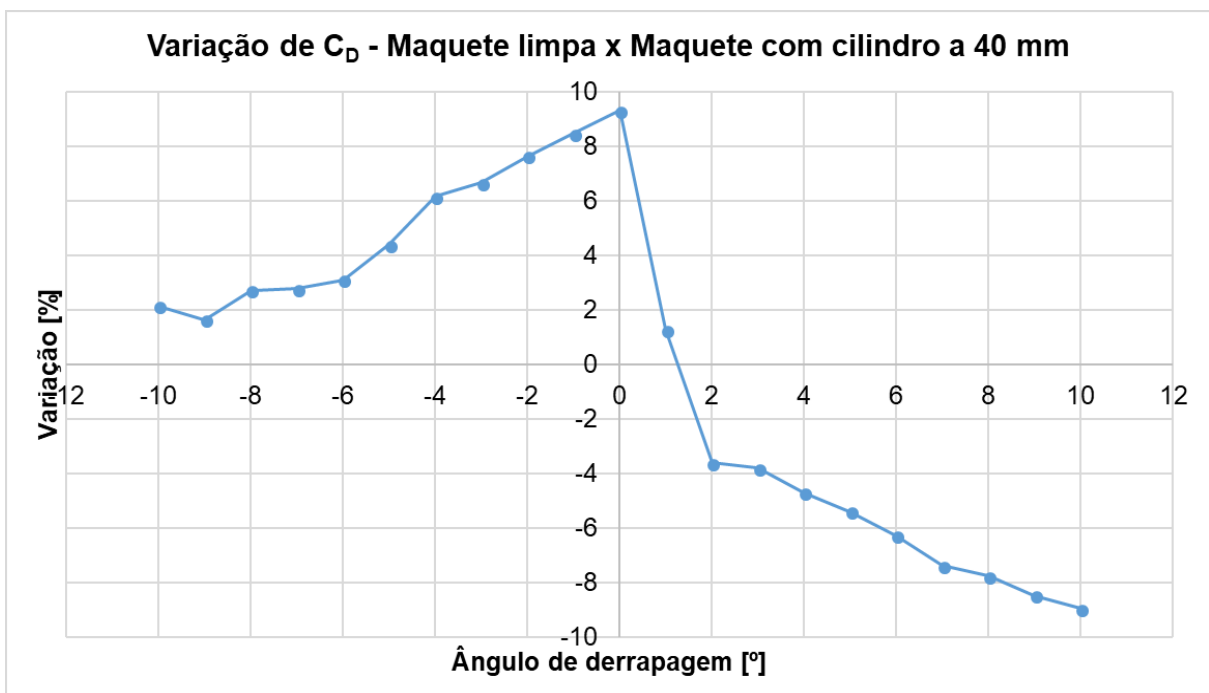


Figura 24 - Comparação da variação de C_D entre a configuração limpa e com cilindro posicionado à 40 mm.

Sustentação Traseira - $C_{L_{back}}$

Analisando agora o gráfico da Figura 26, a curva da configuração sem cilindro nos permite notar mais uma vez a dissimilaridade das inclinações dos dois lados da curva em relação ao eixo y. Mais uma vez, acredita-se que o efeito esteja ligado ao desalinhamento de rolagem

na montagem da balança. Entretanto, ainda assim é possível compará-las, uma vez que o mesmo desalinhamento estrutural se manteve para todos os demais ensaios realizados na sequência.

Para valores positivos do ângulo de guinada β , nota-se um acréscimo no valor do coeficiente comparando a configuração limpa às configurações cilindro à 40 mm e 130 mm. Mais uma vez, com o auxílio dos ensaios qualitativos de visualização, observou-se que em situação de derrapagem, parte do escoamento parietal que se desenvolve na lateral do veículo tende a passar para o teto, formando um turbilhão remontante que se propagará por uma distância considerável na esteira do corpo (um dos motivos do acréscimo de arrasto com a variação de β constatado na análise anterior). Com a inserção do obstáculo sobre a lateral do veículo, essa passagem é acentuada (vide Figura 25), e conseqüentemente, as flutuações de pressão superficial causadas por ela, podendo ser a responsável do aumento observado no coeficiente de sustentação (o que significa uma desestabilização do veículo).



Figura 25 - Visualização do turbilhão remontante acentuado pela presença do cilindro/obstáculo sobre a lateral do veículo.

A configuração “cilindro à 0 mm” não apresentou um acréscimo significativo no valor de C_L , chegando mesmo a apresentar uma redução para guinadas maiores que 2° . Como o cilindro encontra-se posicionado logo no final da geometria nesta configuração, não se observou passagem do escoamento parietal lateral para o teto, possível razão de não se observar alterações significativas nesse caso.

O fenômeno de assimetria das curvas de $C_{L_{back}}$, apresentado na Figura 26, já era esperado, devido ao desalinhamento de rolagem constatado nas fase de alinhamento e de ensaios de visualização. Dessa forma, esse problema impediu que conclusões fossem tiradas a respeito do efeito da inserção do cilindro e do aumento do ângulo de guinada sobre a sustentação gerada na traseira do veículo.

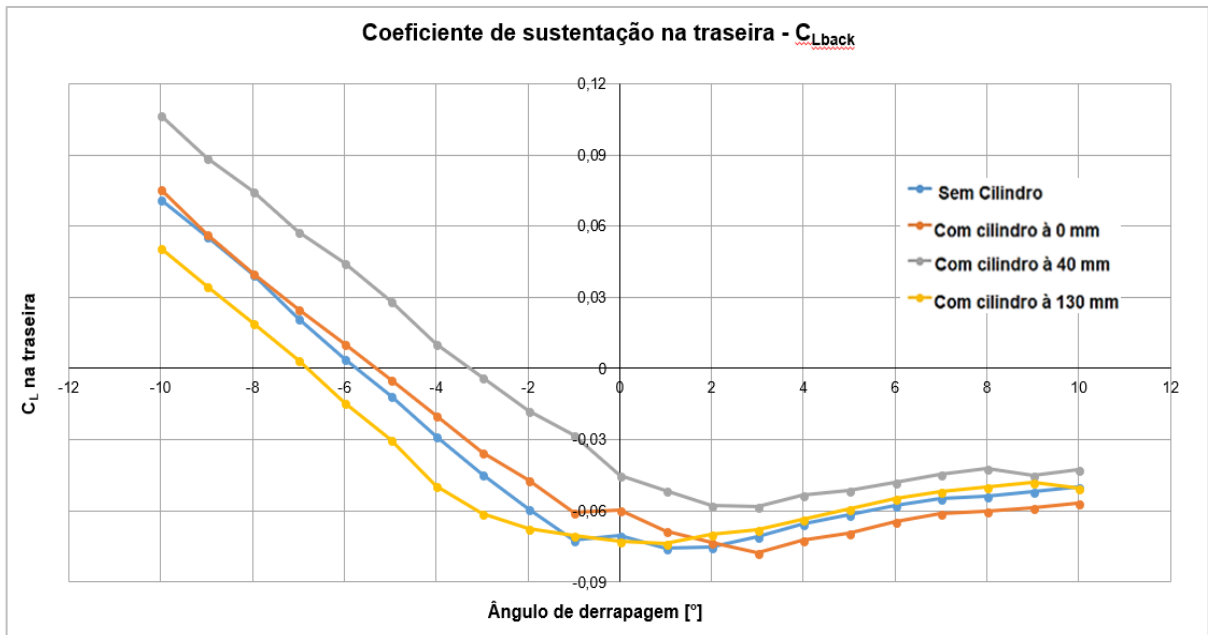


Figura 26 - Coeficiente de Sustentação na traseira do veículo para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.

Momento de Guinada \vec{N} (em torno de \vec{z})

A análise da Figura 27 mostra que o cilindro posicionado à 40 e 130 mm de distância da traseira gera um efeito de acréscimo do momento de guinada, visível a partir do deslocamento das curvas para cima daquela identificada por "Sem Cilindro". Os novos esforços que surgem sobre o veículo e sobre o cilindro quando imerso no escoamento (representação da Figura 22, turbilhão remontante da lateral, etc), seriam os próprios responsáveis pelo acréscimo de momento evidenciado no gráfico para estas configurações.

Entretanto, analisando-se a configuração cilindro à 0 mm nota-se que a curva se encontra deslocada para baixo da de configuração limpa. Isto indica, provavelmente, que todo aquele arrasto extra gerado pelo descolamento logo no fim da geometria (colocado em evidência no gráfico da Figura 23) influencia bastante neste caso, gerando um momento de guinada no

sentido anti-horário, e portanto negativo, o que explicaria o deslocamento da curva para baixo da de referência.

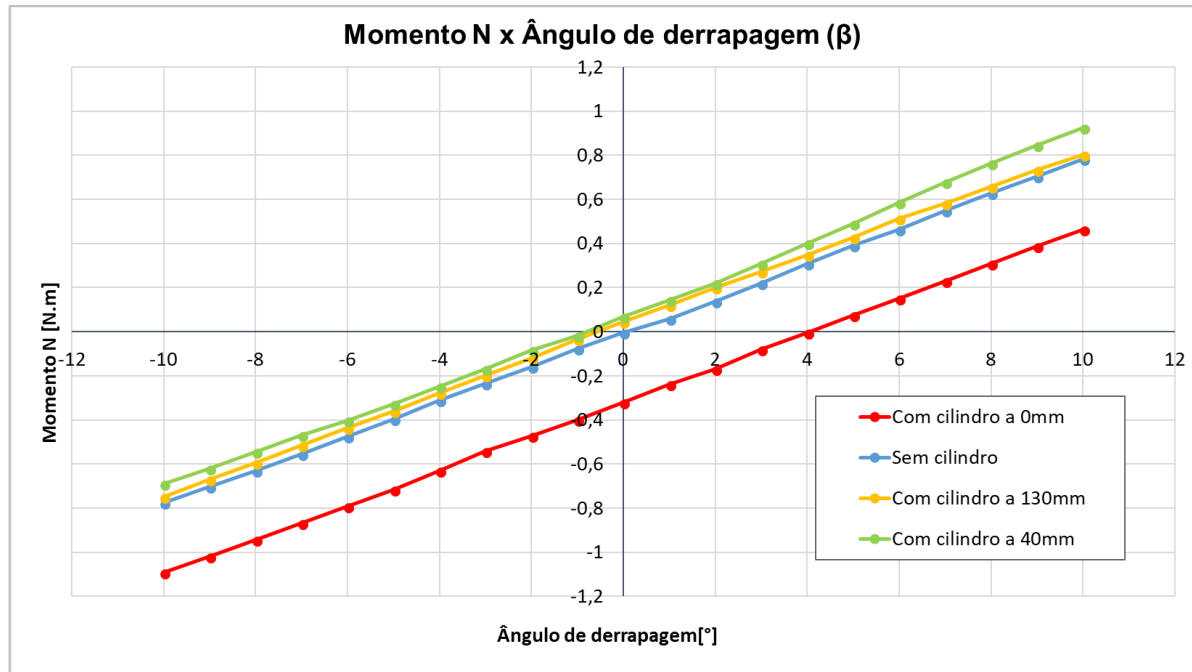


Figura 27 – Momento N em torno do eixo \vec{z} para as configurações sem cilindro, cilindro à 0 mm, cilindro à 40 mm e cilindro à 130 mm de distância da traseira.

Concluídas as investigações desta primeira fase de ensaios, as análises de pressão superficial sobre a traseira do veículo tiveram início. Através delas buscou-se entender melhor, em termos quantitativos, como o cilindro influencia as mudanças na dinâmica da bolha de recirculação. Passadas as análises do coeficiente de pressão superficial, uma fase de ensaios final foi realizada para avaliar-se estas mesmas três grandezas (C_D , $C_{L_{back}}$ e \vec{N}), porém fixando-se o cilindro em posições próximas dos 40 mm (a configuração que apresentou a maior redução de arrasto durante a primeira fase de ensaios).

4.3. Avaliação a partir da pressão

Os ganhos de desempenho aerodinâmico encontrados, já com a primeira fase de ensaios com a balança aerodinâmica, foram objeto de motivação para a realização dos ensaios de pressão estática na traseira do veículo. O principal objetivo desta etapa era consolidar a compreensão dos fenômenos desencadeados pela inserção do cilindro. Dessa forma, antes

mesmo de passarmos à segunda fase de ensaios com a balança, realizaram-se os ensaios de pressão estática, comparando as configurações sem cilindro e com cilindro à 40 mm (configuração de referência e melhor configuração que havia sido encontrada até o momento, respectivamente). Estes ensaios foram realizados seguindo os procedimentos descritos na seção 3.5.2.

Os gráficos de contorno de C_p elaborados a partir dos resultados deste ensaio estão apresentados na Figura 28, onde as imagens da esquerda representam os contornos obtidos com a configuração sem cilindro e, as imagens da direita, representam os contornos obtidos a partir da configuração com cilindro a 40 mm. Além disso, os contornos da Figura 28 apresentam os resultados encontrados para os ângulos de guinada, β , de 0° , 2° e 5° de cima para baixo, respectivamente. Vale ressaltar que, neste caso, quanto mais negativos são os valores de C_p , maior é o arrasto aerodinâmico do veículo.

Para o ângulo de $\beta=0^\circ$ sem cilindro, deveríamos ter uma simetria entre o lado direito e o lado esquerdo, mas o que se vê na Figura 28 (a) é uma leve assimetria e, ainda, uma linha diagonal, possibilitando se concluir que este efeito é decorrente do desalinhamento de rolagem constatado anteriormente. É importante notar que todos os valores de C_p encontrados eram negativos, portanto, a aerodinâmica de toda a traseira contribui para o arrasto.

Quando comparamos, ainda com $\beta=0^\circ$, as configurações sem cilindro e com cilindro a 40 mm (posicionado do lado esquerdo da maquete, quando visto por trás), percebemos que o cilindro provoca um aumento do arrasto na lateral esquerda da traseira, no entanto, melhora os valores de C_p na lateral oposta. Este fenômeno se explica pelo fato de que no lado onde temos o cilindro, o escoamento ainda não estava bem recolado à parede e, portanto, aumentava o tamanho do vórtice gerado. Com isso, podemos inferir que a formação de um vórtice maior do lado esquerdo irá impactar a estrutura do vórtice formado do lado direito, alterando a distribuição de pressão, como ilustrado.

Além disso, percebeu-se que os ângulos de guinada que apresentavam uma menor diferença de pressão entre os dois lados da traseira, eram também aqueles que apresentavam o menor arrasto nas medidas feitas com a balança (0° para a configuração sem cilindro e 2° para a configuração com cilindro a 40 mm). Este fato ratifica a teoria levantada na introdução do trabalho de que ao tornar a competição entre os vórtices formados mais igualitária, temos uma redução do arrasto.

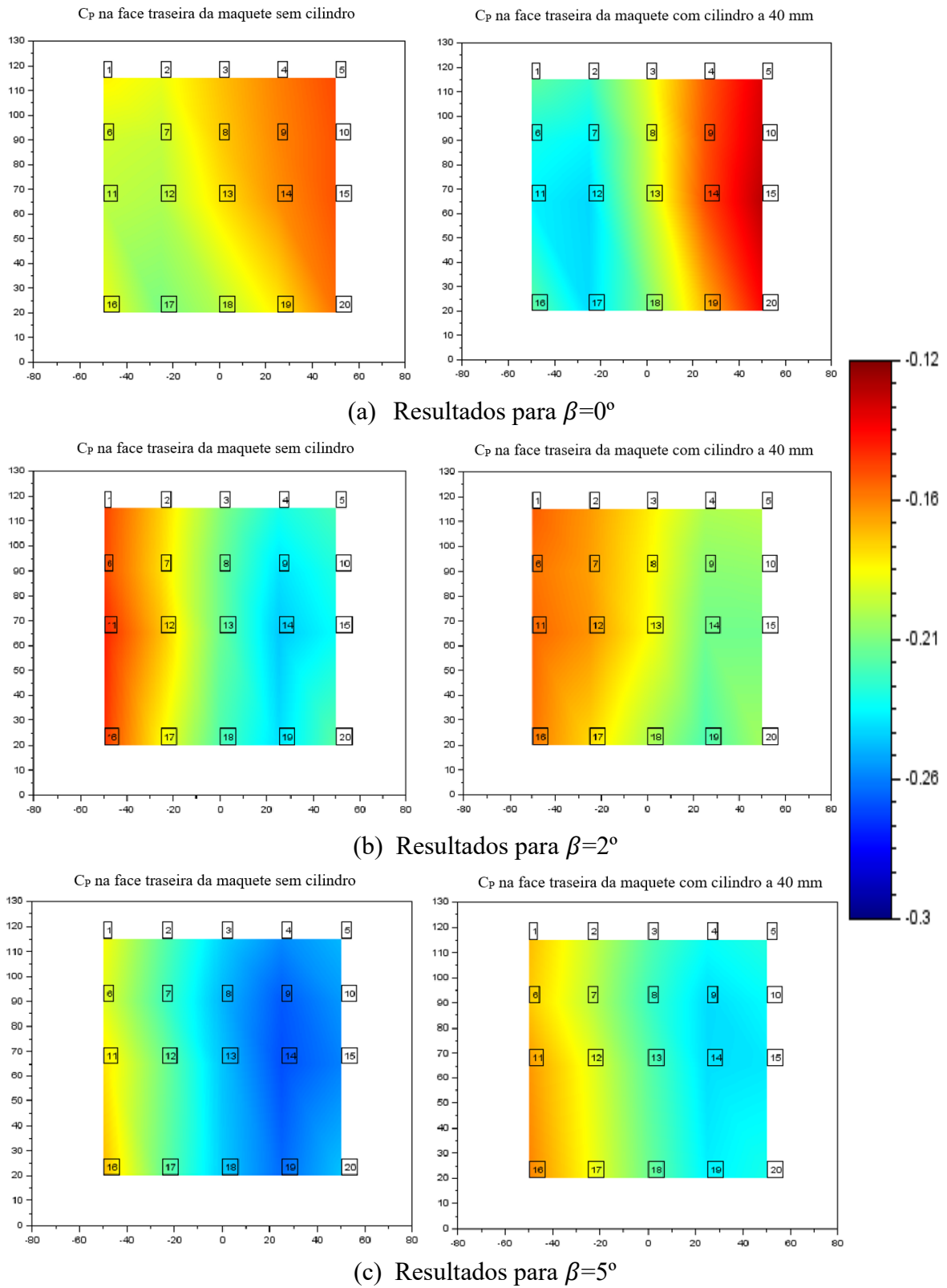


Figura 28 - Contornos de pressão estática na face traseira da maquete sem cilindro (esquerda) e com cilindro a 40 mm (direita), para $\beta=[0^\circ;2^\circ;5^\circ]$ de cima para baixo, respectivamente. Os eixos dos gráficos estão em milímetros.

Já ao analisar-se a Figura 28 (c), com a maquete a 5° de ângulo de guinada, percebe-se que a configuração sem cilindro apresenta valores de C_p ainda menores do que a 2°, devido ao aumento dos descolamentos do escoamento na traseira. No entanto, quando fixamos o cilindro no veículo, o que se percebe é uma redução nítida do módulo de C_p em toda a traseira, mas principalmente do lado em que ele foi fixado. A explicação deste resultado vem do melhor recolamento da camada limite na lateral do veículo antes de chegar à traseira somado ao fato de que a camada limite nesta região se possui uma maior energia cinética, devido à perturbação realizada pelo cilindro.

4.4. Segunda fase de ensaios com a balança aerodinâmica

Em termos de redução de arrasto, os melhores resultados foram obtidos para a configuração “cilindro a 40 mm” nos estudos anteriores. Como fechamento dos trabalhos experimentais, o cilindro foi testado em diferentes posições próximas a 40 mm, a distância aproximada de recolamento identificada nos estudos de visualização. As seguintes posições foram testadas: cilindro a 40, 50 e 55 mm de distância da traseira. Os resultados obtidos para a configuração de 50 mm foram bastante curiosos.

Como se tratava de um estudo mais minucioso, uma nova variação do ângulo de guinada foi escolhida: $\Delta\beta = 0,25^\circ$. Logo na primeira parte do ensaio, os testes com os cilindros em diferentes posições não apresentavam nenhuma variação notável para derrapagens negativas, desta maneira, como o tempo disponível no túnel de vento para conclusão dos ensaios estava limitado, optou-se por realizar os testes apenas para derrapagens positivas, isto é, quando o cilindro se encontra face ao escoamento incidente e realmente exerce influência sobre o valor do arrasto.

A análise da Figura 29 permite concluir que a redução de arrasto gerada chega a ser ainda maior com o cilindro posicionado à 50 mm (um pouco mais afastado da traseira se comparada à configuração que retornou os melhores resultados na primeira fase de ensaios). Esta redução chega a 5,5% se comparada à configuração de referência (sem cilindro) para uma derrapagem positiva de 4°, aproximadamente 3,7 vezes maior que a obtida com o cilindro a 40 mm para o mesmo valor de $\beta = 4^\circ$.

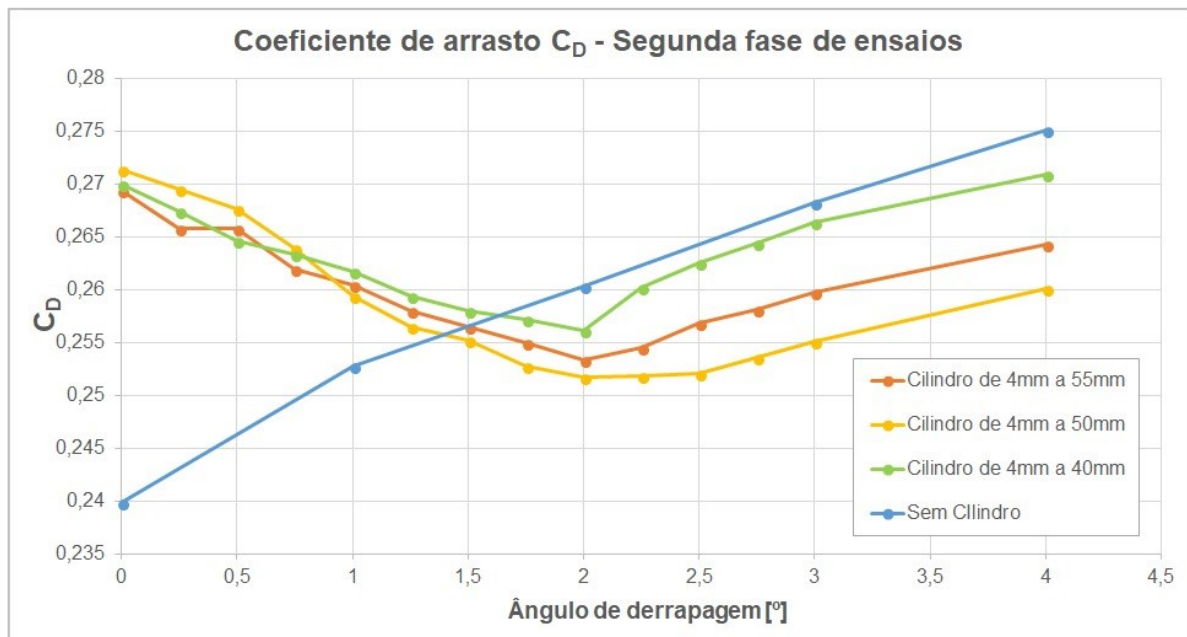


Figura 29 - Resultados da evolução do arrasto em função do ângulo de guinada β para diferentes posicionamentos do cilindro na segunda fase de ensaios.

Novamente, devido a questões de tempo disponível para uso do túnel de vento, não foi possível realizar o estudo desta configuração a 50 mm com os captadores de pressão como se fez com a anterior. Ainda assim, baseando-se nas análises de pressão feitas para a configuração de 40 mm, pode-se fazer algumas suposições para os resultados encontrados nesta etapa do estudo.

Uma vez que a distância de descolamento (cilindro) até a traseira é um pouco maior, o escoamento volta a recolar e (supostamente) retransicionar para a condição laminar antes da interação com a bolha de recirculação propriamente dita. Desta maneira, o escoamento vindo da lateral do veículo insere um nível de energia diferente no turbilhão de recirculação da esteira, alterando toda a dinâmica da bolha e conseqüentemente a distribuição de pressão superficial ali, o que reflete no próprio valor do arrasto gerado. Deixa-se aqui proposto esta análise de pressão para esta nova configuração como uma sugestão de trabalho futuro do tema.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Através do estudo realizado ficou claro que a abordagem escolhida, com um mecanismo simples, é capaz de fornecer resultados bastante interessantes. A melhor configuração encontrada (modelo com o cilindro fixado a 50 mm da traseira) possibilitou uma redução da ordem de 12% do arrasto do modelo. Além disso, este dispositivo ainda afetou de forma positiva a força de sustentação na traseira do veículo, no entanto, com resultados menos expressivos quando comparados aos encontrados para o coeficiente de arrasto.

As principais explicações para os ganhos encontrados, em termos de arrasto, estão relacionadas à perturbação da camada limite na lateral do veículo pelo cilindro, o que alterava a dinâmica turbilhonar da esteira. Com os ensaios de pressão, constatou-se que se tem os menores resultados de coeficiente de arrasto quando a pressão estática é distribuída de forma simétrica na traseira, isto é, quando os vórtices gerados com os descolamentos laterais “concorrem” de forma igualitária.

Já a melhoria do coeficiente de sustentação na traseira, foi atribuída à parcela do escoamento adicional que passava da lateral para o teto do veículo devido à inserção do cilindro. Como a maquete só dispunha de tomadas de pressão na traseira, não foi possível avaliar este efeito mais a fundo. Sugere-se então que a situação seja avaliada com uma maquete de mesma geometria, porém dotada de tomadas de pressão sobre a lateral e teto igualmente.

Deixa-se ainda como uma segunda sugestão para trabalhos futuros, a avaliação da inserção de estruturas menores como método de perturbação do escoamento, por exemplo, uma fita rugosa (como a fixada na parte frontal da maquete). Com isso, acredita-se que seria possível atingir resultados superiores por utilizar-se um corpo que acrescente menos arrasto ao conjunto.

Referências Bibliográficas

- AFFEJEE, F. (2006). *Analyse physique d'écoulements décollés fortement tridimensionnels par expérimentation : Structuration spatio-temporelle et sensibilité à une turbulence amont*. Poitiers, France: École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - ISAE-ENSMA.
- EULALIE, Y. (2014). *Étude Aérodynamique et Contrôle de la Trainée sur un Corps de Ahmed Culot Droit*. Bordeaux: Université de Bordeaux.
- GOUVEIA DE MORAES, L. (2006). *Analyse expérimentale d'un modèle de tourbillon conique et de sa sensibilité à une turbulence amont*. Poitiers, France: École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - ISAE-ENSMA.
- Roumeas, M., Gilliéron, P., & Kourta, A. (2009, January). Analysis and Control of the Near-Wake Flow over a Square-Back Geometry rear window. *Journal of Computers & Fluids*, pp. 60 - 70.
- Vino, G., Watkins, S., Mousley, P., & Prasad, S. (2005). Flow structures in the near-wake. *Journal of Fluids and Structures n.20*, pp. 673 - 695.
- Volpe, R., Ferrand, V., Da Silva, A., & Le Moyne, L. (2014). Forces and Flow Structures Evolution on a Car Body in a Sudden Crosswind. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, pp. 114 - 125.
- Wassen, E., Eichinger, S., & Thiele, F. (2010). Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle. *Notes on Numerical Fluid Mechanics (NNFM) 108*, pp. 241 - 255.