FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Douglas Recla Guzzo

Guilherme Batista Bergamini

Matheus Ricato Garuzzi

Vitor Hugo de Almeida Bahiense

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AERODINÂMICO DE UM MODELO DE VEÍCULO UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

ARACRUZ

2020

Douglas Recla Guzzo

Guilherme Batista Bergamini

Matheus Ricato Garuzzi

Vitor Hugo de Almeida Bahiense

ESTUDO DO COMPORTAMENTO AERODINÂMICO DE UM MODELO DE VEÍCULO UTILIZANDO SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Harerton Dourado

ARACRUZ

2020

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as pessoas que colaboraram, direta ou indiretamente, na conclusão deste trabalho e em toda nossa jornada acadêmica.

RESUMO

O estudo aerodinâmico de corpos tem diversas aplicações, especialmente no campo automobilístico, aeronáutico e espacial. A determinação das características de arrasto e sustentação definem o comportamento aerodinâmico dos veículos e influenciam na potência necessária para vencer a resistência do ar e no consumo de combustível. O estudo das características aerodinâmicas de um corpo pode ser realizado em túneis de vento, equipamentos onde um fluxo de ar controlado é forçado em um duto onde se encontra o objeto a ser estudado. Utilizando-se linhas de fumaça, o escoamento pode ser visualizado e com o uso de sensores pode-se medir os esforços de arrasto e sustentação. A FAACZ possui um túnel de vento didático, construído para auxiliar os estudantes na compreensão dos fenômenos aerodinâmicos. No entanto, limitações dimensionais do equipamento e das velocidades permitidas para o escoamento forçado, fazem necessário o uso de modelos em escala para o estudo do comportamento aerodinâmico de veículos. Este trabalho realizou um estudo aerodinâmico do corpo de Ahmed, experimento consagrado na indústria automobilística, através da simulação numérica CFD dos modelos em escala a ser utilizados no túnel de vento, avaliando os resultados com relação aos resultados originais obtidos. Para a simulação numérica foi utilizado o programa Ansys Discovery Live. Os resultados mostraram que a utilização de modelos em escala no túnel de vento da FAACZ é capaz de descrever qualitativamente o comportamento aerodinâmico do corpo. No entanto, o cálculo dos coeficientes de arrasto e de sustentação apresenta algumas discrepâncias em relação ao encontrado na literatura.

Palavras-chave: Túnel de Vento. CFD. Simulação Numérica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características de fluxo de um veículo de passageiros 13
Figura 2 – Desenvolvimento da camada limite e separação 14
Figura 3 – Perfil da esteira aerodinâmica sem (à esquerda) e com um defletor (à direita) 15
Figura 4 – Geração de vórtices em torno do veículo.....16
Figura 5 – Modelo 3D do Túnel de Vento da FAACZ 21
Figura 6 – Túnel de Vento Montado sobre Base Móvel. 22
Figura 7 – Escoamento em torno de perfil de asa no túnel de vento da FAACZ. 23
Figura 8 – Simulação de escoamento entre dois edifícios no túnel de vento da FAACZ. 23
Figura 9 – Modelo do corpo de Ahmed 24
Figura 10 – Dimensões do corpo de Ahmed 25
Figura 11 – Representação gráfica do corpo de Ahmed com ângulo de 25º. 26
Figura 12 – campo de velocidade no plano longitudinal para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4.....31
Figura 13 – distribuição de pressão (vista isométrica) ao longo do corpo para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4. 32
Figura 14 – distribuição de pressão ao longo da superfície inferior corpo para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4. Cores representam o coeficiente de pressão (cp). 33
Figura 15 – representação das linhas de corrente ao longo do corpo para (a) simulação 1; (b) Simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4.....34

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1: descrição das simulações realizadas no presente trabalho. 27

Quadro 2: condições de contorno para as simulações.....27

Tabela 1: valores para o número de Reynolds (Re), coeficiente de arrasto (cd) e para o simétrico do coeficiente de sustentação, comparando os resultados de Ahmed (1984) com a simulações 1 a 4. 35

LISTA DE SIGLAS

CAD	*Computer Aided Design* (Desenho auxiliado por computador)
CFD	*Computer Fluid Dynamics* (Dinâmica dos fluidos computacional)
FAACZ	Faculdades Integradas de Aracruz
GPU	*Graphics Processing Unit* (Unidade de processamento de gráficos)
IEA	*International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)
tep	Toneladas equivalentes de petróleo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área projetada do corpo
c_D	coeficiente de arrasto aerodinâmico
$-c_L$	simétrico do coeficiente de sustentação aerodinâmica
c_P	coeficiente de pressão
F_D	força de arrasto, na direção do escoamento
F_L	força de sustentação, na vertical
L	comprimento do modelo representativo do veículo
Re	número de Reynolds
V	velocidade do escoamento medida em um ponto indicado do domínio
V^*	velocidade normalizada do fluxo
V_∞	velocidade de corrente livre do escoamento
v	velocidade relativa
μ	viscosidade dinâmica do ar.
ρ	massa específica do ar

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 3
RESUMO 4
LISTA DE FIGURAS 5
LISTA DE QUADROS E TABELAS 6
LISTA DE SIGLAS 7
LISTA DE SÍMBOLOS 8

1. INTRODUÇÃO 9

1.1. OBJETIVO GERAL 11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12

2.1. AERODINÂMICA DE UM VEÍCULO 12
2.2. TÚNEL DE VENTO 16
2.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 19
2.4. O TÚNEL DE VENTO DA FAACZ 21
2.5. MODELO DE AHMED 23

3. METODOLOGIA 26

3.1. PARÂMETROS ANALISADOS 28

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 31

5. CONCLUSÃO 37

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38

1. INTRODUÇÃO

Nas sociedades modernas, o setor de transportes é um dos maiores consumidores de energia. O transporte de cargas e de pessoas é responsável, a grosso modo, por cerca de um terço de todo o consumo de energia de um país. No caso do Brasil, isso não é diferente. Em 2017, o Brasil apresentou um consumo total de energia equivalente a 230.000 ktep (IEA, 2020), dos quais o setor de transportes foi responsável isoladamente por cerca de 85.000 ktep (37% do consumo total). Neste ano, o setor de transportes foi o principal consumidor individual da economia brasileira, situação que já vem acontecendo desde 2013, quando o consumo do setor de transportes ultrapassou o consumo energético do setor industrial brasileiro.

Comentado [HD1]: Refeência?

Comentado [HD2]: Explicar o que é ktep em nota de rodapé

Por ter essa relevância no consumo energético brasileiro, a adoção de medidas de racionalização do uso da energia no setor de transportes é uma iniciativa de grande interesse para a economia nacional. No segmento rodoviário, a redução no consumo de combustíveis pode ser obtida por diversas maneiras, como por exemplo através de uma melhor manutenção da qualidade do pavimento das estradas, desenvolvimento de motores mais eficientes ou melhoria da aerodinâmica dos veículos. No caso dos motores à combustão interna, tanto por centelha como por compressão, é difícil obter ganhos significativos de eficiência sem grandes investimentos, o que pode se revelar antieconômico (MARTINS, 2006). Por outro lado, uma maneira de aumentar a eficiência do transporte rodoviário é reduzir o coeficiente aerodinâmico de arrasto dos veículos, diminuindo assim a energia gasta pelo motor para simplesmente vencer a resistência do ar.

O comportamento aerodinâmico dos automóveis representa um importante setor de pesquisa há muitas décadas e ainda o representa. De fato, ainda há muito a aprender sobre esse tópico. O aumento contínuo da população e o uso cada vez mais extensivo dos automóveis coloca o problema de ter à disposição veículos cada vez mais eficientes. Dessa forma, muita pesquisa é realizada nesse campo. Os testes tradicionalmente utilizados no setor industrial para avaliar o desempenho aerodinâmico dos carros são realizados em túnel de vento ou em condições de campo, na estrada.

Os testes realizados em túneis de vento apresentam algumas vantagens, pois permitem realizar medições de força e pressão em modelos em escala, impondo as condições de contorno desejadas e permitindo análises metódicas. Por outro lado, são estruturas caras, com altos custos operacionais, requerem um design cuidadoso de todos os detalhes, além da realização precisa de modelos em escala. Além disso, mesmo que sejam grandes o suficiente para testar veículos na escala 1:1, eles são incapazes de reproduzir as condições reais de fluxo devido ao tamanho final do túnel, à impossibilidade de simular qualquer sistema de movimentação do solo e de realizar testes em condições de vento lateral. Esses problemas podem ser parcialmente resolvidos usando modelos de pequena escala que, no entanto, não possuem todas as características do veículo real.

Comentado [HD3]: Muita informação sem referência

Os testes de estrada são caracterizados por condições reais de teste, mas são afetados pelos efeitos locais e perturbações devido à variabilidade das condições ambientais (intensidade e direção do vento, por exemplo), que geralmente dificultam a repetibilidade desses testes. Isso faz com que seja mais difícil isolar parâmetros de análise em um teste de estrada.

Comentado [HD4]: Referência?

Para atender às demandas dos clientes, reduzindo os custos e o tempo necessário para desenvolver o carro, os fabricantes de automóveis tiveram que desenvolver veículos acessíveis, seguros e confortáveis em um ritmo cada vez maior. Por esses motivos, os grandes fabricantes começaram a usar o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para simular a interação do veículo com o ar circundante.

Embora os testes em túnel de vento ainda sejam necessários para a validação dos resultados, a simulação de CFD tem várias vantagens: permite realizar um estudo paramétrico de forma mais barata e em menor tempo sobre eventuais modificações geométricas de um veículo em comparação com ensaios em túneis de vento ou em estradas; permite analisar com mais detalhes a maneira pela qual as mudanças de forma influenciarão as características do fluxo aerodinâmico em um veículo; permite realizar simulações impossíveis em um túnel de vento (como um vento cruzado). Por outro lado, o uso de CFD para simulação do desempenho aerodinâmico também apresenta algumas desvantagens, pois é complicado de executar, exigindo alto profissionalismo para que se obtenha bons resultados. Além disso, os modelos computacionais criados devem ser validados com testes experimentais.

Comentado [HD5]: Muito texto e nenhuma referência!

Nesse contexto, este trabalho é desenvolvido, explorando a análise do comportamento aerodinâmico de um modelo avaliando tanto em testes de túnel de vento como através de simulação numérica.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é investigar, utilizando simulação computacional, a possibilidade da utilização do túnel de vento da FAACZ para a avaliação de propriedades aerodinâmicas de veículos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar qualitativamente o escoamento ao redor de um corpo padrão em diferentes tamanhos e comparar com a literatura;
- Medir os coeficientes de arrasto e sustentação de um corpo padrão em diferentes tamanhos e comparar com a literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante grande parte do século XX, as características estéticas e os requisitos de fabricação limitaram o desenvolvimento da aerodinâmica dos automóveis, relegando a segundo plano qualquer preocupação com a redução do consumo de combustíveis dos carros. No entanto, com os choques do petróleo da década de 70, a indústria automotiva precisou começar a lidar com os aspectos aerodinâmicos dos veículos, a fim de melhorar sua eficiência. Além de reduzir o consumo de combustível, a melhoria do comportamento aerodinâmico tornou possível aumentar o desempenho dinâmico dos carros.

Comentado [HD6]: Muita informação sem referência

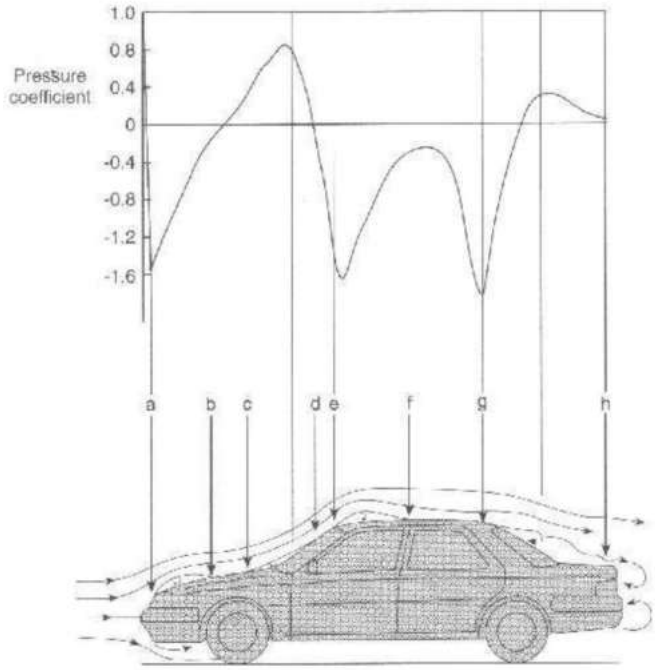
2.1. AERODINÂMICA DE UM VEÍCULO

Os carros modernos geralmente adotam a configuração de três volumes, com o motor colocado na posição frontal. Isso influencia muito suas dimensões externas. Devido a esse formato, o fluxo gerado pelo carro em movimento assume características particularmente negativas para a resistência aerodinâmica (BARNARD, 2001), separando-se e prendendo-se várias vezes na superfície do carro. Essas separações ocorrem mais precisamente na:

- parte superior da grade do radiador, prendendo-se novamente no capô;
- parte inferior do para-brisas, prendendo-se na parte superior;
- parte superior do para-brisa, prendendo-se no teto;
- extremidade do teto, prendendo-se no final da janela traseira; neste caso, a recolocação do fluxo depende de vários fatores, como o comprimento e o ângulo de inclinação da janela traseira. Se o fluxo for reconectado, um novo destacamento ocorrerá no final do corpo do veículo.

A existência de muitos pontos de descolamento e recolocação do fluxo (que são ilustrados na Figura 1) leva ao surgimento de um alto coeficiente de arrasto. Isso deixa claro os motivos pelos quais a aerodinâmica desempenha um papel tão importante no design de carros modernos e por que se deve tentar reduzir ao máximo os efeitos negativos induzidos pela geometria no coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Figura 1 – Características de fluxo de um veículo de passageiros



Fonte: BARNARD (2001).

O arrasto é o fator aerodinâmico que tem maior influência em parâmetros como o consumo de combustível e velocidade em linha reta. Do arrasto depende a força na direção axial que deve ser superada por um veículo em movimento dentro de um fluido. Essa força é expressa pela relação a seguir, que varia com o quadrado da velocidade relativa do veículo.

$$F_D = \frac{1}{2}\, C_D\, \rho\, v^2\, A \qquad (1)$$

Onde F_D é o valor da força de arrasto;

C_D é o coeficiente de arrasto;

ρ é a densidade do fluido, no caso a densidade do ar;

v é a velocidade relativa do veículo em relação ao ar;

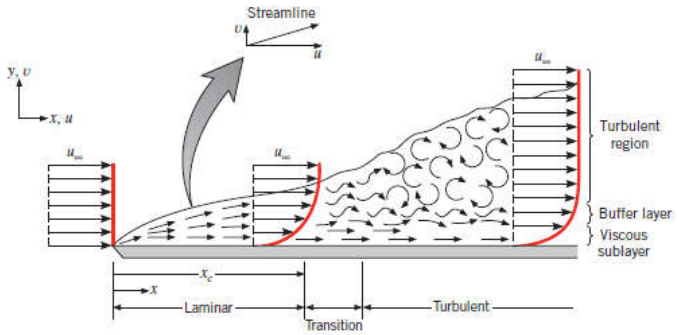
A é a área frontal do veículo.

A influência do atrito no consumo de combustível foi destacada por Hucho (1998), que mostrou que entre 75% a 80% da resistência ao movimento de um carro de tamanho médio, a uma velocidade de 100 km/h, deve-se à força aerodinâmica de arrasto. A força de arrasto é composta por três componentes principais: arrasto de superfície; arrasto de pressão; arrasto induzido por vórtices.

2.1.1. Arrasto de Superfície

A superfície de um carro em movimento dentro de um fluido a diferentes velocidades está sujeita a forças tangenciais. Esses esforços recebem o nome de arrasto de superfície, e são gerados pelo fato de que a velocidade do fluxo na superfície é diferente da velocidade do fluxo não perturbada. Uma descrição do mecanismo físico implícito ao atrito superficial foi feita por Pritchard e Mitchell (2016), considerando um escoamento externo sobre uma superfície, que pode ser considerada como o teto de um carro. De acordo com os autores, a velocidade do ar nesse escoamento é uma função da distância da superfície e seu valor se encontra entre zero (imediatamente na superfície) e o valor da velocidade do fluxo não perturbado. A zona em que a velocidade apresenta essa variação recebe o nome de camada limite. Acima do teto de um carro a camada limite tem uma pequena espessura e, a partir disso, deduz-se que o gradiente de velocidade é particularmente alto. A presença de um forte gradiente de velocidade leva à formação de um esforço, cujo componente tangencial causa o atrito da superfície.

Figura 2 – Desenvolvimento da camada limite e separação



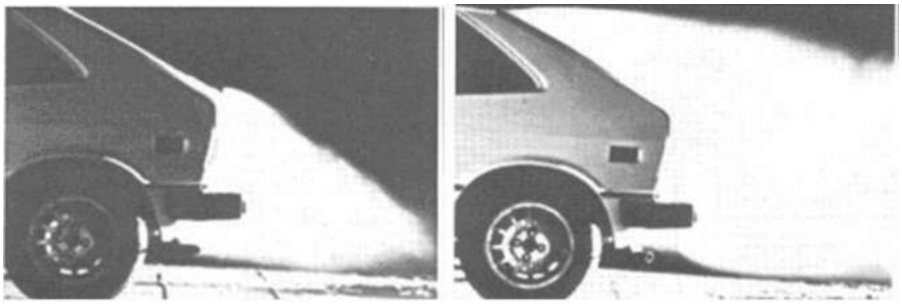
Fonte: BANIHANI e EL HAJ ASSAD (2018).

A Figura 2 destaca como a camada limite é caracterizada por três regiões: fluxo laminar, região de transição, fluxo turbulento. Na região de fluxo laminar, a espessura da camada limite é pequena e aumenta gradualmente. Pode ser encontrada uma região de transição entre o fluxo laminar e turbulento, em que a mistura do fluxo de ar aumenta consideravelmente a espessura da camada limite. Na região turbulenta da camada limite, as tensões de cisalhamento são maiores e a espessura aumenta rapidamente.

2.1.2. Arrasto de Pressão

Como visto anteriormente, quando o fluxo atinge a parte final do teto do carro, ele se separa da superfície causando a formação de uma trilha, ou esteira aerodinâmica. O principal efeito dessa separação é a formação de uma área com menos pressão do que a presente na região frontal do carro e isso gera uma força na direção oposta ao movimento. Essa força é chamada de arrasto por pressão (HUCHO, 1998) e representa o principal componente da força de arrasto, sendo a razão pela qual é tão importante reduzir a esteira aerodinâmica.

Figura 3 – Perfil da esteira aerodinâmica sem (à esquerda) e com um defletor (à direita)



Fonte: HUCHO (1998).

A Figura 3 ilustra as esteiras aerodinâmicas que ocorrem em um carro comum. À direita, a região afetada pela esteira é particularmente larga e o destacamento é induzido por um defletor colocado na parte final do teto. À esquerda, o defletor não está presente e isso causa a formação de vórtices que geram uma queda de pressão capaz de atrair o fluxo em direção à janela traseira e atrasar sua separação. É importante sublinhar que uma esteira menor nem sempre resulta em uma redução das

forças de arrasto, devido ao terceiro mecanismo que contribui para formação dessas, chamado arrasto induzido por vórtices.

2.1.3. Arrasto Induzido por Vórtices

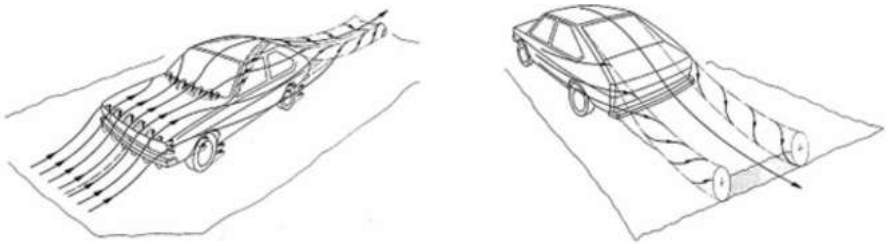
Os carros comuns são corpos com baixa altura em relação ao seu tamanho e largura, sendo inevitável terem uma relativamente grande superfície frontal, o que gera altos níveis de arrasto de pressão. A separação que ocorre no final da parte posterior do veículo geralmente é acompanhada por vórtices na direção longitudinal (esses tipos de vórtices são chamados de vórtices C-Pillar porque são gerados pelo pilar traseiro do carro, que é precisamente chamado C-Pillar). Esses vórtices têm uma forma fortemente tridimensional, possuem elevada energia cinética, e causam uma queda acentuada da pressão, atraindo o fluxo para a janela traseira e atrasando seu a separação da camada limite.

Comentado [HD7]: Pode falar "coluna C"

Os métodos para prover a separação do fluxo da parte traseira do veículo são fortemente condicionados pelo ângulo de inclinação da superfície traseira e afetam significativamente a extensão dos vórtices. O componente da força de arrasto induzido por vórtices é mais conhecido como arrasto induzido por elevação.

Comentado [HD8]: Muita informação e nenhuma referência!

Figura 4 – Geração de vórtices em torno do veículo



Fonte: HUCHO (1998).

2.2. TÚNEL DE VENTO

Túneis de vento são instalações em forma de tubo que permitem que os engenheiros promovam um deslocamento de ar sobre um veículo, como se o mesmo estivesse se locomovendo. São equipamentos que ajudam os pesquisadores a

aprender mais sobre os aspectos aerodinâmicos de um veículo terrestre ou uma aeronave (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012). Os túneis de vento são geralmente utilizados para testar modelos em escala de veículos e aeronaves, embora alguns poucos túneis de vento sejam grandes o suficiente para conter versões em tamanho real dos veículos. Ao mover o ar em torno de um objeto, o túnel de vento simula as condições do objeto em deslocamento.

Túneis de vento são equipados com potentes ventiladores para mover o ar através do tubo. O objeto que está sendo testado é colocado no túnel e fixado, para que não se mova. O ar que se move ao redor do objeto estático mostra o que aconteceria se o objeto estivesse se movendo pelo ar. O objeto pode ser um modelo em escala menor de um veículo, somente uma peça de um veículo, uma aeronave de tamanho normal ou mesmo um objeto comum, como uma bola de tênis. Geralmente, o objeto é carregado com instrumentos especiais para medir as forças produzidas pelo ar no objeto. Os engenheiros também estudam como o ar se move ao redor do objeto, injetando fumaça ou corante no túnel e fotografando seu movimento ao redor do objeto. Melhorar a aerodinâmica do fluxo de ar ao redor de um objeto pode ter como objetivo diminuir seu arrasto ou aumentar sua sustentação, no caso de aeronaves.

A aplicação de testes de túnel de vento na indústria automobilística, tem como objetivo principal não só a determinação das forças aerodinâmicas, mas buscar maneiras de reduzir o arrasto aerodinâmico e, consequentemente, diminuir a potência necessária para mover o veículo nas estradas a uma determinada velocidade. Nesses estudos, a interação entre a estrada e o veículo pode ter um papel significativo, e essa interação deve ser levada em consideração na interpretação dos resultados dos testes (EIDT; OCÁCIA, 2006). Em uma situação real, a estrada está se movendo em relação ao veículo, mas o ar está parado em relação à estrada. No entanto, no túnel de vento o ar está se movendo em relação à estrada, enquanto a estrada está estacionária em relação ao veículo de teste. Assim, alguns túneis de vento de teste automotivo incorporaram cintos móveis sob o veículo de teste, em um esforço para aproximar a condição real. Dispositivos muito semelhantes podem ser usados nos testes de túnel de vento das configurações de decolagem e pouso de aeronaves.

O teste do túnel de vento de equipamentos esportivos também tem sido importante para este setor específico ao longo dos anos, sendo extensivamente aplicado ao desenvolvimento de tacos e bolas de golfe, trenós olímpicos, bicicletas de competição e capacetes de carros de corrida. A aerodinâmica do capacete é particularmente importante em carros de corrida de cabine aberta (como é o caso da Fórmula 1). Forças de elevação excessivas no capacete podem causar considerável tensão no pescoço do piloto, e a separação do fluxo na parte traseira do capacete pode causar golpes turbulentos e, portanto, visão turva para o motorista em alta velocidade (CORREIA, 2008).

Os túneis de vento são de tamanhos diferentes, podendo ser de apenas alguns centímetros de largura até grandes o suficiente para testar um avião em tamanho real. Os túneis de vento movem o ar em velocidades diferentes, para simular diferentes condições de operação. No entanto, diferentes equipamentos são mais adequados para operar em diferentes faixas de velocidade. Segundo Barlow et al. (1999), alguns equipamentos são melhores para testar objetos a velocidades menores de 300 km/h. Outros, utilizados para aplicações aeronáuticas e espaciais podem movem o ar a mais de cinco vezes a velocidade do som (cerca de 6.400 km/h).

Muitos túneis de vento usam ventiladores para acelerar o ar. Em um túnel de vento de circuito fechado, o ar é trazido de volta ao ventilador e é recirculado continuamente através do túnel. Isso permite longos tempos de teste. Outros túneis de vento liberam ar pressurizado em velocidades muito altas por curtos períodos de teste. Segundo Sartori, Soeiro e Dourado (2017), o túnel de vento é considerado uma importante ferramenta que visa simular o escoamento de ar em objetos como prédios, aeronaves e automóveis, a fim de obter soluções mais realísticas do que as apresentadas pelos programas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD).

2.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Nos escoamentos externos sobre corpos rombudos – que são corpos de volume significativo em relação a sua dimensão característica – podem-se encontrar elevados gradientes de pressão que ocorrem nas regiões de separação, onde a camada limite se descola do contorno sólido, resultando em um escoamento complexo, com alto grau de turbulência e recirculações (DA SILVA JR.; DE SOUZA, 2011).

Escoamentos que ocorrem em torno de geometrias complexas podem ser estudados através do auxílio de pacotes de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – *computer fluid dynamics*). As vantagens do uso dessa ferramenta são a elevada capacidade de processamento de muitos dados e a velocidade da análise, permitindo a realização de várias simulações com diferentes cenários, parâmetros e condições de contorno.

Em termos gerais, a estratégia de um pacote CFD é substituir o domínio do problema contínuo por um domínio discreto usando uma "grade". No caso real, em domínio contínuo, cada variável de fluxo é definida em todos os pontos do domínio. No domínio discreto, cada variável de fluxo é definida apenas nos pontos da grade (PRITCHARD; MITCHELL, 2016). Em uma solução CFD, resolve-se diretamente as variáveis de fluxo relevantes apenas nos pontos da grade. Os valores em outros locais são determinados interpolando os valores nos pontos da grade.

As equações diferenciais parciais que governam e as condições de contorno são definidas em termos das variáveis contínuas, como pressão, velocidade e assim por diante. Pode-se aproximar esses dados no domínio discreto em termos das variáveis discretas (pressão, velocidade, etc.). Usando esse procedimento, tem-se um sistema discreto que consiste em um grande conjunto de equações algébricas acopladas nas variáveis discretas (PRITCHARD; MITCHELL, 2016). Configurar o sistema discreto e resolvê-lo (que é um problema de inversão de matriz) envolve um número muito grande de cálculos repetitivos, tarefa que só é possível com a utilização de computadores modernos.

Uma simulação computacional de escoamento de ar sobre um modelo tridimensional geralmente é feita em três etapas (DA SILVA et al., 2012). Primeiro é feita a geração da geometria do veículo ou objeto em um programa de CAD (*Computer Aided Design* – Desenho Auxiliado por Computador). Depois é realizada a discretização do modelo e também do domínio limitado em seu entorno, através de um programa de geração de malha. Finalmente, é feita a solução do escoamento através de um programa de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). O modelo numérico tridimensional contém a geometria do veículo envolvida por um túnel de vento virtual. Nas simulações, são definidas diferentes velocidades de deslocamento do ar em torno do veículo. A solução do escoamento fornece resultados na forma de mapas em cores representado a pressão aerodinâmica e a velocidade do ar através do veículo, além do cálculo do coeficiente de arrasto.

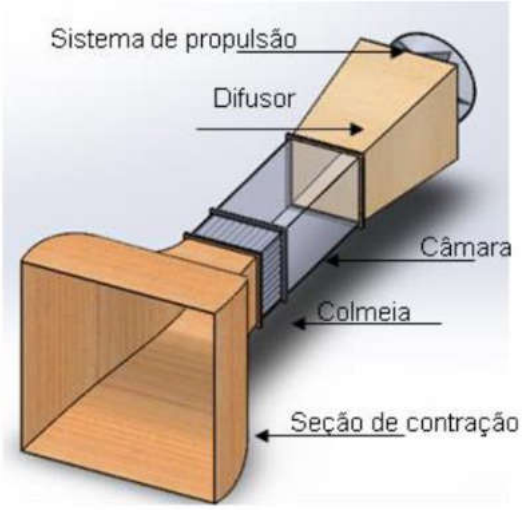
Em fevereiro de 2018, a ANSYS Inc. lançou um novo software baseado em GPU chamado Ansys Discovery Live, que visa apoiar o design criativo de engenharia mecânica. Ao utilizar o método de volume finito, o programa é capaz de uma simulação de fluxos acoplados mecânica e termicamente, quase em tempo real. A Ansys também fornece produtos de software gratuitos para estudantes, voltados para a realização de trabalhos acadêmicos realizados fora da sala de aula. A versão estudantil do Ansys Discovery Live é gratuitamente disponível para download e uso por estudantes de todo o mundo (ANSYS, 2020), podendo ser instalados em qualquer máquina MS Windows de 64 bits suportada.

O Ansys Discovery Live é um pacote de simulação em tempo real baseado em GPU (*graphics processing unit*) que combina ambientes de simulação de modelagem CAD em um ambiente responsivo, onde os usuários podem ver em tempo real como as alterações em seus projetos afetam as simulações, sem necessidade de pós-processamento. O usuário pode modificar a geometria e observar as mudanças nos resultados quase instantaneamente, enquanto a simulação está em execução. Portanto, o processo de desenvolvimento de produtos orientado pela simulação é consideravelmente acelerado. Como o Ansys Discovery Live é baseado em GPU, é necessária uma GPU para executá-lo. A Ansys recomenda uma placa NVIDIA GPU baseada na arquitetura Kepler, Maxwell ou Pascal (ou mais recente) com pelo menos 4 GB de RAM de vídeo (de preferência 8 GB).

2.4. O TÚNEL DE VENTO DA FAACZ

O túnel de vento didático atualmente existente nas instalações da FAACZ consiste em um sistema de circuito aberto que dispõe de um bocal, ou seção de contração, responsável por promover o aumento da velocidade do fluxo de ar; uma colmeia, para estabilizar o fluxo e fazer com que o escoamento chegue a área de testes e medições na forma mais laminar possível, permitindo uma visualização uniforme dos fenômenos aerodinâmicos. Após a colmeia, localiza-se a seção de testes, onde os modelos são estudados, formada por uma câmara de paredes transparentes, permitindo a visualização do escoamento. Após a câmara de testes, tem-se um difusor que completa o sistema, tendo como objetivo a redução da velocidade do escoamento na saída. Finalmente, após o difusor, encontra-se o equipamento de propulsão que gera a diferença de pressão e proporciona o escoamento por sucção. A figura 5 apresenta o sistema.

Figura 5 – Modelo 3D do Túnel de Vento da FAACZ



Fonte: Sartori, Soeiro, Dourado (2017).

O túnel de vento da FAACZ tem um comprimento total de 2,3 metros e é montado sobre uma bancada móvel, como pode ser visto na figura 6, o que permite a realização de ensaios aerodinâmicos fora do ambiente do laboratório da FAACZ.

Figura 6 – Túnel de Vento Montado sobre Base Móvel.

Fonte: Sartori, Soeiro, Dourado (2017).

O sistema de propulsão do túnel de vento da FAACZ é um exaustor de fabricação da Venti-Delta, com dimensões de 40x23,4x41 cm, rotação de 1600 RPM, vazão de 4200 m³/h e peso bruto de 5,735 kg. A seção de testes é constituída de material acrílico, para permitir a visualização dos ensaios, com uma seção transversal quadrada de 300 mm de lado e comprimento de 600 mm.

O bocal de contração, que é o dispositivo responsável por causar a aceleração do fluido a partir da redução de sua área transversal, tem 525 mm de comprimento. Sua entrada tem uma seção quadrada com 670 mm de lado, e sua saída conecta o fluxo à seção de testes, em uma seção quadrada de 300 mm de lado.

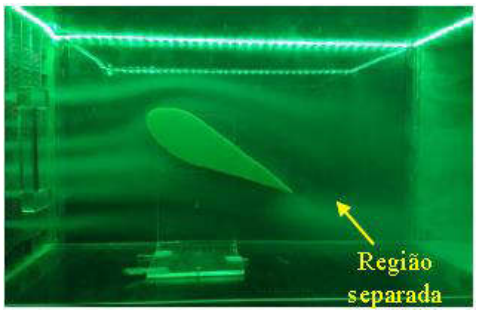
A colmeia, localizada entre o bocal de contração e a seção de testes, é responsável por estabilizar o escoamento, proporcionando um fluxo laminar, e é composta por 225 tubos de 5/8” de diâmetro. Tem 130 mm de comprimento e uma seção de 175 mm x 175 mm.

O difusor possui entrada caracterizada por uma seção quadrada de 300 mm de lado e uma seção de saída quadrada com 440 mm de lado, onde localiza-se acoplado o exaustor, conectado por um meio de um acoplamento de 400 mm de diâmetro.

A visualização do escoamento ocorre com o auxílio de linhas de fumaça, injetadas por meio de um sistema composto por uma máquina de fumaça posicionada na entrada do bocal de contração. À medida que as linhas de fumaça são produzidas pela máquina e injetadas no bocal de contração, as mesmas são direcionadas para a

seção de testes pelos tubos da colmeia. Desse modo, permite-se a visualização do escoamento por sobre as superfícies em estudo, como é ilustrado nas figuras 7 e 8.

Figura 7 – Escoamento em torno de perfil de asa no túnel de vento da FAACZ.



Fonte: Sartori, Soeiro, Dourado (2017).

Figura 8 – Simulação de escoamento entre dois edifícios no túnel de vento da FAACZ.

Fonte: Sartori, Soeiro, Dourado (2017).

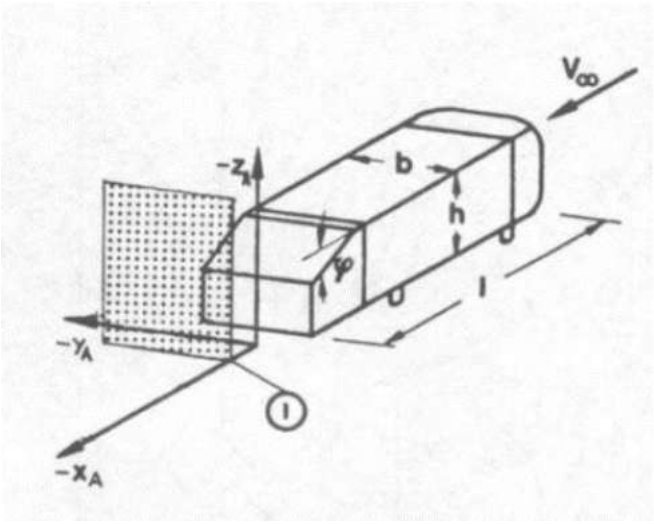
2.5. MODELO DE AHMED

Experimentos de modelagem aerodinâmica adequados para fornecer dados de validação fazem uso de corpos de modelo com geometrias definidas e caracterizadas por parâmetros variáveis, como o ângulo de inclinação na parte traseira. Um desses corpos é o corpo de Ahmed, um modelo de forma simples, com propriedades

aerodinâmicas básicas semelhantes às de um veículo, que tem sido usado para muitas investigações de referência (MEILE et al., 2011).

O modelo de Ahmed foi proposto em 1984, em estudo publicado pelo SAE (AHMED et al., 1984), para estudar aspectos aerodinâmicos dos veículos automotores, pois já nessa época, após os choques do petróleo, havia uma crescente preocupação com a disponibilidade futura de combustível. A economia de combustível havia se tornado um requisito importante de um carro ou veículo utilitário moderno. E o consumo de combustível depende, entre outros fatores, da resistência aerodinâmica do veículo. A figura 9 apresenta o modelo utilizado por Ahmed (1984).

Figura 9 – Modelo do corpo de Ahmed

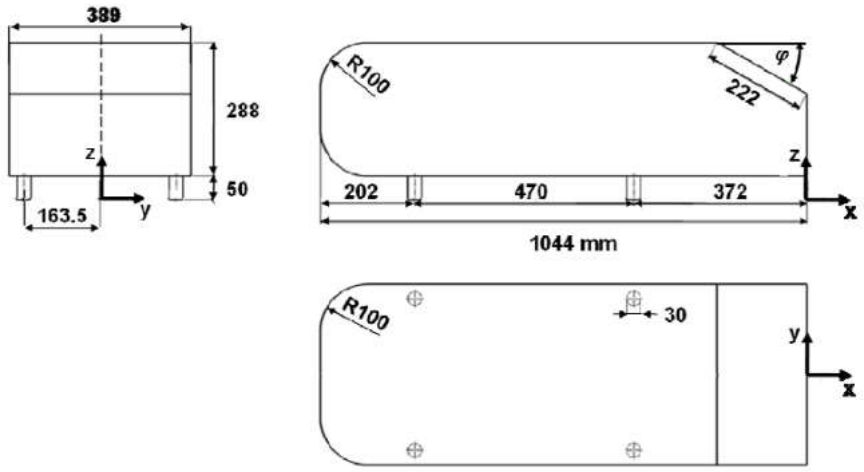


Fonte: AHMED et al. (1984).

A configuração utilizada no corpo de Ahmed foi concebida buscando-se gerar as características essenciais de um campo real de fluxo de veículos, com exceção da rotação das rodas, fluxo do compartimento do motor e dos passageiros, além de projeções irregulares do lado inferior e da superfície. Assim, o modelo escolhido, além de ter uma geometria simples, deveria gerar um forte deslocamento tridimensional de fluxo na frente, um fluxo relativamente uniforme no meio e uma grande esteira estruturada na parte traseira (AHMED et al., 1984).

A forma geométrica do corpo de Ahmed está representada na Figura 10. Apesar do considerável desvio entre sua geometria e a dos veículos usuais, o corpo de Ahmed representa as propriedades aerodinâmicas básicas de um veículo, especialmente na parte traseira. O ângulo de inclinação φ exerce forte influência sobre o arrasto aerodinâmico e o descolamento do fluido na parte traseira. Os coeficientes de arrasto e descolamento se alteram abruptamente quando ângulo $\varphi = 30°$, portanto esse ângulo é chamado de ângulo crítico (MEILE et al., 2011).

Figura 10 – Dimensões do corpo de Ahmed



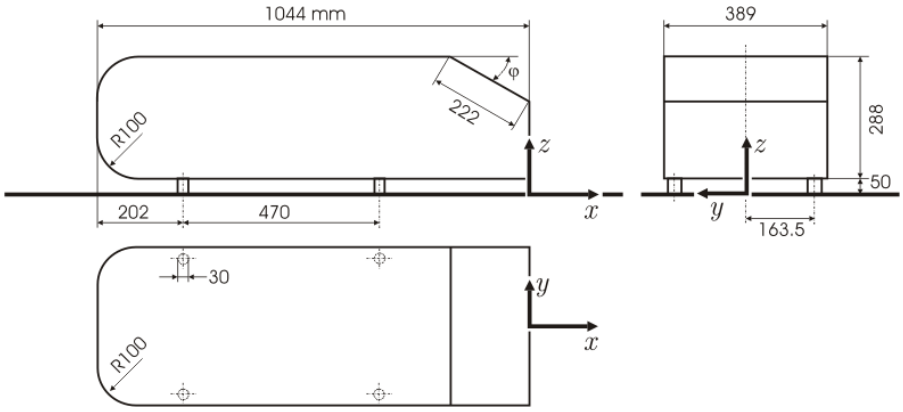
Fonte: MEILE et al. (2011).

3. METODOLOGIA

Para conduzir o estudo aerodinâmico, foi escolhido como referência padrão o corpo de Ahmed, apresentado no item 2.5. Essa escolha se justifica uma vez que este modelo foi estudado numericamente e experimentalmente de maneira exaustiva. No caso específico deste trabalho, foi estudado o comportamento aerodinâmico do corpo de Ahmed com ângulo de caimento de traseira de 25 graus.

O presente trabalho realizou quatro simulações numéricas empregando o software ANSYS Discovery Live 2020 R1 (ANSYS, 2020). O modelo utilizado foi o corpo de Ahmed (Ahmed et al., 1984), com a parte traseira com ângulo de chanfro de 25º, mostrado na Figura 11. O Quadro 1 descreve cada uma das simulações, e o Quadro 2, mostra as condições de contorno utilizadas. Para as simulações 2, 3 e 4, o modelo de Ahmed teve sua escala reduzida a fim de permitir o uso com o túnel de vento da FAACZ. Nas simulações 2 e 3, o comprimento do modelo foi de 250 mm e, na simulação 4, 100 mm.

Figura 11 – Representação gráfica do corpo de Ahmed com ângulo de 25º.



Fonte: adaptado de Hinterberger, Garcia-Villalba, Rodi (2004).

Quadro 1: descrição das simulações realizadas no presente trabalho.

Simulação 1	Simulação do experimento original de Ahmed
Simulação 2	Simulação do túnel de vento da FAACZ, com corpo de Ahmed de comprimento igual a 250 mm e similaridade do número de Reynolds.
Simulação 3	Simulação do túnel de vento da FAACZ, com corpo de Ahmed de comprimento igual a 250 mm e escoamento real do túnel.
Simulação 4	Simulação do túnel de vento da FAACZ, com corpo de Ahmed de comprimento igual a 100 mm e escoamento real do túnel.

O objetivo da simulação 1 é validar os resultados do software empregado. As demais simulações empregam o modelo de Ahmed em dimensões compatíveis com a seção de teste da FAACZ. A simulação 2 objetiva reproduzir o número de Reynolds da simulação original de Ahmed (1984), a fim de alcançar a similaridade dinâmica. As simulações 3 e 4 utilizam o fluxo real obtido com a configuração atual do túnel de vento da FAACZ.

Quadro 2: condições de contorno para as simulações.

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Regime do escoamento	Permanente	Permanente	Permanente	Permanente
Fluido	Ar a 20ºC	Ar a 20ºC	Ar a 20ºC	Ar a 20ºC
Entrada	V = 60 m/s, direção x	V = 60 m/s, direção x	V = 60 m/s, direção x	V = 60 m/s, direção x
Saída	Pressão ambiente (0 Pa, man.)	Pressão ambiente (0 Pa, man.)	Pressão ambiente (0 Pa, man.)	Pressão ambiente (0 Pa, man.)
Laterais	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento
Teto	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento
Piso	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento	Parede sem deslizamento

3.1. PARÂMETROS ANALISADOS

Serão representados graficamente a distribuição de velocidades (magnitude do vetor velocidade) em um plano vertical com orientação longitudinal em relação ao veículo, e a distribuição de pressão ao longo da superfície do veículo, com uma vista isométrica e uma vista inferior do modelo. Para fins de comparação das simulações, a magnitude da velocidade será normalizada em relação à velocidade de corrente livre (EQUAÇÃO 2) e a pressão será expressa como o coeficiente de pressão (EQUAÇÃO 3). Também será apresentada a representação gráfica das linhas de corrente ao redor do modelo do corpo de Ahmed.

Serão também calculados, para cada simulação, o número de Reynolds (EQUAÇÃO 4), bem como os coeficientes de arrasto (EQUAÇÃO 5) e sustentação (EQUAÇÃO 6).

$$V^* = \frac{V}{V_\infty} \tag{2}$$

Onde V^* é a velocidade normalizada do fluxo;
V é a velocidade do escoamento medida em um ponto indicado do domínio;
V_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento.

$$c_P = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2 \tag{3}$$

Onde c_P é o coeficiente de pressão;
V é a velocidade do escoamento medida em um ponto indicado do domínio;
V_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento.

Valores negativos de c_P indicam pressões inferiores à pressão ambiente, ou seja, velocidades locais superiores à velocidade livre do escoamento; valores nulos indicam pontos de pressão idêntica à pressão ambiente, ou seja, velocidades locais idênticas à velocidade do escoamento; valores entre 0 e 1 indicam pressões superiores à pressão ambiente, ou seja velocidades locais inferiores à velocidade livre

e, finalmente, $c_P = 1$ indica pontos de estagnação do escoamento. A fim de melhorar a estabilidade de automóveis, deseja-se que o efeito aerodinâmico produza uma força que pressione o veículo contra o solo (*downforce*) o que significa obter, nas faces superiores dos veículos $c_P \geq 0$ e, nas faces inferiores, $c_P \leq 0$.

$$Re = \frac{\rho V_\infty L}{\mu} \tag{4}$$

Onde Re é o número de Reynolds;
ρ é a massa específica do ar;
V_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento;
L é o comprimento do modelo representativo do veículo;
μ é a viscosidade específica do ar.

$$c_D = \frac{2\,F_D}{\rho V_\infty^2 A} \tag{5}$$

Onde c_D é o coeficiente de arrasto aerodinâmico;
F_D é a força de arrasto, na direção do escoamento;
ρ é a massa específica do ar;
V_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento;
A é a área projetada do corpo, num plano perpendicular à direção do escoamento.

Quanto maior o valor de c_D, maior será o arrasto aerodinâmico sofrido pelo veículo.

$$-c_L = -\frac{2\,F_L}{\rho V_\infty^2 A} \tag{6}$$

Onde $-c_L$ é o simétrico do coeficiente de sustentação aerodinâmica;
F_L é a força de sustentação, na vertical;
ρ é a massa específica do ar;
V_∞ é a velocidade de corrente livre do escoamento;
A é a área projetada do corpo, num plano horizontal.

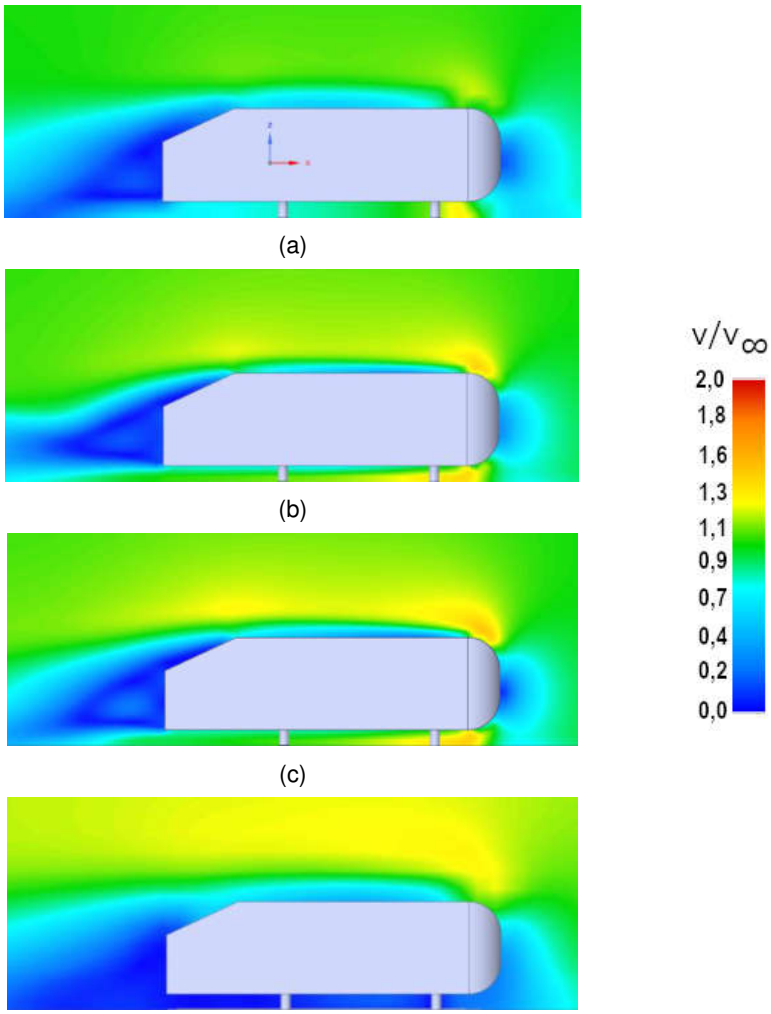
Valores positivos de $-c_L$ indicam que o veículo é pressionado contra o solo (*downforce*), ao passo que valores negativos indicam que o veículo tende a diminuir a força de contato com o solo.

Através da realização das simulações descritas, foram observadas as estruturas e foram medidos os coeficientes de arrasto e coeficiente de sustentação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos. A Figura 12, a seguir, traz os campos de velocidades no plano longitudinal para as 4 simulações realizadas, onde as cores representam a magnitude do vetor velocidade normalizado pela velocidade de corrente livre.

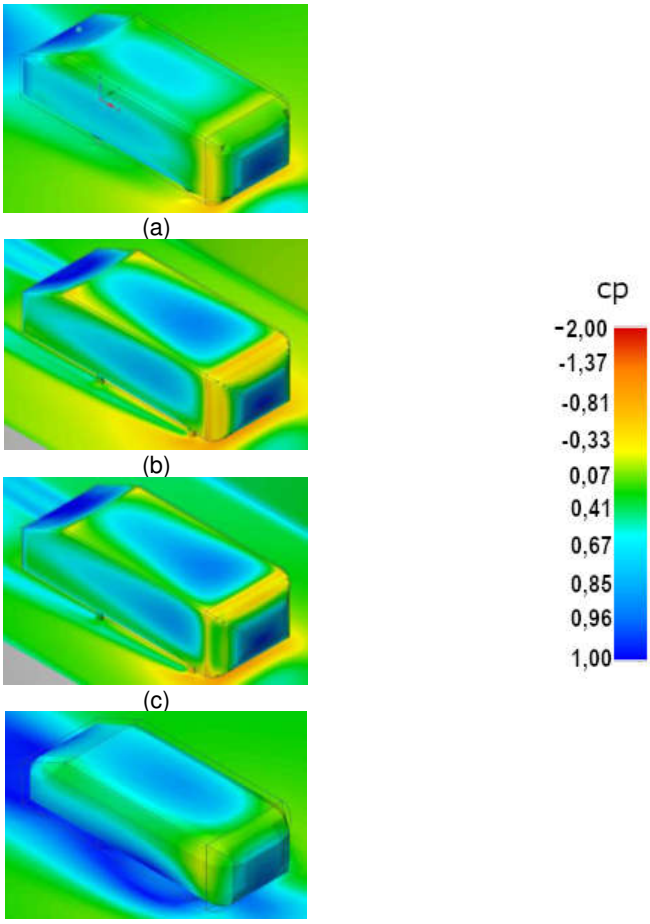
Figura 12 – campo de velocidade no plano longitudinal para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4.



De maneira geral, observa-se que o escoamento gera regiões (em amarelo) onde o ar é acelerado na parte anterior do modelo, especialmente para as simulações 2, 3 e 4, e a formação de zonas de estagnação (em azul) na esteira do modelo, com grande destaque para a simulação 4.

A Figura 13, a seguir, apresenta a distribuição de pressão traz os campos de velocidades no plano longitudinal para as 4 simulações realizadas. As cores representam o coeficiente de pressão (cp).

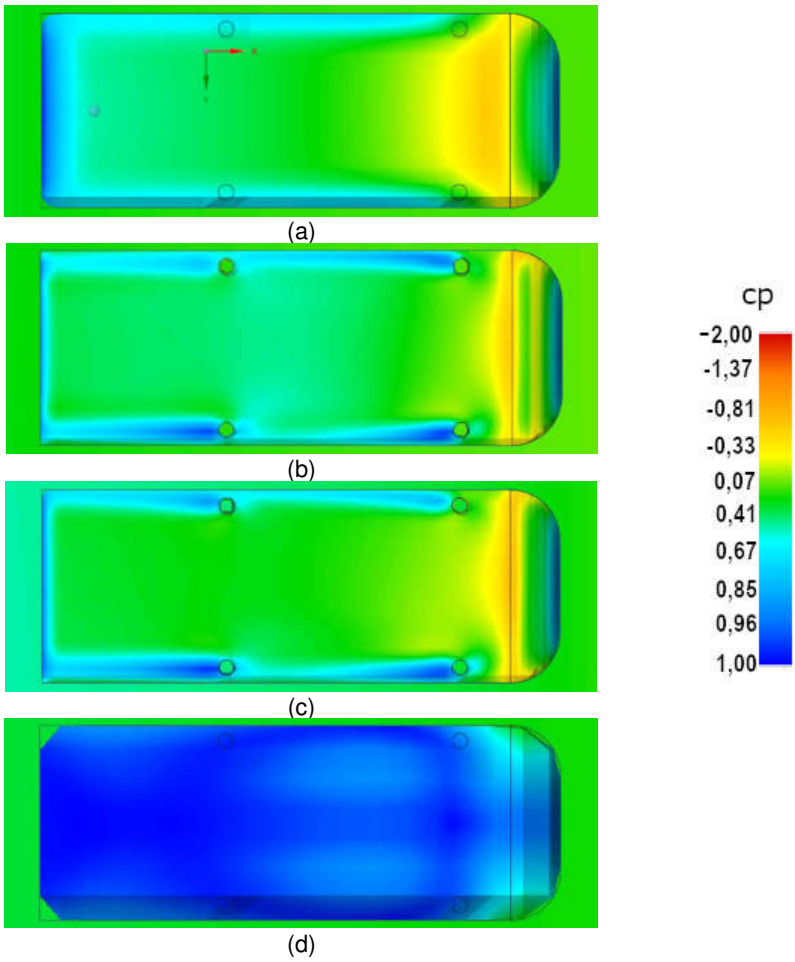
Figura 13 – distribuição de pressão (vista isométrica) ao longo do corpo para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4.



De maneira geral, a distribuição do coeficiente de pressão complementa os resultados apresentados na distribuição de velocidade, onde as zonas em que o fluxo é acelerado apresentam coeficientes de pressão negativos, e as regiões de estagnação apresentam coeficiente de pressão unitário.

A Figura 14, a seguir, apresenta a distribuição de pressão ao longo da superfície inferior do corpo de Ahmed para as 4 simulações realizadas. As cores representam o coeficiente de pressão (cp).

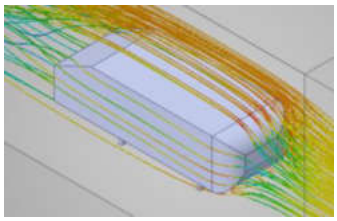
Figura 14 – distribuição de pressão ao longo da superfície inferior corpo para (a) simulação 1; (b) simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4. Cores representam o coeficiente de pressão (cp).



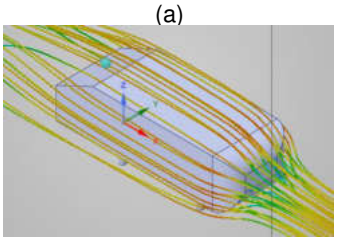
Como pode-se observar, os resultados obtidos na superfície inferior do corpo de Ahmed foram muito similares para as simulações 1, 2 e 3, ao passo que os resultados da simulação 4 foram completamente diferentes, com a superfície inferior sendo completamente tomada por zonas de estagnação.

A Figura 15, a seguir, apresenta a representação das linhas de corrente ao longo do corpo de Ahmed para as 4 simulações realizadas.

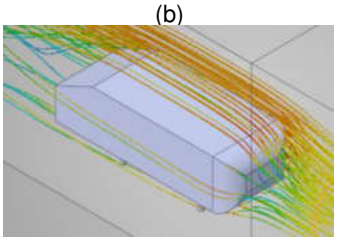
Figura 15 – representação das linhas de corrente ao longo do corpo para (a) simulação 1; (b) Simulação 2; (c) simulação 3; (d) simulação 4.



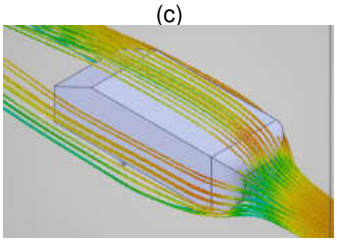
(a)



(b)



(c)



(d)

As linhas de corrente mostram que o fluxo sofre menos perturbações na simulação 2. As simulações 1 e 3 apresentam uma situação semelhante em relação ao aspecto das linhas de corrente, e a simulação 4 apresenta a maior perturbação do fluxo original.

Entretanto, apesar de algumas diferenças individuais, de um modo geral, as estruturas observadas apresentaram comportamentos semelhantes, permitindo a compreensão do escoamento ao redor do modelo, em relação aos seus aspectos qualitativos. Essa compreensão pôde ser obtida através das figuras geradas na simulação: linhas de corrente, distribuições do campo de velocidades sobre as superfícies, e também representação do campo de pressão nas superfícies do modelo.

Finalmente, a tabela a seguir apresenta os resultados do número de Reynolds e dos coeficientes de arrasto e do simétrico do coeficiente de sustentação, comparando os resultados obtidos nas quatro simulações realizadas com os resultados obtidos por Ahmed et al. (1984).

Tabela 1: valores para o número de Reynolds (Re), coeficiente de arrasto (cd) e para o simétrico do coeficiente de sustentação, comparando os resultados de Ahmed et al. (1984) com a simulações 1 a 4.

	Ahmed (1984)	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Re	$4{,}16 \times 10^9$	$4{,}16 \times 10^9$	$4{,}16 \times 10^9$	$9{,}46 \times 10^7$	$3{,}79 \times 10^7$
c_d	0,287	0,251	0,436	1,238	0,324
$-c_L$	-	-0,253	-0,365	0,148	-0,198

Os coeficientes obtidos nas simulações utilizando dados do escoamento real com os modelos de 100 mm (Simulação 4) e de 250 mm (Simulação 3) são diferentes do obtido por Ahmed e de outros autores da literatura, uma vez que não foi respeitada a similaridade (diferentes números de Reynolds).

Para a simulação com o modelo de 250 mm, mesmo com a similaridade sendo mantida (Simulação 2), os coeficientes ainda assim foram diferentes do obtido por Ahmed (1984) e outros autores da literatura. Este resultado pode ter sido influenciado

por dois fatores: (1) pelo software, que é voltado para a otimização rápida de modelos e, portanto, um pouco menos preciso que outros tipos de simulação computacional, e (2) efeitos de compressibilidade que tornaram-se mais significativos devido à alta velocidade utilizada na simulação a fim de se manter a similaridade do escoamento.

5. CONCLUSÃO

O estudo do comportamento aerodinâmico tem grande importância no projeto de veículos e em seu desempenho, influenciando a potência gasta para vencer a resistência do ar e, consequentemente, o consumo de combustível. Os estudos aerodinâmicos podem ser conduzidos através de ferramentas de CFD e do uso de túneis de vento. A vantagem do CFD é a praticidade e a velocidade das simulações, além da possibilidade de estudar corpos de diferentes geometrias e dimensões.

Os resultados obtidos nesse trabalho indicaram que o túnel de vento da FAACZ é adequado para uso didático, permitindo a avaliação qualitativa de escoamentos aerodinâmicos ao redor dos modelos, possibilitando ainda a observação de várias características do escoamento através de seu sistema de visualização com fumaça. Além disso, a utilização de balança acoplada pode permitir o entendimento dos efeitos de sustentação originados pelo fluxo.

As limitações de tamanho e da velocidade de fluxo de ar limitam, entretanto, a reprodução de experimentos envolvendo veículos, sendo necessária a utilização de modelos. Os resultados dos testes com modelos no túnel de vento podem ser convalidados a partir da utilização de CFD e da comparação com experimentos da literatura científica, como foi feito nesse trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, S.R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE Transactions**, p. 473-503, 1984.

ANSYS. **Ansys Free Student Software Download**. Disponível em: https://www.ansys.com/academic/free-student-products#disstudent. Acesso em: 03 jul. 2020.

BANIHANI, E.; EL HAJ ASSAD, M. Boundary-Layer Theory of Fluid Flow past a Flat-Plate: Numerical Solution using MATLAB. **International Journal of Computer Applications**. v.180, 2018.

BARLOW, J.B.; RAE, W.H.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. John Wiley & Sons, 1999.

BARNARD, R.H. **Road Vehicle Aerodynamic Design**: An Introduction, Second Edition, Gardners Books, 2001.

CORREIA, J.P.S. **Estudo numérico de uma asa CDG para fórmula 1**. Dissertação de Mestrado. Universidade da Beira Interior, 2008.

DA SILVA JUNIOR, E.A.; DE SOUZA, S.I.S. Estudo Aerodinâmico de Escoamento Sobre Veículos Rodoviários empregando Simulação Numérica. **III Encontro de Ciência e Tecnologia**, p. 14, out. 2011.

DA SILVA, T.P.; GERTZ, L.C.; RODRIGUES, A.F.A.; CERVIERI, A.; SILVEIRA, M.A.; OLIVEIRA, B.H.; PONCIO, A.L.R. Análise do Desempenho Aerodinâmico de um Protótipo de um Veículo Automotivo de Uso Urbano. In: **XII Fórum de Pesquisa Científica e Tecnológica**. Canoas, 2012.

DEL PIERO, A.R.; GIRO, C.E.; PIMASSONI, R.V.; TAVARES, T.S. **Ensaios Aerodinâmicos em um Perfil NACA 23015 e NACA 66(2)-215 Utilizando o Túnel de Vento das FAACZ**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Aracruz: FAACZ, 2018.

EIDT, E.P.; OCÁCIA, G.C. Desenvolvimento Aerodinâmico de um Veículo Conceito. **Revista Liberato**, v. 7, n. 8, 2006.

HINTERBERGER, C.; GARCIA-VILLALBA, M.; RODI, W. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. In: **The aerodynamics of heavy vehicles**: trucks, buses, and trains, p. 77-87. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.

HUCHO, W.H., **Aerodynamics of Road Vehicles**, Fourth Edition, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 1998.

INTERNACIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Data and Statistics – Brazil – Total Final Consumption**. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy%20consumption&indicator=Total%20final%20consumption%20(TFC)%20by%20sector. Acesso em: 06 abr. 2020.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. Porto: Publindústria, 2006.

MEILE, W.; BRENN, G.; REPPENHAGEN, A.; LECHNER, B.; FUCHS, A. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. **CFD letters**, v. 3, n. 1, p. 32-39, 2011.

NÚÑEZ, G.J.Z.; LOREDO-SOUZA, A.M.; ROCHA, M.M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, v.2, n.04, p.10-23, 2012.

PRITCHARD, P.J.; MITCHELL, J,W. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. John Wiley & Sons, 2016.

SARTORI, L.W.; SOEIRO, D.C.; DOURADO, H.O. **Construção de um Túnel de Vento Didático**. Jornada de Iniciação Científica da FAACZ. Aracruz: FAACZ, 2017.