

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO”**

**Faculdade de Engenharia
Campus de Ilha Solteira**

Evelyn Natalie Aguiar de Almeida

**Simulações de escoamento ao redor
do Corpo de Ahmed via CFD código
aberto e comercial**

Ilha Solteira – SP

Fevereiro de 2022

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO”**

**Faculdade de Engenharia
Campus de Ilha Solteira**

Evelyn Natalie Aguiar de Almeida

**Simulações de escoamento ao redor
do Corpo de Ahmed via CFD código
aberto e comercial**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP,
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de **BACHAREL em ENGENHARIA MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Aluisio Viais Pantaleão

**Ilha Solteira – SP
Fevereiro de 2022**

FICHA CATALOGRÁFICA

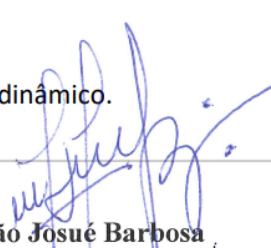
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A447s Almeida, Evelyn Natalie Aguiar de.
Simulações de escoamento ao redor do Corpo de Ahmed via CFD
código aberto e comercial / Evelyn Natalie Aguiar de Almeida. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2022
47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Aluisio Viais Pantaleão
Inclui bibliografia

1. CFD. 2. Corpo de Ahmed. 3. Túnel hidrodinâmico.



João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA - TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: "SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO AO REDOR DO CORPO DE AHMED
VIA CFD CÓDIGO ABERTO E COMERCIAL"

ALUNO: Evelyn Natalie Aguiar de Almeida **RA:** 161050549

ORIENTADOR: Prof. Dr. Aluisio Viais Pantaleão

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Aluisio Viais Pantaleão
Presidente (Orientador)



Prof. Dr. Cassio Roberto Macedo Maia



Eng. Bianca Taís Visoná Carmelo



Evelyn Natalie Aguiar de Almeida

Ilha Solteira, 10 de março de 2022.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por estar sempre presente, por permitir que, em minha vida, fluam momentos bons, tornando-os em memórias felizes e períodos difíceis para me oferecer ensinamentos.

Quero agradecer imensamente meus pais pelo suporte, ensinamentos, carinho e amor ao longo de minha vida. Também agradeço meus demais familiares, amigos e o meu gato por serem fontes de momentos alegres e também abrigo em momentos de tristeza.

Um agradecimento a IDEA - Sistemas Eletrônicos, por oferecer a licença do software utilizado nesse estudo.

Desejo expressar minha gratidão ao meu orientador Professor Aluisio Viais Pantaleão que sempre foi uma fonte constante de incentivo, correções, ensinamentos e ajuda ao longo dos últimos anos.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho, incluindo professores e funcionários da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira e do Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

O corpo Ahmed consiste em um modelo de referência (*benchmark*) utilizado na indústria automotiva para validação de ferramentas de simulação. Com formas complexas, os carros são muito difíceis de modelar ao mesmo tempo que quantificar o arrasto aerodinâmico computacionalmente também tem suas limitações. Dessa forma o corpo de Ahmed é uma simplificação da geometria veicular sendo aplicado para visualização, previsão e entendimento de fenômenos atrelados a escoamentos ao redor de corpos. O túnel hidrodinâmico horizontal do Laboratório de Visualização de Escoamentos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS-UNESP é utilizado para ensaios experimentais com o propósito de entender e investigar a hidrodinâmica do escoamento sobre corpos de Ahmed com foco na visualização de esteiras turbulentas. Todavia, os dados gerados são em suma, qualitativos. Assim sendo, para que o escoamento e sua interação com a superfície do corpo em estudo sejam obtidos corretamente e corresponda com o fenômeno físico real, é necessário validar o modelo numérico computacional, aonde é possível obter dados qualitativos (visualização) e quantitativos como força de arrasto e perfis de velocidade, por exemplo. O software livre no âmbito da Mecânica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) OpenFOAM®, assim como o software fechado SolidWorks Flow® foram utilizados para a discretização e solução numérica do problema proposto, atrelado a comparação dos resultados obtidos com aqueles coletados no túnel hidrodinâmico horizontal, conforme mencionado. As análises foram realizadas empregando métodos numéricos que incluem estabelecer critérios de simulação via CFD com a finalidade de obtenção de dados e determinação do padrão dos escoamentos ao redor das geometrias de corpo estabelecidas.

Palavras-chave: CFD, corpo de Ahmed, túnel hidrodinâmico, arrasto, esteira

Abstract

The Ahmed body consists of a reference model (*benchmark*) used in the automotive industry to validate simulation tools. With complex shapes, cars are very difficult to model while quantifying aerodynamic drag computationally also has its limitations. Thus, the Ahmed body is a simplification of the vehicular geometry being applied to visualization, prediction and understanding of phenomena linked to flows around bodies. The horizontal hydrodynamic tunnel of the Flow Visualization Laboratory of the Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, FEIS-UNESP is used for experimental tests in order to understand and investigate the hydrodynamics of the flow over Ahmed bodies with a focus on the visualization of turbulent wakes. However, the data generated are, in short, qualitative. Therefore, for the flow and its interaction with the surface of the body under study to be correctly obtained and correspond to the real physical phenomenon, it is necessary to validate the computational numerical model, where it is possible to obtain qualitative (visualization) and quantitative data such as force of drag and velocity profiles, for example. Free software in the scope of Computational Fluid Dynamics (CFD) OpenFOAM®, as well as the closed software SolidWorks Flow® were used for the discretization and numerical solution of the proposed problem, linked to the comparison of the results obtained with those collected in the horizontal hydrodynamic tunnel, as mentioned. The analyzes were performed using numerical methods that include establishing simulation criteria via CFD in order to obtain data and determine the flow pattern around the established body geometries.

Keywords: CFD, Ahmed body, hydrodynamic tunnel, drag, wake

Lista de figuras

Figura 1: Escoamento ao redor de um veículo comercial – regiões de separação.	6
Figura 2: Vórtices tridimensionais gerados na traseira do corpo de Ahmed.	9
Figura 3: Um modelo conceitual da estrutura de escoamento em torno do modelo de Ahmed no regime de baixo arrasto.	11
Figura 4: Produção da energia cinética turbulenta no plano de simetria $Y = 0$ para diferentes modelos de turbulência.	12
Figura 5: Contornos de vorticidade Y do escoamento instantâneo em torno de dois corpos com $d = L$ em três dimensões.	13
Figura 6: CD em função do número de Reynolds obtidos Millán et al. (2016) comparados com os resultados de outros autores.	14
Figura 7: Canal de superfície livre com recirculação de água – Túnel hidrodinâmico horizontal.	16
Figura 8: Dados experimentais do escoamento para o corpo de Ahmed com inclinação traseira de 25° e 30° , respectivamente.	17
Figura 9: Corpo de Ahmed com dimensões originais.	19
Figura 10: Esteira de vórtices na parte traseira do corpo de Ahmed – Simulação Computacional.	21
Figura 11: Escala dos modelos utilizados.	22
Figura 12: Interface de acesso ao usuário - SolidWorks Flow®.	23
Figure 13: Exemplificação do tamanho do domínio computacional utilizado para a simulação (dimensões em metro).	24
Figure 14: Domínio computacional adimensionalizado e condições de contorno.	24
Figura 15: Detalhamento da malha computacional utilizada nas simulações.	25
Figura 16: Variação do arrasto (CD) em função do ângulo de traseira.	32
Figura 17: Distribuição de pressão para uma razão de bloqueio de 4% e 25° .	33
Figura 18: Vórtices formados para uma razão de bloqueio de 4% e 25° .	33
Figura 19: Distribuição de pressão para uma razão de bloqueio de 4% e 30° .	33
Figura 20: Vórtices formados para uma razão de bloqueio de 4% e 30° .	34
Figura 21: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 6% e 25° .	34
Figura 22: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 6% e 25° .	34
Figura 23: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 6% e 30° .	35
Figura 24: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 6% e 30° .	35
Figura 25: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 9% e 25° .	36
Figura 26: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 9% e 25° .	36

Figura 27: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 9% e 30°.	36
Figura 28: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 9% e 30°.	37
Figura 29: Vórtices formados para ângulo de traseira de 25°.	37
Figura 30: Vórtices formados para ângulo de traseira de 30°.	38
Figura 31: Interface MATLAB® para processamento do sinal – nº de Strouhal.	39

Lista de tabelas

Tabela 1: Sumário dos parâmetros da análise conduzida por Ahmed et al. (1984).	18
Tabela 2: Dimensões dos modelos CAD.	22
Tabela 3: Quantidade de elementos de malha no modelo.	25
Tabela 4: Grid Convergence Method (CGI) para malha em OpenFoam®.	26
Tabela 5: Quadro de simulações do presente estudo.	29
Tabela 6: Resultados para geometria com 4% razão de bloqueio.	30
Tabela 7: Resultados para geometria com 6% razão de bloqueio.	30
Tabela 8: Resultados para geometria com 9% razão de bloqueio.	31
Tabela 9: Número de Strouhal para geometria com 4% de razão de bloqueio.	39

Sumário

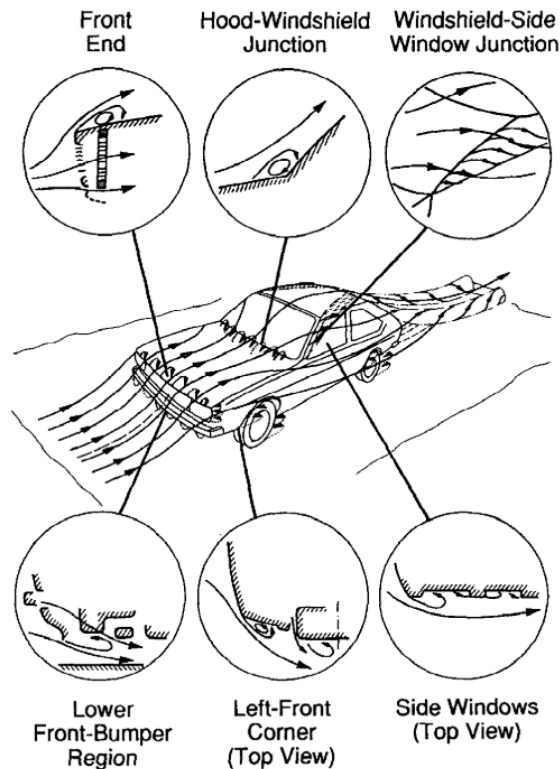
Agradecimentos.....	3
RESUMO.....	6
Abstract	7
Lista de figuras.....	8
Lista de tabelas	10
1 Introdução	6
1.1 Corpo de Ahmed	7
1.2 Objetivos	9
2 Revisão Bibliográfica.....	10
3 Metodologia	16
3.1 Abordagem Experimental	16
3.2 Parâmetros governantes	17
3.3 Geometria de Teste	21
3.4 Ferramentas numéricas: OpenFoam® e SolidWorks Flow®	22
3.5 Domínio Computacional e Condições de Contorno	24
3.6 Malha	25
3.7 Análise de convergência (CGI)	27
4 Resultados e Discussão.....	29
4.1 Influência da Razão de Bloqueio.....	29
4.2 Visualização do escoamento.....	32
4.3 Número de Strouhal	38
5 Considerações finais	40
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	41
6 Referências Bibliográficas.....	42

1 Introdução

O escoamento ao redor de um veículo comercial apresenta um padrão bastante complexo, possui grandes áreas de transição, separação do escoamento, regiões de recolamento da camada limite, além da formação de uma esteira de vórtices sendo formados e emitidos em diferentes regiões ao redor do corpo (Happian-Smith 2001).

A Figura 1, retirada de (Hucho e Sovran 1993), ilustra de maneira esquemática o escoamento ao redor de um veículo comercial com foco nas regiões de separação do escoamento, mostrando detalhes e padrões do escoamento em locais onde a geometria do corpo é mais complexa. Sabe-se, portanto, que esse padrão de escoamento é responsável pela geração das forças aerodinâmicas (arrasto, sustentação e força lateral), bem como geração de ruído externo e interno. A correta compreensão e predição desse escoamento tem papel fundamental na indústria automotiva, uma vez que a solução tridimensional (3D) completa do escoamento pode levar a técnicas de redução do arrasto aerodinâmico, redução do ruído externo e interno e, principalmente, redução do consumo de combustível e emissões.

Figura 1: Escoamento ao redor de um veículo comercial – regiões de separação.



Fonte: (Hucho & Sovran, 1993) – original em Inglês.

Do ponto de vista de análise de engenharia é possível abordar o problema do escoamento ao redor de um veículo qualquer, através de análises experimentais com ensaios em túnel aerodinâmicos (túnel de vento) ou mesmo túneis hidrodinâmicos. De maneira geral, essa abordagem experimental é relativamente dispendiosa pois requer modelos em escala reduzida, instrumentação acessória para as medições de perfis de velocidade, distribuição de pressão além da medição das forças aerodinâmicas/hidrodinâmicas presentes no corpo. Todavia, uma vez bem conduzida ela fornece detalhes necessários ao entendimento global do padrão do escoamento. Por outro lado, outra abordagem é possível através do uso da simulação computacional no campo da Mecânica dos Fluidos / Aerodinâmica. A análise numérica, ou CFD do inglês – *Computational Fluid Dynamics* é uma técnica bastante difundida no setor industrial.

Assim, dentre as abordagens citadas, CFD requer menor custo financeiro para a sua utilização (quando comparado às técnicas experimentais) e envolve, geralmente, menos tempo para análise do escoamento. No entanto, o uso do CFD requer formação e qualificação nesta área, não é simples para uso e possui diversos problemas associados ao custo computacional (a depender do tipo de análise), exigência de modelos CAD (*computed-aided design*), emprego de modelagem numérica para escoamentos turbulentos, condições de contorno (Hinterberger et al. 2004).

Atualmente, pode-se dizer que ambas abordagens experimentais e numéricas são amplamente utilizadas nas análises de engenharia, tornando-se ferramentas complementares para o completo entendimento do problema. As simulações computacionais, quando devidamente verificadas e validadas através de comparações de dados com medições em problemas reais, fornecem de maneira rápida perfis de velocidade, coeficientes aerodinâmicos, distribuição de pressão, bem como o próprio padrão de escoamento. Tornaram-se, portanto, ferramentas confiáveis, sendo possível caracterizar o campo de escoamento que, a posteriori, pode ser confirmada através de ensaios em túnel de vento ou testes reais. De maneira geral, esse é um dos caminhos utilizados no projeto de veículos aéreos e terrestres.

1.1 Corpo de Ahmed

O corpo de Ahmed (Ahmed et al. 1984) é uma geometria simplificada utilizada na indústria automotiva para investigar o próprio padrão de escoamento e variáveis de projeto, como o coeficiente de arrasto, Guilmineau (2008). Tal corpo idealizado por Ahmed foi utilizado como modelo para, entre outras, visualização de escoamento em torno de corpos rombudos, com formato semelhante a de veículos de grande porte como ônibus, trens, vans e caminhões (Bayraktar et al. 2001).

Veículos automotivos são considerados corpos rombudos que se movem próximo ao chão. Sabe-se que uma das principais regiões responsáveis pelo aumento do arrasto aerodinâmico, é a região traseira do veículo, local onde ocorre a separação do escoamento e onde é formada a esteira turbulenta. Existe uma influência do ângulo de saída de uma geometria veicular e pode-se correlacioná-la com arrasto aerodinâmico, Lienhart et al. (2002).

Conforme apresentado por Bello-Millán et al. (2016), o corpo de Ahmed é um dos mais estudados na comunidade aerodinâmica devido ao grande número de referências publicadas, e bancos de dados experimentais confiáveis. Pode-se validar novas configurações experimentais ou medições de túnel de vento comparando-as com as obtidas em outras instalações ao redor do mundo.

Nesse contexto, o túnel hidrodinâmico horizontal, foi utilizado para aplicações, tal como a reportada por Bassan et al. (2011), e para estudos experimentais voltados para problemas ou obstáculos não aerodinâmicos. Vislumbrando o uso desse segundo túnel, para aplicações aerodinâmicas, é proposto ensaiar o modelo de referência (*benchmark*), conforme descrito por Ahmed et al. (1984), para aferição dos resultados e posteriormente qualificação ou validação do modelo CFD. No trabalho desenvolvido, foram primeiramente estudados os limites da razão de bloqueio (área frontal do modelo / área efetiva da seção de teste) do túnel hidrodinâmico horizontal, uma vez que não existe uma grande quantidade de dados reportados na literatura para esse parâmetro - Lienhart & Becker (2003).

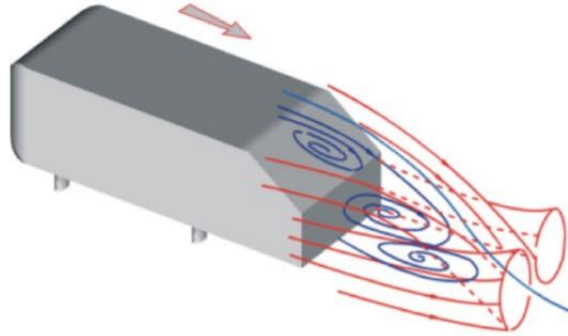
Para esta finalizada, utilizou-se dois corpos de Ahmed, um com inclinação traseira em 25° e outro em 30°, para um valor de Reynolds na ordem de 4000. A variação da inclinação gera uma mudança significativa nos padrões das recirculações de origem turbulenta (descolamento aerodinâmico) (Hanfeng et al. 2016). Associa-se maiores forças de arrasto às configurações que apresentam maiores zonas turbulentas, Fox et al. (2020). Na literatura, observa-se que a intensidade de recirculação na traseira do corpo em 25° é superior a de 30°. Será apresentado ao longo do trabalho que os resultados evidenciam que a configuração de 25° possui maior arrasto aerodinâmico.

Conforme descrito por Ahmed et al. (1984), o aumento do arrasto aerodinâmico está intimamente ligado ao aumento da inclinação de saída dos corpos. As estruturas aerodinâmicas mais comuns são o vórtice formado na traseira e uma grande zona de recirculação, sendo essas as principais fontes de arrasto, as quais devem ser modificadas para se obter uma diminuição no arrasto do corpo, Gheyssens (2016).

O arrasto para o corpo de Ahmed é gerado principalmente na base inclinada e vertical da extremidade traseira. Devido, principalmente, pela camada de cisalhamento, saindo da borda traseira que se torna um vórtice longitudinal, a camada de cisalhamento enrola, em duas regiões de escoamento recirculatório, situadas uma sobre a outra, como mostrado na

Figura 2. O escoamento recirculatório é gerado através de vórtices, situados um acima do outro na região de separação do escoamento, Hinterberger et al. (2004).

Figura 2: Vórtices tridimensionais gerados na traseira do corpo de Ahmed.



Fonte: (Kuntz & Menter, 2002).

1.2 Objetivos

O presente estudo teve como objetivos principais:

- a) Desenvolver simulações computacionais com propósito de entendimento da hidrodinâmica de corpos de Ahmed para a investigação, via visualização de esteiras turbulentas, e avaliar suas implicações e impactos.
- b) Realizar um comparativo entre duas ferramentas numéricas de CFD, de código aberto (*opensource*) e código fechado (*closedsource*).

Dados experimentais obtidos no túnel hidrodinâmico horizontal do Laboratório de Visualização de Escoamento da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira também foram utilizados no contexto deste trabalho, fornecendo dados adicionais tanto para a validação da simulação computacional quanto para a compreensão do próprio escoamento ao redor do corpo de Ahmed.

OBSERVAÇÃO: O presente trabalho foi desenvolvido durante a pandemia do SARS-COV2 (COVID-19) em 2021, onde restrições de acesso à laboratórios e a própria Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS foram impostas. Essas restrições limitaram a quantidade de testes que foram realizados bem como a qualidade dos dados finais, uma vez que seria necessário acesso às instalações físicas, uso de computadores com mais recursos, bem como contato direto com o orientador para eventuais esclarecimentos de dúvidas e discussões dos resultados obtidos.

2 Revisão Bibliográfica

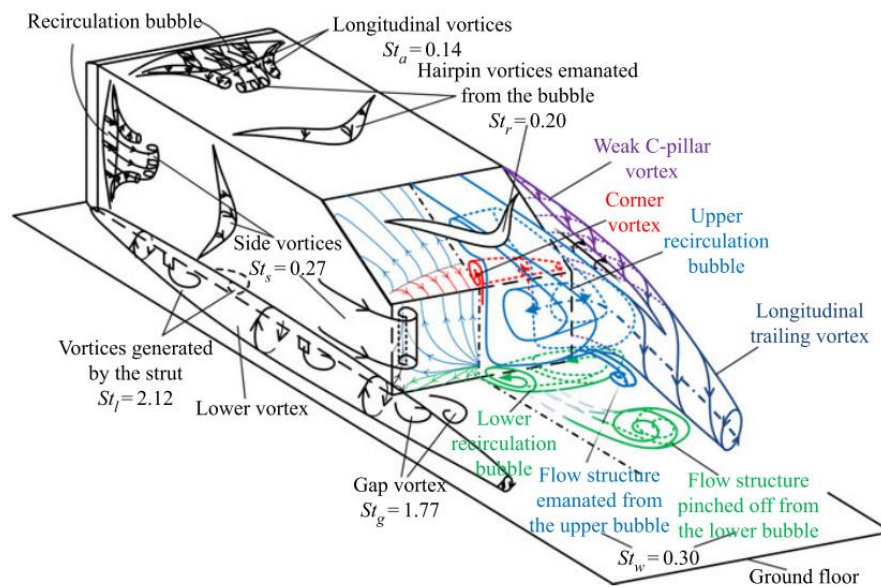
Após quase 40 anos desde a publicação do trabalho original de Ahmed et al. (1984), ainda hoje existe forte interesse na reprodução e complementação de dados qualitativos (visualização) e quantitativos (arrasto, sustentação, perfis de velocidade, distribuição de pressão etc.), relativos ao próprio corpo de Ahmed em sua forma original ou pequenas variações geométricas introduzidas por diferentes pesquisadores ao longo dos anos.

O objetivo desta revisão bibliográfica é apresentar e discutir os trabalhos mais recentes publicados envolvendo abordagens experimentais e numéricas do corpo de Ahmed. A pesquisa realizada inclui trabalhos publicados nos últimos 6 anos retrocedendo, portanto até o ano de 2016.

Liu et al. (2021) é um dos trabalhos mais recentes (até a data deste estudo) relativo à análise experimental do escoamento ao redor do corpo de Ahmed. Os autores visaram obter uma compreensão relativamente completa das estruturas coerentes predominantes e instáveis em torno de um corpo de Ahmed com inclinação de traseira de 35° para um regime de baixo arrasto. Foram feitos mapeamentos através de medições de fio quente (*hot-wire anemometer*), pressão de parede, visualização de escoamento e velocimetria por imagem de partículas (PIV) foram realizadas para uma faixa de n° de Reynolds entre 0.3 a 2.7×10^5 . Com base nos dados desse estudo, as principais observações referem-se aos mecanismos de formação dos vórtices de esteira com n° de Strouhal da ordem de ≈ 0.30 e seu processo de formação, o vórtice de canto e seu papel dinâmico, a interação entre o vórtice do pilar C e a perna da bolha de recirculação superior, e a formação e desenvolvimento do vórtice de fuga longitudinal. A Figura 3 apresenta um modelo conceitual da estrutura do escoamento ao redor do corpo de Ahmed para um inclinação de traseira de 35° . Esse trabalho de Liu et al. (2021) reforça a ideia de que dados complementares e novos estudos podem ainda ser realizados com a geometria do corpo de Ahmed.

Saha et al. (2020) investigam numericamente o comportamento aerodinâmico do corpo de Ahmed com o auxílio da ferramenta CFD comercial: Ansys Fluent®. Os resultados da simulação foram validados com dados experimentais bem como resultados de outras simulações presentes na literatura. As simulações foram realizadas para um ângulo de inclinação fixo de 25 graus e ângulo de guinada zero. Os autores demonstram como se comporta o arrasto da carroceria, associado principalmente ao efeito da força de arrasto de pressão gerada na parte traseira da carroceria. A magnitude da velocidade em diferentes locais para diferentes casos de malha auxiliam na quantificação do padrão de escoamento na região frontal ou próxima à esteira.

Figura 3: Um modelo conceitual da estrutura de escoamento em torno do modelo de Ahmed no regime de baixo arrasto.



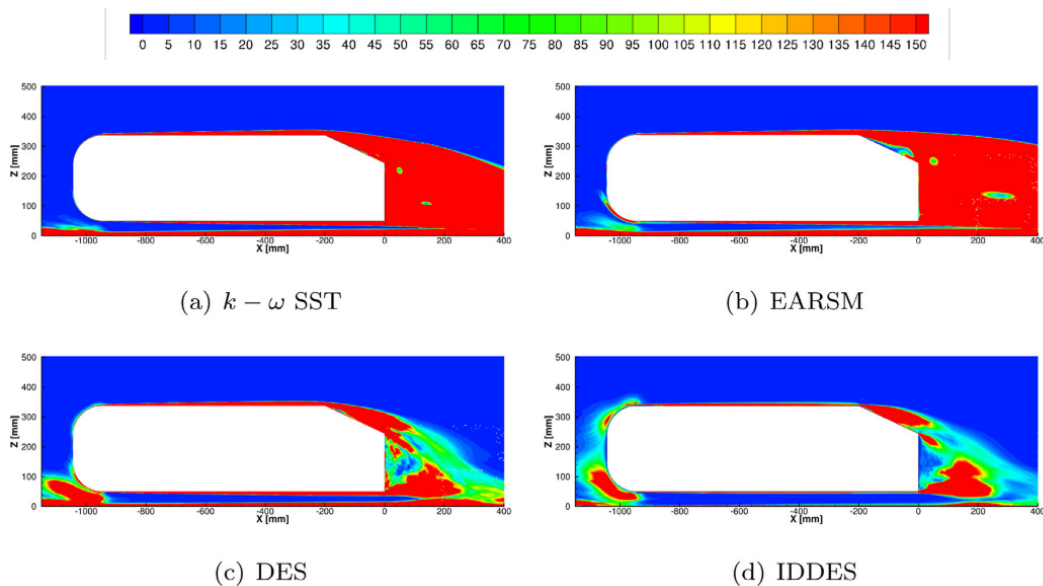
Fonte: (Liu et al., 2021) – original em Inglês.

Um estudo recente aqui no Brasil é apresentado por Gutierrez et al. (2020), também através de uma abordagem puramente numérica (CFD) do escoamento em torno da geometria de referência do corpo de Ahmed. Os autores buscaram analisar a aerodinâmica externa observando os principais aspectos relevantes como geração de vórtices, campos de velocidade e pressão, separação e regiões de recolamento, bem como as contribuições de arrasto e sustentação de cada superfície do corpo. Testes de independência de domínio e malha foram realizados para garantir independência das malhas geradas no estudo. Diferentes modelos de turbulência foram utilizados para melhor elucidar o efeito numérico do modelo de turbulência nos resultados. Dados experimentais da literatura foram utilizados para avaliar os procedimentos numéricos adotados, bem como para identificar o modelo de turbulência que melhor se ajustou aos resultados experimentais. Os autores mostram que os resultados numéricos com o uso do modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ realizável aproxima-se bem do arrasto com 3,9% de diferença para os resultados experimentais e o Modelo das Tensões de Reynolds (*Reynolds Stress Model*) se ajusta melhor à sustentação com 2,8% de diferença para os resultados experimentais.

Dois outros relevantes estudos computacionais são identificados no ano de 2018. No primeiro, Guilmineau et al. (2018) apresentam uma investigação dos modelos RANS e DES para o corpo de Ahmed com ângulos de inclinação de 25° e 35°. O número de Reynolds, baseado na altura do modelo e na velocidade a montante, foi de 7.68×10^5 . Dois modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier–Stokes*) foram usados: o $k - \omega$ SST de Menter e o EARSM (*Explicit Algebraic Stress Model*), baseado no modelo $k - \omega$. Dois modelos híbridos RANS-LES

(*Large Eddy Simulation*) também foram empregados na pesquisa: um DES (*Detached Eddy Simulation*) e um IDDES (*Improved Delay Detached Eddy Simulation*). Como resultados relevantes, o escoamento para o ângulo de inclinação 35° é bem previsto por todos os modelos de turbulência com uma pequena vantagem para o modelo IDDES. Para o escoamento com o ângulo de inclinação 25° , apenas o modelo híbrido IDDES RANS-LES prevê a bolha de recirculação na inclinação. Os autores concluíram que o modelo IDDES é o único modelo de turbulência que dá boas concordâncias com os dados experimentais. A Figura 4 ilustra os resultados para a produção de energia cinética na esteira do corpo de Ahmed obtidos com os quatro modelos de turbulência avaliados nesse estudo.

Figura 4: Produção da energia cinética turbulenta no plano de simetria $Y = 0$ para diferentes modelos de turbulência.



Fonte: (Guilmineau et al., 2018).

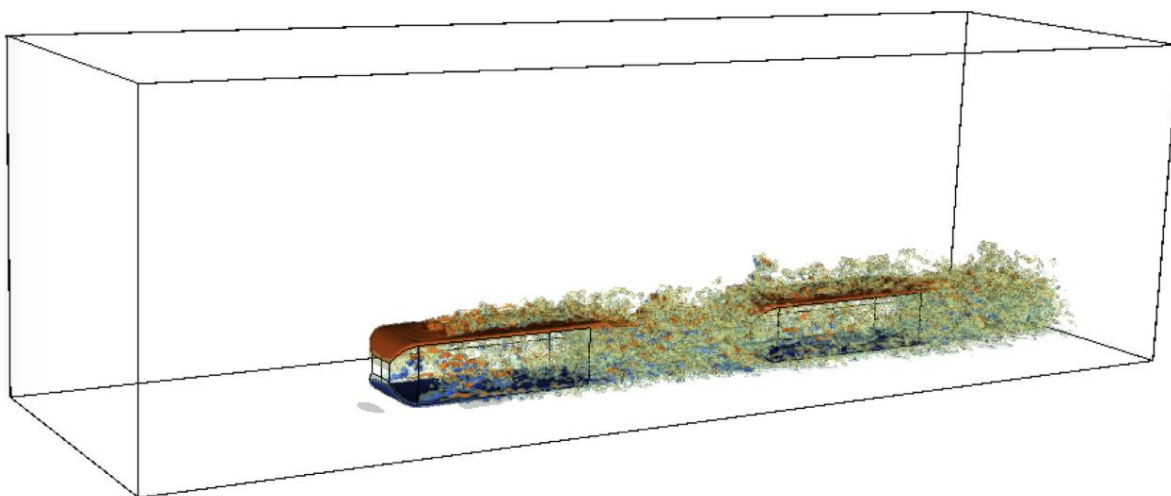
No segundo estudo, Rao et al. (2018) realizam um estudo numérico sobre o padrão da esteira atrás do corpo de Ahmed. Os autores buscaram confirmar a existência de dois estados de esteiras estáveis: (1) onde o escoamento é totalmente separado sobre a inclinação traseira do corpo de Ahmed, e (2) onde o escoamento inicialmente se separa e depois se recolhe mais ao longo da inclinação traseira. Assim, a existência dos dois estados de escoamento pode ser confirmada numericamente usando o modelo de turbulência de Navier-Stokes parcialmente médio (PANS) para várias configurações do corpo de Ahmed. Os dois estados de escoamento também puderam ser distinguidos pelos valores instantâneos dos coeficientes de força. No estado de escoamento (1), os valores do coeficiente de sustentação e arrasto são menores em comparação com o estado de escoamento (2). Nesse mesmo estudo, os autores também

investigaram o efeito do ângulo de derrapagem no padrão da esteira, sempre correlacionando os dados com os estados de escoamentos (1) e (2).

Outro estudo no Brasil, também de natureza numérica, foi identificado no ano de 2017. Zucco (2017) apresenta uma validação de desempenho de simulações (CFD) para o corpo de Ahmed. Nesse trabalho foi utilizado o software comercial STAR-CCM+ para efetuar as simulações. O modelo de turbulência escolhido foi o RANS-SST em uma malha do tipo poliédrica (*polymesh*). Um estudo sobre a qualidade das malhas geradas e sua convergência foi realizado utilizando o método GCI (*Grid Convergence Index*). A comparação do desempenho feita na análise dos coeficientes de arrasto total, viscoso e de pressão foi considerada satisfatória pelos autores. Os coeficientes de arrasto obtidos no presente trabalho apresentaram erros menores que 4% em relação aos coeficientes medidos no trabalho original sobre o corpo de Ahmed.

Ainda em 2017, Bruneau et al. (2017) apresentam um estudo numérico para avaliar o padrão de escoamento em corpos de Ahmed perfilados em linha (*tandem*). Quando dois ou três corpos estão seguindo um ao outro com uma curta distância entre eles, a presença do corpo anterior altera significativamente a força de pressão na frente do seguinte, pois um escoamento deficitário está presente no meio. O corpo anterior desempenha o papel de bloqueio e, portanto, o corpo seguinte deve enfrentar condições de escoamento completamente diferentes. Nesse estudo, um, dois e três corpos foram simulados. Os resultados demonstram que para três corpos Ahmed há uma redução de arrasto maior do que para dois corpos Ahmed, uma vez que uma redução de arrasto em torno de 30% é alcançada. A Figura 5 ilustra o escoamento sobre uma configuração de 2 corpos de Ahmed em linha.

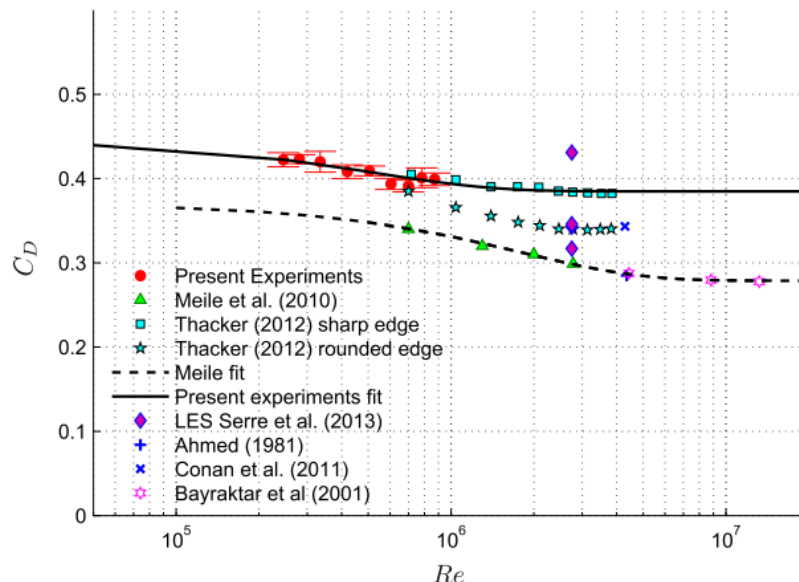
Figura 5: Contornos de vorticidade Y do escoamento instantâneo em torno de dois corpos com $d = L$ em três dimensões.



Fonte: (Bruneau et al., 2017).

Em 2016, Millán et al. (2016) mostram um estudo experimental conduzidos em túnel de vento para caracterizar os efeitos do ângulo de guinada na força de arrasto que atua no corpo de Ahmed com ângulo de inclinação de 25° . A principal contribuição deste trabalho experimental foi a de criar um banco de dados confiável de coeficientes de arrasto sob condições de guinada. Para ângulo de guinada zero, foi encontrada uma pequena variação no coeficiente de arrasto, C_D , para o número de Reynolds no intervalo de 3×10^5 a 30×10^5 , resultando em uma tendência conhecida como decréscimo do coeficiente de arrasto à medida que o número de Reynolds aumenta. Esta tendência está de acordo com outros trabalhos experimentais, mas é 30% maior do que a função $C_D(Re)$ usual. Ou observação importante dos autores é a de que o coeficiente de arrasto aumenta significativamente com um incremento no ângulo de guinada para um número de Reynolds constante. Três regiões distintas para o coeficiente de arrasto em função dos ângulos de guinada são estabelecidas a partir dos resultados experimentais: o coeficiente de arrasto aumenta para $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$, permanece constante no intervalo $60^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$ e, finalmente, o coeficiente de arrasto cresce novamente até $\beta = 90^\circ$. A Figura 6 ilustra a evolução do C_D como uma função do nº de Reynolds.

Figura 6: C_D em função do número de Reynolds obtidos Millán et al. (2016) comparados com os resultados de outros autores.



Fonte: (Millán et al., 2016) – original em Inglês.

Ainda em 2016, Mendes-Alves (2016) apresenta um estudo numérico e experimental envolvendo a aerodinâmica de veículos pesados, porém com o uso do corpo de Ahmed como referência. Nesse estudo, os resultados foram obtidos através de anemometria a fio quente em experimentos de túnel de vento em baixa velocidade. Foi proposta também uma avaliação computacional, utilizando um software comercial (Star CCM+) com o intuito de aprofundar a análise do escoamento, e validar os resultados experimentais. Ambos os resultados são confrontados e permitem caracterizar o escoamento ao redor do corpo de referência. Resultados dos perfis de velocidade na esteira do corpo são apresentados bem como visualização numérica do campo de escoamento. Os resultados foram considerados satisfatórios pelo autor.

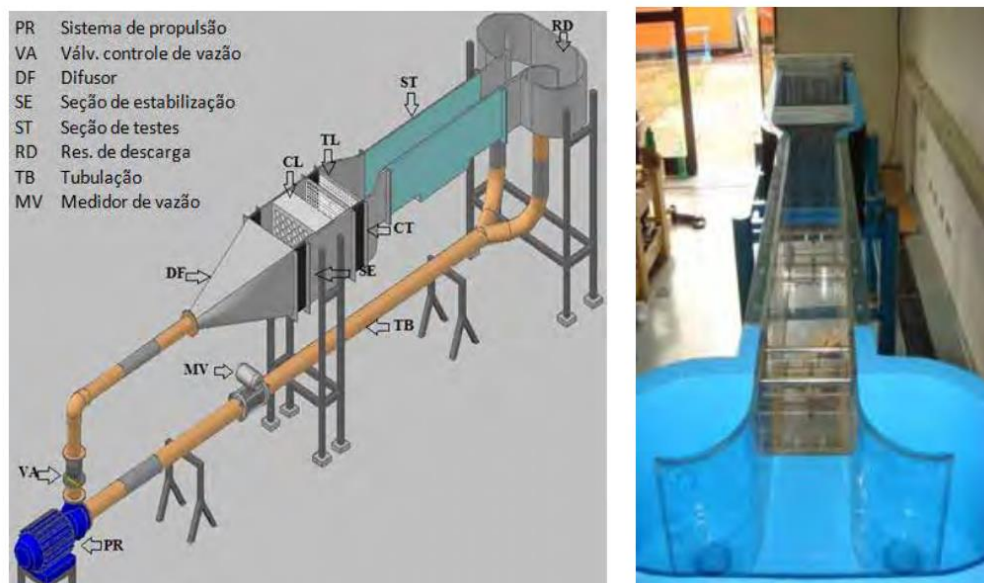
3 Metodologia

Este capítulo é dedicado à apresentação dos métodos e procedimentos utilizados neste estudo, sendo separados em uma sessão destinada à abordagem experimental, seguido da explicação dos parâmetros governantes e variáveis de interesse, descrição dos modelos de testes, apresentação dos códigos computacionais, domínio de cálculo e condições de contorno, finalizando com a apresentação dos parâmetros numéricos utilizados nas simulações.

3.1 Abordagem Experimental

O túnel hidrodinâmico horizontal do Laboratório de Visualização de Escoamento da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, foi usado na abordagem experimental para a análise do escoamento ao redor do corpo de Ahmed. A Figura 7 ilustra o equipamento (túnel hidrodinâmico) utilizado na obtenção dos resultados experimentais.

Figura 7: Canal de superfície livre com recirculação de água – Túnel hidrodinâmico horizontal.



Fonte: (Rosim, 2012)

Conforme descrito em Rosim (2012), O sistema de propulsão (PR) retira água do reservatório de descarga (RD), impelindo-a até o difusor (DF), instalado na tubulação de recalque, a jusante da válvula controladora de vazão (VA). Seguindo seu trajeto, o fluido é conduzido à seção de estabilização (SE), onde passa por grades, colmeias e telas (TC). Ao

atravessar a contração (CT), o fluido é acelerado para entrar na seção de testes (ST), de onde é reconduzido ao reservatório de descarga (RD), fechando o ciclo.

A seção de testes empregada nos ensaios experimentais, mede 1200 mm de comprimento, 200 mm de largura e 300 mm de altura total. Para permitir bom acesso visual ao escoamento, esta seção foi totalmente confeccionada em acrílico transparente de boa qualidade ótica.

A Figura 8 mostra os resultados experimentais do escoamento em torno do corpo de Ahmed com inclinação traseira de 25° e 30° obtida pelos alunos Carlos H. Silveira e Bruno Veneziano, apresentada em seu relatório de Iniciação Científica. Os dados dos testes experimentais serão usados para validar os campos de velocidade obtidos via simulação CFD desenvolvidos neste trabalho e apresentados nas sessões subsequentes. Ainda, dados experimentais da literatura, desde que disponíveis para o respectivo nº de Reynolds, também serão usados para a validação da modelagem em CFD.

Figura 8: Dados experimentais do escoamento para o corpo de Ahmed com inclinação traseira de 25° e 30°, respectivamente.



Fonte: (Laboratório de Visualização de Escoamentos – FEIS/UNESP)

3.2 Parâmetros governantes

No início dos anos 1980, a pesquisa experimental realizada por Ahmed tornou-se um marco na aerodinâmica automotiva. O autor forneceu distribuições de pressão e força sobre o modelo em questão (Ahmed et al. 1984). Além disso, a esteira turbulenta foi investigada em função do ângulo de inclinação traseiro, que representa vagamente a superfície traseira de um modelo de veículo comercial real (Venning et al. 2015). No trabalho original de Ahmed et al. (1984), os autores foram os primeiros a analisar o escoamento externo tridimensional (3D) nesse corpo peculiar. O principal objetivo do estudo foi o de analisar a mudança no coeficiente de arrasto (CD) e características do escoamento com vários ângulos de inclinação traseira. Eles

concluíram que até 85% do arrasto total que atua no corpo é governado pelo arrasto de pressão e o restante do arrasto é o arrasto de atrito. O arrasto de pressão gerado na extremidade traseira depende do ângulo de inclinação da traseira (Cooper 1993).

É importante sumarizar o tipo de análise, os ângulos de traseira estudados por esses autores, bem como o nº de Reynolds do experimento realizado. A Tabela 1 ilustra essas informações:

Tabela 1: Sumário dos parâmetros da análise conduzida por Ahmed et al. (1984).

	Ângulos	Tipo de túnel	Técnica de medida	Nº de Reynolds
Ahmed et al. (1984)	0°, 5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40	Túnel de vento	Sonda direcional de 10 furos e sistema de medição de força (balança)	1.2×10^6

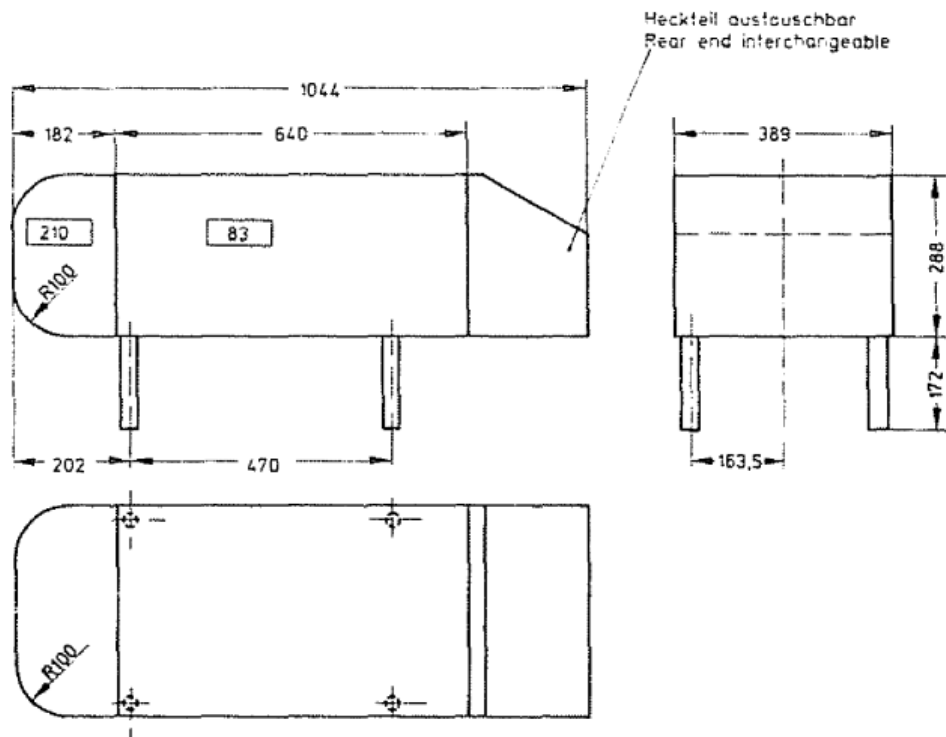
Como o corpo de Ahmed, é uma simplificação de um corpo veicular, ao se analisar o exterior do carro, as quantidades aerodinâmicas mais importantes são as forças (arrasto, sustentação e lateral) e os respectivos momentos, estas que influenciam diretamente a estabilidade e o consumo do veículo (Tunay et al. 2014). Conforme descrito no trabalho original de Ahmed et al. (1984), uma característica chave do campo de escoamento ao redor de um veículo são as regiões de escoamento ou fluxo separado. Mesmo as configurações básicas simples do veículo sem todos os apêndices e detalhes e mesmo com superfícies lisas geram uma variedade de regiões quase bidimensionais e totalmente tridimensionais de escoamento separado. Uma grande contribuição para o arrasto de um veículo decorre do arrasto de pressão que é uma consequência da separação do escoamento.

A escolha da geometria do corpo de Ahmed foi governada pela exigência de que o corpo deve gerar as características essenciais de um campo de escoamento representativo de um veículo real, com exceção daquele devido a rotação das rodas, motor e escoamento no compartimento de passageiros, parte inferior áspera e projeções de superfície. Ahmed et al. (1984) avaliaram que o modelo escolhido devia gerar:

- a) um forte escoamento de deslocamento tridimensional na frente;
- b) escoamento relativamente uniforme no meio;
- c) uma grande esteira estruturada na parte de trás do corpo.

As dimensões originais do corpo de Ahmed são apresentadas na Figura 9, retirada do trabalho original Ahmed et al. (1984).

Figura 9: Corpo de Ahmed com dimensões originais.



Fonte: (Ahmed et al. 1984) – original em Alemão.

É importante ressaltar que neste estudo, as dimensões do corpo Ahmed serão redimensionadas (modelo em escala) de acordo com a taxa de bloqueio do túnel. Introduzindo os parâmetros de influência ou governantes, tem-se que a razão de bloqueio ($B_{\%}$), que é a relação em porcentagem da área transversal do objeto (A_{st}) (área frontal perpendicular ao escoamento) e a área transversal da seção de ensaio do túnel de vento (A_{tt}).

$$B_{\%} = \frac{A_{st}}{A_{tt}} * 100 \quad (1)$$

Outro parâmetro de extrema relevância em estudos de Mecânica dos Fluidos / Aerodinâmica é o número de Reynolds. Esse número adimensional é utilizado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície e denota, em sua essência, a relação entre as forças de inércias e as forças viscosas presentes no escoamento. Sua ordem de grandeza pode indicar, portanto, o tipo de escoamento, turbulento ou laminar, e dado pela Eq. 2:

$$Re = \frac{\rho U_0 L}{\mu} \quad (2)$$

Sendo ρ a densidade do fluido, U_0 a velocidade da corrente livre (a frente do corpo) e μ a viscosidade dinâmica do fluido. L é uma dimensão característica do corpo.

Em um estudo de hidrodinâmica ou aerodinâmica o principal objetivo é a determinação das forças e momentos presentes sobre o objeto (corpo genérico ou veículo) em estudo. A natureza do escoamento é descrita pela análise do nº de Reynolds, caracterizando o escoamento como laminar, em transição ou turbulento. Na sequência, busca-se a determinação das forças aerodinâmicas. O arrasto e sustentação são as forças aerodinâmicas mais estudadas, pois a primeira atua contra o movimento do veículo e a segunda reduz a aderência dos pneus com o solo. Conforme mencionado, a determinação dessas forças no âmbito da indústria automotiva pode conduzir a projetos otimizados para redução de consumo de combustível e emissões bem como veículos com boa manobrabilidade e estáveis em qualquer tipo de condição operacional.

A fim de comparar forças nas diferentes condições de velocidade, densidade do fluido e geometria, coeficientes adimensionalizados são utilizados, conforme as seguintes equações:

$$C_D = \frac{F_{Arrasto}}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (3)$$

Sendo $F_{Arrasto}$ a própria força de arrasto, ρ a densidade da água a 25°C (valor de referência apenas), U_0 velocidade da corrente livre e A é a área de referência do corpo de teste. Da mesma forma também se define o coeficiente de sustentação:

$$C_L = \frac{F_{Sustentação}}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 A} \quad (4)$$

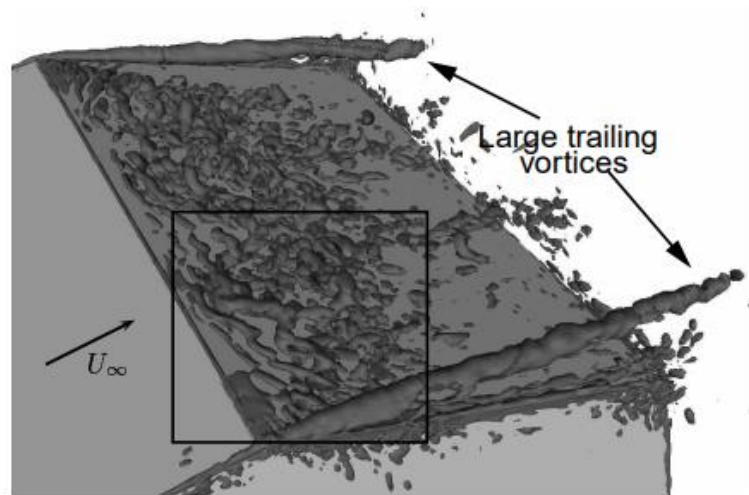
Outro fator não dimensional importante na análise do escoamento transiente sobre corpos é o número de Strouhal, que correlaciona a frequência de emissão dos vórtices presentes no escoamento e a velocidade de do escoamento livre:

$$S_t = \frac{fL}{U_0} \quad (5)$$

Onde f é a frequência de desprendimento de vórtice, L é uma dimensão característica do corpo e U_0 velocidade da corrente livre.

Os esforços criados devido aos vórtices são notavelmente influenciados pela viscosidade e tornam-se, portanto, uma fonte de arrasto. Por serem altamente tridimensionais, vórtices de escoamento contínuo e muitas estruturas de vórtices menores são comuns em torno do corpo de Ahmed (Krajnovic & Davidson 2004), como ilustrado na Fig. 10.

Figura 10: Esteira de vórtices na parte traseira do corpo de Ahmed – Simulação Computacional.



Fonte: (Krajnovic & Davidson 2004) – original em Inglês.

A dinâmica dos vórtices na parte traseira do veículo é de grande interesse e tem sido amplamente discutida na literatura. O uso de geometria simplificada, continua sendo uma importante contribuição para a compreensão dessas estruturas e a otimização da aerodinâmica dos automóveis (Zhang et al. 2015).

3.3 Geometria de Teste

Para a criação da geometria foi utilizado a ferramenta de CAD intrínseco ao *software* Solidworks®, enquanto no OpenFoam® foi utilizado o Salome®, uma ferramenta de CAD aberta (*opensource*).

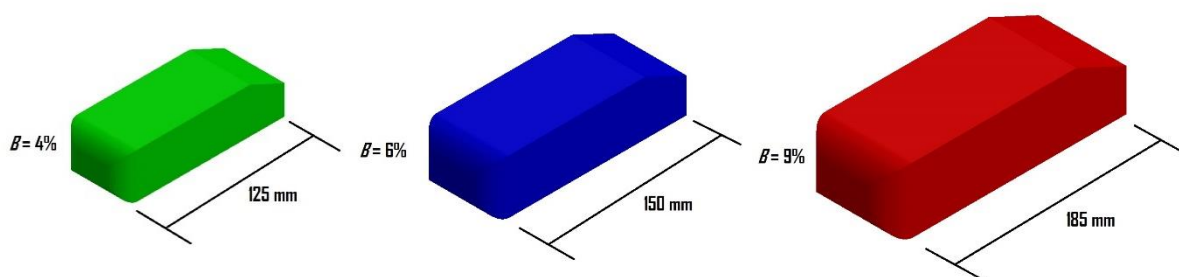
Em Ahmed et al. (1984) a geometria é especificada dimensionalmente, conforme visto na Figura 9. Assim, para as medidas do túnel hidrodinâmico as dimensões dos corpos foram escaladas (redução de escala) de modo a obter as razões de bloqueio de 4, 6 e 9%, conforme apresentado na tabela 2. Deve-se enfatizar que neste estudo os ângulos observados na traseira do corpo de Ahmed foram respectivamente de 25° e 30°.

Tabela 2: Dimensões dos modelos CAD.

Razão de Bloqueio (%)	Seção transversal (mm ²)	Comprimento (mm)
4	2492	125
6	3588	150
9	5421	185

Apenas para fins ilustrativos da dimensão dos modelos utilizados neste estudo, a Figura 11 ilustra os três modelos e suas respectivas escalas.

Figura 11: Escala dos modelos utilizados.



Fonte: Autoria própria.

3.4 Ferramentas numéricas: OpenFoam® e SolidWorks Flow®

O OpenFOAM® é um software gratuito e de código aberto (opensource) desenvolvido para o domínio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Este software é de propriedade da OpenFOAM Foundation e distribuído exclusivamente sob a General Public License (GPL). A licença garante a todos os usuários a livre modificação e redistribuição do software e o uso livre por um período de tempo indeterminado. Criado por Henry Weller em 1989 sob o nome “FOAM”, o OpenFOAM® foi posteriormente lançado como código aberto com a nomenclatura de “OpenFOAM” por Henry Weller, Chris Greenshields e Mattijs Janssens em dezembro de 2004 (<https://www.openfoam.com/>). Desde então, o OpenFOAM® continuou a ser gerenciado e desenvolvido com novas versões sendo lançadas ao público a cada ano (The OpenFOAM Foundation, sd).

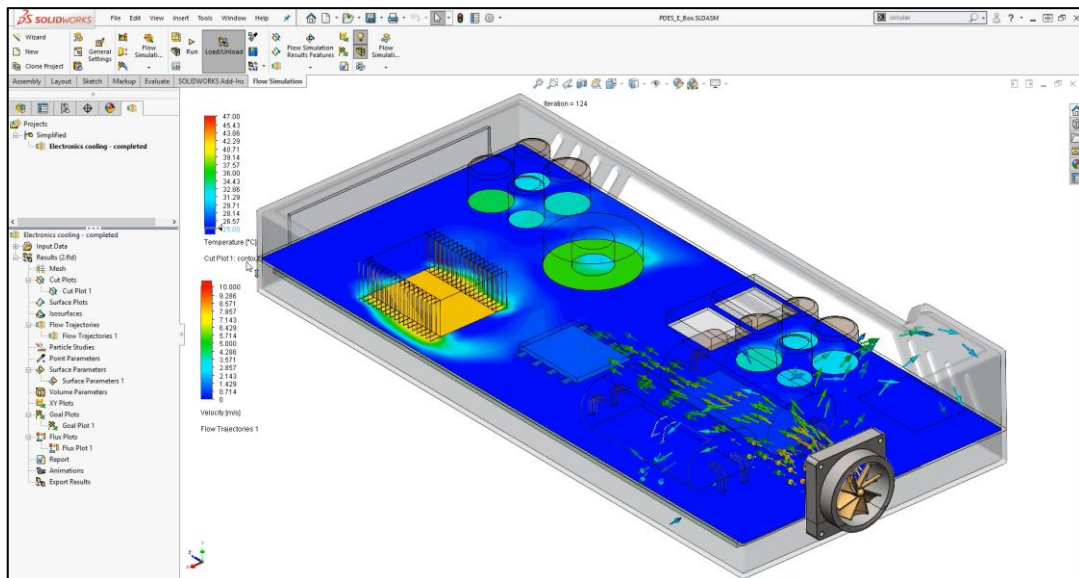
O SolidWorks®, por sua vez, é um software de CAD 3D que possui diversas extensões como o módulo Flow (<https://www.solidworks.com/pt-br/product/solidworks-flow-simulation>) que realiza simulações computacionais no domínio do CFD. Ambas as ferramentas de simulação são paramétricas e utilizam em sua base o método de volumes finitos para analisar de maneira rápida e fácil (a depender do tipo de simulação) os escoamentos de gases e líquidos através (escoamento interno) e em torno (escoamento externo) dos mais diversificados tipos de projetos em engenharia que envolvam escoamentos.

O intuito de utilizar as duas ferramentas é validar o conceito proposto, já que os resultados experimentais observados no túnel hidrodinâmico são somente qualitativos em termos da visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed.

Assim, ao se observar pouca ou nenhuma diferença nos resultados dos dois *softwares*, tem-se uma comprovação de que o conceito proposto é correto.

A principal diferença entre os dois softwares e a interface do usuário, uma vez que o SolidWorks Flow® oferece uma interface mais “*user friendly*” do que o OpenFoam® o qual oferece uma estrutura de programação orientada a objetos em C++. No entanto, através do uso do OpenFoam® o usuário tem maior contato com o tipo de código fonte (*solver*) que está sendo utilizado para a solução do problema, enquanto isso é mascarado pela interface do SolidWorks Flow®. A Figura 12 ilustra a interface de simulação do SolidWorks Flow®.

Figura 12: Interface de acesso ao usuário - SolidWorks Flow®.

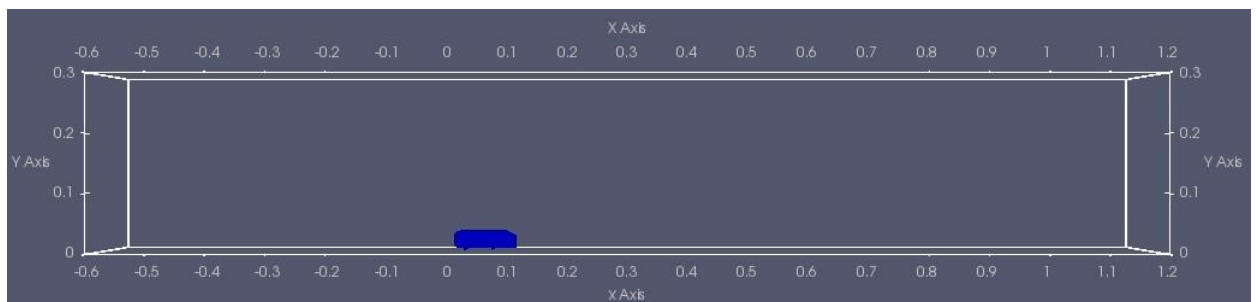


Fonte: <https://www.goengineer.com/solidworks/simulation/solidworks-flow-simulation-cfd>

3.5 Domínio Computacional e Condições de Contorno

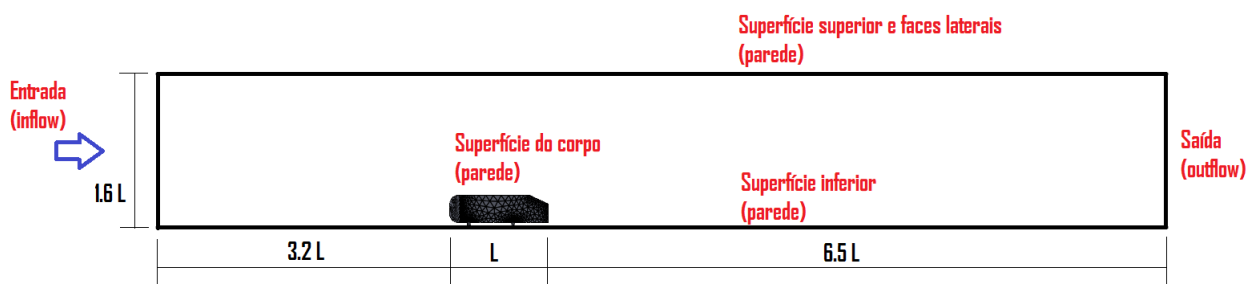
O domínio computacional ou do escoamento foi baseado nas dimensões do túnel hidrodinâmico, tendo as seguintes dimensões: 200 mm de largura, 300 mm de altura e 1200 mm de comprimento. As Figuras 13 e 14 ilustram as dimensões reais e adimensionalizadas do domínio computacional utilizado neste estudo. Com base na dimensão característica do corpo o domínio computacional é definido como um volume de controle tridimensional, com dimensões mínimas (para o corpo de maior comprimento) de $10.7 L \times 1.6 L \times 1.6 L$; sendo L o comprimento do corpo de Ahmed. No presente estudo, o corpo de Ahmed foi posicionado em $Z = 0$, ou seja, conforme posicionamento dentro do túnel hidrodinâmico, sendo simulado o corpo 3D. Assim como no trabalho original de Ahmed et al. (1984), o corpo foi posicionado sobre os quatro apoios circulares, permitindo que o escoamento se desenvolva embaixo da superfície inferior do corpo.

Figure 13: Exemplificação do tamanho do domínio computacional utilizado para a simulação (dimensões em metro).



Fonte: Autoria própria.

Figure 14: Domínio computacional adimensionalizado e condições de contorno.



Fonte: Autoria própria.

As condições de contorno do problema foram definidas da seguinte forma: A superfície do corpo de Ahmed foi tratada como uma parede viscosa sem deslizamento (*no slip condition*). A condição de contorno de velocidade prescrita foi definida na entrada do domínio

computacional (*inflow*) enquanto a face do lado oposto foi definida como condição de contorno de saída (*outflow*).

A face superior e as laterais do domínio computacional foram tratadas com condições de contorno do tipo parede viscosa sem deslizamento. A parte inferior do domínio computacional foi tomado como uma parede viscosa sem deslizamento (*no slip condition*), representando a situação real do túnel hidrodinâmico experimental – Fig. 14.

3.6 Malha

Para a geração da malha foi utilizado o CfMesh®, que é um gerador de malha intrínseco à versão estendida do OpenFoam® v4. Para a criação da malha do modelo no *software* SolidWorks®, utilizou-se sua própria plataforma que disponibiliza esse recurso.

Maior quantidade de elementos de malha no modelo, gera melhores resultados, em contrapartida, exige maior processamento computacional. Há, portanto, um limite de refinamento de malha, em que não há grandes alterações nos resultados. Nesse caso, pode-se dizer que o resultado passa a ser independente da malha computacional utilizada. Para obter esse limite foi utilizado o método (CGI) *Grid Convergence Method* (Celik et al. 2008), o qual será explicado na próxima sessão, com o número de elementos e uma variável observada, nesse caso o coeficiente de arrasto (CD), ver tabela 3:

Tabela 3: Quantidade de elementos de malha no modelo

OpenFoam®	SolidWorks®
467801	214562
643744	350953
846867	549801

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com o emprego do método (CGI) *Grid Convergence Method*. Ao comparar os resultados apresentados na tabela 4, e considerando a metodologia proposta por Cooper (1993), pode-se verificar que a malha média, em termos de refinamento, deve ser utilizada na análise, pois GCI21 é menor que 1% e o erro relativo aproximado foi menor que 5%.

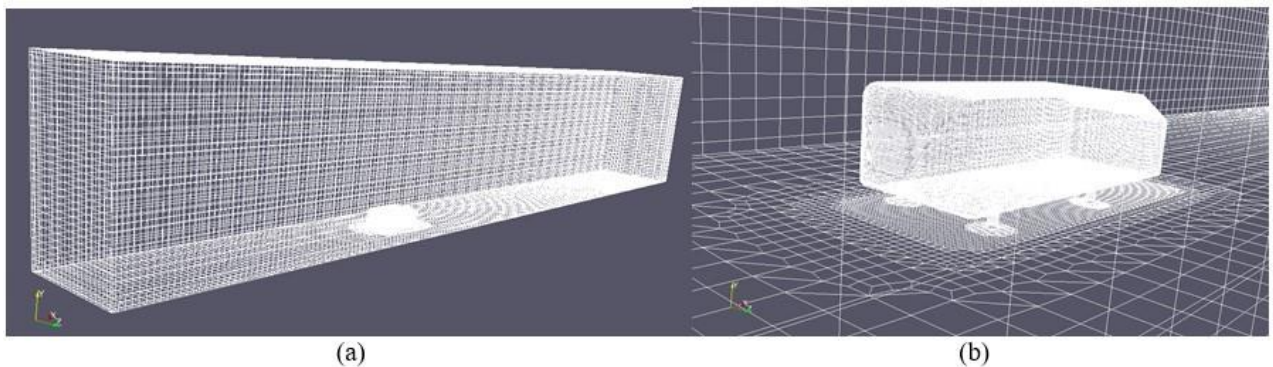
Tabela 4: *Grid Convergence Method* (CGI) para malha em OpenFoam®.

Number of Elements in mesh 1	467801
Number of elements in mesh 2	643744
Number of elements in mesh 3	846867
Refinement factor r_{21}	1,38
Refinement factor r_{32}	1,32
Approximate relative error e_{a21}	3,76%
Approximate relative error e_{a32}	15,5%
Extrapolated relative error e_{ex21}	0,71%
Extrapolated relative error e_{ex32}	4,82%
Convergence index GCI_{21}	0,79%
Convergence index GCI_{32}	6,74%

Assim, a segunda malha foi escolhida para ser utilizada nas simulações para ambas modelagens com os dois *softwares*. A Figura 15 mostra a malha ao redor da geometria. A malha utilizada é quadrilateral, refinada nas regiões mais próximas ao corpo (ao redor do corpo e atrás do mesmo) como visto no detalhe (b) na Figura 15. Conforme mencionado, foram geradas 643744 células. A malha também foi refinada nos pontos de apoio do corpo, como visto na Figura 15(b).

Deve-se observar que neste estudo as camadas próximas às superfícies do corpo foram refinadas, visando uma melhor precisão (maior número de pontos) na camada limite.

Figura 15: Detalhamento da malha computacional utilizada nas simulações.



Fonte: Autoria própria.

3.7 Análise de convergência (CGI)

O método CGI (*Grid Convergence Method*) descrito em (Celik et al. 2008) contém cinco etapas, explicadas a seguir:

Etapla 1. Definir um tamanho representativo de célula, malha ou grade h :

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\delta A_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Etapla 2. Selecionar três conjuntos de grid significativamente diferentes:

É desejável que o fator de refinamento do grid $r = h_{fino}/h_{grosso}$ seja maior que 1.3. A partir dos resultados, selecione uma propriedade e três valores correspondentes, ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 .

$$\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1 \quad e \quad \varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2 \quad (7)$$

Etapla 3. Seja $h_1 < h_2 < h_3$ e $r_{21} = h_2/h_1$, $r_{32} = h_3/h_2$ e calcule a ordem aparente p do método usando a expressão:

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| + q(p) \right| \quad (8)$$

$$q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad (9)$$

$$h = 1.5 \operatorname{sgn} \left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right) \quad (10)$$

Etapa 4. Calcular os valores extrapolados de:

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^p \phi_1 - \phi_2}{r_{21}^p - 1} \quad \text{e} \quad \phi_{ext}^{32} = \frac{r_{32}^p \phi_2 - \phi_3}{r_{32}^p - 1} \quad (11)$$

Etapa 5. Calcule e relate as seguintes estimativas de erro, juntamente com a ordem aparente p :

Erro relativo aproximado:

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (12)$$

Erro relativo extrapolado:

$$e_{ext}^{21} = \left| \frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}} \right| \quad (13)$$

Grid convergence index:

$$GCI = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (14)$$

É importante enfatizar que todas simulações conduzidas neste trabalho com os dois *softwares* atingiram o estado de convergência (onde não há mais variação dos parâmetros de interesse), com a queda de pelo menos 3 ordens de magnitude dos resíduos. Como critério de convergência do *solver*, foi observado a estabilidade das curvas de CD e CL.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo é direcionado à apresentação dos resultados numéricos obtidos no presente estudo, bem como uma discussão e observação sobre os principais aspectos do escoamento sobre o corpo de Ahmed. É importante ressaltar que, apesar de um número não tão expressivo de simulações (devido ao período da pandemia do COVID-19), os resultados permitem caracterizar o impacto da razão de bloqueio no coeficiente de arrasto do corpo, bem como no escoamento. Portanto, os resultados apresentados terão a seguinte sequência: a) tabelas com os coeficientes de arrasto em função da razão de bloqueio; b) comparação dos valores obtidos para cada software utilizado; c) visualização do escoamento; d) nº de Strouhal;

A Tabela 5 apresenta o quadro de simulações conduzidas ao longo deste trabalho, totalizando 12 simulações.

Tabela 5: Quadro de simulações do presente estudo.

Re = 4000 (Escoamento laminar)		
Razão de Bloqueio (%)	Ângulo de Traseira (°)	Software
4%	25° e 30°	OpenFoam®
6%		
9%		SolidWorks Flow®

Devido ao baixo número Reynolds presente nos experimentos do túnel hidrodinâmico ($Re = 4000$), o qual foi considerado laminar, optou-se por utilizar um *solver* de escoamento laminar e em regime transiente para ambas as abordagens numéricas, ou seja, tanto no software OpenFoam® quanto no SolidWorks Flow®. Como saída de dados quantitativa, o coeficiente de arrasto foi o parâmetro observado nas simulações. Visualizações do campo de pressão, vorticidade e linhas de trajetória (pathlines) serão apresentadas para complementar a análise e fornecer uma visão geral sobre os campos de escoamentos.

4.1 Influência da Razão de Bloqueio

No trabalho original de Ahmed et al. (1984) o tipo de túnel de vento utilizado, com seção aberta, reduz o impacto da variável Razão de Bloqueio uma vez que não há o confinamento do escoamento dentro de paredes. Sabe-se que durante qualquer teste realizado em túnel de vento, as paredes do túnel restringem o campo de escoamento ao redor do corpo e causam uma aceleração local do escoamento. Este efeito é chamado de bloqueio sólido. Isso provoca um gradiente de pressão simétrico e um aumento no arrasto medido.

Portanto, é importante quantificar esse efeito e identificar o quanto o resultado final para o coeficiente de arrasto se altera em função desse parâmetro.

Os resultados para geometria com 4% de razão de bloqueio podem ser visualizados na Tabela 6 para os dois *softwares* utilizados.

Tabela 6: Resultados para geometria com 4% razão de bloqueio.

	Software		Erro relativo ϵ %
	OpenFoam®	SolidWorks Flow®	
Ângulo da traseira	CD	CD	
25°	0.432	0.456	5.5
30°	0.434	0.469	8.0

Para esta primeira análise, verifica-se que os valores obtidos para o coeficiente de arrasto para todas as simulações com ambos softwares forneceram valores bastante próximos (entre 5 e 8%) e acima de 0.4. Posteriormente, serão feitas observações sobre os valores calculados no presente estudo, em comparação com aqueles obtidos por Ahmed et al. (1984). É importante apenas observar que os valores obtidos são maiores para o Software SolidWorks Flow®.

É importante observar também que os valores de CD são maiores para a traseira com 30° de inclinação, o que indica uma provável diferença na esteira próxima à parte final (ou traseira) do veículo.

Os resultados para o coeficiente de arrasto (CD) para uma razão de bloqueio de 6% são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados para geometria com 6% razão de bloqueio.

	Software		Erro relativo ϵ %
	OpenFoam®	SolidWorks Flow®	
Ângulo da traseira	CD	CD	
25°	0.432	0.457	5.8
30°	0.435	0.470	8.0

Verifica-se, comparando as Tabelas 6 e 7 que os resultados para CD variam muito pouco e estão dentro da mesma margem de erro relativo (5 a 8%), indicando que para razões de bloqueio entre 4% a 6% o escoamento não é afetado pela proximidade das paredes do túnel. Esse resultado está em sintonia com a referência Barlow e Pope (1999), que afirmam

que para ensaios com corpos confinados deve-se manter a razão de bloqueio abaixo de 10% para garantir a não influência das paredes nos resultados a serem medidos, especialmente as forças aerodinâmicas.

Na sequência, na Tabela 8, verificam-se os dados para CD considerando uma razão de bloqueio de 9%.

Tabela 8: Resultados para geometria com 9% razão de bloqueio.

	Software		Erro relativo $\epsilon\%$
	OpenFoam®	SolidWorks Flow®	
Ângulo da traseira	CD	CD	
25°	0.433	0.458	5.8
30°	0.436	0.471	8.0

Observa-se uma vez mais que os resultados para CD variam muito pouco e estão dentro da mesma margem de erro relativo (5 a 8%). Ou seja, para as razões de bloqueio investigadas neste trabalho, pode-se dizer que não houve influência das paredes no padrão de escoamento. Espera-se, portanto, identificar padrões de escoamentos semelhantes sobre o corpo, especialmente na região traseira.

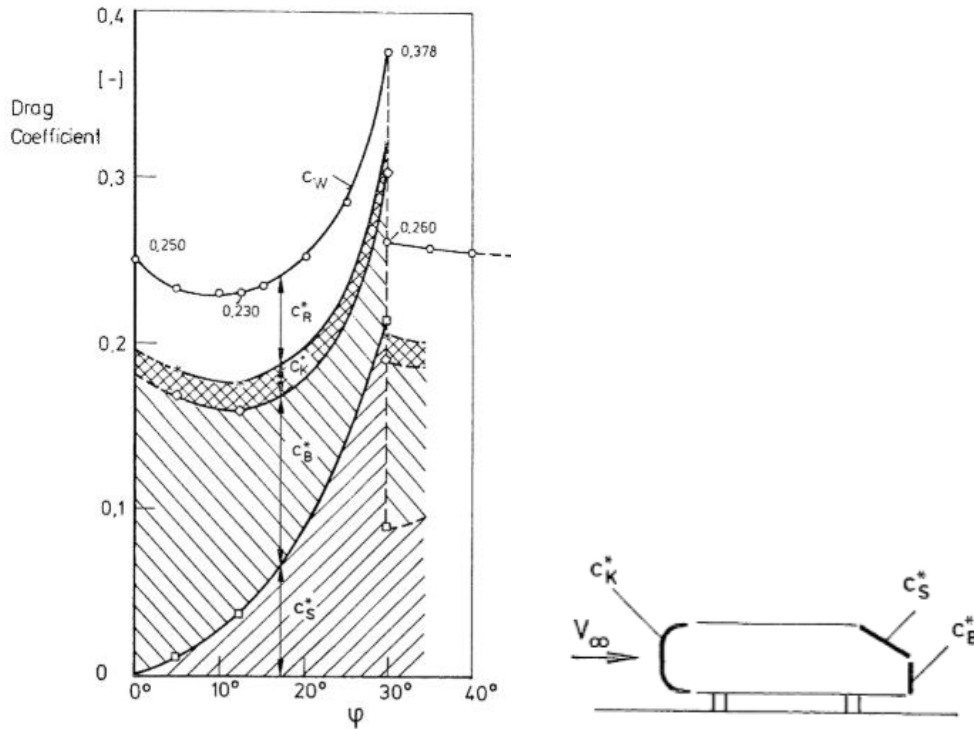
Resumindo as observações:

- Os valores de CD obtidos com o software SolidWorks Flow® se mostraram sempre superiores aos valores obtidos com o OpenFoam®;
- Os valores de CD para o corpo de Ahmed são sempre maiores para o ângulo de inclinação de 30°;
- Pode-se dizer que não há uma forte influência da razão de bloqueio no campo de escoamento;
- Os valores praticados de razão de bloqueio entre 4% a 9% são coerentes com outros dados da literatura e podem ser aplicados para trabalhos futuros.
- Os valores de CD, para o nº de Reynolds de 4000 sempre foram maiores do que 0.4.

Outra observação importante a ser considerada é a grande discrepância entre o nº de Reynolds desta pesquisa (4000) e do trabalho original de Ahmed et al. (1984) (4.29×10^6). A Figura 16, conforme Ahmed et al. (1984) aponta que o maior valor medido do coeficiente de arrasto foi de 0.378 para uma traseira com 30° de inclinação. Portanto, assumindo um valor médio de CD de 0.435 para 30°, obtido com o software OpenFoam®, verifica-se que este resultado é da ordem de 15% maior. Seriam necessárias mais investigações, considerando tanto ensaios numéricos quanto experimentais para se avaliar a influência do nº de Reynolds,

mas neste momento, pode-se dizer que há um efeito do nº de Reynolds no coeficiente de arrasto, porém não se pode afirmar como seria o comportamento dessa variação C_D versus Re .

Figura 16: Variação do arrasto (C_D) em função do ângulo de traseira.



Fonte: (Ahmed et al., 1984).

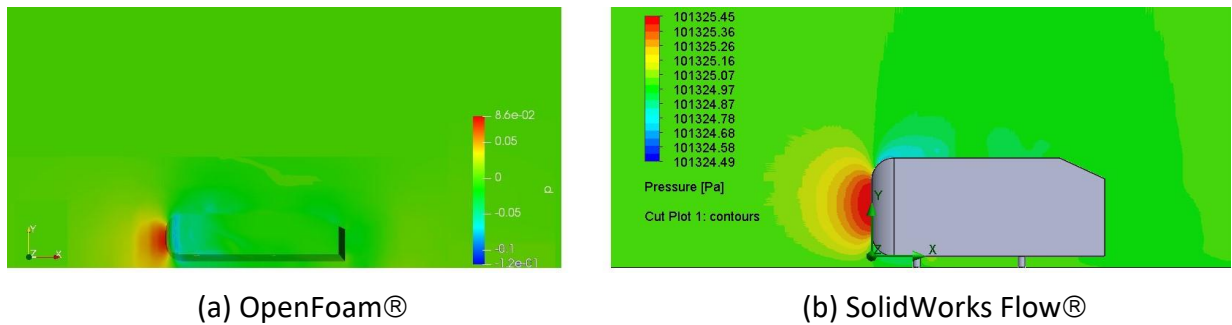
4.2 Visualização do escoamento

Serão apresentadas na sequência detalhes do padrão de escoamento sobre o corpo de Ahmed para um nº de Reynolds de 4000 e para ângulos de traseira de 25° e 30° para as diferentes razões de bloqueio investigadas neste trabalho. As visualizações são feitas considerando-se os campos de pressão, vorticidade e isolinhas de trajetória (*pathlines*).

A Figura 17 mostra a distribuição da pressão no escoamento sobre o corpo de Ahmed obtidas numericamente com os softwares OpenFoam® e SolidWorks Flow® respectivamente.

Apesar da diferença na escala das figuras geradas, devido principalmente às características de pós-processamento dos softwares utilizados, é possível identificar semelhança local no campo de pressão a frente do corpo. Os detalhes do escoamento sobre a carroceria e na parte traseira do corpo poderão ser melhor visualizados através do campo de vorticidade na Figura 18.

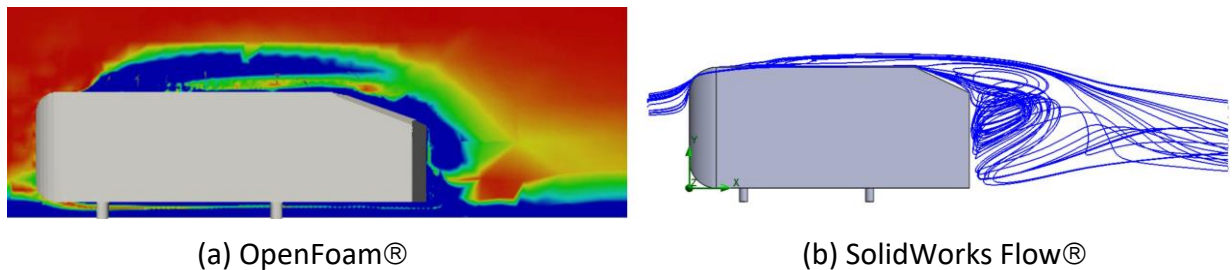
Figura 17: Distribuição de pressão para uma razão de bloqueio de 4% e 25°.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 mostra o campo de vorticidade, o qual permite se ter uma ideia dos padrões de vórtices formados na traseira do corpo, obtidos com o OpenFoam® e SolidWorks Flow® respectivamente.

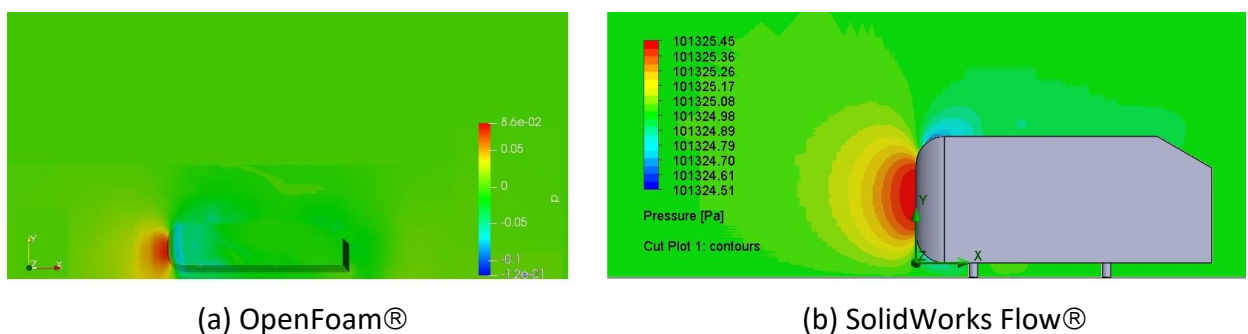
Figura 18: Vórtices formados para uma razão de bloqueio de 4% e 25°.



Fonte: Autoria própria.

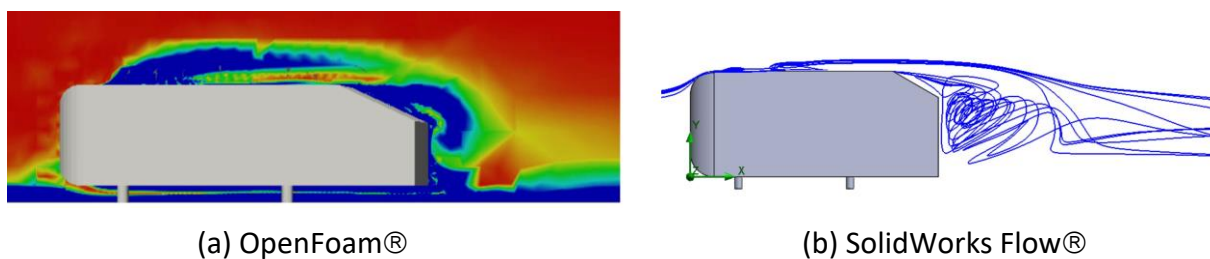
Na sequência serão repetidos os gráficos de visualização do escoamento para um ângulo de traseira de 30°.

Figura 19: Distribuição de pressão para uma razão de bloqueio de 4% e 30°.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Vórtices formados para uma razão de bloqueio de 4% e 30°.

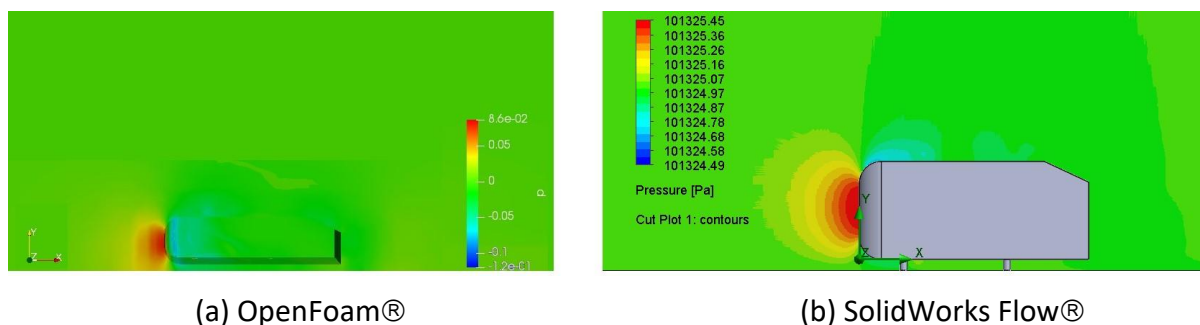


Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar sutis diferenças entre os campos de vorticidade e isolinhas de trajetória para os dois ângulos de traseira 25° e 30°. Todavia, seria necessário um estudo mais aprofundado em termos de detalhamento e mapeamento de esteira (perfis de velocidade) para de fato quantificar essa diferença. Deve-se ressaltar que o objetivo desses resultados de visualização é o de apenas dar uma ideia geral do campo de escoamento.

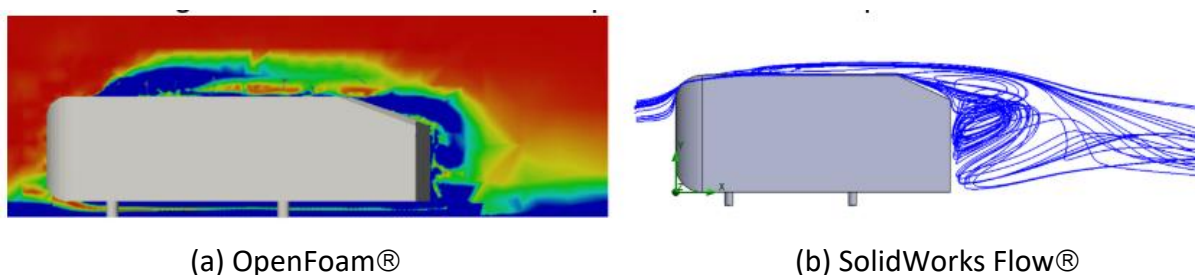
As Figuras 21 e 22 mostram a distribuição da pressão no escoamento e o campo de vorticidade, respectivamente, para uma razão de bloqueio de 6% e um ângulo de traseira de 25°.

Figura 21: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 6% e 25°.



Fonte: Autoria própria.

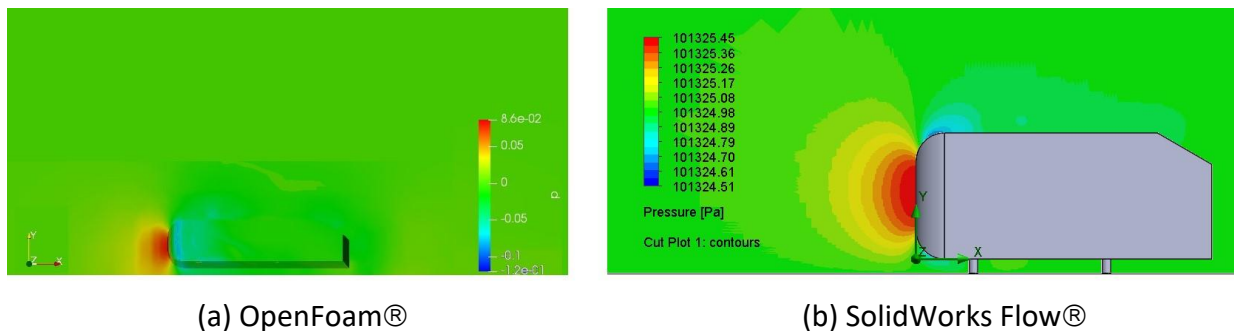
Figura 22: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 6% e 25°.



Fonte: Autoria própria.

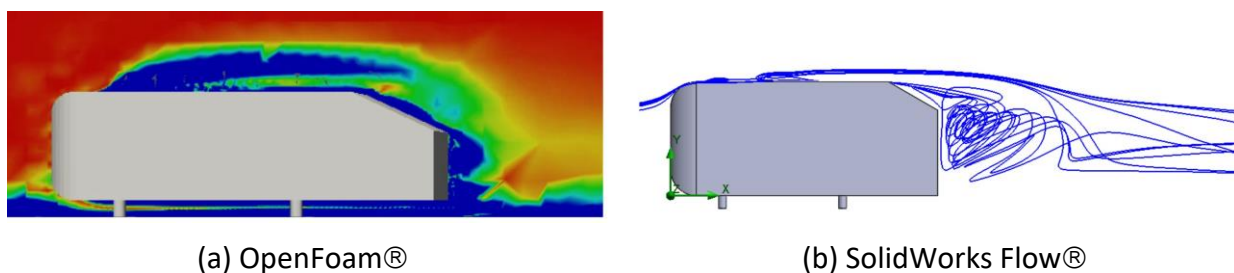
Na sequência serão repetidos os gráficos de visualização do escoamento para um ângulo de traseira de 30° .

Figura 23: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 6% e 30° .



Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 6% e 30° .

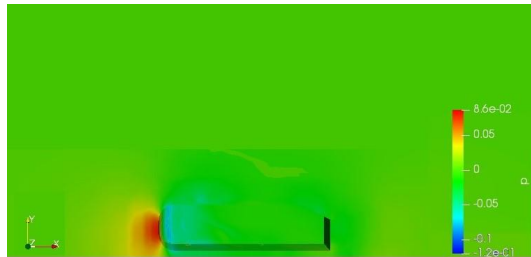


Fonte: Autoria própria.

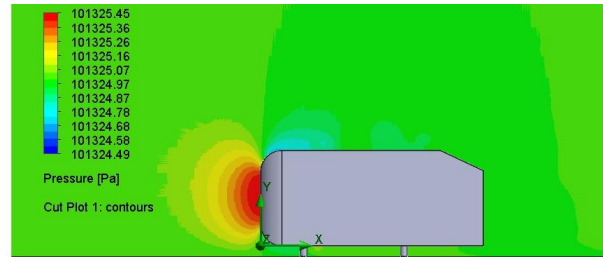
Pode-se observar diferenças pontuais entre os campos de vorticidade e isolinhas de trajetória para os dois ângulos de traseira 25° e 30° . Identifica-se diferença no padrão de escoamento sobre a traseira inclinada do corpo. Conforme observado anteriormente seria necessário aprofundar os estudos para detalhamento do escoamento.

Por fim, os resultados para a geometria com 9% de razão de bloqueio se encontram nas Figuras 25, 26, 27 e 28 ilustrando os respectivos campos de pressão e vorticidade do escoamento para ângulos de traseira de 25° e 30° .

Figura 25: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 9% e 25°.



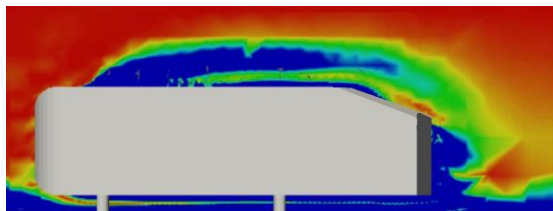
(a) OpenFoam®



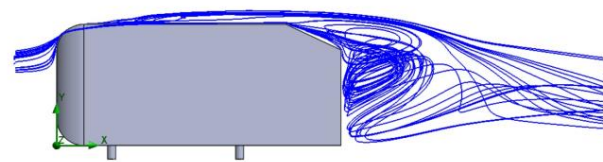
(b) SolidWorks Flow®

Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 9% e 25°.



(a) OpenFoam®

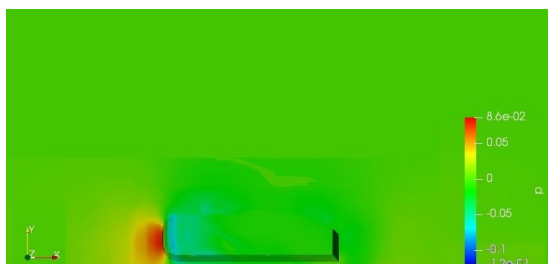


(b) SolidWorks Flow®

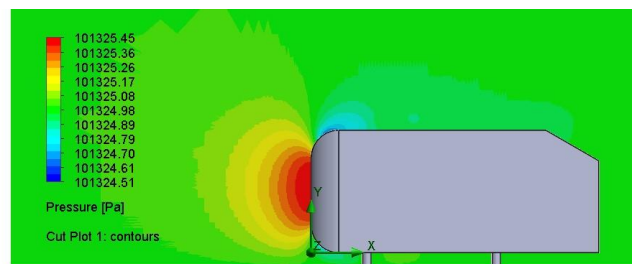
Fonte: Autoria própria.

Na sequência serão repetidos os gráficos de visualização do escoamento para um ângulo de traseira de 30°.

Figura 27: Distribuição de pressão para razão de bloqueio de 9% e 30°.



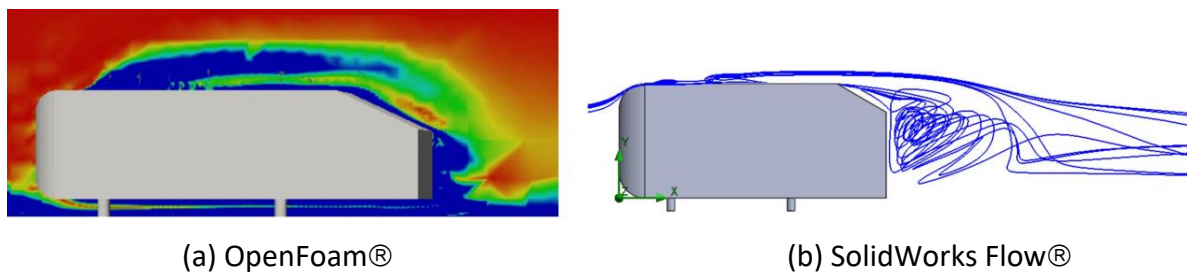
(a) OpenFoam®



(b) SolidWorks Flow®

Fonte: Autoria própria.

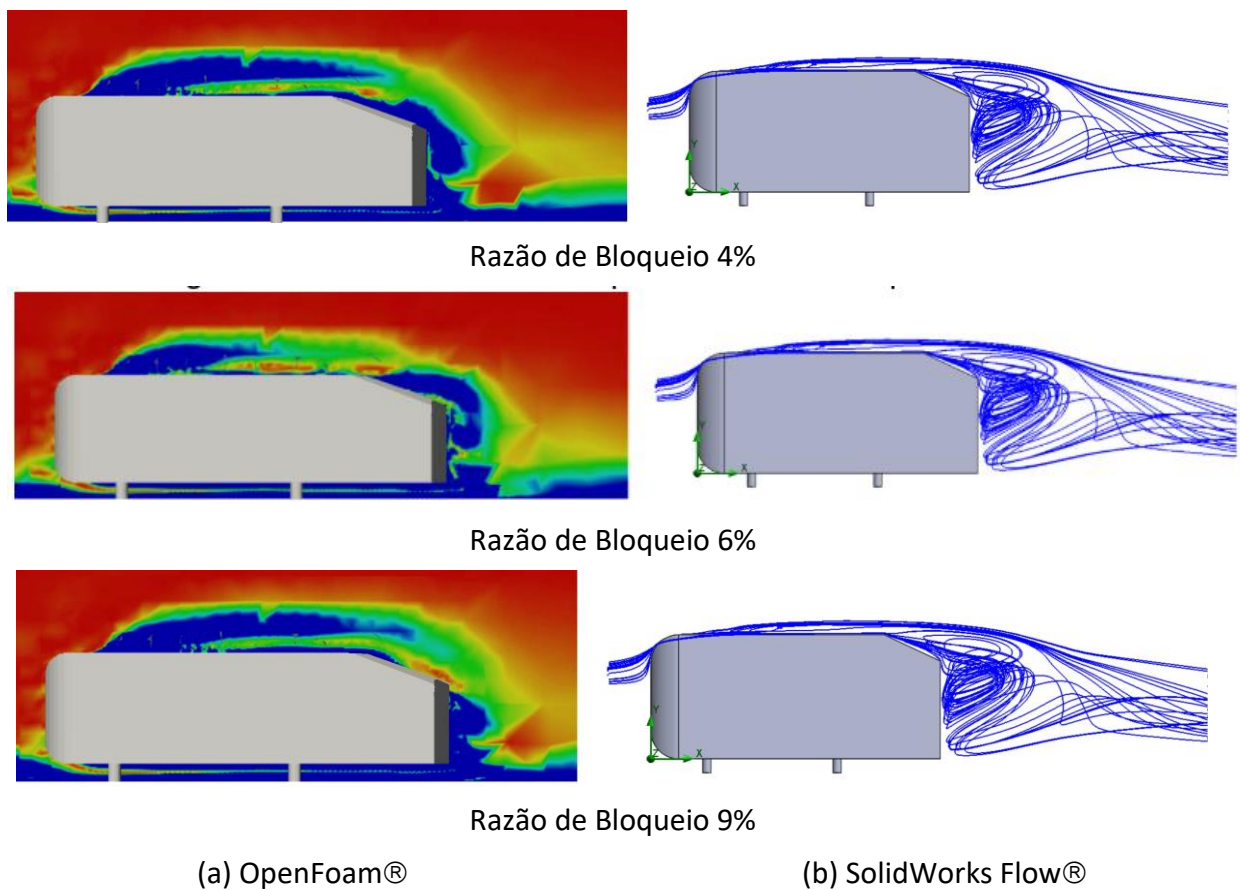
Figura 28: Vórtices formados para um razão de bloqueio de 9% e 30°.



Fonte: Autoria própria.

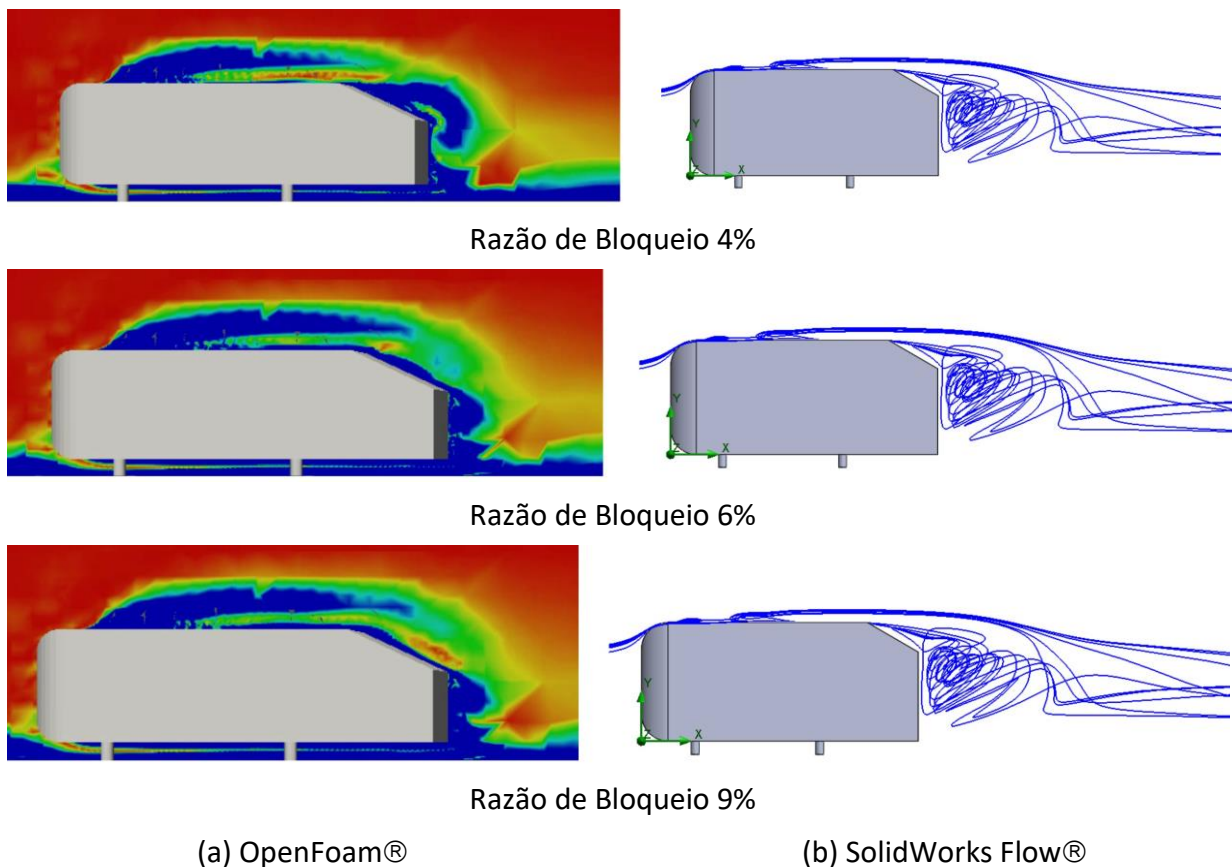
As Figuras 29 e 30 reproduzem lado a lado, os campos de vorticidade para as diferentes razões de bloqueio e ângulos de traseira:

Figura 29: Vórtices formados para ângulo de traseira de 25°.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Vórtices formados para ângulo de traseira de 30°.



Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, é possível observar grande semelhança entre os resultados obtidos através dos diferentes *solvers* computacionais. Nota-se que as camadas de fluido adjacentes ao corpo de Ahmed são levadas ao repouso e o escoamento se separa da superfície. Essa separação da camada limite acarreta a formação de uma região de baixa pressão atrás do corpo (esteira), que resulta em um arrasto de pressão (ou arrasto de forma).

Observa-se também que quanto menor o ângulo da traseira menor os valores de C_D , isso é devido a um “afunilamento” da traseira que reduz o gradiente de pressão, dispersando um aumento de pressão sobre uma distância maior. A suavização da forma retarda a separação, reduzindo assim o coeficiente de arrasto.

4.3 Número de Strouhal

Para uma razão de bloqueio de 4%, foi possível obter o número de Strouhal para as configurações do corpo de Ahmed com traseira de 25° e 30°, respectivamente. Essas

simulações foram conduzidas somente com o emprego do software OpenFoam®. A Tabela 9 apresenta os resultados.

Tabela 9: Número de Strouhal para geometria com 4% de razão de bloqueio.

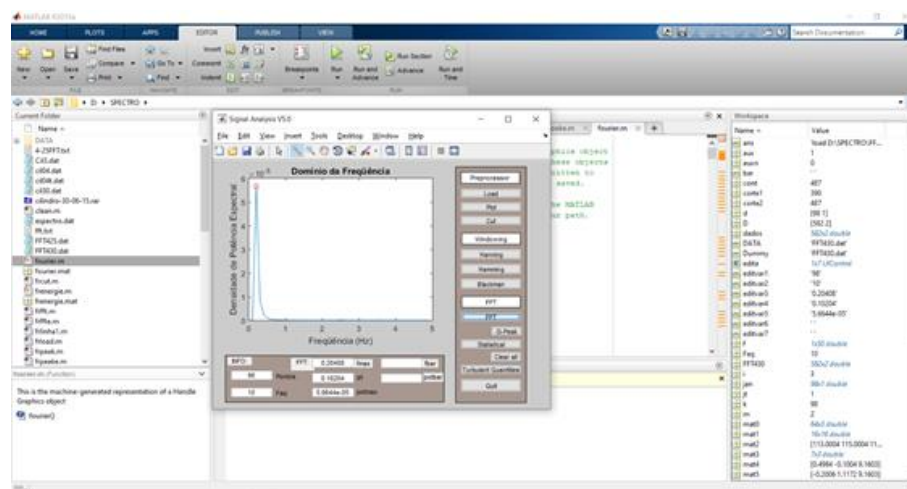
Ângulo de traseira	Número de Strouhal
25°	0.23
30°	0.27

O procedimento adotado para a avaliação da frequência de emissão de vórtices consistiu na amostragem temporal da série do coeficiente de arrasto. Posteriormente, considerando a parte periódica do sinal, foi feita uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) no *software* MATLAB® - Figura 31 - para a obtenção da frequência fundamental daquele sinal. Essa frequência foi então utilizada na Eq.(5) para a obtenção do nº de Strouhal.

Com base nos resultados, comparativamente com outros trabalhos da literatura, pode-se dizer que a esteira obtida tem significado físico e é representativa do escoamento ao redor do corpo de Ahmed. Todavia, verificou-se que a série temporal do coeficiente de arrasto talvez não seja a mais adequada para o cálculo da frequência. Foi verificado em outros trabalhos que o mapeamento da velocidade em um ponto na esteira do corpo é uma forma mais utilizada para esse cálculo, pois o sinal da velocidade está dentro da esteira e possivelmente deve apresentar um sinal mais estável para esta análise.

Apesar de pequenas discrepâncias, as quais requerem estudos futuros, os resultados se mostraram satisfatórios e confiáveis para futuras análises nesse campo de estudo.

Figura 31: Interface MATLAB® para processamento do sinal – nº de Strouhal.



Fonte: Autoria própria.

5 Considerações finais

Foi realizado um estudo numérico do corpo de Ahmed em 3 diferentes razões de bloqueio: 4, 6 e 9% para um número de Reynolds na ordem de 4000. Nesse estudo, dois diferentes softwares de CFD foram analisados, um de código aberto (*opensource*) denominado OpenFoam® e um código comercial SolidWorks Flow®.

Através dos resultados obtidos, foi possível verificar que as diferentes razões de bloqueio não influenciam nos parâmetros estudados do coeficiente de arrasto (CD) e número de Strouhal (St). Pode-se dizer que houve mínima mudança nos valores do número de Strouhal, devido ao aumento da área do corpo, sendo essa variável sensível a variações no número de Reynolds e, como o nº de Reynolds não sofre tanta alteração ao com a área do corpo, devido que a ordem de grandeza permanece a mesma, o número de Strouhal é pouco alterado.

Apesar do fato de que a literatura carece de dados experimentais sobre o escoamento a baixos nº de Reynolds sobre o corpo de Ahmed, de maneira geral, a solução obtida é semelhante a observada nos dados qualitativos obtidos no túnel hidrodinâmico da FEIS-UNESP. Essa observação, valida satisfatoriamente os resultados obtidos no presente estudo.

Do ponto de vista quantitativo, os coeficientes de arrasto e distribuição do campo de pressão foram bem definidos. A separação do escoamento foi observada na traseira da geometria de maneira similar ao que é observado na literatura e nos dados experimentais. Regiões de recirculação e locais de escoamento separado foram identificadas na traseira do corpo. Verifica-se também que há diferenças entre os escoamentos tanto na parte superior do modelo quanto na traseira, em função dos ângulos de traseira estudados, 25° e 30. Em comparação com o trabalho original de Ahmed et al. (1984), identificou-se um aumento de 15% nos valores do coeficiente de arrasto avaliado numericamente. É importante então ressaltar que não foram encontrados resultados experimentais que ilustram o comportamento da curva CD versus Re para o corpo de Ahmed, o qual poderia explicar ou mesmo confirmar os resultados obtidos.

Em suma, as estruturas principais no campo de escoamento sobre um corpo de Ahmed a Reynolds 4000 foram reproduzidas numericamente. Os resultados mostraram-se satisfatórios e indicam a viabilidade de tal abordagem no estudo dessa geometria, favorecendo no futuro comparações e complementações de resultados experimentais obtidos no Laboratório de Visualização da FEIS/UNESP.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como consequência do estudo realizado neste trabalho de conclusão de curso, são deixadas sugestões de trabalhos futuros com o objetivo de sempre ampliar o entendimento dos temas abordados neste trabalho. São as seguintes recomendações:

- 1) Aumentar o número de casos estudados, variando o número de Reynolds do escoamento;
- 2) Gerar estudos para demais angulação da traseira do corpo de Ahmed;
- 3) Comparar os dados obtidos numericamente com dados quantitativos experimentais obtidos no Laboratório de Visualização da FEIS/UNESP ou outro estudo publicado;
- 4) Detalhar os resultados obtidos em termos de perfis de velocidade na esteira do corpo para eventuais futuras comparações com dados experimentais;
- 5) Conforme identificado na revisão bibliográfica deste trabalho, dispor a geometria em diferentes configurações, por exemplo, em comboio, para estudo dessas interações na aerodinâmica do escoamento.

6 Referências Bibliográficas

- Ahmed, S. R., Ramm, G. & Faltin, G. (1984), 'Some salient features of the timeaveraged ground vehicle wake', SAE Transactions pp. 473–503.
- Bassan, R. A., Mansur, S. S. & Vieira, E. D. R. (2011), Rebuilding and testing a vertical hydrodynamic tunnel, in 'Proceedings of the 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering–COBEM'.
- Bayraktar, I., Landman, D. & Baysal, O. (2001), 'Experimental and computational investigation of ahmed body for ground vehicle aerodynamics', SAE transactions pp. 321– 331.
- Bello-Millán, F. J., Mäkelä, T., Parras, L., Del Pino, C., & Ferrera, C. (2016). Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 157, 140-144.
- Bruneau, C. H., Khadra, K., & Mortazavi, I. (2017). Flow analysis of square-back simplified vehicles in platoon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 66, 43-59.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J. & Freitas, C. J. (2008), 'Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in cfd applications', *Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME* 130(7).
- Cooper, K. (1993), 'Bluff-body aerodynamics as applied to vehicles', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 49(1-3), 1–21.
- Durand, L., Kuntz, M. and Menter, F., 2002, Validation of CFX-5 for the Ahmed Car Body, CFX Validation Report, CFX-Val 13/1002.
- Fox, R. W., McDonald, A. T. & Mitchell, J. W. (2020), Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics, John Wiley & Sons.
- Gheysens, T. (2016), 'Aerodynamic analysis of a platoon of bluff bodies subjected to cross wind, a numerical investigation on the effect of drag reduction devices'.
- Guilmineau, E. (2008), 'Computational study of flow around a simplified car body', *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 96(6-7), 1207–1217.
- Guilmineau, E., Deng, G. B., Leroyer, A., Queutey, P., Visonneau, M., & Wackers, J. (2018). Assessment of hybrid RANS-LES formulations for flow simulation around the Ahmed body. *Computers & Fluids*, 176, 302-319.
- Gutierrez, J. E. C., Duarte, L. E. V., Oliveira Jr, A. A. M., & Cancino, L. R. ENC-2020-0060 THE AHMED BODY'S EXTERNAL AERODYNAMICS AT 25° SLANT ANGLE REAR SURFACE: A NUMERICAL ANALYSIS USING CFD.
- Hanfeng, W., Yu, Z., Chao, Z. & Xuhui, H. (2016), 'Aerodynamic drag reduction of an ahmed body based on deflectors', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 148, 34–44.
- Happian-Smith, J. (2001), *An introduction to modern vehicle design*, Elsevier.

- Hinterberger, C., Garcia-Villalba, M. & Rodi, W. (2004), Large eddy simulation of flow around the ahmed body, in 'The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains', Springer, pp. 77–87.
- Hucho, W., & Sovran, G. (1993). Aerodynamics of road vehicles. Annual review of fluid mechanics, 25(1), 485-537.
- Krajnovic, S. & Davidson, L. (2004), 'Large-eddy simulation of the flow around simplified car model', SAE Technical Papers .
- Lienhart, H. & Becker, S. (2003), 'Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model', SAE transactions pp. 785–796.
- Lienhart, H., Stoots, C. & Becker, S. (2002), Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed modell), in 'New results in numerical and experimental fluid mechanics III', Springer, pp. 323–330.
- Liu, K., Zhang, B. F., Zhang, Y. C., & Zhou, Y. (2021). Flow structure around a low-drag Ahmed body. Journal of Fluid Mechanics, 913.
- MENDES-ALVES, R. M. Experimental and numerical study of the aerodynamics of heavy vehicles. 2016. Work for the Mechanical Course Conclusion, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.
- Rao, A., Minelli, G., Basara, B., & Krajnović, S. (2018). On the two flow states in the wake of a hatchback Ahmed body. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 173, 262-278.
- Rosim, E. L. B. (2012). Estudo experimental do escoamento em cavidades retangulares: padrões de escoamento e instabilidades hidrodinâmicas na camada cisalhante. Master's thesis.
- Saha, I., Mukherjee, T., Saha, A., & Pandey, R. (2020). Aerodynamic Study of an Ahmed Body with the help of CFD Simulation.
- Tunay, T., Sahin, B. & Ozbolat, V. (2014), 'Effects of rear slant angles on the flow characteristics of ahmed body', Experimental Thermal and Fluid Science 57, 165– 176.
- Venning, J., Jacono, D. L., Burton, D., Thompson, M. & Sheridan, J. (2015), 'The effect of aspect ratio on the wake of the ahmed body', Experiments in Fluids 56(6), 1–11.
- Zhang, B., Zhou, Y. & To, S. (2015), 'Unsteady flow structures around a high-drag ahmed body', Journal of Fluid Mechanics 777, 291–326.
- ZUCCO, G.R. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO EM TORNO A UM CORPO DE AHMED EMPREGANDO UMA MALHA POLIÉDRICA. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). Low-speed wind tunnel testing. John Wiley & sons.