



<http://ensaios.usf.edu.br> - ISSN 2595-1300

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

AERODINÂMICA ATIVA – ESTUDO EM CFD *ACTIVE AERODYNAMICS – STUDY AT CFD ANALYSIS*

PIANTE, André Luís Drezza¹; GOMES, Leonardo Molina Aprigio¹; Eugenio Morita²
¹Estudantes do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco; Campus Itatiba

²Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco; Campus Itatiba

andrepicante98@hotmail.com
leonardomolinaaprigio@gmail.com

Resumo. Neste presente trabalho será discutido a aplicabilidade e funcionalidade da aerodinâmica ativa para veículos capazes de alcançar altas velocidades. O estudo terá enfoque não somente em abordagens teóricas de aerodinâmica e mecânica dos fluidos, mas também abordará análises hipotéticas em CFD, utilizando o software ANSYS. Desta forma, além de permitir coletas e análises comparativas de dados de simulações computacionais, será passível de análise visual para com os efeitos estudados no âmbito da mecânica dos fluidos.

Nos estudos descritos, possibilitar-se-á observar como a movimentação de aerofólios influencia diretamente na dinâmica do veículo e o quanto o desempenho do mesmo é afetado quando exposto a situações de trânsito em altas velocidades. Desta forma, foram definidos parâmetros base para que as simulações cumprissem com o requisito de permissibilidade comparativa.

Palavras-chave: Aerodinâmica; Ansys; Desempenho

Abstract. In this present work, the applicability and functionality of active aerodynamics for vehicles capable of reaching high speeds will be discussed. The study will encompass not only theoretical approaches to aerodynamics and fluid mechanics but will also address hypothetical analyses in Computational Fluid Dynamics (CFD) using the ANSYS software. Thus, in addition to enabling the collection and comparative analysis of data from computational simulations, it will be subject to visual analysis regarding the effects studied in the field of fluid mechanics. In the described studies, we will observe how the movement of airfoils directly influences the vehicle's dynamics and how its performance is affected when exposed to high-speed traffic situations. Consequently, basic configurations were defined to ensure that the simulations met the requirement of comparability.

Keywords: Aerodynamics; Ansys; Performance



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

INTRODUÇÃO

A aerodinâmica teve seu início de pesquisas e estudos no final do século XV e início do século XVI, com fenômenos relacionados ao movimento do ar e objetos na atmosfera, no qual sua evolução pode ser atribuída a um campo de pesquisa muito amplo onde houve a participação de cientistas, matemáticos e diversos engenheiros, que desempenharam estudos até os dias de hoje. Conforme o conhecimento científico e evolução das tecnologias, houve diversas melhorias nos sistemas de aerodinâmica em todos os quesitos, como exemplos a redução de resistência do ar em baixas e altas velocidades, aumento melhoria na estabilidade, aumento das velocidades consideravelmente, melhor resfriamento de motor e freios.

Após séculos de pesquisas e evoluções consideráveis, a Análise de Dinâmica de Fluidos Computacionais, mais conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é considerada um dos avanços mais importantes para montadoras e engenheiros automotivos. Eles podem realizar simulações para análise de fluidos em situações reais e teóricas.

Um dos *softwares* líderes de mercado na indústria de simulação e análise de projetos de engenharia é o *Ansys*, que foi utilizado para as simulações no projeto. Ele é uma ferramenta de extrema importância no cenário atual para projetistas e engenheiros. Com ele é possível adiantar diversas etapas no projeto, desde os cálculos até as melhores formas e geometrias, por meio de suas análises e cálculos.

À medida que se aproxima de um futuro no qual veículos autônomos serão uma presença comum nas estradas, surge a perspectiva de visualizar esses veículos transitando em altas velocidades com segurança e eficiência.

Nesse cenário de veículos autônomos de altas velocidades, a aerodinâmica ativa emerge como uma tecnologia fundamental capaz de moldar o desempenho e a eficiência energética desses veículos, tem-se a aerodinâmica como uma peça-chave na otimização do desempenho e da segurança.

Um sistema de asa adaptável trará ao veículo estabilidade e fluidez no deslocamento com tudo poderá também se converter a um sistema de frenagem, criando arrasto ao veículo desta forma será implementado eficiência e segurança.

A capacidade de ajustar ativamente a aerodinâmica de um veículo autônomo, adaptando-a as condições em tempo real, não apenas influenciará na eficiência energética reduzindo o consumo de combustível e ou eletricidade nos veículos, mas também desempenhará um papel crucial na capacidade de realizar frenagens mais eficazes em altas velocidades, tornando as viagens mais seguras para os ocupantes e para os demais usuários das estradas.

Este projeto se propõe a explorar como a aerodinâmica ativa pode ser implementada em veículos autônomos, avaliando seu impacto na eficiência energética, na estabilidade em altas velocidades e na capacidade de frenagem. Será discutido como essa tecnologia pode ser otimizada para proporcionar um deslocamento mais seguro, mais eficiente e mais rápido. Analisando casos já realizados com êxito que obtiveram homologação para transitar em rua.

METODOLOGIA

Nesta seção, descreve-se a abordagem metodologia científica utilizada para analisar e implementar a aerodinâmica ativa em veículos de passeio capazes de atingir altas velocidades

constantes com segurança. O desenvolvimento dessa metodologia envolveu várias etapas essenciais com embasamento teórico e prático (*Análise Software*):

Definição de objetivos

O primeiro passo foi definir com clareza os objetivos de pesquisa e estudos, que consistem em melhorar a eficiência aerodinâmica e a estabilidade de veículos em alta velocidade por meio da aerodinâmica ativa, com foco no aumento da segurança, eficiência e melhora na autonomia.

Revisão bibliográfica

Realizou-se uma busca em artigos científicos, literatura e sistemas de segurança rodoviária, para coleta de dados sobre o tema, de forma a inserir um contexto e um objetivo ao estudo, uma vez que apesar do pouco tempo disponível para idealização do projeto. O objetivo também é visar tecnologias aplicáveis ao mercado automotivo futuro.

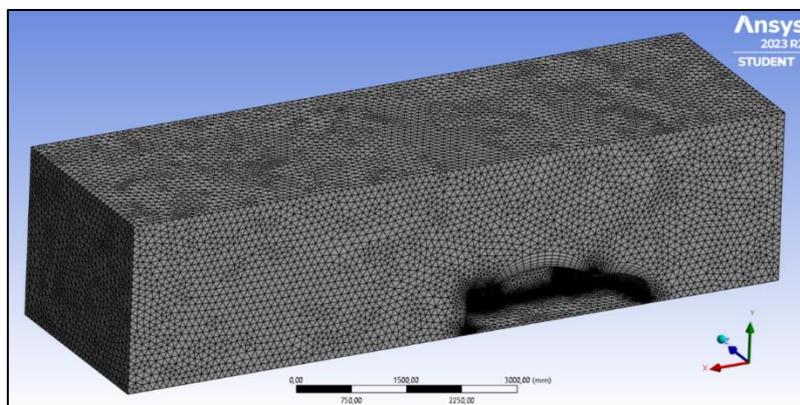
Modelagem computacional

Foi utilizado o *software Ansys* para realizar simulações computacionais avançadas. Isso incluiu a criação de um modelo simplificado de veículo de passeio e simulações de fluxo de ar para entender o conceito do comportamento aerodinâmico em alta velocidade.

O *software* permite análises excepcionais para aerodinâmica de um veículo, contudo, por existir uma limitação de ferramentas computacionais, os testes foram realizados baseados em aproximações, em busca de ser o mais fiel a realidade possível.

Para as análises utilizou-se alguns parâmetros padronizados, como por exemplo: Tamanho máximo de elementos de 400 mm, considerando o tamanho médio de 100mm para discretizações. Tal fato é ilustrado na figura 1 à seguir.

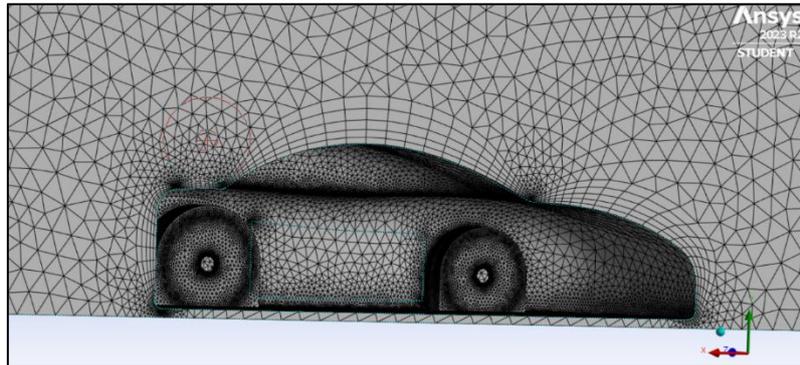
Figura 1 - Parâmetro de malha



Fonte: autor próprio

É importante ressaltar que foi feito um refinamento das faces do veículo para exigir menor poder computacional e garantir melhor análise sobre o objeto de estudo. Conforme apresentado na figura 2.

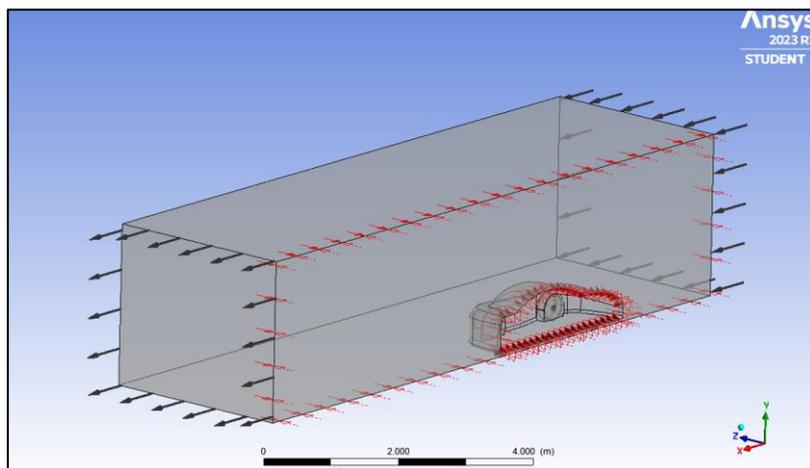
Figura 2 - Refinamento de malha computacional



Fonte: autor próprio

Assim, para criar a análise também foi realizada algumas configurações tomadas como padrão para nosso ambiente de pesquisa. Dentre elas pode-se destacar: Definição de cada face do campo de análise para sua específica função no espaço de estudo tendo entrada, saída e campos limitantes laterais e o solo. Para o solo foi considerado em movimento à mesma velocidade definida no ar, 300 km/h, além de um espaçamento de grão de 1 mm bem como uma simulação de uma pavimentação padrão, conforme apresentando na figura 3

Figura 3 - Relação de simetria

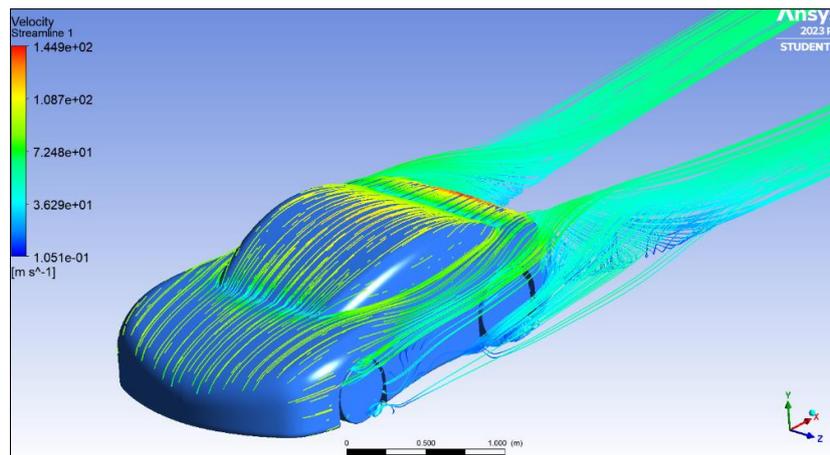


Fonte: autor próprio

Foi inclusa também a simetria para que a simulação seja exposta na forma real do veículo, desta forma todos os parâmetros definidos para o ambiente, veículos são replicados à sua face.

Como resultado das análises tem se representações gráficas do estudo em três dimensões, contudo para validar o estudo, foi feito uma análise do veículo sem aerofólio (Figura 4) e em seguida representações em distintos posicionamentos do mesmo.

Figura 4 - Análise de velocidade do fluido



Fonte: Autor próprio

Análise de dados teóricos

Foram coletados dados teóricos sobre a aerodinâmica do veículo, pressão do ar, distribuição de cargas e outros parâmetros relevantes. Esses dados foram usados como base para otimizar o sistema de aerodinâmica ativa

Projetos do sistema de aerodinâmica ativa

Com base nas informações obtidas nas simulações e análises, projetou-se um sistema de aerodinâmica ativa que incluiu asas móveis para exemplificar e comprovar o desempenho aerodinâmico. Contudo, como limitação computacional é um dos complicadores do projeto, as análises para diferentes posicionamentos de asa foram feitas em momentos diferentes.

Conceitos teóricos utilizados

Para compreender os efeitos aerodinâmicos em um automóvel, houve a necessidade de revisar alguns conceitos teóricos discutidos no âmbito da mecânica dos fluidos, como a compressibilidade do ar, que para o estudo é considerada desprezível (a validade dessa aproximação é discutida posteriormente); a influência do ambiente para com a aerodinâmica do corpo estudado (onde as paredes do túnel de vento foram projetadas suficientemente distantes para não interferir no arrasto aerodinâmico do automóvel modelo); o número de Reynolds que dita o tipo de escoamento presente em um determinado espaço de tráfego do fluido em um corpo de prova imerso no mesmo; e também conceitos de análise computacional de fluidos como: conceitos de malhas e discretizações.



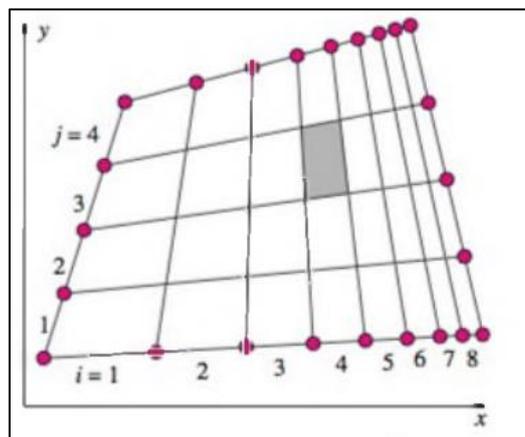
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Geração de malhas

A primeira etapa crucial no processo de solução por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é a criação das malhas. Essa etapa envolve a geração de uma malha que define as células onde as variáveis de escoamento, como velocidade e pressão, serão calculadas em todo o domínio computacional. Existem dois tipos principais de malhas: estruturadas e não estruturadas.

Uma malha estruturada consiste em células planares ou volumétricas com índices que não correspondem necessariamente às coordenadas x , y e z . O processo de construção de uma malha estruturada 2-D, pode ser exemplificado como os nós ao longo das arestas e depois conectados para formar a malha interna, como mostra a figura 6.

Figura 5 - Malha estruturada



Fonte: Yunus A. Çengel - 2007

Por outro lado, uma malha não estruturada é composta por células de diversas formas, como triângulos ou quadriláteros (2-D) e tetraedros ou hexaedros (3-D). Tais formatações destacam-se por geometrias complexas, malhas não estruturadas são mais fáceis de criar, embora malhas estruturadas possuam vantagens, como convergência mais rápida em alguns códigos CFD mais antigos.

A qualidade da malha é enfatizada como fator crítico para soluções CFD confiáveis. Células extremamente inclinadas podem levar a dificuldades de convergência e imprecisões na solução numérica. O texto destaca a importância de evitar inclinações excessivas nas células para garantir resultados precisos. O tipo de inclinação mais adequado para as células bidimensionais é a inclinação equiangular, definida pela equação 1:

Equação 1 - Inclinação equiangular

$$Q_{EAS} = M\acute{A}X \left(\frac{\theta_{M\acute{a}x} - \theta_{Igu\grave{a}l}}{180^\circ - \theta_{Igu\grave{a}l}} \cdot \frac{\theta_{Igu\grave{a}l} - \theta_{M\grave{i}n}}{\theta_{Igu\grave{a}l}} \right)$$

Fonte: Yunus A. Çengel - 2007

Onde $\theta_{M\acute{a}x}$ e $\theta_{M\acute{i}n}$ são os ângulos máximo e mínimo (em graus) entre dois lados da célula e $\theta_{Igu\grave{a}l}$ é o ângulo entre duas arestas quaisquer de uma célula equilátera ideal com mesmo número de arestas. Demonstra-se pela equação 1 que $0 < Q_{EAS} < 1$ para qualquer modelagem de célula em duas dimensões.

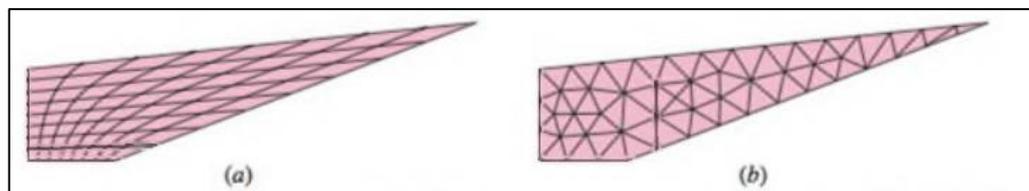
Deve-se destacar a importância de suavizar a malha para minimizar a inclinação das células, pois, isso pode afetar a convergência e a precisão numérica no código CFD.

Além disso, fatores como variações abruptas no tamanho da célula e razões de aspecto muito grandes também podem influenciar negativamente a qualidade da malha.

Apesar da possibilidade de minimizar a contagem de células usando malhas estruturadas em vez de malhas não estruturadas, a escolha entre elas depende da forma do domínio computacional. Também é importante frisar que uma malha não estruturada de alta qualidade pode ser mais eficaz do que uma malha estruturada de qualidade inferior.

As figuras 7 e 8 apresentam diferentes malhas para um domínio e suas respectivas descrições. Ainda que com o mesmo número de células para comparação direta, a malha triangular não estruturada demonstra uma inclinação mais baixa em comparação com a malha estruturada, enquanto a malha quadrilátera não estruturada fica intermediária em termos de inclinação.

Figura 6 - Malha estruturada / Malha triangular

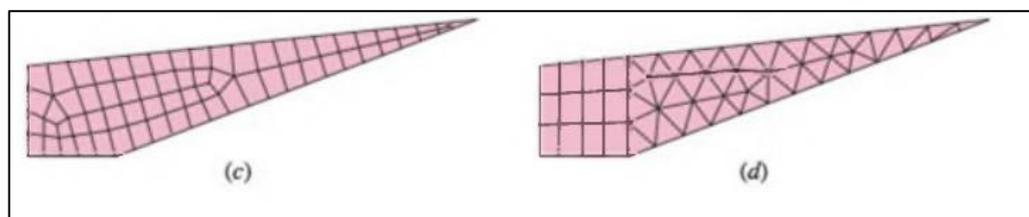


Fonte: Yunus A. Çengel - 2007

Malha (A): Malha estruturada 8 X 8 com 64 células e $(Q_{EAS})_{m\acute{a}x} = 0,83$

Malha (B): Malha triangular não estruturada com 70 células e $(Q_{EAS})_{m\acute{a}x} = 0,76$

Figura 7 - Malha estruturada / Malha triangular



Fonte: Yunus A. Çengel - 2007

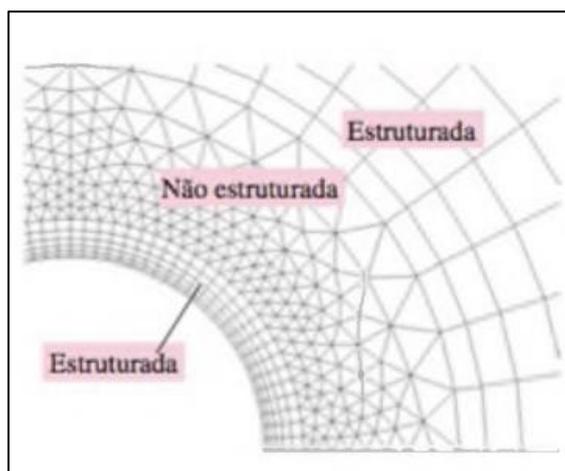
Malha (C): Malha quadrilátera não estruturada com 67 células e $(Q_{EAS})_{m\acute{a}x} = 0,87$

Malha (D): Malha híbrida com 62 células e $(Q_{EAS})_{m\acute{a}x} = 0,76$

Também é de suma importância citar que existem situações em que uma malha estruturada pode ser preferida, como quando o código CFD exige malhas estruturadas ou quando a simulação está pressionando os limites de memória disponíveis.

Dentro das diversas possibilidades de aplicação de malhas, foi utilizada a malha híbrida no projeto aqui discutido, conforme exposto na imagem teórica pela figura 09.

Figura 8 - Malha híbrida



Fonte: Yunus A. Çengel - 2007

Integração no veículo de teste

Implementou-se o sistema de aerodinâmica ativa em um veículo de teste virtual e conduziu-se testes em condições de alta velocidade para avaliar seu desempenho e segurança. Nos testes foram consideradas algumas variáveis como principais: Pressão média sobre a carroceria, Força de arrasto e sustentação.

Para tais variáveis foram considerados e estudados alguns dos principais conceitos de fluidodinâmica para corpos imersos em fluidos, como: Forças de arrasto e pressão, tipos de escoamento, sustentação e *downforce* (pressão aerodinâmica do veículo contra o solo, considerado como sustentação negativa em relação ao eixo Y).

Analisou-se os dados coletados durante os testes e comparou-se com os resultados teóricos para avaliar a eficácia do sistema de aerodinâmica ativa em atingir os objetivos de segurança e desempenho.

Esta metodologia abrange todas as etapas essenciais envolvidas na pesquisa sobre aerodinâmica ativa em veículos de passeio de alta velocidade. Ela combina simulações computacionais avançadas com testes práticos para garantir resultados confiáveis e seguros.

Resultados e discussões

Neste tópico, abordam-se os resultados obtidos a partir das análises realizadas no contexto do projeto de "Aerodinâmica Ativa para Veículos de Passeio Autônomos," com um enfoque nos princípios fundamentais da mecânica dos fluidos. Para que as análises fossem fiéis ao tema foram considerados quatro possibilidades de análise CFD: Apenas o veículo, Veículo com asa traseira a 0°, Veículo com asa traseira a 20° e Veículo com asa traseira a 75°.



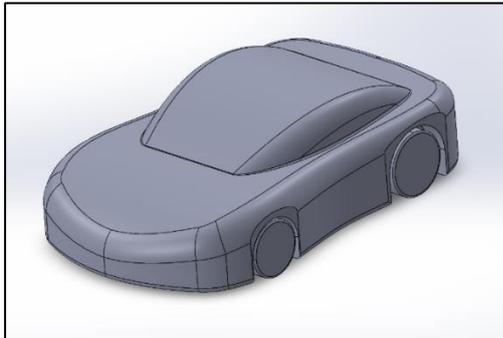
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

A aerodinâmica desempenha um papel crucial na eficiência e segurança dos veículos automotores. Com base nas simulações e testes realizados, os resultados são discutidos nos seguintes pontos:

Modelos analisados

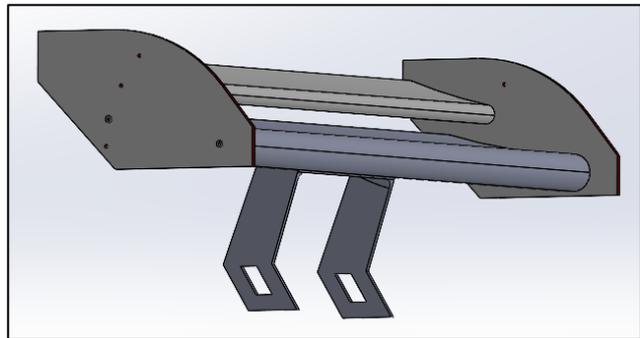
Dentro do contexto apontado anteriormente foram utilizados os seguintes modelos para as análises. Um veículo genérico simplificado (Figura 8) e uma asa detalhada (Figura 9) com possibilidade de adaptabilidade de *flap* para análises em situações diferentes. Foi realizada a montagem dos itens descritos como mostra a figura 10, 11 e 12.

Figura 9 - Veículo simplificado



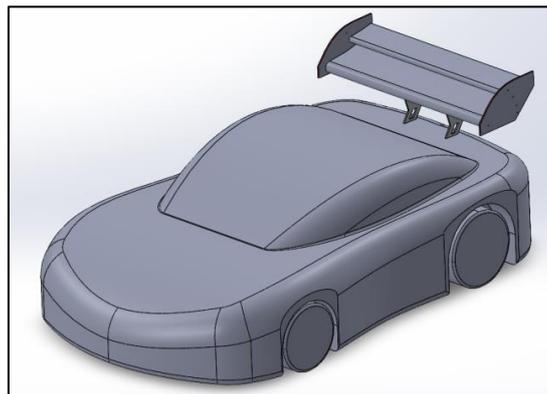
Fonte: Autor próprio

Figura 10 - Asa móvel



Fonte: Autor próprio

Figura 11 - Montagem



Fonte: Autor próprio

Perfil de Arrasto (Coeficiente de Arrasto C_d): O coeficiente de arrasto é um indicador-chave da resistência que os veículos encontram ao se moverem através do ar. As análises computacionais de CFD permitiram determinar o C_d para diferentes configurações de aerodinâmica ativa, comparando os resultados com um veículo de referência. Esses dados servem como base para avaliar o impacto da tecnologia de aerodinâmica ativa ao arrasto.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Distribuição da Pressão e *Downforce*: A distribuição da pressão na superfície do veículo é fundamental para entender como a aerodinâmica ativa afeta as forças que atuam sobre o carro. Isso inclui a minimização de áreas de alta pressão, que aumentam a resistência ao ar, e a maximização de áreas de baixa pressão, que contribuem para a fluidez dinâmica perante o veículo. Para que o veículo possua estabilidade em altas velocidades é necessário que exista uma força descendente que force o mesmo a vencer a força de sustentação, permanecendo estável ao solo.

É de suma importância frisar que os testes realizados em CFD foram padronizados conforme descrito pela Tabela 1:

Tabela 1- Geometria túnel de vento

Geometria túnel de vento	
Comprimento total	15m
Comprimento entrada	5m
Altura total	3m
Altura Solo-roda	0,415m

Mesh	
Tamanho elementos	100
Boundary inflation	133 Faces

Setup	
Default Domain	Material: air ideal gas
	Fluid Models: Option: Shear Stress transport
Boundary Entrada	300km/h
Boundary Saída	Realtive Pressure = 0
Boundary Simetria	Simetry
Boundary Far Field	Free slip Wall
Boundary Solo	No slip wall
	Wall Velocity
	Wall U = 300km/h
	Rough Wall = 1mm
Boundary Carro (Default domain Default)	No Slip Wall
Solver Control	Max Iterations = 1000
	Option = Upwind

Análises CFD

Neste tópico são apresentados e comparados os resultados obtidos nas análises de CFD realizadas no *software Ansys*. É de suma importância enfatizar, que as análises se aproximam conceitualmente dos estudos descritos anteriormente,

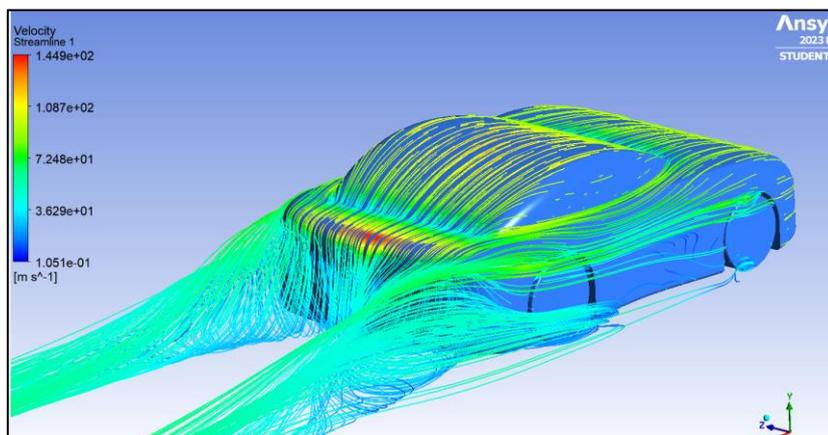
contudo, não são capazes de representar a realidade devido ao baixo poder computacional disponível e aos modelos teóricos dos corpos utilizados.

São apresentadas também tabelas com os resultados de força de sustentação e força de arrasto fornecida pelo *software Ansys* juntamente com as simulações.

Veículo sem aerofólio.

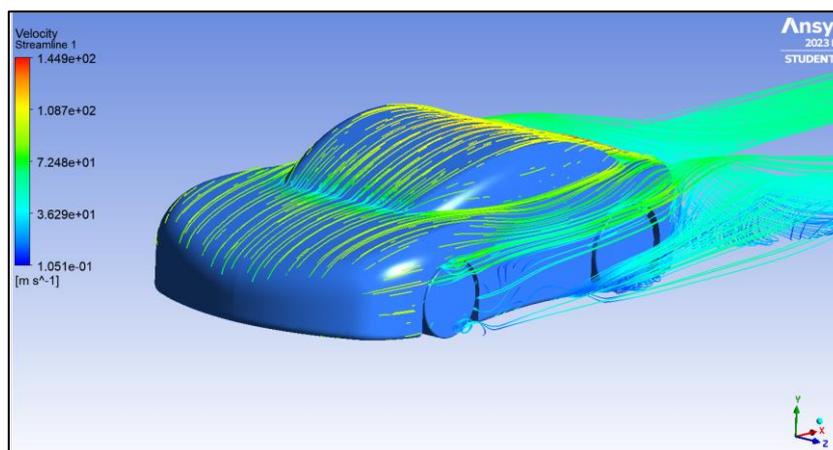
É possível observar que o veículo não possui eficiência aerodinâmica, como mostram as figuras 13, e 14 onde se permite observar o mapa de velocidade do ar sobre a superfície do carro com pontos claros de turbulência. E na figura 15 onde é possível observar áreas de baixa pressão na traseira do veículo, criando sustentação e por consequência instabilidade em altas velocidades.

Figura 12 - Vista traseira - Representação de linhas de velocidade do ar



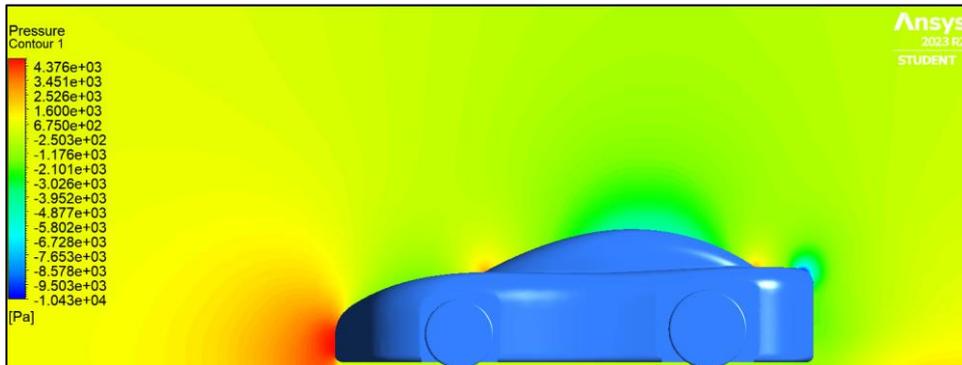
Fonte: Autor próprio

Figura 13 - Vista dianteira - representação de linhas de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

Figura 14 - Vista Lateral - Representação de contornos de pressão na carroceria



Fonte: Autor próprio

Entretanto, é importante ressaltar que o modelo não é fiel a realidade e por isso o resultado da sustentação via cálculos do software Ansys é “exagerada”, como exposto na tabela 2, para fins ilustrativos. O conceito é expor os dados adquiridos afim de comparar com os resultados das outras análises onde serão inseridos os aerofólios.

Tabela 2 – Forças de sustentação e de arrasto sem aerofólio

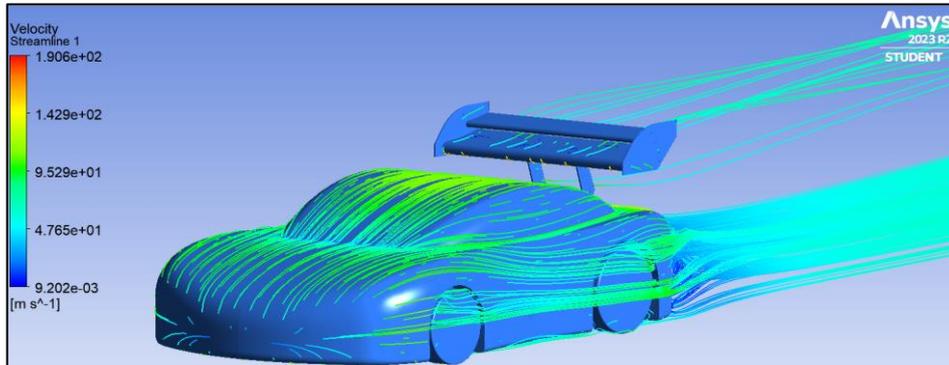
Veículo sem aerofólio	
Força de sustentação [Y]	2657,67 [N]
Força de arrasto [X]	1643,08 [N]

Veículo com aerofólio a 0°

As figuras 16, 17 e 18 representam as simulações com a o *flap* do aerofólio em sua posição original, também nomeado como 0°. A aerodinâmica da asa desempenhou um papel crucial no desempenho do veículo, assim pode-se afirmar que o aerofólio é um elemento essencial para otimizar a interação do veículo com o ar. O *downforce* gerado nessa configuração específica é notavelmente incrementado, proporcionando benefícios significativos em termos de estabilidade do veículo durante a simulação de condução.

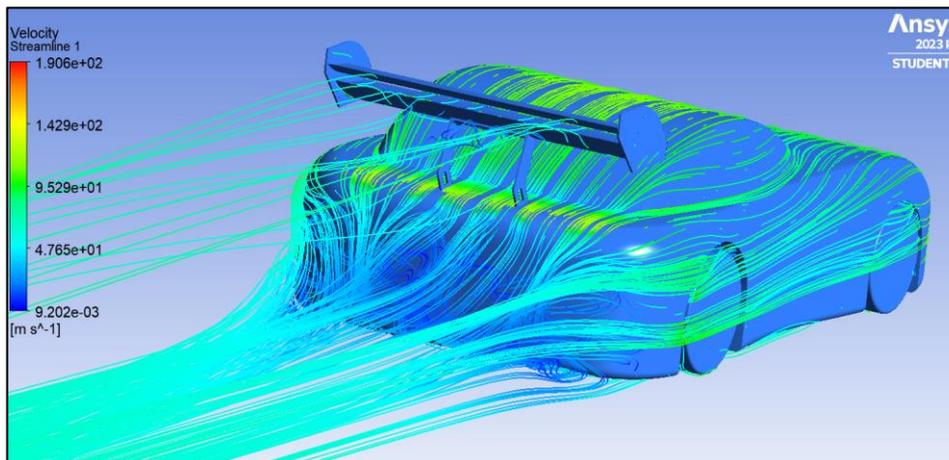
Ao analisar mais a fundo o fenômeno aerodinâmico, é vital compreender o conceito de *downforce*. Este é o componente da força aerodinâmica que atua perpendicularmente à direção do vento, pressionando o veículo contra o solo. Essa força descendente adicional contribui para uma aderência mais efetiva dos pneus ao solo, resultando em uma melhoria significativa na estabilidade direcional e na capacidade de manter o veículo em contato seguro com a superfície da estrada.

Figura 15 - Vista frontal - Representação de linhas de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

Figura 16 - Vista traseira - Representação de linha de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

Figura 17 - Vistal lateral - Representação de contornos de pressão na carroceria



Fonte: Autor próprio

Embora seja verdade que a introdução do aerofólio também esteja associada a um aumento no arrasto aerodinâmico, conforme tabela 3, é fundamental compreender que essa é uma troca necessária para otimizar o equilíbrio entre desempenho aerodinâmico e eficiência energética. O arrasto é uma força resistiva que age na direção oposta ao movimento do veículo e, ao implementar um aerofólio, é inevitável que haja um acréscimo nessa resistência. Conforme apresenta a tabela 3.

Tabela 3 - Forças de sustentação e de arrasto para aerofólio a 0°

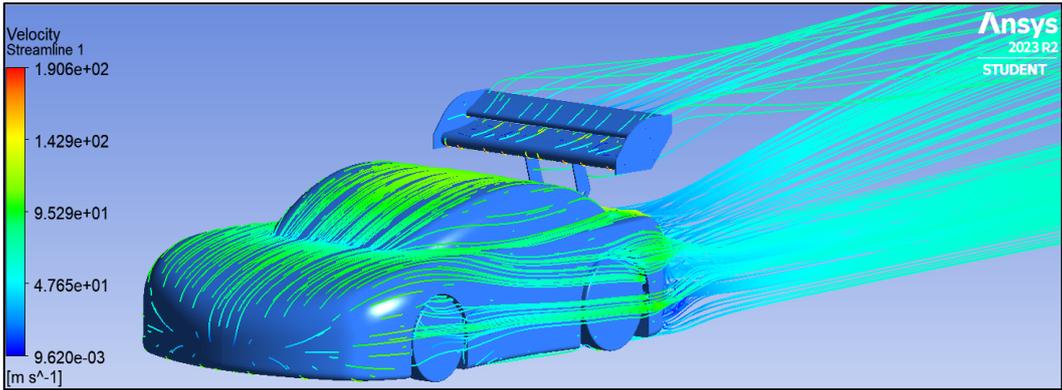
Veículo com aerofólio a 0°	
Força de sustentação [Y]	-3216,84 [N]
Força de arrasto [X]	2758,49 [N]

Veículo com aerofólio a 20°

Observa-se que o aerofólio estudado em seu ângulo máximo de inclinação, 20°, torna-se evidente que o *downforce* atingido nessa configuração é o mais substancial possível, como expõe as figuras 19 e 20 com os mapas de velocidade do ar, onde descrevem-se visualmente pontos de alta pressão e principalmente áreas de turbulência fluidodinâmica.

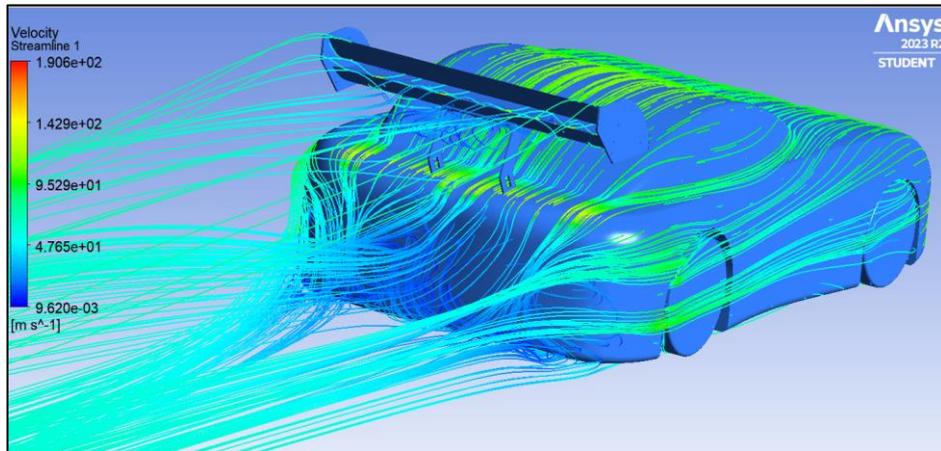
Este ângulo representa, portanto, o ponto de saturação onde o benefício adicional de força descendente se equilibra com o aumento correspondente no arrasto aerodinâmico.

Figura 18 - Vista frontal - Representação de linhas de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

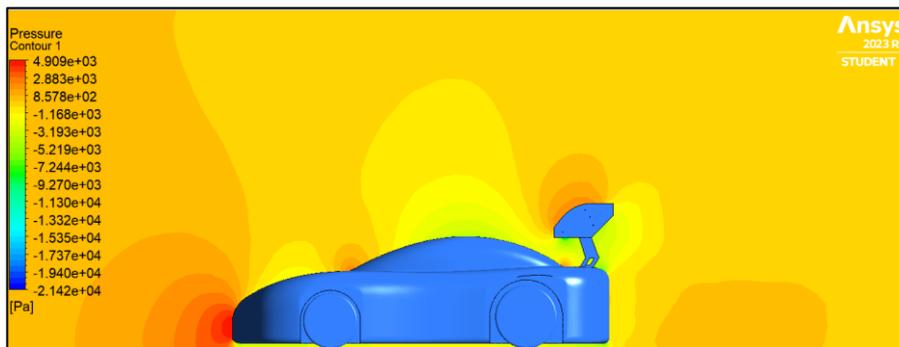
Figura 19 - Vista traseira - Representação de linha de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

Ao atingir o ângulo máximo de 20°, a intenção clara é maximizar a estabilidade e segurança do veículo ao solo, como mostra a figura 21 no mapa de pressão do ar sobre o corpo estudado, onde é notável a distribuição de forças na composição do aerofólio. A pressão aerodinâmica adicional exercida sobre o veículo aumenta a força de aderência dos pneus, melhorando assim a capacidade de tração e a estabilidade direcional.

Figura 20 - Vista lateral - Representação contornos de pressão na carroceria, aerofólio a 20°



Fonte: Autor próprio

É importante destacar que, embora essa configuração resulte em um aumento proporcional no arrasto aerodinâmico, conforme tabela 4, a abordagem da aerodinâmica ativa visa adaptar-se às exigências dinâmicas da condução. Em situações de maior demanda por estabilidade, o sistema ajusta automaticamente o aerofólio para maximizar o *downforce*, proporcionando assim uma resposta otimizada em termos de controle e segurança.

Tabela 4 - Forças de sustentação e de arrasto para aerofólio a 20°

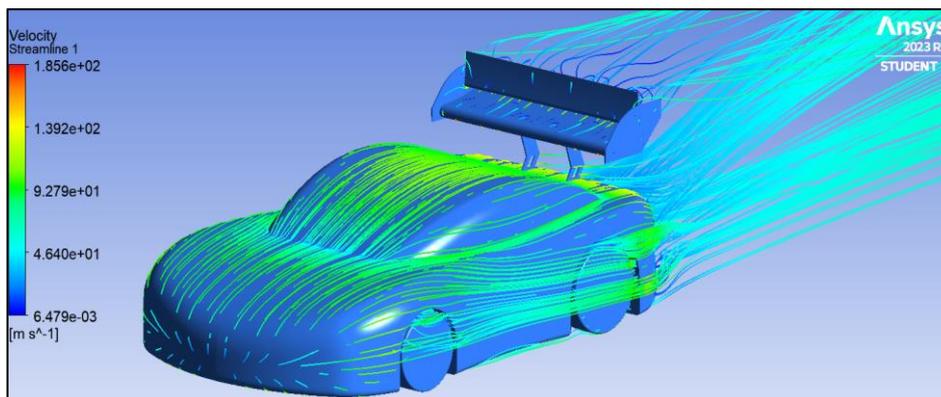
Veículo com aerofólio a 20°	
Força de sustentação [Y]	-3985,18 [N]
Força de arrasto [X]	3293,84 [N]

Veículo com aerofólio a 75°

A implementação de um sistema de frenagem por aerodinâmica ativa representa uma abordagem inovadora na busca por melhorias no desempenho e segurança veicular. O posicionamento específico do aerofólio a 75°, como descrito, evidencia uma aplicação inteligente dessa tecnologia para simular eficientemente a frenagem aerodinâmica, um conceito no qual o veículo utiliza o arrasto aerodinâmico como uma ferramenta ativa no processo de desaceleração.

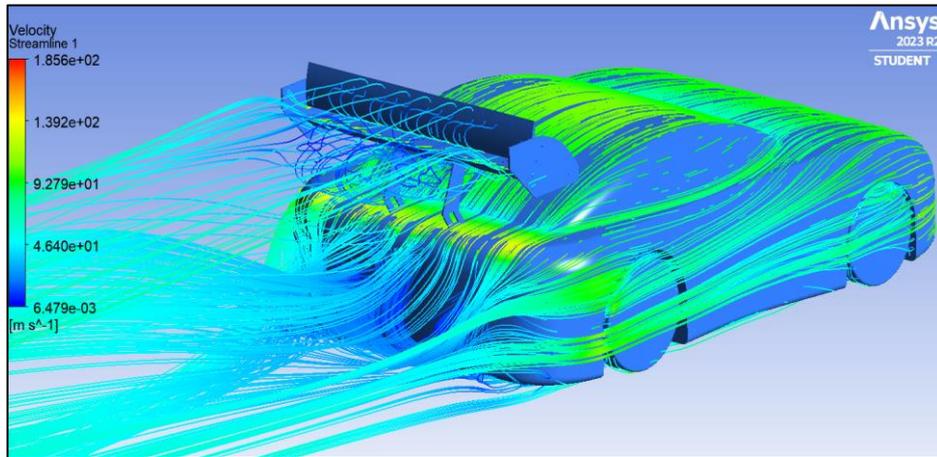
A teoria subjacente a essa estratégia é notavelmente comprovada pela simulação bem-sucedida da situação de frenagem aerodinâmica. Ao posicionar o aerofólio a 75°, cria-se intencionalmente um arrasto significativo, como exposto nas figuras 22 e 23, funcionando como uma resistência ao avanço do veículo. Esse arrasto, em vez de ser uma força indesejada, é aproveitado para auxiliar o sistema padrão de freios do veículo. Como resultado, o tempo e a distância necessários para que o veículo pare completamente são reduzidos, proporcionando uma resposta de frenagem mais eficaz.

Figura 21 - Vista frontal - Representação de linhas de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

Figura 22 - Vista traseira - Representação de linha de velocidade do ar



Fonte: Autor próprio

No entanto, é essencial observar que o alto ângulo de 75° torna inviável o trânsito do veículo com essa configuração de pressão aerodinâmica, como exemplificado na figura 24. Portanto, a utilização dessa posição específica do aerofólio é plausível apenas em situações de frenagem de emergência. Em circunstâncias normais de condução, manter um arrasto tão elevado seria impraticável devido ao consumo adicional de energia e à redução da eficiência geral do veículo.

Figura 23 - Vista lateral - Contornos de pressão na carroceria, aerofólio a 75°



Fonte: Autor próprio

O aumento notável do *downforce*, exposto na tabela 5, nessa configuração é um elemento crítico para a eficácia do sistema, pois, a força adicional pressiona o veículo contra o solo, melhorando a aderência dos pneus e aumentando assim a capacidade de frenagem. Essa pressão aerodinâmica extra contribui para uma distribuição mais uniforme da força de frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro, resultando em maior estabilidade durante a desaceleração.



Tabela 5 - Forças de sustentação e de arrasto para aerofólio a 75°

Veículo com aerofólio a 75°	
Força de sustentação [Y]	- 4132,35[N]
Força de arrasto [X]	4019 [N]

CONCLUSÃO

A implementação da aerodinâmica ativa em veículos autônomos pode ser uma solução promissora para melhorar a eficiência energética, a estabilidade em altas velocidades e a capacidade de frenagem. Através da revisão bibliográfica e das análises hipotéticas em CFD, foi possível entender melhor como a movimentação de aerofólios influencia diretamente na dinâmica do veículo e como a tecnologia pode ser otimizada para proporcionar um deslocamento mais seguro, mais eficiente e mais rápido.

Além disso, a abordagem metodológica científica utilizada neste projeto permitiu definir objetivos claros e realizar uma análise aprofundada dos efeitos da aerodinâmica ativa em veículos de alta velocidade. As simulações em CFD utilizando o software ANSYS foram fundamentais para entender como a tecnologia pode ser aplicada na prática e como os parâmetros base definidos para as simulações podem influenciar nos resultados.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a aerodinâmica ativa pode ser uma tecnologia promissora para melhorar a eficiência aerodinâmica e a estabilidade de veículos em alta velocidade, com foco no aumento da segurança, eficiência e melhora na autonomia.

REFERÊNCIAS

Angelo, Gabriel – **Ansys CFX, Youtube.** Disponível em: <https://www.youtube.com/@testemaximohighlande/videos>

Brunetti, Franco – **Mecânica dos Fluidos 2ª Edição.** Ed. Pearson Universidades, 2008.

Çengel, Yunus A. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações.** Ed. AMGH, 2007. Capítulo 4. Cinemática dos Fluidos

Daugherty, Robert L – **Fluid Mechanics With Engineering Applications.** Ed. Mcgraw – Hill Book Company, 1977.

Shames, Irving H. – **Mecânica de fluidos.** Ed. Mcgraw hill, 1973