

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

MATHEUS BEUTHER

ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DE UM SISTEMA DE
ADMISSÃO DE AR PARA FÓRMULA SAE

Joinville
2021

MATHEUS BEUTHER

ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DE UM SISTEMA DE
ADMISSÃO DE AR PARA FÓRMULA SAE

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Joinville
2021

MATHEUS BEUTHER

ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DE UM SISTEMA DE
ADMISSÃO DE AR PARA FÓRMULA SAE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 07 de Maio de 2021.

Banca Examinadora:

Orientador(a): Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Orientador(a)
Presidente

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr. Eng.
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville

Prof. Modesto Hurtado Ferrer, Dr. Eng.
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville

Dedico este trabalho à minha família e à minha namorada que sempre me apoiaram e me deram suporte ao longo desses anos para que eu pudesse estudar na UFSC, aos amigos que criei e que levarei para a vida toda e aos meus professores que muito me ensinaram, profissional e pessoalmente.

AGRADECIMENTOS

O meu primeiro agradecimento é para os meus pais Hariberto e Andreia que me proporcionaram a possibilidade de estudar Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville, e mesmo em meio à dificuldades não mediram esforços para que pudesse completar o objetivo da graduação. Agradeço também às minhas irmãs Gabrielle e Maria Eduarda por todo o apoio para seguir firme nessa jornada. Um muito obrigado à minha namorada Laís, sempre ao meu lado, enviando boas energias e me suportando nos momentos difíceis.

Na sequência agradeço aos meus professores do curso por todo o conhecimento transmitido. Em especial ao Professor Leonel R. Cancino, que sempre me proporcionou grandes oportunidades dentro do mundo de motores à combustão interna, assunto pelo qual me apaixonei ainda mais nesse período; e ao Professor Modesto H. Ferrer por toda a convivência, aprendizado e crescimento dentro do projeto Fórmula CEM ao longo dos 4 anos que participei.

Ao Fórmula CEM, essa equipe incrível onde cresci profissional e pessoalmente e criei amigos que levarei comigo. Destaco aqui os membros do Engine, em especial o Agostinho J. Dalprá e o Alan Pastre, pelos quais aprendi muito e são amigos que tenho. Outra pessoa importante que agradeço é o Rodrigo Cane, com quem atuei na liderança da equipe no ano de 2019 e juntos superamos vários momentos difíceis, e o suporte dele foi essencial ao longo do desafio. Além disso, agradeço pela disponibilidade de uma licença do programa ANSYS para realizar as análises.

Agradeço também às pessoas e entidades que me proporcionaram todas as experiências dentro da faculdade. Agradeço à UFSC Joinville pelo ensino, pela possibilidade de participar de uma equipe de competição e pelo empréstimo do computador utilizado para realizar as atividades de simulação deste Trabalho de Conclusão de Curso. Ao Laboratório de Motores à Combustão Interna (LABMCI) pela disponibilidade de espaço e auxílio nos estudos. À Professora Sueli Becker pela ajuda com a análise dos dados experimentais dentre trabalho. À FastParts pelo patrocínio da fabricação do sistema de admissão de ar para aplicação no projeto. À Master Injection pelo patrocínio da injeção eletrônica para a equipe Fórmula CEM, de onde foram retirados dados fundamentais neste estudo. À Syntetic Cabeçotes pela disponibilidade de utilização da bancada de fluxo para o experimento com o sistema de admissão de ar.

RESUMO

O sistema de admissão de ar em motores à combustão interna possui relação direta com o desempenho que o conjunto motriz irá entregar para movimentar o veículo. Diversos são os fenômenos e as abordagens de estudo que podem ser feitas nesse contexto, e dentro de uma equipe de competição estilo Fórmula SAE não seria diferente. Entender os conceitos físicos relacionados ao escoamento, atender às regras do regulamento e maximizar o enchimento do cilindro do motor com ar e combustível são os pilares que guiam o estudante nesse universo.

O regulamento impõe a existência de uma restrição de 20 mm de diâmetro para motores à gasolina, onde o estudante deve encontrar soluções que busquem minimizar os efeitos prejudiciais deste elemento. Garantida a conformidade com as regras, analisar e maximizar o desempenho do sistema é outra necessidade. Quando já existe um sistema implementado, é sempre possível que outras alternativas sejam propostas para melhoria do conjunto, seja aumentando a eficiência volumétrica alcançada, seja diminuindo a perda de carga gerada pelo sistema.

Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise de escoamento sobre três variações de geometria de um sistema de admissão, aplicado na equipe Fórmula CEM. As propostas de geometria tem como base o sistema de admissão existente (denominado Sistema Original) e em utilização na equipe. A metodologia para tal inicia com a realização de um experimento em bancada de fluxo para obtenção da queda de pressão observada no sistema. Na sequência, estuda-se um modelo de turbulência que seja capaz de descrever o escoamento para a geometria base, aliada à um estudo de independência de malha. Os parâmetros da malha e o modelo de turbulência são então extrapolados para as demais geometrias e os resultados são analisados.

Como conclusão, tem-se a necessidade de validar o modelo numérico criado, refinando o experimento realizado, para garantir que as análises feitas são válidas. Além disso, em escoamento não-pulsante, o restritor com ângulos de 18° para os bocais convergente e divergente, respectivamente, é o que apresenta a menor velocidade média na restrição e a menor perda de carga ao longo do seu comprimento. E dentro da análise de sistema completo, a geometria original é a que desenvolve a menor perda de carga, ou seja, a qual propicia a menor perda de energia cinética do fluido. Assim é recomendado que se mantenha esse sistema em uso e que novas análises sejam propostas.

Palavras-chave: Admissão de ar. Bancada de fluxo. Simulação CFD. Validação de modelo computacional. Formula SAE.

ABSTRACT

The air intake system in internal combustion engines is directly related to the performance that the powertrain will deliver to move the vehicle. There are several phenomena and study approaches that can be done in this context, and within a Formula SAE style competition team it would be no different. Understanding the physical concepts related to flow, meeting the rules of the regulation and maximizing the filling of the engine cylinder with air and fuel are the pillars that guide the student in this universe. The regulation imposes a restriction of 20 mm in diameter for gasoline engines, where the student must find solutions that seek to minimize the harmful effects of this element. Guaranteed compliance with the rules, analyzing and maximizing the performance of the system is another need. When a system is already in place, it is always possible for other alternatives to be proposed to improve the set, either by increasing the volumetric efficiency achieved or by decreasing the head loss generated by the system.

Thus, this work aims to present a flow analysis on three variations of geometry of an intake system, applied in the Formula CEM team. The geometry proposals are based on the existing admission system (called the Original System) and in use by the team. The methodology for this starts with a flow bench experiment to obtain the pressure drop observed in the system. Then, a turbulence model that is capable of describing the flow to the base geometry is studied, together with a mesh independence study. The mesh parameters and the turbulence model are then extrapolated to the other geometries and the results are analyzed.

In conclusion, there is a need to validate the numerical model created, refining the experiment performed, to ensure that the analyzes performed are valid. In addition, in non-pulsating flow, the restrictor with angles of $18^{\circ}/7^{\circ}$ for the convergent and divergent nozzles, respectively, is the one with the lowest average speed in the constraint and the least head loss along its length. And within the analysis of the complete system, the original geometry is the one that develops the least loss of pressure, that is, the one that provides the least loss of kinetic energy of the fluid. Thus, it is recommended that this system be kept in use and that new analyzes be proposed.

Keywords: Air Intake System. Mass Flow Bench. CFD Simulation. Validation of Computational Model. Formula SAE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes comportamentos de escoamento	19
Figura 2 – Escoamento em duto de seção variável	21
Figura 3 – Esquemático de montagem do sistema de admissão para aspiração natural	25
Figura 4 – Regiões de interesse no sistema de admissão	26
Figura 5 – Restritor utilizado no sistema original	27
Figura 6 – <i>Plenum</i> utilizado no sistema original	28
Figura 7 – <i>Runner</i> utilizado no sistema original	29
Figura 8 – <i>Tryout</i> construído para verificar posicionamento do injetor no sistema original	30
Figura 9 – Fluxograma com as etapas que foram percorridas nesta análise . .	32
Figura 10 – Exemplo de uma bancada de fluxo	33
Figura 11 – Perfis de velocidade de escoamento ao longo do comprimento de um tubo	34
Figura 12 – Efeito de borda na entrada de um tubo	34
Figura 13 – Implementação do sistema em bancada de fluxo	35
Figura 14 – CAD do sistema de admissão com os prolongamentos	35
Figura 15 – Sistema Original	37
Figura 16 – Sistema 2: variação dos ângulos dos bocais do restritor	37
Figura 17 – Sistema 3: variação do volume do <i>plenum</i>	37
Figura 18 – Sistema 4: variação dos ângulos dos bocais do restritor	38
Figura 19 – Curva de vazão mássica admitida calculada pela eficiência volumétrica	39
Figura 20 – Detalhe da disposição da malha na restrição	40
Figura 21 – Independência da malha com os possíveis comportamentos	41
Figura 22 – Resultados da análise de independência de malha	44
Figura 23 – Distribuição dos valores de <i>Skewness</i> na malha escolhida	45
Figura 24 – Distribuição dos valores de <i>Aspect Ratio</i> na malha escolhida	46
Figura 25 – Distribuição dos valores de y^+ na malha escolhida	46
Figura 26 – Representação do campo de pressão absoluta no sistema original .	47
Figura 27 – Diferença de pressão experimental em função da vazão mássica de ar calculada	48
Figura 28 – Localização dos pontos de medição das propriedades	49
Figura 29 – Região com tensão de cisalhamento negativa na geometria original	50
Figura 30 – Região com tensão de cisalhamento negativa na geometria 2	50

Figura 31 – Vetor velocidade indicando recirculação do ar no restritor da geometria 2	51
Figura 32 – Vetores de velocidade indicando recirculação do ar no <i>plenum</i> da geometria 2	52
Figura 33 – Linhas de corrente classificadas por velocidade indicando recirculação do ar no <i>plenum</i> da geometria 4	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de Pugh criada para o sistema original	24
Tabela 2 – Propostas de variações geométricas do sistema	37
Tabela 3 – Possíveis cenários para condições de contorno	39
Tabela 4 – Resultados das variáveis na análise de independência de malha . .	45
Tabela 5 – Resultados de desempenho dos sistemas e de componentes	49
Tabela 6 – Resultados do experimento em bancada de fluxo	58
Tabela 7 – Resultados obtidos em CFD para cada região de análise	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Letra grega Delta; Representa uma diferença entre dois valores
ϵ	Letra grega epsilon; Define um modelo de turbulência
η	Letra grega eta; Representa a eficiência volumétrica
κ	Letra grega kappa; Define um modelo de turbulência
ρ	Letra grega rho; Representa a densidade do ar
ω	Letra grega omega; Define um modelo de turbulência

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Drawing</i> / Desenho Auxiliado por Computador
CAE	<i>Computer Aided Engineer</i> / Engenharia Auxiliada por Computador
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> / Dinâmica dos Fluidos Computacional
MAF	<i>Mass Air Flow</i> / Vazão Mássica de Ar
RPM	<i>Revolutions per Minute</i> / Rotação por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> / Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SLS	<i>Selective Laser Sinter</i> / Sinterização Seletiva a Laser
WOT	<i>Wide-open Throttle</i> / Corpo de Borboleta Totalmente Aberto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	DO SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR	16
2.1	Conceitos Relacionados ao escoamento do Ar	17
2.1.1	Escoamento Interno	17
2.1.2	Escoamento Turbulento	18
2.1.3	Escoamento Incompressível	19
2.1.4	Variação de Pressão (Δp)	20
2.1.5	Perda de Carga	21
2.2	Conceitos Relacionados à Estatística sobre os Dados Experimentais	22
3	DO PROJETO DE UMA ADMISSÃO DE AR	23
3.1	Metodologia do Desenvolvimento do Sistema de Admissão de Ar Original	23
3.2	Regulamento Inerente ao Sistema de Admissão FSAE	25
3.3	Variáveis dos componentes do Sistema de Admissão de Ar	25
3.3.1	Requisitos e Definições para o Restritor	26
3.3.2	Requisitos e Definições para o Plenum	27
3.3.3	Requisitos e Definições para o Runner	29
3.4	Parâmetros de Entrada para o Modelamento de Novas Geometrias	30
4	ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA DE ADMISSÃO	32
4.1	Fase de Experimentação	32
4.2	Criação das Geometrias para Análise CFD	36
4.3	Métodos e Modelos para Análises CFD	38
4.4	Elaboração da Malha de Elementos	40
4.5	Interesses nas Análises dos Resultados	42
4.6	Fase de Validação	42
5	RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS	44
6	CONCLUSÕES	54
6.1	Sugestão de Trabalhos Futuros	54
	REFERÊNCIAS	56

APÊNDICE A	58
APÊNDICE B	59

1 INTRODUÇÃO

O sistema de admissão de ar em veículos automotores é o primeiro produto encontrado no sistema motriz quando analisado o caminho percorrido pelo ar admitido. Este possui forte influência sobre o enchimento do cilindro, e por consequência, a parcela de combustível injetada (BRUNETTI, 2012). Em equipes de competição estudantil da categoria Fórmula SAE (*Society of Automotive Engineers*), a admissão é comumente encontrada como objeto de estudo dentro do *Powertrain*, muito em vista da necessidade de amenizar os efeitos da restrição imposta pela competição, o que afeta o desempenho alcançado.

O Sistema Original que é usado como ponto de partida para a proposição das demais geometrias foi desenvolvido em um ambiente de equipe de competição, dentro da Equipe Fórmula CEM da UFSC Joinville. As sugestões tomam como premissa a possibilidade de que, caso alguma das propostas seja escolhida, esta é possível de ser implementada.

Assim, buscando alternativas que apresentem um melhor desempenho para perda de carga, quando comparado com o Sistema Original, foram propostos e estudados novos cenários para este componente. De forma similar ao que apresentou Shelagowski e Mahank (2015) em sua análise sobre a geometria do restritor, foram criadas alterações sobre as principais variáveis dos componentes de um sistema de admissão. Tratando do restritor, o foco foi direcionado para os ângulos dos bocais; já sobre o *plenum*, a variação fica sobre o volume interno deste. O estudo contempla a análise numérica das alternativas, buscando validar o modelo numérico por meio de experimento.

Assim, após o experimento para validação do modelo numérico escolhido para análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*), este foi extrapolado para as demais geometrias para então analisar o escoamento sobre estas. O foco das observações está sobre a velocidade média na restrição e a perda de carga no restritor, no *plenum* e no sistema como um todo.

1.1 OBJETIVO

Impulsionado pela necessidade de um aprendizado contínuo dentro de uma equipe de competição, e neste contexto em específico, na área de sistemas de admissão de ar, são descritos os objetivos geral e específicos deste trabalho, como segue.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é analisar a influência da geometria sobre o escoamento e os parâmetros de desempenho de um sistema de admissão de ar utilizado em veículo do tipo Fórmula SAE, com auxílio de programa de dinâmica dos fluidos computacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se citar os seguintes pontos:

- Apresentar o contexto e as considerações que deram origem ao sistema utilizado como base para as alterações propostas;
- Apresentar os itens que limitam esse desenvolvimento por parte do regulamento da competição;
- Apresentar conceitos sobre os componentes do sistema;
- Apresentar conceitos relacionados a simulação deste tipo de sistema;
- Apresentar conceitos relacionados a experimentação deste tipo de sistema;
- Indicar os passos para a validação de um modelo numérico por meio de experimento.

2 DO SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

O sistema de admissão, segundo Heywood (1988), é composto por filtro de ar, carburador, corpo de borboleta - em motores de ignição por centelha -, dutos externos, pórticos do cabeçote e válvulas. É importante salientar que nos dias atuais a injeção eletrônica já substituiu o carburador na grande maioria das aplicações automotivas, e este gerenciamento eletrônico é também utilizado dentro da Equipe Fórmula CEM. O autor ainda comenta que, devido as suas características, a admissão restringe a quantidade de ar a qual um dado motor pode admitir, interferindo sobre o seu enchimento. Cavaglieri (2014) complementa a descrição dos componentes do sistema dizendo que este é composto também por um volume chamado *plenum*, do latim câmara, que tem como principal função a de responder às oscilações de pressão.

Dentre os parâmetros influentes no comportamento temos a eficiência volumétrica, que é o fator que mensura a capacidade de enchimento em motores quatro tempos, sendo a relação da quantidade de ar admitida dividida pelo volume deslocado do cilindro. Assim, busca-se sempre maximizar esta característica no sistema. (HEYWOOD, 1988) A Equação 1 representa esta propriedade, que é expressa a seguir.

$$n_v = \frac{2 * m_a}{\rho * V_d * N} \quad (1)$$

Onde:

- n_v = eficiência volumétrica, [-]
- m_a = vazão mássica admitida, [kg/min]
- ρ = densidade de ar admitido, [kg/m³]
- V_d = volume deslocado no motor, [m³]
- N = rotação do motor, [rpm]

Heywood (1988) ainda demonstra a importância deste parâmetro, dentre outros relacionados ao desempenho evidenciados na Equação 2, a qual permite estimar a potência desenvolvida por um motor.

$$P = \frac{n_f * m_a * N * Q_{hv} * (F/A)}{n_R} \quad (2)$$

Onde:

- P = potência desenvolvida, [W]
- n_f = eficiência do motor, [-]
- Q_{hv} = poder calorífico do combustível, [W/min]
- (F/A) = relação combustível/ar admitido [-]
- n_R = número de revoluções completas por ciclo [-]

Assim, nota-se que o sistema de admissão está intimamente ligado ao funcionamento e ao desempenho que o sistema motriz do veículo consegue desempenhar.

2.1 CONCEITOS RELACIONADOS AO ESCOAMENTO DO AR

Segundo Heywood (1988), induzir o máximo de massa de ar em WOT (*wide – open throttle*), ou com carga máxima, e retê-la dentro do cilindro é a primeira meta no processo de troca dos gases. Em um motor, estes momentos são caracterizados por uma série de parâmetros, como eficiência volumétrica (em motores 4-tempos) e eficiência de *scavenging* e *trapping* (em motores 2-tempos). Os valores alcançados dependem dos parâmetros de geometria e desempenho dos subsistemas do motor, sobre os dutos, pórticos e as válvulas de admissão, assim como as condições de operação do mesmo. Portanto, o escoamento através de cada um destes, nos sistemas de admissão e de exaustão, também tem sido muito estudado.

Nas próximas seções são descritos alguns dos principais assuntos relacionados a mecânica dos fluidos, os quais são de fundamental importância para o embasamento dos estudos desenvolvidos aqui.

2.1.1 Escoamento Interno

Segundo Fox, Pritchard e McDonald (2000), escoamentos completamente limitados por superfícies sólidas são denominados escoamentos internos, desse modo, são incluídos escoamentos em tubos, dutos, bocais, difusores, contrações e expansões súbitas, válvulas e acessórios.

É importante entender em qual regime encontra-se o domínio de estudo. Podendo ser transiente (em desenvolvimento, o qual sofre alterações das propriedades de um mesmo ponto ao longo do tempo) ou estacionário (regime permanente, com propriedades constantes), onde cada um deles infere sobre valores dos parâmetros que os descrevem. Para cada regime de movimento, e limitado pela geometria interna do corpo, são criados perfis de velocidade ao longo do caminho, os quais influenciam no método de análise e no comportamento encontrado, uma vez que estes são utilizados na criação dos modelos matemáticos de solução, seja em análises perto ou longe da parede, antes, durante ou depois da entrada do sistema, ou de uma variação geométrica existente.

O movimento do fluido ainda pode ser caracterizado como laminar ou turbulento, influenciando assim, a forma de representação e/ou solução do caso em estudo. Alguns casos de escoamentos laminares podem ser resolvidos analiticamente. Já para os casos de escoamento turbulento, as soluções analíticas não são possíveis e devemos nos apoiar fortemente em teorias semi empíricas e em dados experimentais. (FOX;

PRITCHARD; MCDONALD, 2000) Como na prática casos laminares são dificilmente encontrados e, quando analisado o caso apresentado, veremos mais à frente que a condição que melhor representa é a de comportamento turbulento, a próxima seção versará sobre esse tema.

2.1.2 Escoamento Turbulento

Um escoamento turbulento ocorre quando as forças viscosas no fluido não são capazes de conter flutuações aleatórias no movimento (geradas, por exemplo, pela rugosidade da parede ou pela própria variação de geometria), tornando-se caótico. (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2000) O regime de escoamento em um tubo é determinado pelo número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{\rho * \nu * D}{\mu} \quad (3)$$

Onde:

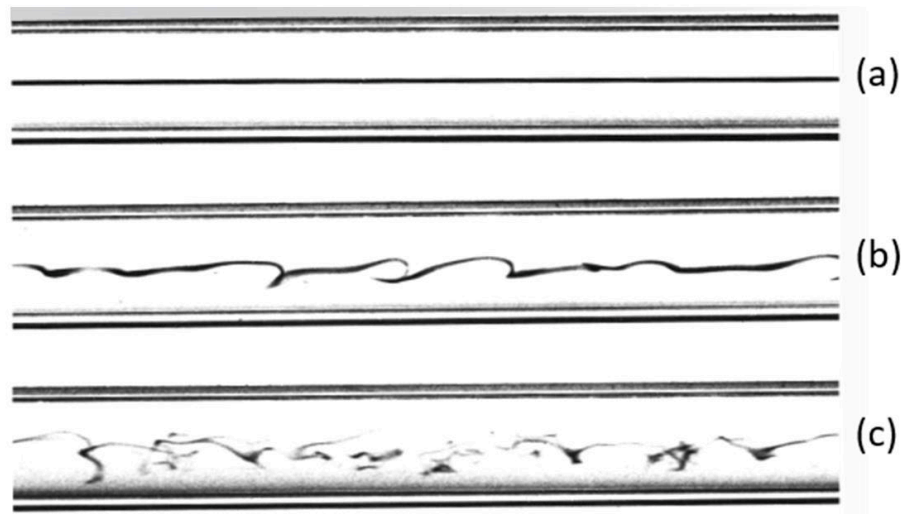
- Re = número de Reynolds, [-]
- ρ = densidade de ar admitido, [kg/m³]
- ν = velocidade do ar admitido, [m/s]
- D = diâmetro hidráulico do tubo, [m]
- μ = viscosidade do ar admitido, [m/kg*s]

Na maioria das situações de engenharia o escoamento não é controlado, de modo que a referência comumente utilizada de transição para a turbulência é $Re \approx 2300$. (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2000)

Blair (1999) complementa dizendo que o escoamento de ar incidente, passante e expelido do motor são todos instáveis. Um escoamento deste tipo é definido como aquele onde a pressão, temperatura e a velocidade das partículas no duto são variáveis no tempo.

A Figura 1 caracteriza a diferença entre estes comportamentos, onde (a) representa uma linha de trajetória de partículas em um escoamento laminar, (b) representa a transição, onde ambos os casos ocorrem e (c) representa o caso turbulento.

Figura 1 – Diferentes comportamentos de escoamento



Fonte: ANSYS, Inc.

Assim, fica claro em (c) o comportamento aleatório do fluido o que infere a necessidade de modelos matemáticos robustos a fim de caracterizá-los de forma coerente.

2.1.3 Escoamento Incompressível

A compressibilidade do fluido é outro fator de importância na caracterização da região de controle do estudo. Segundo Saad (1993) diz-se incompressível quando o escoamento não apresenta alteração de densidade desde que a velocidade seja pequena quando comparada com a velocidade do som normalizada naquele meio. Assim, é limitada a faixa do número de Mach, calculada como sendo:

$$M = \frac{v}{c} \quad (4)$$

Onde:

- M = número de Mach, [-]
- v = velocidade de ar admitido, [m/s]
- c = velocidade do som no meio, [m/s]

Portanto, segundo Fox, Pritchard e McDonald (2000) essa condição incompressível aplica-se para $M < 0,3$, onde a variação máxima de massa específica é inferior a 5%, o que para o ar corresponde a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s. Acima deste valor de Mach, esta definição deixa de ser válida e precisamos passar a tratar o problema considerando a variação da densidade do fluido no meio.

2.1.4 Variação de Pressão (Δp)

A variação de pressão é entendida como uma das principais variáveis na análise de desempenho, tanto do sistema completo, mas também de forma individual, para cada componente integrante. Neste trabalho, a análise da perda de pressão do sistema será mostrada nos capítulos que seguem, relacionando também à seção de perdas de carga.

Uma primeira abordagem simplificada para estimativa do comportamento do fluido pode ser feita por meio da Equação de Bernoulli (5), que representa a integral da Equação de Euler ao longo de uma linha de corrente, e relaciona a pressão e a velocidade entre dois pontos, desde que respeitadas as seguintes hipóteses:

- Escoamento em regime permanente
- Escoamento incompressível
- Escoamento sem atrito
- Escoamento ao longo de uma linha de corrente

A equação é descrita a seguir, computando as parcelas de pressão estática, pressão dinâmica e força gravitacional para cada ponto. De forma analítica é possível estimar a condição de pressão ou velocidade em um ponto de interesse 2, quando referenciado ao ponto 1.

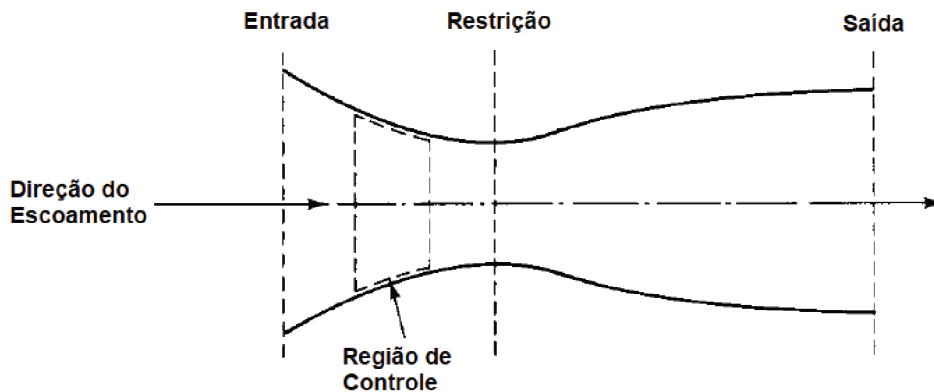
$$p_1 + \frac{\rho * V_1^2}{2} + \rho * g * z_1 = p_2 + \frac{\rho * V_2^2}{2} + \rho * g * z_2 \quad (5)$$

Onde:

- p = pressão no ponto, [Pa]
- ρ = densidade de ar admitido, [kg/m³]
- V = velocidade no ponto, [m/s]
- g = aceleração da gravidade, [m/s²]
- z = altura do ponto em relação a referência, [m]

Portanto, podemos estimar condições limites para velocidade na restrição de forma que não atinja o regime compressível, região de controle demarcada na Figura 2 por exemplo, ou uma queda de pressão máxima, de modo que ocorram as menores perdas energéticas possíveis. O conceito de perda de carga será explicado na seção seguinte.

Figura 2 – Escoamento em duto de seção variável



Fonte: Adaptado de SAAD (1993)

De forma a caracterizar este comportamento em uma geometria com área de seção transversal variável, Saad (1993) explica que quando um fluido incompressível escoar de forma estacionária por um duto, o produto da seção transversal pela velocidade é constante, assim, se a área aumenta, o fluido tende a desacelerar. O autor complementa dizendo que, caso este esteja em regime compressível, além do número de Mach atingido, o contorno da geometria também interfere no resultado.

As variações de pressão inferem nas mais diversas aplicações e estudos dentro do contexto de motores a combustão. O enchimento do cilindro, por exemplo, é afetado por este fenômeno. Blair (1999) exemplifica mostrando que no caso do escoamento admitido no cilindro por meio da válvula de admissão, que varia a área de passagem ao longo do tempo, a pressão no duto se altera. Assim, aliado à variação da pressão causada pela movimentação do pistão, observa-se a variação volumétrica de ar no cilindro, dado o gradiente de pressão existente na região da válvula, que pode ou não, favorecer a alimentação de ar.

2.1.5 Perda de Carga

Sendo de conhecimento que o objetivo do sistema de admissão de ar é fornecer a maior quantidade de ar possível para o motor, é intuitivo que quanto menor for a parcela de energia desperdiçada ao longo do deslocamento do ar, entre a entrada no sistema e a saída para o cilindro, maior a vazão de ar admitida e, conseqüentemente, maior a potência desenvolvida.

Entendendo este conceito, são definidas diversas formas de perdas energéticas, e por conseguinte, maneiras de quantificá-las. Uma das formas mais importantes é relacionada ao atrito entre o ar admitido e os componentes do sistema. Fox, Pritchard e McDonald (2000) divide as perdas decorrentes do atrito em duas categorias: perdas maiores, que são perdas causadas pelo atrito nas seções de área constantes do

tubo e perdas menores, que são perdas decorrentes de válvulas, cotovelos e outros elementos. Cada parcela desta pode ser estimada por equações e dados experimentais encontrados na literatura específica. O autor completa que isto representa a conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica não desejada. Assim, estudar geometrias que geram a menor perda de pressão entre dois pontos é essencial para um bom desempenho do conjunto.

2.2 CONCEITOS RELACIONADOS À ESTATÍSTICA SOBRE OS DADOS EXPERIMENTAIS

Na fase experimental é importante que a confiabilidade dos dados seja a maior possível. Assim, para que estes possam ser utilizados, alguma metodologia, ou norma, existente na literatura deve ser utilizada. Por fim, uma análise estatística deve ser realizada sobre os valores aferidos de forma a quantificar as variabilidades ocorridas e decidir sobre a aplicabilidade dos dados.

Segundo Cabral (2012), para tornar significativos os métodos e as interpretações estatísticas é geralmente necessário dispor de um grande número de medidas. É recomendado que nunca seja somente uma medida, e proposto que três ou mais rodadas sejam realizadas. Por meio de múltiplas medições minimiza-se o risco de um valor discrepante, causado por algum desvio no processo, que pode afetar o resultado.

A quantidade de medição varia de acordo com o recurso de tempo e custo disponível, além da característica do ensaio, que pode ser destrutivo por exemplo. Cabral (2012) completa dizendo que erros sistemáticos devem ser pequenos em comparação com os erros aleatórios, visto que o tratamento estatístico dos dados não elimina o erro de fidelidade existente em todas as medições. E termina escrevendo que erros sistemáticos são aqueles que afetam o resultado sempre no mesmo sentido, como por exemplo, o zeramento incorreto de uma balança que acrescenta uma quantia a todas as medições. Já os erros aleatórios são aqueles associados a variabilidade natural dos processos físicos, onde os valores flutuam de forma aleatória.

3 DO PROJETO DE UMA ADMISSÃO DE AR

O capítulo que segue tem como objetivo apresentar a metodologia que foi utilizada no desenvolvimento do Sistema Original. Algumas variáveis e alguns requisitos para o projeto de uma admissão de ar, assim como características do sistema que é utilizado como base para este estudo também são apresentados.

3.1 METODOLOGIA DO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR ORIGINAL

Dentro de uma metodologia de projeto, existem diversas etapas que devem ser cumpridas como forma de minimizar riscos que podem atrapalhar a sua execução. Na equipe Fórmula CEM a metodologia PRODIP é utilizada para organizar de forma clara as etapas e definir os entregáveis de projeto de cada fase.

O primeiro momento é a fase informacional que consiste em um *brainstorming*. Aqui, são definidas as especificações técnicas em baixo nível técnico que viabilizam as funções primárias do sistema, também definidas aqui. A aplicação da matriz QFD (*Quality Function Deployment*, Casa da Qualidade) é de grande valia.

Na sequência existe a fase conceitual. Caracteriza-se pela fase criativa onde as alternativas são geradas e avaliadas técnica e economicamente. Os métodos empregados são o da síntese de funções, matriz morfológica e matrizes multicritério de seleção.

Dentro desse contexto, o entendimento dos métodos e materiais para a fabricação do sistema são de grande importância, pois refletem em restrições de requisitos de produto e de manufatura. Diversas são as formas de se estudar e escolher os possíveis caminhos, e com isso, diversas ferramentas de escolha podem ser utilizadas.

É certo que somente a ferramenta não resolverá o problema, assim, conhecer o ambiente e suas possibilidades é de suma importância. Entender quais os métodos de fabricação acessíveis, quais as matérias-primas disponíveis e quanto de recurso - humano e financeiro - estão disponíveis para a execução são dados importante que alimentam essa escolha.

A seguir é mostrada na Tabela 1 a matriz de Pugh que foi criada durante o desenvolvimento do sistema sobre o qual serão propostas alterações. A metodologia desta consiste em confrontar os processos e materiais acessíveis contra os requisitos definidos pelo projetista. O melhor custo-benefício é aquele onde a soma da linha resulta no maior valor. Os possíveis valores são:

- (- -) Muito pouca relação = -2

- (-) Pouca relação = -1
- (0) Neutro = 0
- (+) Forte relação = +1
- (++) Muito forte relação = +2

Tabela 1 – Matriz de Pugh criada para o sistema original

Matriz de Decisão					
Funções x Recursos	Estanqueidade	Manutenção	Peso	Geometria	Total
Fibra de Vidro	-	+	+	-	0
Poliamida 2200	+	-	+	+	3
PLA	-	-	+	+	0
Alumínio	++	-	--	-	-2
Laminação					
Fibra de Vidro	+	+	+	+	+4
SLS	++	+	++	++	+7
Impressão 3D	+	+	++	+	+5
Usinagem	+	-	--	--	-4

Fonte: Adaptado de (UFSC. Fórmula CEM, 2018).

Obteve-se que a combinação do SLS (*Selective Laser Sintering*) (soma +7 entre os processos de fabricação) utilizando a Poliamida 2200 (soma +2 entre as matérias-primas) seria a combinação que traria o melhor custo-benefício dentre as possibilidades. É importante também ter sempre em mente que alterações podem ocorrer e que outras abordagens podem ser escolhidas, uma vez que estas são ferramentas de auxílio à definição.

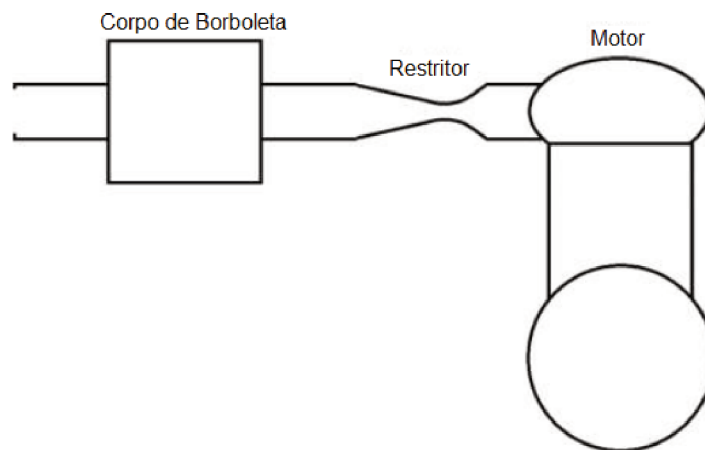
A possibilidade da utilização do processo de SLS se deu por meio de patrocínio da empresa Fastparts Protótipos Ltda, situada em Joinville-SC. Entregando geometrias com tolerâncias de 0,1 mm para o projeto original, que garante fidelidade de manufatura, aliado a baixa densidade da Poliamida 2200 -matéria-prima específica desse maquinário- quando comparado com outros materiais como alumínio, permitiram a criação de uma admissão que usufrísse das possibilidades desse processo de manufatura. Assim, para as alterações propostas ficam estabelecidas limitações inerentes a este processo e material escolhido.

Na sequência é executada a fase preliminar, onde a solução conceitual é desenvolvida em termos de geometria. Modelos de análise, simulação e otimização da solução são fortemente empregados nessa fase, bem como a construção e testes de protótipos. Por fim, na fase detalhada temos a transformação do projeto criado em arquivos de manufatura, que serão utilizados para construir a solução escolhida.

3.2 REGULAMENTO INERENTE AO SISTEMA DE ADMISSÃO FSAE

Na fase conceitual apresentada anteriormente, existe a necessidade de atenção sobre as imposições do regulamento da competição. A SAE International (2019) não limita quesitos de design dos componentes. A indicação é feita sobre a ordem de montagem destes, conforme o método de alimentação de ar escolhido, diferenciando entre naturalmente aspirado ou sobrealimentado. No caso em estudo, a forma construtiva utilizada é a de aspiração natural, assim, o esquemático da admissão requerido pela organização segue como na Figura 3: corpo-de-borboleta > restritor > motor.

Figura 3 – Esquemático de montagem do sistema de admissão para aspiração natural



Fonte: Adaptado de FSAE RULES (2019)

Na Figura 3 pode ser visto também a segunda, e mais importante, regra imposta pela competição, onde é necessário a existência de uma restrição no diâmetro do duto de admissão. Esta deve ser posicionada em algum lugar após o corpo de borboleta, com valor máximo de 20 mm para veículos que utilizam gasolina e 19 mm para aqueles que usam etanol.

3.3 VARIÁVEIS DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

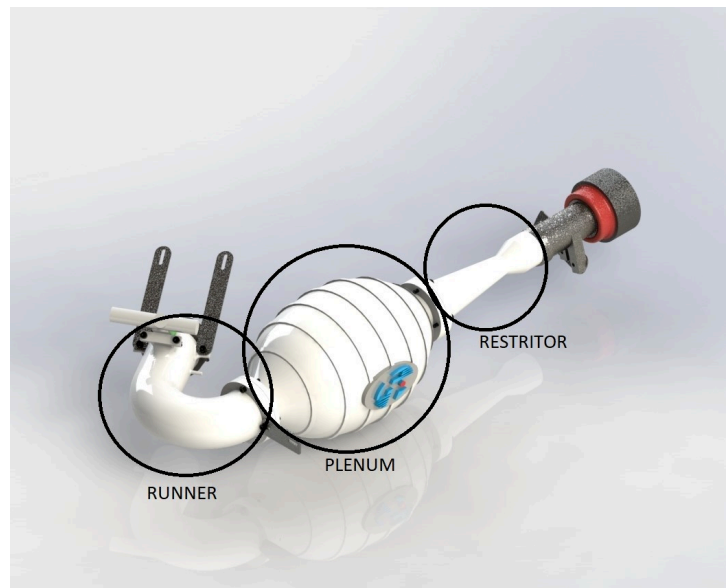
Nesta seção são descritas as características relacionadas ao estudo e a criação dos componentes que integram o sistema de admissão. Uma breve contextualização sobre as definições do sistema original utilizado como comparativo também são apresentadas.

A análise de cada fator envolvido não é independente, assim, a alteração de uma característica reflete em outra, e deve ser feita uma análise que combine as variações possíveis. Um ponto de atenção fica para o número de fatores, e

consequentemente de casos que serão estudados, uma vez que esta é calculada de forma exponencial como 2^n , onde n é o número de variáveis. Portanto, vale entender quais são os pontos que possuem maior liberdade de valores, na busca de otimizar os recursos gastos no desenvolvimento.

Podem ser definidas três regiões principais: o *runner*, o *plenum* e restritor. Esta classificação pode variar de acordo com a forma construtiva empregada, entretanto, no caso apresentado temos essa distinção clara entre as três regiões, como segue na Figura 4. Na sequência são descritos cada um destes de forma separada.

Figura 4 – Regiões de interesse no sistema de admissão



Fonte: O Autor (2021)

3.3.1 Requisitos e Definições para o Restritor

O primeiro componente, o restritor (Figura 5), é aquele cuja geometria tem como objetivo minimizar os efeitos da restrição de diâmetro imposta pela competição. É nele que se concentram grande parte dos estudos muito em vista de este afetar diretamente a quantidade de ar passível de ser admitida. Os trabalhos nessa região buscam minimizar as perdas de energia cinética, provindas da variação da seção transversal ao longo do comprimento e do atrito com as paredes, de forma que seja maximizada a quantidade de ar passante.

As características que normalmente mais influenciam neste produto são: o comprimento total da peça e os ângulos dos bocais convergente e divergente. Para o sistema original foram escolhidas por meio de revisão de bibliografia específicas os ângulos de 18° para o bocal convergente e de 7° para o bocal divergente. O comprimento foi definido pelo espaço disponível para o sistema, de forma que os

requisitos dos demais componentes fossem implementados também.

Figura 5 – Restritor utilizado no sistema original

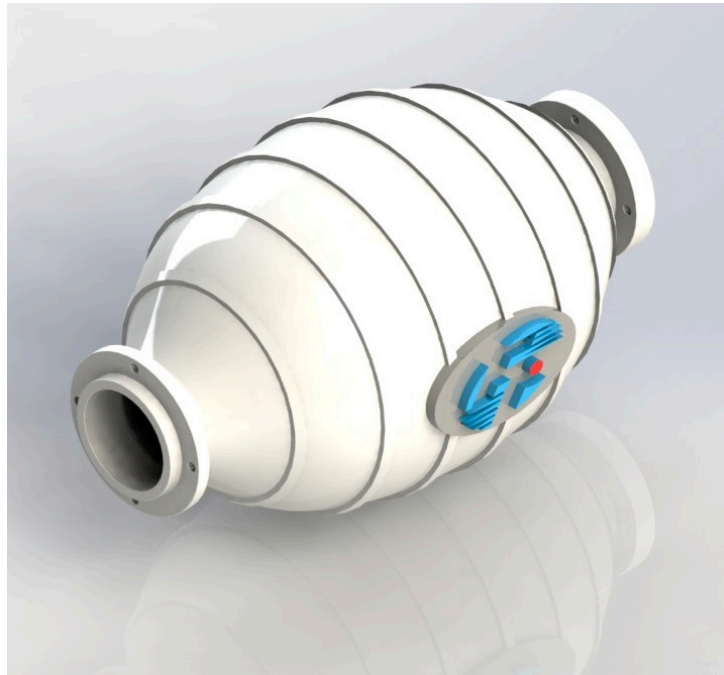


Fonte: O Autor (2021)

Dentro das possibilidades de alteração, e do esforço necessário para análise, o comprimento total do produto, por exemplo, permite menor flexibilidade de variação quando comparado com os ângulos dos bocais. Este fato deve-se a questões de projeto como o *packaging*, e assim, esse fator poderia receber menos atenção, ante as demais propostas.

3.3.2 Requisitos e Definições para o Plenum

O segundo componente é o *plenum* (Figura 6), responsável principalmente por garantir disponibilidade de ar durante acelerações rápidas que podem saturar a restrição. Além disso, trabalha atenuando as oscilações no escoamento, visto que o motor em funcionamento apresenta um comportamento pulsante, por ser uma máquina de fluxo alternativa com ciclos intercalados de admissão e exaustão.

Figura 6 – *Plenum* utilizado no sistema original

Fonte: O Autor (2021)

Neste são duas as principais características: o volume total e a forma geométrica. O volume que melhor atende a necessidade pode ser estudado por meio de modelos matemáticos em programas específicos como Ricardo WAVE© e AVL Boost©, onde é possível a criação dos componentes que pertencem ao conjunto motor, e a realização da simulação destes em funcionamento. Uma possível análise que relaciona a variação do volume e o resultado de potência do motor pode ser um caminho a ser seguido. O volume interno da peça do sistema original é de 3,7 litros, mantendo o valor encontrado na peça do conjunto antecessor a este aqui apresentado.

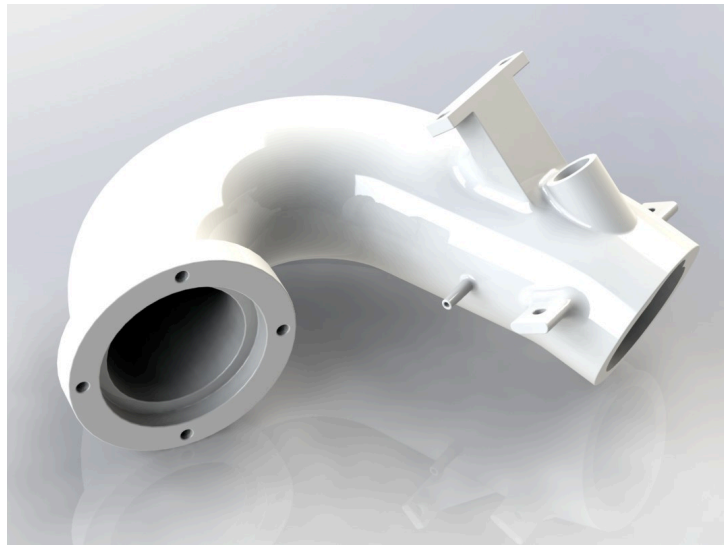
Já a geometria é afetada por outros fatores, como o espaço disponível dentro do veículo e o escoamento que esta gera. Sobre esse último ponto, existem variantes que apresentam o *plenum* como uma peça isolada, e outras abordagens onde este se integra à saída do restritor como uma extensão do mesmo, criando um único volume. Claywell e Horkheimer (2006) comenta que estudos realizados pelo autor demonstram que essa abordagem sem diferenciação pode gerar pequenos ganhos de desempenho. A diferença entre os dois deve ser estudada na sua aplicação específica. Para a o *plenum* de referência foram adotadas linhas que buscam minimizar as variações abruptas de geometria, e conseqüentemente uma menor perturbação no escoamento, com menor perda de carga.

3.3.3 Requisitos e Definições para o Runner

Por último, tem-se o *runner* (Figura 7) que é responsável pelo acoplamento do sistema com o motor e por acomodar o sistema de alimentação de combustível. Para este, temos o estudo do seu comprimento com o objetivo de refletir as ondas providas da pulsação do ciclo do motor, função que compartilha com o *plenum* conforme citado anteriormente.

Alves (2017) escreve que a situação ideal de reflexão da onda dentro do *runner* ocorre de forma que, uma vez que a válvula se abra, a onda de expansão gerada por ela se propague até o fim do duto, seja refletida em forma de onda de pressão e retorne a válvula momentos antes do fechamento completo desta. Esta situação auxilia no enchimento do cilindro com uma maior quantidade de ar. Utilizando deste estudo, o comprimento do componente foi projetado para atender ao 3º harmônico de reflexão em 5200 RPM, comprimento tal que foi possível de ser implementado no espaço disponível e situa-se na região de maior torque do motor (UFSC. Fórmula CEM (2018)).

Figura 7 – *Runner* utilizado no sistema original



Fonte: O Autor (2021)

Além disso, este pode incorporar o injetor de combustível (ou mais de um) de forma que garanta o direcionamento do *spray*, sendo capaz de misturá-lo com o ar turbulento passante, formando uma mistura adequada. Estas posições podem ser testadas por meio de um *tryout* antes da manufatura do mesmo. A Figura 8 demonstra um exemplo, onde foi buscado a reprodução do posicionamento original do componente.

Figura 8 – *Tryout* construído para verificar posicionamento do injetor no sistema original



Fonte: O Autor (2021)

3.4 PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O MODELAMENTO DE NOVAS GEOMETRIAS

Dentro desta etapa de conhecimento do ambiente de estudo, é necessário entender quais são os parâmetros que mais impactam o desenvolvimento. Para um sistema de admissão Formula SAE, inicialmente, mas não só, são necessárias a vazão mássica de ar admitida e a faixa de RPM para a qual otimizar o sistema trará maior resultado.

Conhecer a vazão mássica que está passando pelo sistema na situação de estudo é importante independentemente da situação de projeto: seja ela para um primeiro desenvolvimento, para a sugestão de um modelo sucessor ou para propor uma melhoria no sistema atual. Existem diferentes metodologias para a obtenção deste valor e algumas delas são:

- Aplicação de sensor MAF (*Mass Air Flow*)
- Implementação de um tubo de Pitot
- Calculada por meio da eficiência volumétrica provinda da leitura de uma central de injeção aberta programável

Estes são apenas exemplos e cada uma delas apresenta as suas

particularidades, das quais alguns pontos são comentados a seguir.

É necessário, por exemplo, que a diferença de diâmetro entre um sensor MAF e a geometria do sistema a ser medido seja a menor possível. O local de adaptação também deve ser pensado de forma a permitir uma correta leitura da vazão: uma curva antes do sensor pode induzir uma maior/menor quantidade de ar passante pelo mecanismo de medição. Além disso, a precisão do sensor deve estar de acordo com a vazão encontrada no duto, para que erros de medição pela resolução sejam minimizados.

Um tubo de Pitot necessita dos mesmos cuidados relacionados a posição de medição e resolução do equipamento adequado a vazão. Além disso, esta ferramenta necessita ainda de um estudo sobre a viabilidade de implementação, já que é necessário introduzir o equipamento dentro do sistema. Além disso, necessita de um espaço disponível na parte externa para sua fixação.

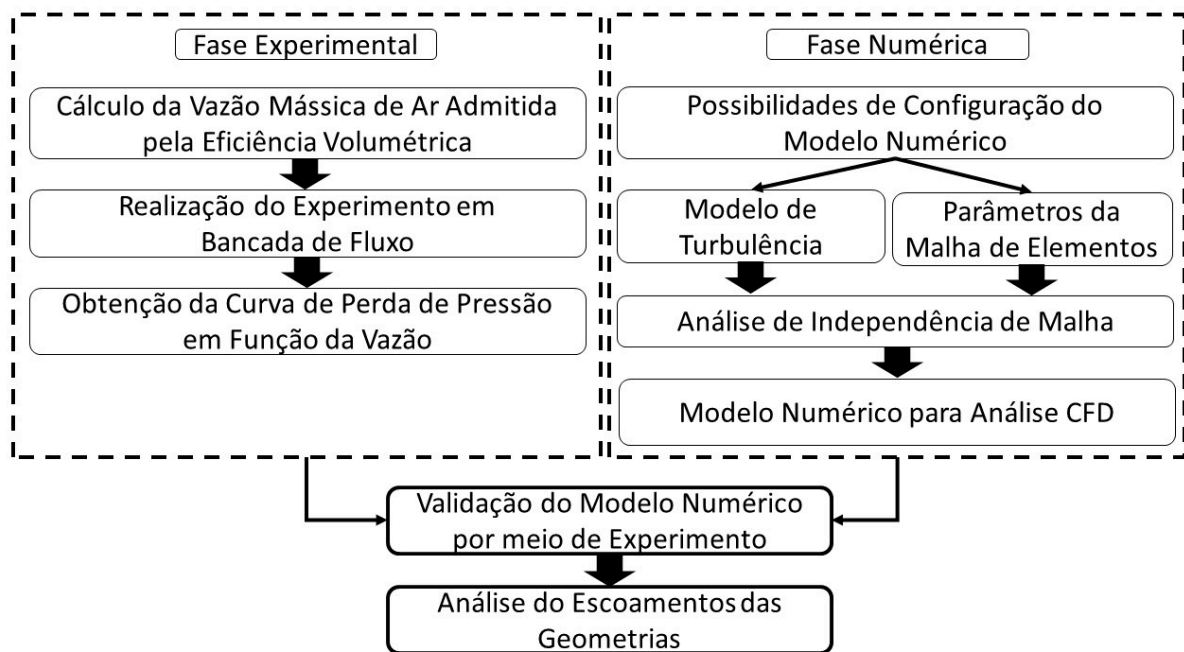
Por fim, outra metodologia é por meio da fórmula da eficiência volumétrica (Eq. 1) a qual apresenta relação com a vazão mássica. Aqui é necessário que o dado de eficiência seja fornecido por uma injeção programável por exemplo, ou por meio de outros parâmetros fornecidos por esta, com cálculos que envolvem a cilindrada do motor, a razão ar/combustível de operação e a quantidade de combustível injetada.

Já a faixa de RPM com maior potencial para ganho pode ser encontrada por histórico da própria equipe. Por meio de um arquivo com registros de desempenho adquirido por um sistema de telemetria (*log*) em uma prova dinâmica, pode mostrar a faixa de maior utilização. No caso de um desenvolvimento novo, existem programas que, a partir de modelos simplificados de veículo - que necessitam de informações mínimas de desempenho de *powertrain* e de dimensões do Formula - e de um traçado de teste, podem estimar o desempenho e uma estimativa de utilização da faixa de RPM. Esses programas normalmente necessitam de um aprendizado e um entendimento sobre o caso simulado, além da obtenção de licenças de uso, seja pela compra ou patrocínio.

4 ANÁLISE DE ESCOAMENTO EM VARIAÇÕES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA DE ADMISSÃO

Neste capítulo é apresentada a forma com que foi realizado o trabalho de estudo do escoamento sobre o sistema original e as demais proposições geométricas. A Figura 9 apresenta o fluxograma com as atividades realizadas.

Figura 9 – Fluxograma com as etapas que foram percorridas nesta análise



Fonte: O Autor (2021)

As três fases - experimental, numérica e validação - são descritas nos tópicos que seguem.

4.1 FASE DE EXPERIMENTAÇÃO

É neste momento que ocorrem os ensaios de obtenção dos dados experimentais para comparação com àqueles alcançados nas análises numéricas, e também com as hipóteses empregadas no início do projeto. A sinergia entre os dois momentos de estudo (numérico e experimental) é de suma importância uma vez que a análise será o resultado do cruzamento das informações destes.

Para uma correta e completa execução é importante que ocorra um planejamento adequado, que contemple e integre todos as fases que serão executadas.

O primeiro passo é entender qual o objetivo do teste e pensar nas grandezas

físicas envolvidas. Correlacionar os dados com a validação, seja por um dado de entrada, de saída ou para a validação. Essas considerações guiam ações relacionadas a que tipo de aparato é o mais adequado para fornecer o resultado esperado, quais outros equipamentos além deste serão necessários durante a execução - medição de temperatura, pressão, vazão mássica, etc - e quais parâmetros são necessários conhecer previamente, seja por histórico, seja por estimativa. Estas são questões que devem estar claras na hora do planejamento.

Para a experimentação do sistema de admissão original foi selecionada a bancada de fluxo. Este tem por finalidade a aquisição de dados que servirão de base para confrontar com o modelo computacional.

O equipamento utilizado foi a bancada de fluxo MOTORPOWER CFM-01, disponibilizada pela Syntetic Cabeçotes, empresa localizada em Joinville-SC. Este tipo de máquina é utilizado principalmente para a medição do fluxo de ar nos pórticos do cabeçote, mas é também largamente empregada em testes de capacidade de vazão dos componentes que constituem os sistemas de admissão e exaustão. Seu funcionamento pode ser simplifiadamente descrito como uma estrutura de dutos e orifícios com as dimensões conhecidas, que por meio de bombas de ar, impõe um fluxo desejado. Apresenta também Um sistema de monitoramento sobre as variáveis do processo, como temperatura e pressão.

O modelo aqui utilizado conta com 6 moto bombas para empregar movimento ao ar e dois sensores de pressão Motorola® para a medição da diferença de pressão gerada pelo sistema. A Figura 10 representa um exemplo de bancada de fluxo.

Figura 10 – Exemplo de uma bancada de fluxo



Fonte: <https://www.tecquipment.com/pt/modular-air-flow-bench>, Acesso: 15/04/2020

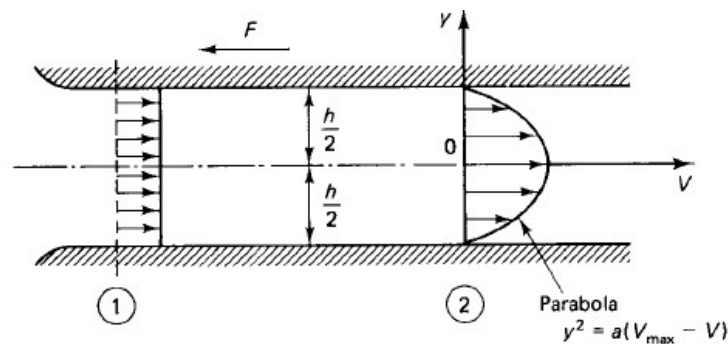
Entendido onde se quer chegar e quais os possíveis caminhos, é necessário atrelar isto às peculiaridades provindas das análises numéricas computacionais, independente se este momento acontece antes do experimento, no caso de projetos novos; ou depois dele, quando temos a continuação de um já existente. Aqui os detalhes

são muito inerentes as características do produto ou região de interesse, e no caso de um sistema de admissão também existem pontos de atenção.

No planejamento, estas se relacionam principalmente com as condições de contorno que podem ser estabelecidas: no caso em estudo, por exemplo, devemos cuidar com a maneira que o escoamento se apresenta na entrada do sistema. Definir no modelo numérico um escoamento normal a face de entrada, com perfil de velocidade homogêneo por toda a extensão (Figura 11, ponto 1), pode não representar corretamente a aplicação do sistema em uma bancada de fluxo. Nesta ocorrem fenômenos como o efeito de borda (Figura 12) que tornaria o perfil de velocidade numérico incoerente com o experimental.

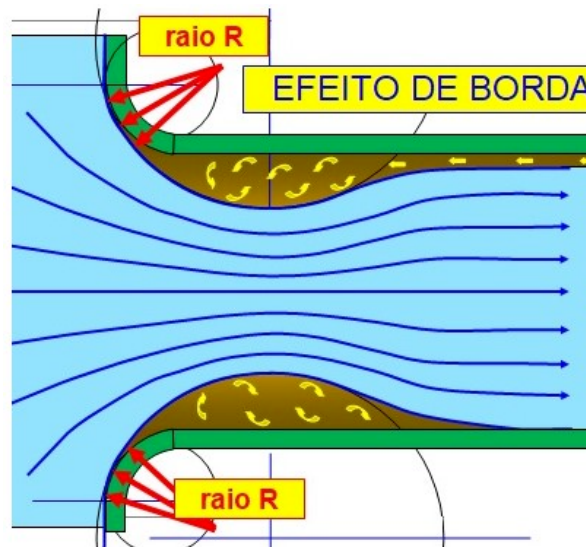
Para gerir essa situação, uma das saídas é a implementação de dutos antes do início do bocal convergente para que o escoamento torne-se completamente desenvolvido (Figura 11, ponto 2).

Figura 11 – Perfis de velocidade de escoamento ao longo do comprimento de um tubo



Fonte: (SAAD, 1993)

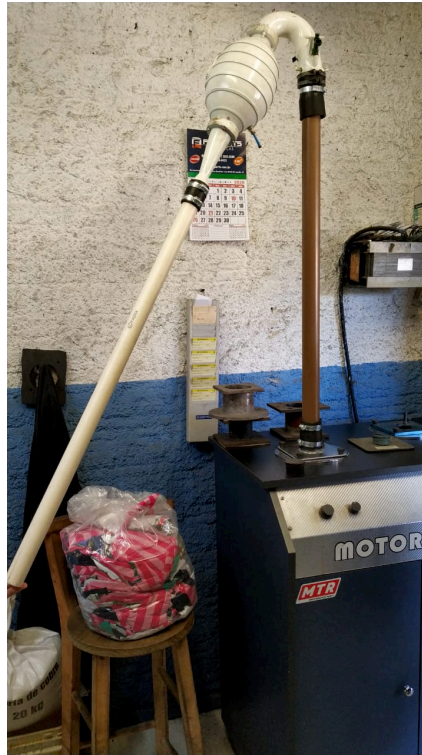
Figura 12 – Efeito de borda na entrada de um tubo



Fonte: (WATANABE, 2021)

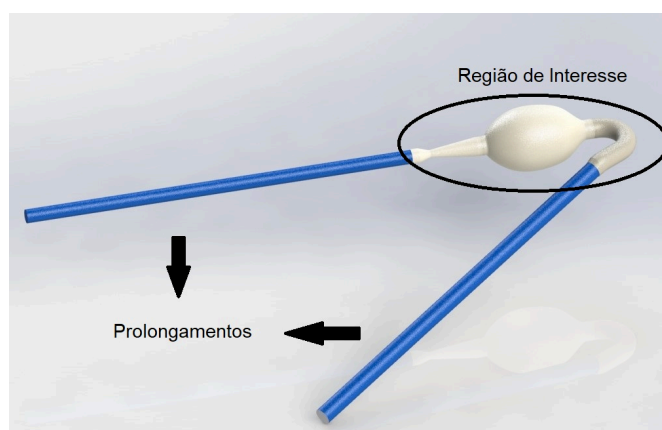
Seguindo esta proposta, para o estudo da geometria original foram implementados tubos prolongadores, de forma a isolar o sistema destes fenômenos, buscando escoamentos equivalentes nas duas situações. As Figuras 13 e 14 representa esta ideia.

Figura 13 – Implementação do sistema em bancada de fluxo



Fonte: O Autor (2021)

Figura 14 – CAD do sistema de admissão com os prolongamentos



Fonte: O Autor (2021)

As mesmas considerações são válidas para a saída do sistema. Afastar os fenômenos que ocorrem nas condições de contorno para longe do domínio de interesse diminuem a interferência destes sobre o resultado.

Da mesma forma que devemos entender os meios de se prover um modelo numérico representativo, é de mesma importância conhecer os detalhes dos instrumentos que serão utilizados no experimento. Mapear de que forma as propriedades físicas são medidas, a forma de interação com o sistema em estudo, a resolução e a unidade de grandeza de cada um dos dispositivos de medição, os efeitos de escoamento que ocorrem no equipamento dada a geometria interna do próprio, a capacidade de operação quando se trata de uma bomba, etc. Todos são pontos fundamentais para correlacionar aquilo que é medido, com aquilo que é esperado para o modelo numérico, a fim de saber se são grandezas equivalentes.

4.2 CRIAÇÃO DAS GEOMETRIAS PARA ANÁLISE CFD

Definido o meio de experimentação, pode-se então gerar as geometrias que farão parte da análise numérica. Para que fosse possível entender o comportamento do escoamento e o desempenho do sistema de admissão, foram propostas algumas considerações simplificadoras sobre o estudo. Estas buscam viabilizar uma análise dentro de um ambiente de equipe de competição, limitado por tempo de desenvolvimento.

Primeiramente foi definido que este seria feito somente com os três componentes apresentados aqui (*runner*, *plenum* e restritor) e não levaria em consideração os demais componentes do sistema, como o filtro, corpo de borboleta e o cabeçote com as válvulas de admissão e exaustão. Além disso, a realização com escoamento não pulsante, condição de trabalho da bancada de fluxo, mas que é diferente do que acontece no motor.

Desta maneira é possível centralizar o esforço sobre o conjunto estudado, reduzindo o número de variáveis que possam interferir sobre o resultado e viabilizar a execução de todas as etapas (numérica e experimental) em tempo hábil. Por exemplo, contabilizar o cabeçote e as válvulas geram a necessidade de um detalhamento preciso da geometria para reprodução no modelo numérico; já sobre o escoamento pulsante, é necessário que fosse aferido o perfil de excitação gerado pelo movimento do motor que caracteriza o seu funcionamento. As duas situações são possíveis, mas demandam uma carga de trabalho muito grande e incompatível com o ambiente aqui apresentado.

Assim, como forma de analisar o comportamento e a influência das características citadas nas seções anteriores, foram modeladas em um programa CAD três versões do sistema original com as seguintes propriedades geométricas, descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propostas de variações geométricas do sistema

	Sistema Original	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Ângulo convergente no restritor [°]	18	16	18	12
Ângulo divergente no restritor [°]	7	9	7	12
Volume do <i>plenum</i> [L]	3,7	3,7	1,7	3,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, foram criadas duas configurações de restritor com variação dos ângulos dos bocais convergente e divergente, e um volume de *plenum*. As Figuras 15, 16, 17 e 18 representam os domínios do Sistema Original, Sistema 2, Sistema 3 e Sistema 4, respectivamente.

Figura 15 – Sistema Original

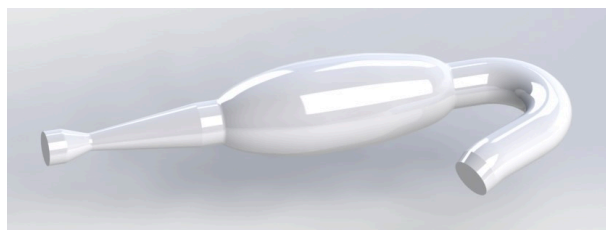


Fonte: O Autor (2021)

Figura 16 – Sistema 2: variação dos ângulos dos bocais do restritor



Fonte: O Autor (2021)

Figura 17 – Sistema 3: variação do volume do *plenum*

Fonte: O Autor (2021)

Figura 18 – Sistema 4: variação dos ângulos dos bocais do restritor



Fonte: O Autor (2021)

4.3 MÉTODOS E MODELOS PARA ANÁLISES CFD

Um escoamento turbulento é caracterizado como a flutuação do campo de velocidades ao longo do tempo e infelizmente não existe um modelo matemático que consegue descrever todo e qualquer tipo de movimentação, que possa ser resolvido em tempo hábil com uma capacidade computacional comum. (ANSYS-INC, 2013) Assim, o entendimento dos diversos modelos disponíveis para utilização é de fundamental importância na hora da escolha daquele que poderá melhor descrever a sua situação de estudo.

Entender a finalidade para qual aquele método foi criado e a necessidade computacional que este vai demandar, sem esquecer das definições anteriores de malha por exemplo, podem fazer a diferença para conseguir alcançar um resultado coerente, em um tempo aceitável. Cada programa apresenta a sua própria descrição dos modelos disponíveis, então é de suma importância a leitura e entendimento destes para a correta escolha.

No estudo de caso mostrado aqui, a escolha do modelo de turbulência foi o $\kappa - \epsilon$ RNG, o qual, segundo ANSYS-INC (2013), resolve duas equações de transporte de energia e apresenta termos de maior ordem para a não-linearidade, resultando em cerca de 10-15% a mais em demanda computacional, quando comparado com o método mais simples disponível no programa.

Esta configuração está orientada de forma a reduzir a viscosidade turbulenta uma vez que exista uma condição de alta taxa de tensão de cisalhamento. Por este motivo o $\kappa - \epsilon$ é mais suscetível a instabilidade em condições de regime permanente, entretanto, mostra-se mais responsivo a captar importantes instabilidades físicas como vórtices ao longo do tempo. (ANSYS-INC, 2013)

Relacionado as condições de contorno, estas dependem muito dos dados de entrada aquisitados para o estudo - vide exemplos na Subseção 3.4 - e também da metodologia de validação experimental escolhida, descrita na Subseção 4.1. Assim,

criam-se dois conjuntos: dados de entrada obtidos por meio de cálculos/experimentos, e os dados de saída que contemplam os objetos e parâmetros esperados como resultado.

Para este estudo existem alguns cenários de simulação que vão ao encontro da validação por meio de experimento, que está orientado para a execução em bancada de fluxo. Estes são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Possíveis cenários para condições de contorno

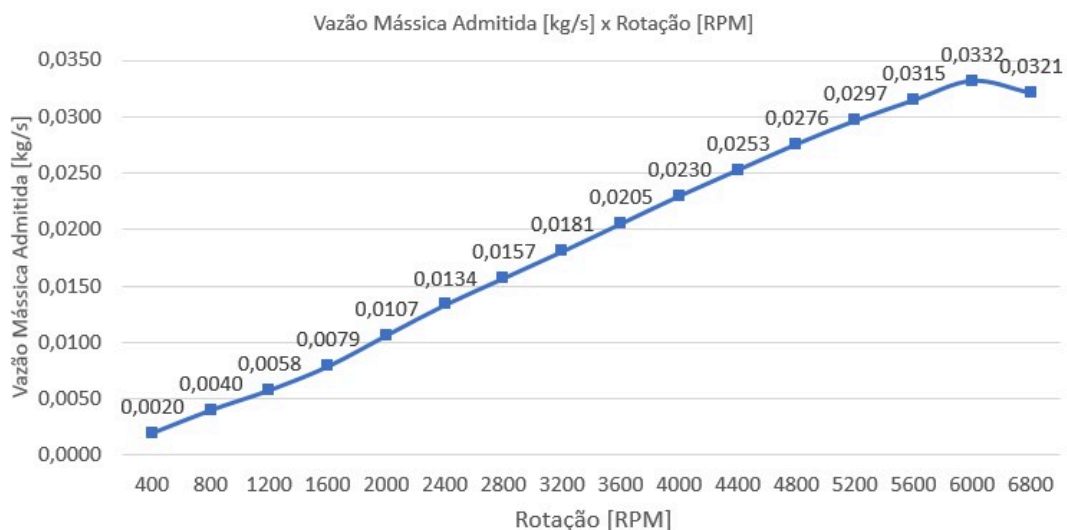
	Entrada	Saída	Validação
Cenário 1	<i>Inlet – vent</i>	Vazão mássica	Diferença de pressão
Cenário 2	Vazão mássica	<i>Outlet – vent</i>	Diferença de pressão
Cenário 3*	Pressão X	Pressão Y	Vazão mássica

Fonte: Elaborado pelo autor.

*Onde (X-Y) é uma diferença de pressão conhecida

Nos resultados que serão apresentados foi utilizada a condição de contorno de vazão mássica de ar na entrada (*mass – flow inlet*), calculada por meio da eficiência volumétrica provinda de dados da injeção eletrônica utilizada pela equipe Fórmula CEM. A Figura 19 demonstra a curva de vazão mássica admitida em função da rotação, sendo que o ponto de estudo escolhido foi para 5200 RPM, e vazão de 0,0297 kg/s. Esta escolha foi motivada pela maximização do desempenho na faixa de maior torque, região muito utilizada nas provas dinâmicas da competição, de acordo com arquivos da equipe.

Figura 19 – Curva de vazão mássica admitida calculada pela eficiência volumétrica



Fonte: O Autor (2021)

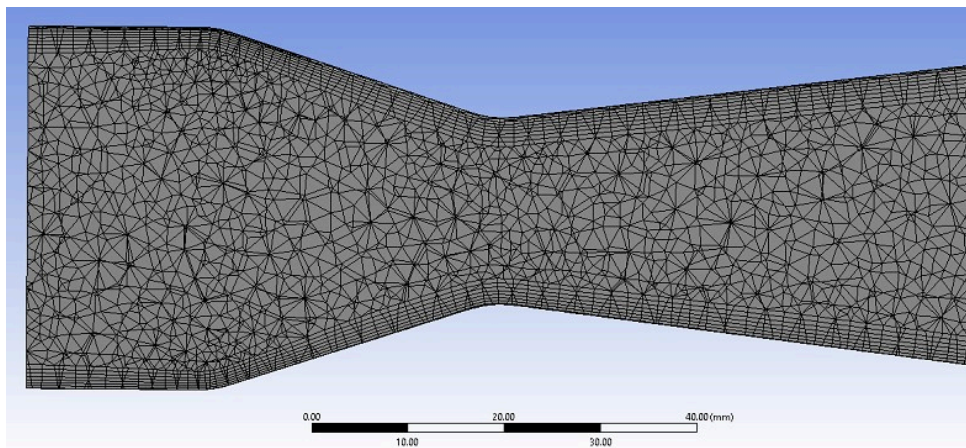
Da mesma forma é necessária a definição de uma condição de contorno para a saída do sistema. Esta foi escolhida como *outlet – vent*, condição que representa uma saída de ar livre, a qual se ajusta de acordo com o escoamento presente ao longo do domínio de estudo. Desta maneira é possível representar a condição de uma bancada de fluxo, onde é imposta uma vazão de ar em uma extremidade, e uma saída livre para o escoamento na outra.

4.4 ELABORAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS

Definidas as geometrias que serão analisadas, dentro do processo de simulação numérica com auxílio de programas de computador é necessário o estudo sobre a malha de elementos. Nesta fase podem ser pontuados dois momentos: a definição dos valores dos parâmetros que a constituem, de forma a atender a qualidade mínima necessária, e a análise de independência desta sobre o resultado.

Relacionada a qualidade, na literatura existem recomendações e boas-práticas sugeridas para serem seguidas, como explica em seu documento o autor Lanfrit (2005). O tamanho dos elementos deve garantir que as variações geométricas sejam discretizadas sem prejudicar os efeitos esperados, principalmente naquelas regiões que são críticas como variações abruptas, cantos pequenos e, focado no sistema aqui desenvolvido, a região da restrição mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Detalhe da disposição da malha na restrição



Fonte: O Autor (2021)

Além da discretização, Lanfrit (2005) sugere a implementação de *inflation* nas paredes do domínio, de forma a conseguir caracterizar o comportamento do escoamento perto desta, onde os efeitos de atrito da parede com o fluido são significativos. O autor indica ainda a implementação de uma zona com 7 camadas de elementos para que seja atingida uma boa descrição dos fenômenos. Esta aplicação

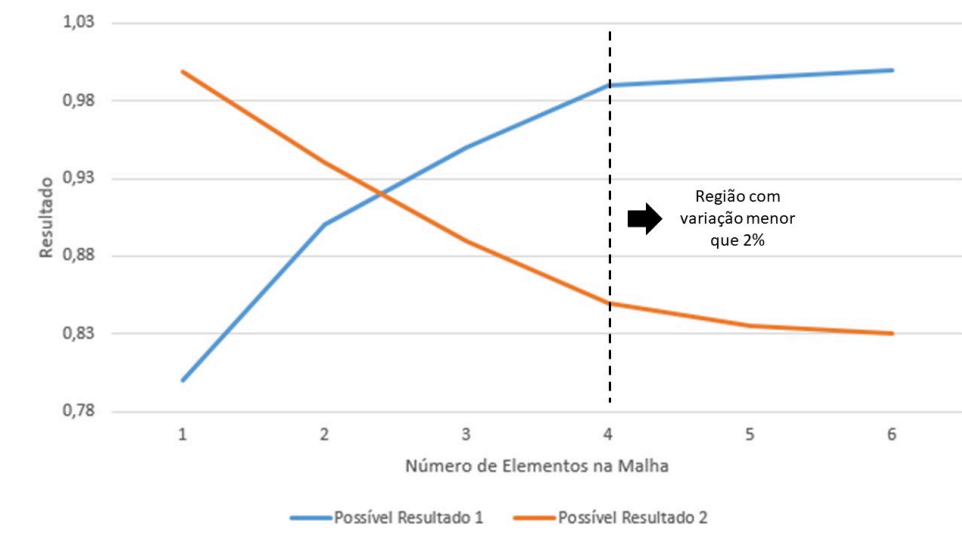
pode ser vista também na Figura 20, onde existem 7 camadas de elementos próximas a parede.

Assim, o trabalho de encontrar uma condição de dimensão dos elementos que consiga representar a geometria normalmente é feita por meio dos indicadores de qualidade. Dentro daqueles que são apresentados pelo programa utilizado, *ANSYS Fluent*, se destacam dois: *skewness* e *aspect ratio*.

O primeiro representa a diferença entre os contornos de uma célula comparada com outra, as quais devem dividir a face lateral e apresentar volumes próximos entre si. Espera-se que seja obtido um valor abaixo de 0,95, com média abaixo de 0,33. Já o segundo calcula o alongamento do elemento, sendo a razão entre a largura e a altura, e como sugestão tem-se que elementos longe da parede devem respeitar a escala de 5:1. (ANSYS-INC, 2013)

Aliado a análise de qualidade deve-se atentar ao fato de que a discretização afeta o resultado calculado. É então realizada uma análise de independência de malha, acompanhando a relação entre o aumento do refino, ou seja, diminuição do tamanho do elemento, com a variação no resultado. Define-se um comportamento adequado quando a variação for da ordem abaixo de 2% (GUTIERREZ, 2020).

Figura 21 – Independência da malha com os possíveis comportamentos



Fonte: O Autor (2021)

A Figura 21 apresenta dois possíveis comportamentos esperados no resultado conforme o refino aplicado, encontrando assim um ponto ótimo para o tamanho do elemento e sua influência sobre a solução.

4.5 INTERESSES NAS ANÁLISES DOS RESULTADOS

O momento de análise de resultados requer muito critério e atenção. É nesta fase que o entendimento dos resultados alcançados se faz presente de forma a, primeiramente, reconhecer se os fenômenos apresentados estão de acordo com aquilo que é esperado e em uma condição física coerente. Por exemplo, o objeto pode apresentar um gradiente de velocidade condizente ao longo de todo o domínio, entretanto, quando analisada a magnitude desta, percebe-se que foram alcançados valores acima dos permitidos para uma análise de escoamento incompressível, contradizendo as escolhas de modelo numérico e invalidando a solução.

Na sequência busca-se analisar os fenômenos de interesse, e no caso de um sistema de admissão de ar existem alguns, mas a abordagem sobre eles depende do tipo de condição que é aplicada. Diferenciam-se principalmente entre os casos transiente e estacionário, onde as condições de contorno variam, ou não, ao longo do tempo, respectivamente.

Os principais pontos comumente analisados são:

- Gradiente de velocidade/pressão ao longo do domínio
- Velocidades máximas em pontos específicos
- Linhas de corrente originadas pela geometria na visualização de vórtices
- Regiões de descolamento do escoamento da parede
- Zonas de estagnação/recirculação
- A diminuição do diâmetro efetivo do escoamento (zonas onde o diâmetro por onde efetivamente passa o escoamento é menor do que o da geometria em si)

É válido ressaltar que estes são alguns dos pontos que podem ser analisados, mas fica a cargo do desenvolvedor definir qual o objetivo e quais os comportamentos e parâmetros que serão estudados. Além disso, faz parte deste momento a definição de novas rodadas de análise (*looping* de projeto) buscando a maior coerência possível para o que se espera como resultado, alterando a malha, o modelo numérico, as condições de contorno, ou até a geometria, para atingir os requisitos de desempenho.

4.6 FASE DE VALIDAÇÃO

Até o momento já foram percorridas as etapas de entendimento dos parâmetros influentes sobre os componentes, definição de um plano de análise numérica e experimental e a elaboração das propostas de alteração da geometria.

Assim, ao final deste primeiro ciclo do desenvolvimento de um produto tem-se a fase de validação. Existem algumas maneiras de se validar e elas estão relacionadas a forma com que o projeto, o produto e a análise se apresentam. O objetivo é estudar o problema de maneiras diferentes, de forma a comparar se ambas as respostas são

equiparáveis.

Pode-se exemplificar duas condições que possuem a validação como parte integrante do ciclo: projetos novos e projeto de evolução. Essas não são as únicas formas de trabalhar, mas são duas que representam grande parte dos estudos.

Em projetos novos existem casos que parte-se de dados experimentais já conhecidos e testados ao longo dos anos por diversas pessoas, para então criar um modelo numérico do objeto de estudo, onde novos experimentos são feitos após a construção deste para a comparação dos resultados.

Dentro do mesmo ponto, outra forma é por meio da criação de um modelo numérico que atende aos próprios requisitos estipulados nas fases iniciais, e após a fabricação do mesmo, são feitos experimentos que buscam medir a grandeza dos mesmos requisitos para confrontá-los.

Um segundo caminho, que busca a evolução de um sistema, é a condição onde já existe um produto real, onde pretende-se propor uma melhoria, ou até um novo conceito. Para que isso seja possível são feitos experimentos para obtenção de dados, que alimentam um modelo numérico tornando-os equivalentes, e assim este é utilizado para a proposição de novas soluções.

O estudo mostrado aqui segue esta última definição. Sabendo do sistema real já construído e em utilização, tem-se a realização de testes que mensuram valores experimentais e que servem de base para validar um modelo numérico, criado para análise de novas soluções. Assim, os dados obtidos nas simulações devem estar de acordo com aquilo que foi aferido no experimento realizado, mostrando que o modelo virtual é capaz de entregar resultados condizentes, que neste ambiente é caracterizado pela variação de pressão causada pela geometria.

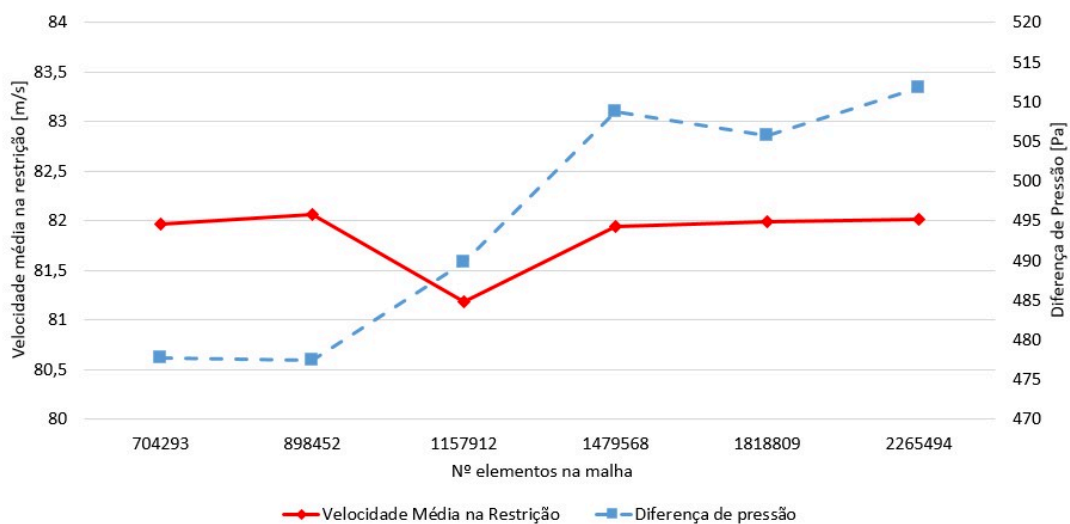
5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS

De forma a elucidar as etapas descritas anteriormente é apresentada a seguir uma análise comparativa do escoamento de três variações geométricas da admissão e do sistema original. O modelo computacional das análises é validado por meio de experimento, e dentre os caminhos possíveis para tal, foi escolhido a utilização de uma bancada de fluxo.

Os fatores observados para que sejam tiradas as conclusões são: a velocidade média na restrição, a perda de carga do sistema e nos componentes e a existência de vórtices e zonas de descolamentos ao longo do domínio.

Retomando a definição do ponto de análise, temos o valor de vazão mássica de 0,0297 kg/s. Entendendo que a melhor forma de correlacionar o experimento com o caso numérico é definindo esta vazão mássica na entrada e uma condição de saída livre na outra extremidade, pode ser feita então a análise de independência de malha. A Figura 22 representa o comportamento da resposta com o incremento no número de elementos na malha, com base no modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ RNG.

Figura 22 – Resultados da análise de independência de malha



Fonte: O Autor (2021)

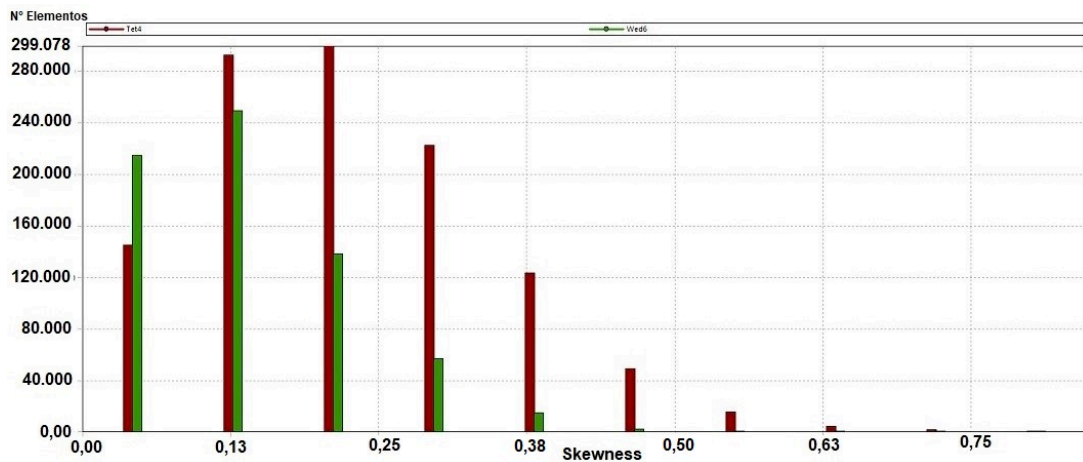
Percebe-se que a velocidade média na restrição não sofre grande impacto com o incremento da malha, diferentemente do que acontece com a diferença de pressão entre as extremidades, onde somente a partir da quarta malha testada, foram obtidos resultados que variaram menos de 2%. Assim, a malha escolhida para análise foi a de 1.818.809 elementos. Os dados exatos podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados das variáveis na análise de independência de malha

Número de Elementos	Velocidade Média [m/s]	Diferença para anterior [%]	Diferença de pressão [Pa]	Diferença para anterior [%]
704.293	81,97	-	477,8	-
898.452	82,06	0,11%	477,4	-0,08%
1.157.912	81,19	-1,07%	489,8	2,53%
1.479.568	81,95	0,92%	508,7	3,72%
1.818.809	82,00	0,06%	505,7	-0,59%
2.265.494	82,02	0,03%	511,8	1,19%

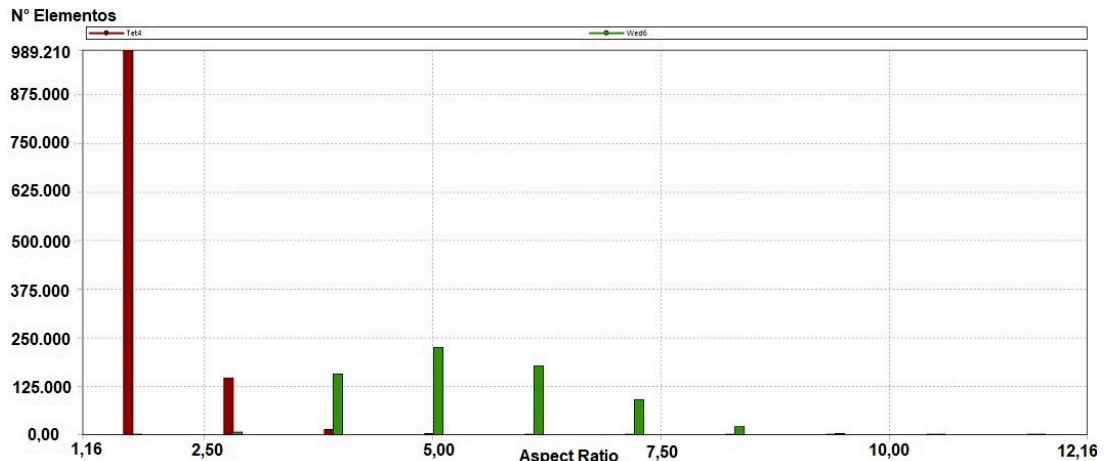
Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha escolhida atende aos requisitos de qualidade descritos na Subseção 4.4. A Figura 23 apresenta a distribuição dos valores de *Skewness* alcançados ao longo do domínio onde o valor máximo obtido é de 0,84755 com média de 0,19024. Já para o *Aspect Ratio* foi alcançado o máximo de 12,16 em dois elementos no limite do domínio, o que não traz problema de resolução do caso, com média de 3,16 para a grande maioria do sistema. A Figura 24 apresenta a distribuição deste último.

Figura 23 – Distribuição dos valores de *Skewness* na malha escolhida

Fonte: O Autor (2021)

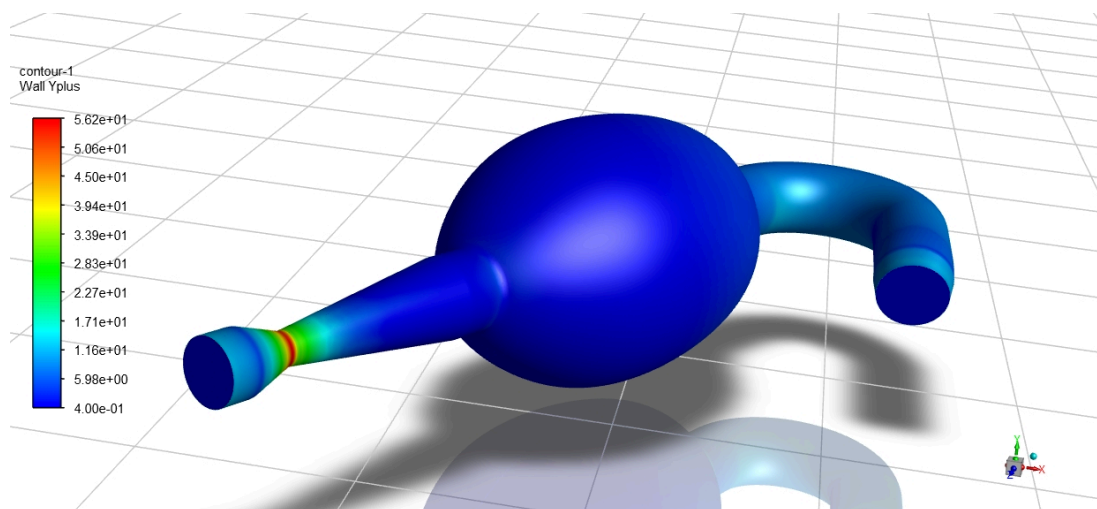
Figura 24 – Distribuição dos valores de *Aspect Ratio* na malha escolhida



Fonte: O Autor (2021)

Outro parâmetro que indica a qualidade da malha próxima a parede, possível de ser analisada após a solução do caso é o " y^+ ". Segundo ANSYS-INC (2013) este fator limita o valor de distância aceitável entre o centroide dos elementos próximos à parede e a parede em si. No caso de modelos definidos como *Non – equilibrium Wall Functions*, como o apresentado aqui, o valor deve ficar entre 30 e 300. A Figura 25 apresenta a distribuição do resultado obtido, os quais ficaram dentro do limite estabelecido.

Figura 25 – Distribuição dos valores de y^+ na malha escolhida

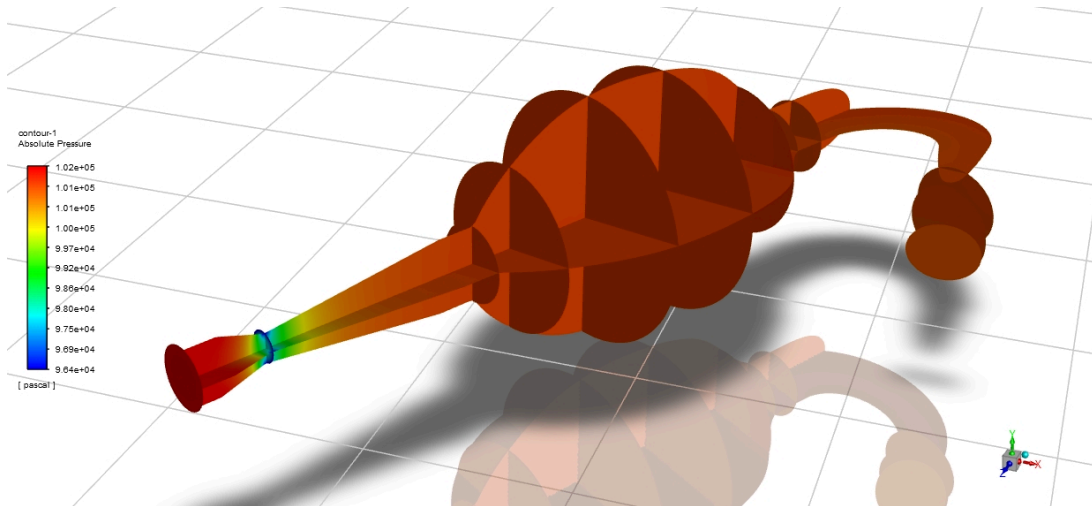


Fonte: O Autor (2021)

Da Tabela 4 temos a primeira análise possível de ser feita: a velocidade média atingida na restrição foi de 0,24 Mach indicando que esta está dentro do regime incompressível, e assim, as hipóteses adotadas para método e modelo de cálculo são válidas. Além disso, temos o valor da diferença de pressão entre as extremidades do

domínio que é de 505,70 Pa, indicando o valor que se espera no experimento de forma a validar o objeto de estudo criado. A Figura 26 representa a solução para pressão absoluta no sistema original.

Figura 26 – Representação do campo de pressão absoluta no sistema original



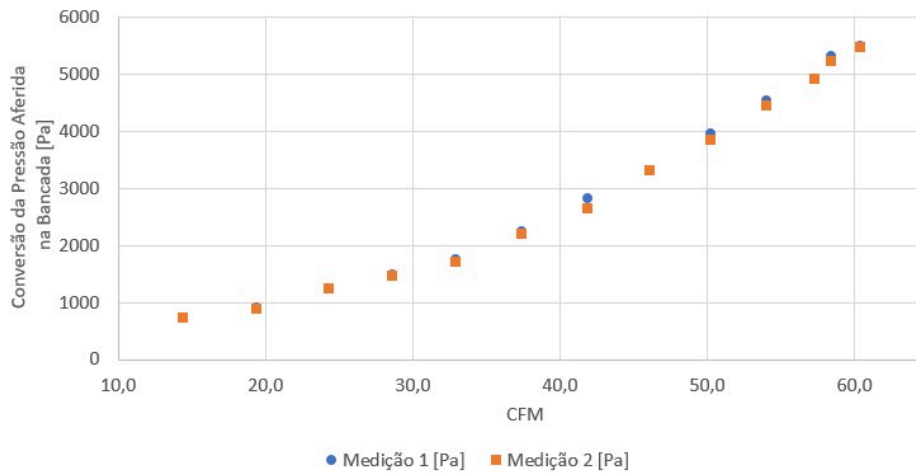
Fonte: O Autor (2021)

A etapa seguinte se deu pela realização do experimento em bancada de fluxo e não foi possível correlacionar corretamente o resultado alcançado no experimento com a abordagem numérica. Os pontos de medição de pressão no experimento estão referenciados na bomba de ar, já a simulação tinha como hipótese que a pressão deveria ser mensurada na interface entre o sistema e a bancada, ou seja, a perda de carga gerada da interface até a bomba não foi mensurada, afetando o resultado.

Este entendimento só foi alcançado em um momento posterior à realização do experimento, após várias análises numéricas indicarem resultado muito diferente do experimental. As medições foram realizadas no período em que a Pandemia do Covid-19 estava começando a afetar o Brasil, assim, não foi possível uma nova rodada de testes de forma a ajustar essa consideração.

De forma a registrar os resultados obtidos, a Figura 27 apresenta a curva de perda de carga obtida em função da vazão mássica de ar calculada.

Figura 27 – Diferença de pressão experimental em função da vazão mássica de ar calculada



Fonte: O Autor (2021)

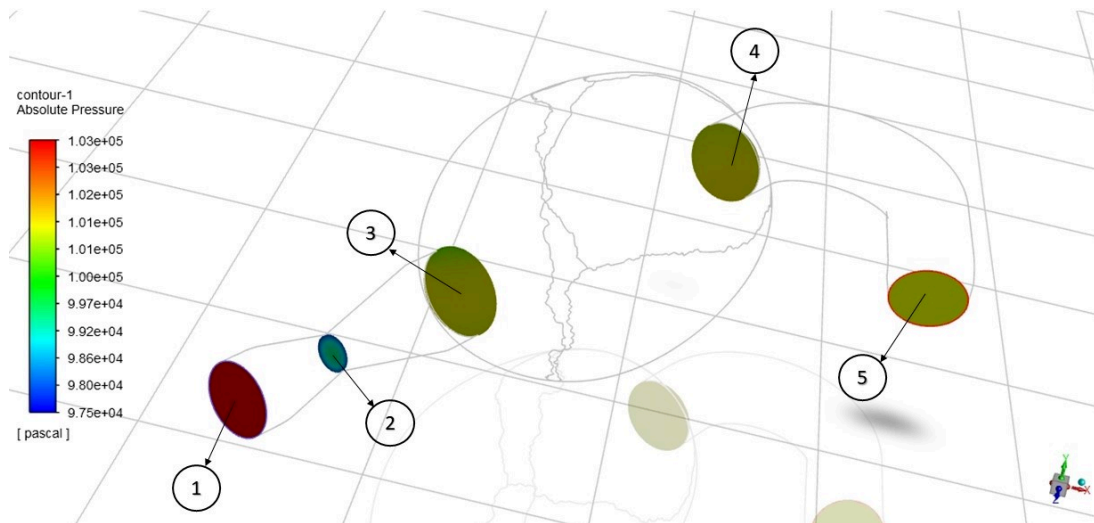
Os dados da Figura 27 estão detalhados no Apêndice A. A análise estatística sobre os valores apresenta um desvio-padrão de $\pm 0,3$ pol H₂O, onde o Teste de Barlett apresentou Valor-p de 0,246, indicando que esta variação está aceitável para os dados coletados.

Mesmo com esta constatação, foi continuada a análise para as demais geometrias de sistema, assumindo que o modelo numérico proposto é capaz de representar a condição experimental. Os prolongamentos também foram retirados uma vez que o resultado com e sem estes diferiram em somente 39,20 Pa para o valor de delta de pressão absoluta no sistema. Portanto, retirá-los impacta menos do que 10% no resultado e também diminui o esforço computacional para solução.

De forma geral, os resultados podem ser divididos em dois momentos: um comparativo de desempenho entre os componentes/sistemas, e no destaque de alguns fenômenos observados. Para desempenho, a Figura 28 representa os pontos onde foram calculadas as propriedades em todas as geometrias, como segue:

- Ponto 1 = entrada do sistema / *inlet*
- Ponto 2 = restrição
- Ponto 3 = saída do restritor e entrada do *plenum*
- Ponto 4 = saída do *plenum*
- Ponto 5 - saída do sistema / *outlet*

Figura 28 – Localização dos pontos de medição das propriedades



Fonte: O Autor (2021)

A Tabela 5 apresenta os dados para velocidade média atingida na restrição e a perda de carga (ou diferença de pressão) entre duas extremidades, tanto do sistema, quanto dos componentes. No Apêndice B estão os valores de velocidade e pressão absoluta de cada geometria, em cada região de interesse.

Tabela 5 – Resultados de desempenho dos sistemas e de componentes

Caso de Estudo	Velocidade Média na Restrição (2) [m/s]	ΔP Restritor (3-1) [Pa]	ΔP <i>Plenum</i> (4-3)[Pa]	ΔP Total (5-1) [Pa]
Geometria Original	82,00	-380,00	-22,80	-505,70
Geometria 2	84,79	-503,90	-51,70	-642,20
Geometria 3	81,45	-415,10	-5,00	-529,00
Geometria 4	84,29	-1742,70	53,20	-1788,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

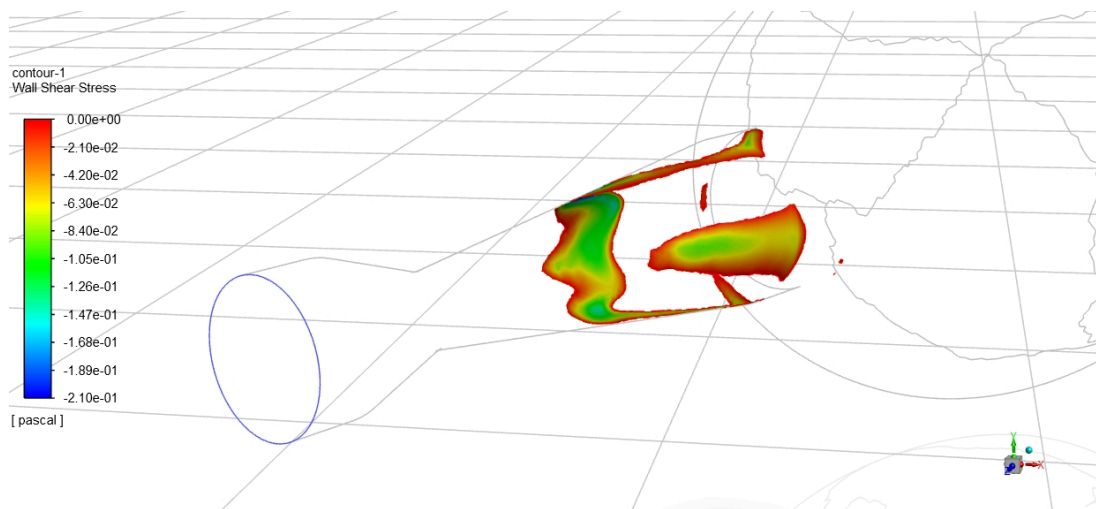
O modelo de turbulência $\kappa - \epsilon$ não conseguiu solucionar o caso da Geometria 4 pois esta apresenta uma instabilidade maior, que será analisada nesta seção. Assim, para que fosse possível a análise em quatro sistemas, o modelo $\kappa - \omega$ SST foi utilizado na Geometria 4, mantendo as condições de contorno. Segundo ANSYS-INC (2013), este método mantém as equações do $\kappa - \epsilon$ para o escoamento livre e enrobustece àquela perto das paredes. Dessa maneira consegue misturar robustez, acuracidade e flexibilidade para uma maior classe de escoamentos.

Primeiramente podem ser analisados os componentes individualmente. Para o restritor é possível constatar que utilizar os ângulos de $18^{\circ}7'$ produz uma velocidade média na restrição 3,94% menor do que a maior velocidade média atingida entre as outras duas construções. Isto também reflete em uma menor perda de carga ao

longo do seu comprimento, atingindo um valor 123,90 Pa menor do que o restritor 16°/9° e 1.362,70 Pa menor do que o restritor 12°/12°. Este valor alto observado na Geometria 4 é explicado uma vez que os resultados de todos os casos na saída do sistema convergiram para pressão absoluta em nível de pressão atmosférica, assim, é necessário que a pressão na entrada seja muito elevada para garantir a vazão mássica definida.

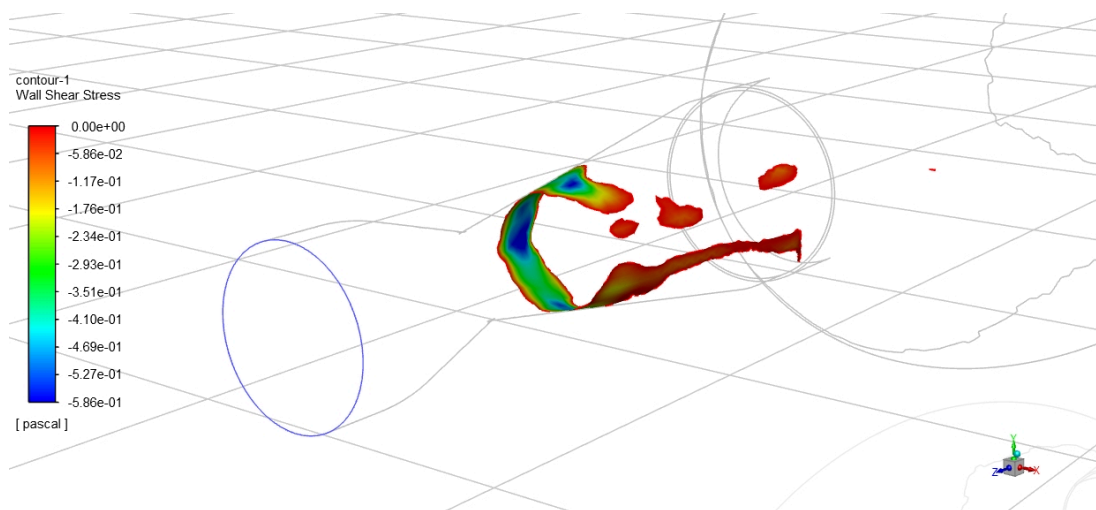
Para entender a diferença na pressão absoluta podemos analisar o comportamento do escoamento dentro desta peça. As Figuras 29 e 30 representam os gradientes de Tensão de Cisalhamento com valores negativos nas Geometrias Original e 2. A escolha destas se dá para demonstrar que uma pequena variação nos ângulos dos bocais pode gerar uma grande diferença no resultado.

Figura 29 – Região com tensão de cisalhamento negativa na geometria original



Fonte: O Autor (2021)

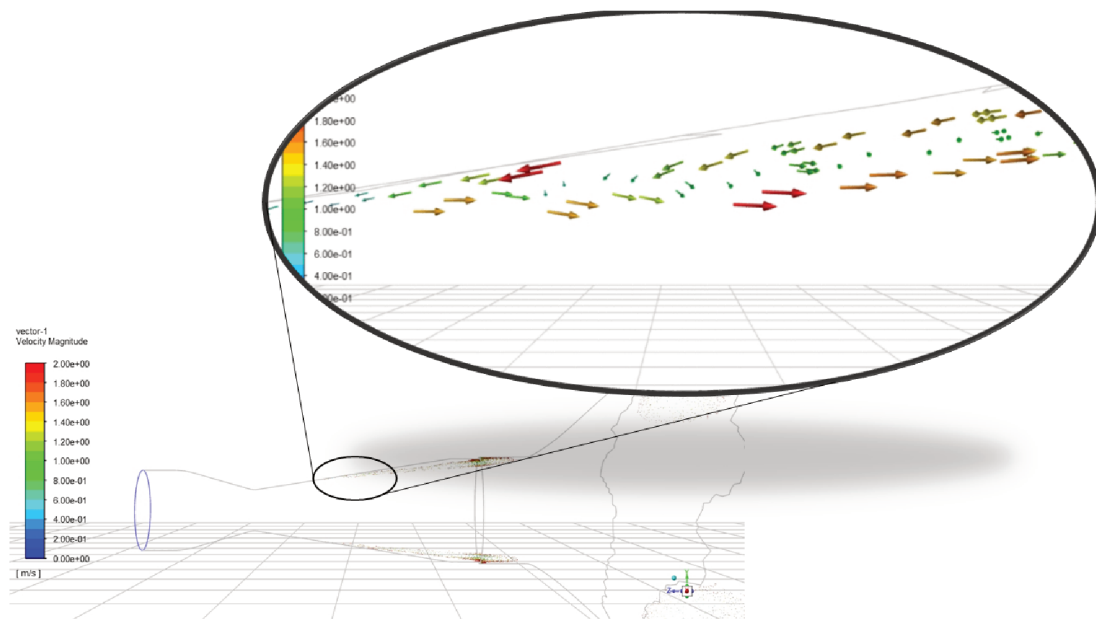
Figura 30 – Região com tensão de cisalhamento negativa na geometria 2



Fonte: O Autor (2021)

A região onde a tensão de cisalhamento cai a zero indica separação do escoamento, e quando é negativa, indica que o cisalhamento está ocorrendo no sentido contrário ao referencial. Quando analisado a direção do vetor velocidade na região, percebe-se que este valor zero demarca um ponto de retorno do escoamento. A Figura 31 demonstra este comportamento.

Figura 31 – Vetor velocidade indicando recirculação do ar no restritor da geometria 2



Fonte: O Autor (2021)

Assim, este fenômeno caracteriza que o escoamento descolou da parede e que a partir deste momento existe recirculação do ar, característica que aumenta a perda de carga. É possível perceber que existe diferença na intensidade alcançada, sendo maior na Geometria 2, implicando em um menor desempenho na ordem de 24,59%.

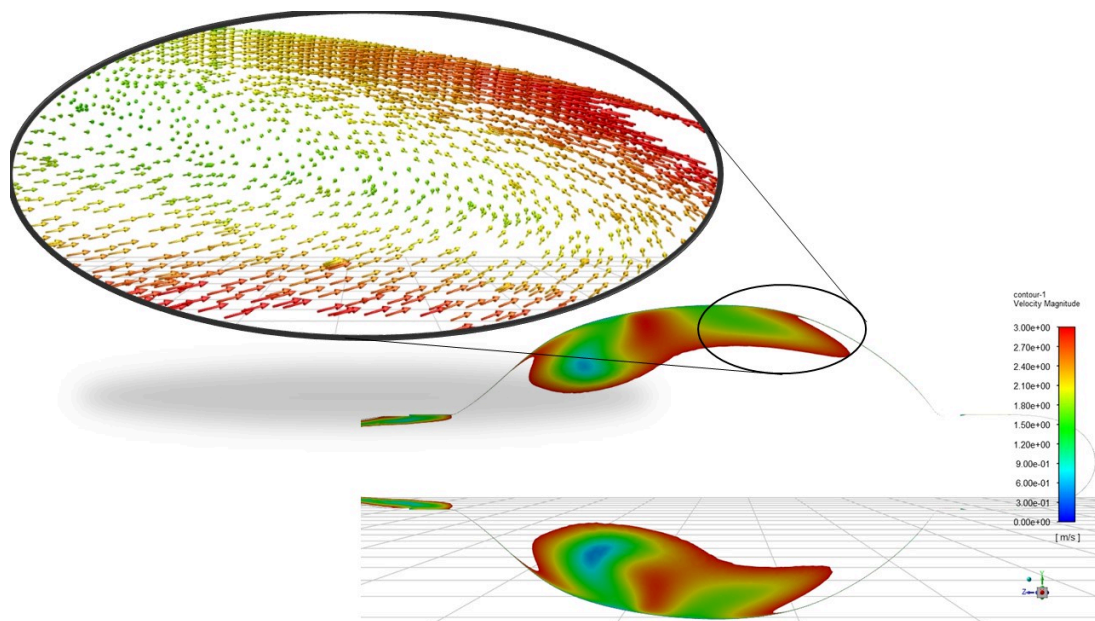
Agora, comparando a aplicação do mesmo restritor com dois volumes de *plenum* diferentes, Geometria Original e Geometria 3, percebe-se que existe uma influência no resultado alcançado de 8,46% neste último. Mesmo sendo uma diferença com menor impacto na soma global da perda de carga quando comparado com a parcela do restritor, é importante saber da conexão entre cada componente e deles com o resultado.

Uma análise semelhante à do restritor pode ser feita para o *plenum* no viés do gradiente de pressão absoluta. Relacionado à perda de carga, o volume de 1,2 L apresentou a menor diferença de pressão entre extremidades. Quando comparada com os valores obtido para as Geometrias 2 e 3, temos um ganho em performance de até 90,33%, ou seja, muito menos restritivo.

A razão para este resultado tem análise parecida com àquela apresentada para o restritor. É possível observar várias zonas de recirculação na periferia do

volume de 3,6 L, fato este que aumenta o atrito entre partículas do próprio escoamento, aumentando a perda de carga. A Figura 32 apresenta um plano médio com foco em uma dessas regiões de baixa velocidade, onde a representação foi limitada à 3 m/s. O detalhe mostra a direção dos vetores, que caracteriza um movimento circular.

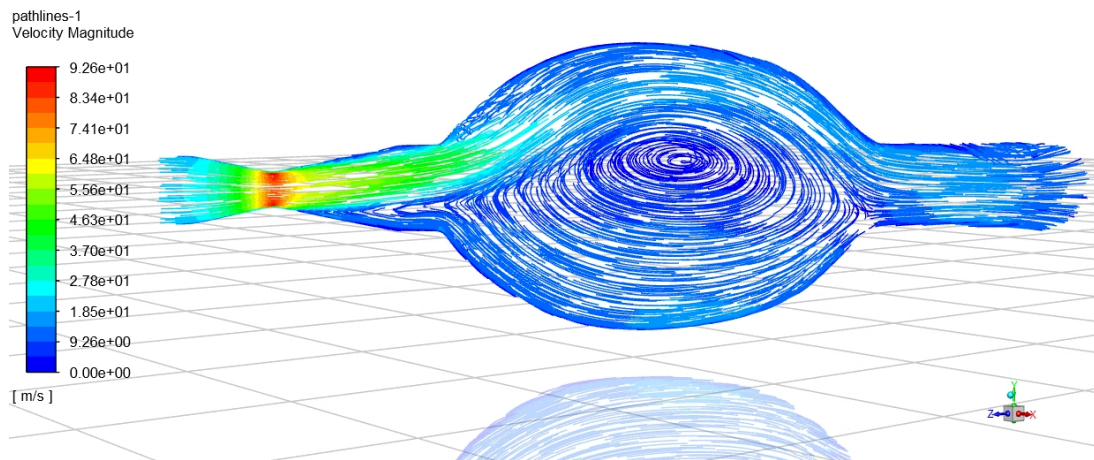
Figura 32 – Vetores de velocidade indicando recirculação do ar no *plenum* da geometria 2



Fonte: O Autor (2021)

Assim, diminuir o volume do *plenum* na condição de escoamento não-pulsante traz a vantagem de menor perda de carga pela geometria. Já quando analisada contra a Geometria 4 a situação se inverte, visto que esta obteve um aumento de pressão na ordem de 53,20 Pa. Uma maior pressão na saída no *plenum* pode favorecer o enchimento do cilindro em função do gradiente de pressão, ou seja, a alteração dos ângulos do restritor fez aumentar a pressão no *plenum*, o que favorece o fluxo de ar para o motor. A Figura 33 ilustra o comportamento do escoamento no domínio, evidenciando a grande recirculação que gera baixas velocidades e alta pressão.

Figura 33 – Linhas de corrente classificadas por velocidade indicando recirculação do ar no *plenum* da geometria 4



Fonte: O Autor (2021)

É necessário lembrar que este componente desempenha outras funções como a interface para reflexão de ondas de pressão geradas pelo movimento alternativo do motor e de reservatório de ar em acelerações rápida, que podem saturar o fluxo mássico na restrição. Portanto, outros estudos devem ser feitos para uma definição de geometria.

Por fim podem ser feitas considerações sobre os conjuntos como um todo. Como medida de sistema é observada a diferença de pressão entre a entrada (Ponto 1) e a saída (Ponto 5) na Figura 28, indicando quanto de energia cinética é perdida principalmente em atrito. Neste contexto a Geometria Original é a que melhor performa quando se trata de escoamento contínuo. Sendo uma somatória das perdas ao longo de cada componente, deve-se principalmente às menores perdas na restrição que apresenta ângulos de bocal iguais a 18° e 7° .

Agora, sabendo da possibilidade de favorecimento do enchimento do cilindro, a Geometria 4 figura como outra possível para implementação. Como conclusão tem-se que as Geometrias Original e 4 devem ser estudadas sobre a ótica de escoamento pulsante para completo entendimento do desempenho e escolha daquela que trará maior benefício. Deve-se ainda realizar a validação por meio de experimento dos dados apresentados aqui para garantir fidelidade desta análise.

6 CONCLUSÕES

Como resultado foi apresentada a metodologia utilizada para o projeto de uma admissão de ar que contempla as fases de projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhada. Na sequência são descritas as principais variáveis envolvidas em cada componente do sistema, indicando também uma maneira de analisar cada um deles com viés numérico e experimental. Por fim, foi apresentada uma análise de três geometrias criadas com base em um sistema existente e em utilização.

Dos resultados obtidos nas simulações, nota-se que o restritor com ângulos de $18^\circ/7^\circ$ propicia uma velocidade média na restrição 3,94% menor e um gradiente de pressão 123,90 Pa menor do que o restritor $16^\circ/9^\circ$ e 1.362,70 Pa menor do que o restritor $12^\circ/12^\circ$. A alta pressão na entrada da Geometria 4 é consequência da necessidade de garantir a vazão mássica definida, mostrando-se uma geometria restritiva.

Relacionado ao *plenum*, o menor volume é aquele que apresenta a menor perda de carga em escoamento não-pulsante, 90,33% menos restritivo entre os que apresentaram gradiente negativo. No caso da Geometria 4, onde o gradiente no *plenum* foi positivo com valor de 53,20 Pa, sabe-se que este fenômeno pode contribuir para o enchimento dos cilindros.

Quando analisado o conjunto como um todo, o Sistema Original apresenta o melhor desempenho em escoamento não-pulsante em função da menor queda de pressão. Entretanto, a Geometria 4 também apresentou um fenômeno interessante o que indica que um comparativo entre estas duas geometrias deve ser realizado no âmbito de escoamento pulsante.

Por fim, este trabalho além de refletir toda a experiência adquirida no tempo de participação na equipe de competição Fórmula CEM, permitiu um crescimento técnico e pessoal que agrega expertise para a execução da profissão de engenharia.

6.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros tem-se os tópicos:

- Relacionado ao experimento, tem-se a necessidade de estudar mais a fundo a diferença de pressão medida pela bancada de fluxo, de forma a concretiza a validação do modelo numérico proposto;
- Realizar uma análise em escoamento pulsante sobre a geometria original e 4, de modo a cobrir as demais condições de funcionamento do sistema de admissão;
- Geração de novas propostas de geometrias com base nos resultados apresentados;

- Análise em escoamento pulsante, para reflexão de ondas e do comportamento em acelerações rápidas;
- Entendimento da flexibilidade de um *setup* de modelo numérico de forma a absorver as variações geométricas propostas para o sistema.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. V. **Análise da influência de coletores de admissão com geometria variável nos parâmetros de desempenho em motores de combustão interna de ignição por faísca e HCCI usando AVL-BOOST**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- ANSYS-INC. Ansys fluent theory guide. **ANSYS, Inc Canonsburg**, 2013.
- BLAIR, G. P. **Design and Simulation of Four-Stroke Engines**. 1. ed. Warrendale, PA 15096-0001 USA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1999.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: volume 1**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012.
- CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. 1. ed. Porto: ISEP Instituto Superior de Engenharia do Porto e IEP Instituto Eletrotécnico Português. Laboratório de Metrologia e Ensaios, 2012.
- CAVAGLIERI, M. R. **Estudo Experimental do Fenômeno de Onda em Coletores de Admissão para Motores de Combustão Interna**. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, 2014.
- CLAYWELL, M.; HORKHEIMER, D. Improvement of intake restrictor performance for a formula sae race car through 1d & coupled 1d/3d analysis methods. **SAE Technical Paper**, 2006.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- GUTIERREZ, J. E. C. The ahmed body's external aerodynamics at 25° slant angle rear surface: A numerical analysis using CFD. **ABCM 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Online**, 2020.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 1. ed. USA: McGraw-Hill, Inc., 1988.
- INTERNATIONAL, S. **FORMULA SAE RULES 2019**. 1. ed. Warrendale, Pensilvânia, EUA: SAE International, 2019.
- LANFRIT, M. Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics with FLUENT. **Fluent Deutschland GmbH**, 2005.
- SAAD, M. **Compressible Fluid Flow**. Prentice Hall, 1993. ISBN 9780131613737. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=usVoQgAACAAJ>.
- SHELAGOWSKI, L. M.; MAHANK, T. A. CFR formula SAE intake restrictor design and performance. **2015 ASEE North Central Section Conference**, 2015.
- UFSC. Fórmula CEM. **Documentos Internos**. Joinville, 2018.

WATANABE, R. M. **Cálculo (dimensionamento) das Calhas e Condutores**. 2021.
Disponível em: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/telhado/calhas.php>.

APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos por meio de experimento realizado com o sistema utilizado como exemplo neste trabalho. Foram feitas duas rodadas de medições para cada vazão calculada. A coluna da média apresenta os valores médios com a tolerância calculada por meio do desvio-padrão sobre os dados aquistados.

Tabela 6 – Resultados do experimento em bancada de fluxo

Rotação (rpm)	Vazão (cfm)	Medição 1 (pol H2O)	Medição 2 (pol H2O)	Média com Tolerância (pol H2O)
1600	14,4	2,99	2,92	2,96±0,3
2000	19,4	3,70	3,57	3,64±0,3
2400	24,3	5,00	5,03	5,02±0,3
2800	28,6	6,03	5,94	5,99±0,3
3200	32,9	7,02	6,92	6,97±0,3
3600	37,4	9,04	8,81	8,93±0,3
4000	41,9	11,33	10,67	11,00±0,3
4400	46,0	13,35	13,34	13,35±0,3
4800	50,2	15,93	15,49	15,71±0,3
5200	54,0	18,23	17,86	18,05±0,3
5600	57,3	19,72	19,72	19,72±0,3
6000	60,4	22,07	21,94	22,01±0,3
6400	58,4	21,35	21,02	21,19±0,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B - RESULTADOS NUMÉRICOS

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos por meio de simulação numérica realizada sobre as geometrias analisadas neste trabalho, apresentadas na Figura 28.

Tabela 7 – Resultados obtidos em CFD para cada região de análise

	Sistema Original	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Pressão na Entrada do Sistema - Área 1 [Pa]	101830,70	101967,20	101854,00	103113,60
Velocidade Média na Restrição - Área 2 [m/s]	82,00	84,79	81,45	84,29
Pressão na Entrada do <i>Plenum</i> - Área 3 [Pa]	101450,70	101463,30	101438,90	101370,90
Pressão na Saída do <i>Plenum</i> - Área 4 [Pa]	101427,90	101411,60	101433,90	101424,10
Pressão na Saída do Sistema - Área 5 [Pa]	101325,00	101325,00	101325,00	101325,00

Fonte: Elaborado pelo autor.