



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM

COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Dissertação de mestrado

**Estudo do escoamento em meio poroso de um coletor
de admissão automotivo**

Apresentada por: Alberto Ruiz Vieira de Melo Filho

Orientador: Prof^o. Dr. Ivan C. da Cunha Lima

Co-orientador: Prof^o. Dr. André T. da Cunha Lima

Julho de 2018

Alberto Ruiz Vieira de Melo Filho

Estudo do escoamento em meio poroso de um coletor de admissão automotivo

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Prof^o. Dr. Ivan C. da Cunha Lima
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Co-orientador: Prof^o. Dr. André T. da Cunha Lima
Universidade Federal da Bahia

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M528e Melo Filho, Alberto Ruiz Vieira de

Estudo do escoamento em meio poroso de um coletor de admissão
automotivo / Alberto Ruiz Vieira de Melo Filho. – Salvador, 2018.

78 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ivan C. da Cunha Lima.

Coorientador: Prof. Dr. André T. da Cunha Lima.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia
Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC,
Salvador, 2018.

Inclui referências.

1. Escoamento. 2. Turbulência. 3. Porosidade. I. Centro Universitário SENAI
CIMATEC. II. Lima, Ivan C. da Cunha. III. Lima, André T. da Cunha. IV. Título.

CDD: 629.1

Nota sobre o estilo do PPGMCTI

Esta dissertação de mestrado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (*download* na Página Web http://ead.fieb.org.br/portal_faculdades/dissertações-e-teses-mcti.html ou solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

Centro Universitário SENAI CIMATEC

Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, leram e recomendam a aprovação da Dissertação de mestrado, intitulada "Estudo do escoamento em meio poroso de um coletor de admissão automotivo", apresentada no dia 20 de Julho de 2018, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Orientador:

Prof.º Dr. Ivan C. da Cunha Lima
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Co-orientador:

Prof.º Dr. André T. da Cunha Lima.
Universidade Federal da Bahia

Membro interno da Banca:

Prof.º Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.
Centro Universitário SENAI CIMATEC

Membro externo da Banca:

Prof.º Dr. Murilo Pereira de Almeida.
Universidade Federal do Ceará

Dedicatoria

Ao Prof° Ivan da Cunha Lima, amigo, companheiro e orientador ao longo de todo o Curso de Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Senai Cimatec. Eu posso dizer que minha formação, inclusive pessoal, não teria sido a mesma sem a sua pessoa. Dedico este trabalho também à minha mãe, Denise, e à Tassiana Mendel, que sempre tiveram paciência e compreensão durante esse período de minha vida. Não posso deixar de também dedicar este trabalho à Pablo Brito, amigo sempre presente que me ajuda em todos os momentos e também faz parte dessa conquista.

Agradecimentos

Existem muitas pessoas às quais devo agradecimentos por terem me ajudado de forma direta ou indireta para que esse trabalho fosse finalizado. Eu gostaria de expressar primeiramente um muito obrigado ao meu orientador Ivan e ao meu co-orientador André, por terem me guiado e por toda paciência e atenção dada.

Agradeço ao Departamento de Pesquisa Industrial do Senai Cimatec pelo apoio técnico e operacional para permitir a digitalização dos componentes físicos estudados neste trabalho, em especial ao André, Valter e ao Arthur. Agradeço também à Alex e Daniel por viabilizarem recursos para os laboratórios dos quais precisei de suporte para a obtenção dos dados que alimentaram este estudo.

E por fim quero agradecer à Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades. Agradeço também aos meus amigos e familiares que sempre me apoiaram de forma contínua e paciente durante meus momentos ausentes e de dedicação para a conclusão desse trabalho. Sem todo esse apoio não seria possível concluir essa jornada.

Salvador, Brasil

20 de Julho de 2018

Alberto Ruiz Vieira de Melo Filho

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo a análise do escoamento do ar através de um conduto de admissão automotivo, avaliando o fenômeno ao longo de todo o sistema desde a entrada do bocal da admissão até a válvula corpo de borboletas do motor. Para isso, foi feita a obtenção das geometrias de um componente físico aplicado em um veículo comercial, através de ferramentas avançadas de digitalização tridimensional. Após a conversão do modelo físico em um modelo digital foi construída uma malha de volumes finitos para representar todo o domínio do escoamento. Também, foi representado o meio poroso dentro do sistema, que é o filtro de ar, componente necessário em todo motor à combustão interna moderno. Todos esses dados foram modelados no *software Fluent*[®], solver comercial para fluido dinâmica computacional. Sendo assim foi possível modelar um problema real da indústria e entender seu comportamento como um todo.

Palavras-chave: Escoamento. Turbulência. Porosidade.

Abstract

This dissertation has as the main goal the analysis of the air flow through an automotive intake system. To perform this study, the geometry of a physical component applied to a commercial vehicle was obtained through advanced three-dimensional scanning tools.

Also, the porous region inside the air intake system was introduced too, which is the air filter in a real system, a needful component in every modern ICE (Internal Combustion Engine).

I modeled all those data in the *Fluent*[®] software, a commercial solver for fluid dynamics problems. It was possible to model a real problem of the automotive industry and to understand its behavior.

Key-words: Air flow. Turbulence. Porosity.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Objeto de estudo e definição do problema	2
1.3	Importância e motivação da pesquisa	4
1.4	Revisão Teórica	4
1.5	Aspectos Metodológicos	5
1.6	Organização da Dissertação de Mestrado	6
2	Fundamentação teórica	7
2.1	Dinâmica dos fluidos computacional	7
2.1.1	Fluido	7
2.1.2	Teorema de Transporte de Reynolds	8
2.1.3	Conservação de massa	10
2.1.4	Conservação de momento	11
2.1.5	Equação de Navier-Stokes para um fluido newtoniano	12
2.1.6	Tipos de escoamento - Número de Reynolds	14
2.1.7	Média de Reynolds para a equação de Navier-Stokes - RANS	15
2.1.8	Modelo k-Epsilon	17
2.2	Porosidade	20
2.2.1	Lei de Darcy em meio poroso	21
2.3	Digitalização tridimensional	22
2.3.1	Digitalização 3D com contato	22
2.3.2	Digitalização 3D sem contato	23
3	Metodologia	24
3.1	Digitalização do modelo físico	25
3.1.1	Equipamentos utilizados	25
3.1.2	Confecção do modelo digitalizado	27
3.2	Pré-processamento	30
3.2.1	Delimitação do volume de controle	30
3.2.2	Construção da malha de volumes finitos	31
3.3	Solução das equações (Solver)	34
3.3.1	Definição das condições de contorno	34
3.3.2	Inicialização da Solução	36
3.3.3	Monitoramento da Solução e Convergência	39
4	Resultados e Discussões	40
4.1	Resultados	40
4.1.1	Análise do campo de velocidades	41
4.1.2	Estudo de consideração do início do escoamento	42
4.1.3	Análise do impacto do filtro de ar no escoamento - elemento poroso	43
4.1.4	Análise da perda de pressão ao longo do escoamento	46
4.1.5	Análise do escoamento ao longo do domínio	48
4.1.6	Estudo de um fator de envelhecimento do filtro	49
4.2	Discussão	51

5	Considerações finais	53
5.1	O cenário atual da engenharia de desenvolvimento de produto	53
5.2	Contribuições	54
5.3	Sugestões para Futuras Pesquisas	54
A	Relatórios de escaneamento 3D	56
A.1	Relatório do sistema Gom de digitalização 3D	56
A.2	Relatório do sistema T - SCAN de digitalização Pág. 01	57
A.3	Relatório do sistema T - SCAN de digitalização Pág. 02	58
A.4	Discritivo técnico do revelador - D 70 Metal Check	59
	Referências	60

Lista de Tabelas

1.1	Tabela de dados técnicos do motor Ford 1.0 TiVCT.	3
3.1	Tabela dos parâmetros de malha usados no <i>Hypermesh</i>	32
3.2	Tabela do estudo da convergência de malha no <i>Hypermesh</i>	32
3.3	Composição da malha relativa ao tipo elementos da biblioteca <i>Nastran</i> . . .	34
3.4	Parâmetros do modelo viscoso definidos no Fluent.	35
3.5	Propriedades dos materiais da biblioteca do Fluent.	36
3.6	Valores do campo <i>Solution Initialization</i> do <i>Fluent</i>	38
4.1	Perda de pressão ao longo da geometria do sistema de admissão de ar. . . .	47
4.2	Variação da perda de pressão na entrada e saída para o estudo do fator de envelhecimento do filtro.	51

Lista de Figuras

1.1	Motor à combustão com destaque ao sistema de admissão de ar.	2
1.2	Motor Ford 1.0 TiVCT.	3
1.3	Vista explodida de um coletor de admissão automotivo.	4
1.4	Exemplo de um modelo veicular complexo.	5
3.1	Gráfico de fluxo de processo do estudo do escoamento de um AIS	24
3.2	Foto do coletor de admissão cedido pela Ford.	25
3.3	Atos Core - Optical 3D Scanner.	26
3.4	Steinbichler T-Scan CS.	26
3.5	Gráfico de fluxo de digitalização.	27
3.6	Superfície digitalizada.	28
3.7	Componente sanfonado posicionado para escaneamento à laser.	29
3.8	Montagem de todas as superfícies digitalizadas.	29
3.9	Duto delimitando região sólida e malha do volume interno.	31
3.10	Detalhe da região da malha que representa o filtro de ar.	32
3.11	Figura em corte da malha com detalhe para os diferentes elementos utilizados.	33
3.12	Figura das condições de contorno para o <i>Inlet</i> e <i>Outlet</i> no <i>Fluent</i>	36
3.13	Figura do gráfico resíduos por iterações da simulação.	39
4.1	Gráfico de vetores do perfil de velocidades em todo o domínio do objeto de estudo.	41
4.2	Gráfico de vetores do perfil de velocidades em detalhe no bocal de admissão na entrada do sistema.	42
4.3	Figura com vista superior e lateral plotando os vetores do campo de velocidade na região porosa.	44
4.4	Figura com o corte longitudinal do domínio no plano ZY plotando o campo de velocidades.	45
4.5	Figura com os planos de controle identificados ao longo do domínio de estudo.	46

Lista de Gráficos

3.1	Gráfico do estudo da convergência de malha no <i>Hypermesh</i>	33
4.1	Gráfico de linha com a média de pressão ao longo da geometria do coletor de admissão de ar.	48
4.2	Gráfico da variação da perda de pressão dentro da região porosa para o estudo do fator de envelhecimento do filtro.	49
4.3	Gráfico de linha com a variação da pressão entre a região de entrada e saída para quatro diferentes estudos de condição do filtro de ar.	50

Lista de Siglas

1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
BL	<i>Boundary Layer</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>
DES	<i>Detached eddy simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FOAM ...	<i>Field Operation And Manipulation</i>
HPC	<i>High Performance Computer</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos
Open	<i>Open Source</i>
PISO	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
RANS ...	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>
RPM	rotações por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIMPLE .	<i>Semi Implicit Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi Implicit Linked Equations Consistent</i>
SST	<i>Shear stress transport</i>
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>
TiVCT ...	<i>Twin Independent Variable Camshaft Timing</i>

Lista de Símbolos

U	Magnitude da velocidade
\mathbf{u}	Vetor velocidade
T	Torque
ρ	Densidade
μ	Coefficiente de viscosidade dinâmica ou absoluta
t	Tempo
r	Posição
A	Área
ℓ	Comprimento
\mathbf{f}	Força externa
p	Pressão
Re	Número de Reynolds
n	Porosidade
K	Coefficiente de Permeabilidade
k	Energia Cinética de Turbulência
ϵ	Taxa de dissipação de energia de turbulência
Ω_t	Momento de um fluido
∇	Operador Gradiente
∇^2	Operador Laplaciano
∂	Derivada Parcial

Introdução

1.1 *Objetivo*

Durante os últimos cem anos a indústria automobilística vem usando a mesma tecnologia em termos de motores a combustão. Conquistas no sentido de obter maior conhecimento desse processo, técnicas de produção e otimização no perfil aerodinâmico levaram, no entanto, a importantes evoluções. Novos métodos construtivos vêm garantindo maior precisão de fabricação, o que significa, atualmente tolerâncias dimensionais menores, menos folgas e menor perda de energia por atrito e vibração. Novos materiais e ligas foram desenvolvidas, como o uso de alumínio e ligas de titânio, o que permite conjuntos mais leves e menores. Motores modernos possuem sistemas de acessórios com rotação variável, como é o caso dos compressores do ar condicionado e da bomba de água do sistema de arrefecimento ou do alternador. Isso permite alternar as cargas aplicadas ao motor, e criar regimes de funcionamento mais eficientes. Carros modernos possuem direção elétrica, dispensando assim uma carga a mais que seria do bomba de direção hidráulica. A eletrônica do sistema de injeção moderno (injeção direta) aumentou a eficiência dos motores. O mesmo com coletores de ar com geometria variável. O comando do motor com geometria variável na admissão e no escape permitiu uma melhor performance, assim como a evolução dos combustíveis de alta octanagem.

Neste trabalho o foco é voltado para sistemas de admissão, que mudou muito ao longo do tempo. Hoje, em carros modernos, podemos dizer que ele favorece a eficiência ao garantir a entrada do oxigênio no interior do motor com a temperatura mais próxima a ambiente, já que sua geometria tende a coletar o ar externo e não o de dentro do cofre do motor, que é mais quente. O sistema também garante ar mais limpo, já que há um filtro de ar que não permite a passagem de partículas suspensas no ar do ambiente. No entanto, analisando o processo apenas do ponto de vista do escoamento, o sistema de admissão de ar só traz prejuízo, pois cria resistência ao escoamento, ao perder pressão, piorando o desempenho do motor. Após grandes esforços da indústria automobilística, novos dispositivos passaram a contar com projetos dimensionados para atender as necessidades dos motores e dos demais requisitos de projetos, de forma a obter um sistema em harmonia com todas essas solicitações. A intenção é reduzir o prejuízo causado pela perda de pressão dos dutos de ar do sistema de admissão.

Com o objetivo de melhor entender essas perdas de pressão e os meios de tornar o sistema de admissão mais eficiente, utilizamos neste trabalho ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional - DFC - (em inglês Computational Fluid Dynamics - CFD) para definir ge-

ometrias mais eficientes e principalmente novas tecnologias de filtro, que possam garantir limpeza do sistema, aliada a uma menor perda de carga. Nesse sentido nos beneficiamos da infraestrutura em computação de alta performance - CAP (em inglês High Performance Computer - HPC) do *Centro Universitário SENAI CIMATEC*, através do seu HPC Yemoja, e das facilidades laboratoriais de digitalização de superfícies tridimensionais.

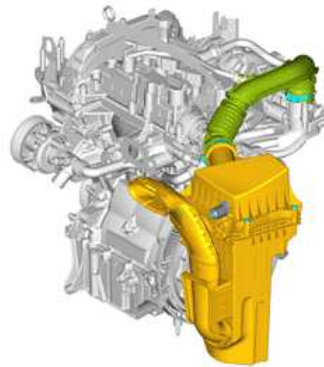


Figura 1.1: Motor à combustão com destaque ao sistema de admissão de ar.

Fonte: Manual de serviço ford Ka 2015 em (COMPANY, 2015).

As técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) vêm sendo cada vez mais utilizadas no ramo da engenharia. Na área de projetos de motores de combustão interna e seus subsistemas em particular, essas técnicas são muito utilizadas especialmente em problemas de cálculo do escoamento no sistema de admissão e de escape dos gases do processo de combustão. Também há aplicações que ajudam no dimensionamento de condutos de ar através do cálculo das perdas de carga ao longo da geometria proposta com utilização de filtros de ar e principalmente da variação de temperatura do sistema. Um exemplo desse sistema pode ser visto na Figura 1.1.

1.2 Objeto de estudo e definição do problema

O objeto de estudo principal desse trabalho é um coletor de admissão de um veículo moderno. No período em que este trabalho foi escrito foi escolhido um dos veículos que figurava entre os cinco primeiros do *ranking* dos mais vendidos de acordo com os dados fornecidos pela Fenabrave (Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores). O veículo escolhido foi o Ford Ka, modelo 2015 equipado com o motor 1.0 TiVCT. É um motor bastante atual e de concepção nova, tendo sido empregado pela primeira vez em um veículo no ano de lançamento do carro escolhido. Uma imagem mais detalhada do motor pode ser vista na Figura 1.2.



Figura 1.2: Motor Ford 1.0 TiVCT.

Fonte: Manual de serviço ford Ka 2015 em (COMPANY, 2015).

Segundo o fabricante em seu web-site esse motor tem instalação dianteira na posição transversal. O motor conta com apenas três cilindros em linha, de aspiração natural e injeção de combustível através de injetores individuais no coletor de admissão, funcionando tanto com álcool como gasolina. Conta também com comando duplo no cabeçote e acionamento por correia dentada, que permite também variação no acionamento do comando de admissão e escape. Alguns dados técnicos desse motor podem ser encontrados na Tabela 1.1:

Tabela 1.1: Tabela de dados técnicos do motor Ford 1.0 TiVCT.

Características	Valores
Válvulas por cilindro	4
Taxa de compressão	12:1
Rotação máxima	6900 rpm
Diâmetro dos cilindros	71,9 mm
Curso dos pistões	81,8 mm
Potência Álcool	85 cv @6500 rpm
Potência Gasolina	80 cv @6500 rpm
Torque Álcool	10,7 kgfm @3500 rpm
Torque Gasolina	10,2 kgfm @3500 rpm

O coletor de admissão é um sistema complexo e com vários componentes, porém basicamente podemos nos referenciar a ele através da sua principal função, que no caso é de conduzir o ar atmosférico até o interior do motor para que faça parte do processo de combustão que fornecerá movimento ao veículo. A parte que aqui será estudada é a que vemos na Figura 1.3.

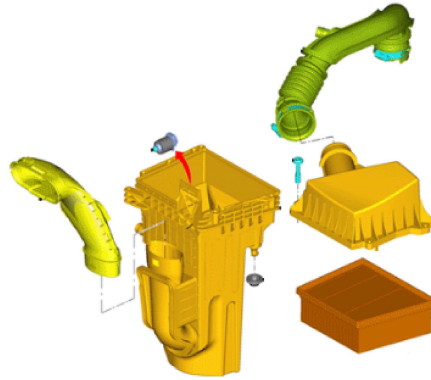


Figura 1.3: Vista explodida de um coletor de admissão automotivo.

Fonte: Manual de serviço ford Ka 2015 em (COMPANY, 2015).

1.3 Importância e motivação da pesquisa

As ferramentas de simulação computacional surgem aliadas ao desenvolvimento de recursos computacionais, garantindo uma grande vantagem competitiva, pois acompanhadas do desenvolvimento assistido permitem que engenheiros proponham soluções com base em protótipos digitais. Isso reduz o tempo de desenvolvimento dos componentes e permite um custo total mais baixo, pois em ambiente digital é possível trabalhar com diversas propostas e escolher a que melhor atende as necessidades do projeto.

Ao fim do ciclo de desenvolvimento é confeccionado apenas um protótipo funcional com a intenção apenas de executar testes de validação e homologação dos órgãos legais. Assim é possível desenvolver projetos de forma mais eficiente e de maneira multidisciplinar, haja visto que um veículo é a união de diversas competências. Para o desenvolvimento do projeto de um carro, é necessário subdividir as áreas que são dedicadas ao desenvolvimento de sistemas que compõe o veículo, como: sistema de direção, estrutura, suspensão, rodas, freios e trem de força. (SCHRAMM; HILLER; BARDINI, 2014) Essa é uma divisão clássica do ponto de vista da dinâmica veicular, com enfoque no desenvolvimento dos sistemas dinâmicos do carro, um exemplo que vemos na Figura 1.4. Porém, deve ser considerado que um veículo também precisa agregar conforto e tecnologia, logo falta adicionar nessa lista áreas importantes como "elétrica" e "sistemas de conforto interno".

1.4 Revisão Teórica

Muitos trabalhos experimentais e testes físicos são desenvolvidos com o objetivo de coletar os dados necessários sobre o comportamento desse sistema. Entretanto, isso só pode ser feito com protótipos físicos reais, que para serem produzidos necessitam de um elevado

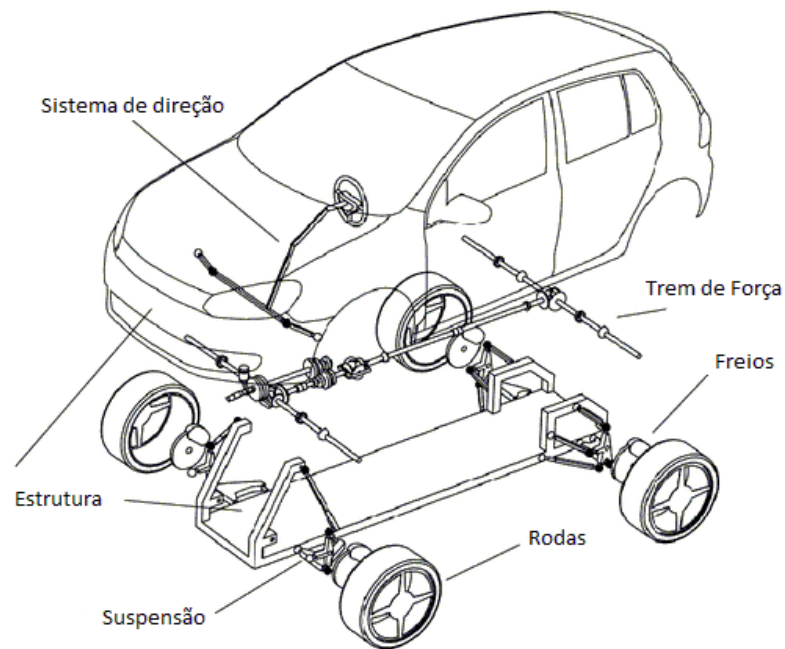


Figura 1.4: Exemplo de um modelo veicular complexo.

Fonte: Adaptado (SCHRAMM; HILLER; BARDINI, 2014).

grau de maturidade do projeto e altos custos associados, pois são fabricados utilizando técnicas avançadas de prototipagem. Por esse motivo durante a fase de projeto se torna inviável a confecção de protótipos apenas para verificação da *performance* dos componentes. Para isso são calculados valores estimados de desempenho com base em modelos pré-definidos, o que insere incertezas no dimensionamento dos componentes e reduz a capacidade criativa dos engenheiros durante a fase de desenvolvimento.

O estudo do escoamento é um braço da Dinâmica dos Fluidos. Este ramo da Física trata do transporte de massa, momento e calor, em regimes de escoamento laminar e turbulento. (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

1.5 Aspectos Metodológicos

Este estudo terá um enfoque maior no sistema de trem de força, que basicamente é formado pelo motor e transmissão de um veículo à combustão, especificamente no subsistema do coletor de admissão de ar, que é o componente do veículo responsável por conduzir o ar atmosférico até o interior do motor.

Essa pesquisa foi elaborada com a intenção de reunir os conhecimentos básicos necessários para o estudo de um escoamento em meio poroso de um coletor de admissão automotivo, e como produto principal desse estudo o desenvolvimento de uma simulação através do software *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1*, que busca representar o escoamento do ar no interior de um coletor de admissão com filtro de ar (elemento poroso).

Para isso algumas etapas iniciais se fazem necessárias, como:

- Revisão teórica dos conceitos físicos e matemáticos abordados no estudo;
- Definição do objeto de estudo, coletor de admissão automotivo e filtro de ar, assim como a coleta dos seus dados geométricos;
- Construção de um modelo de volumes finitos que represente o volume interno do coletor de admissão e o filtro de ar;
- Definição das condições de contorno e configuração do *solver* para execução da simulação;
- Pós-processamento dos dados coletados e plotagem dos resultados obtidos;

Todas as etapas descritas foram executadas no *Centro Universitário SENAI CIMATEC* utilizando recursos e equipamentos da própria instituição através de competências cruzadas do Departamento de Pesquisa Industrial (DPI) e do HPC Yemoja. A pesquisa tem duas grandes áreas de estudo, que são: fenômenos dos transportes e escoamento em meios porosos.

1.6 Organização da Dissertação de Mestrado

Este documento apresenta cinco capítulos e está estruturado da seguinte forma: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Resultados e Discussões, e Considerações finais.

Fundamentação teórica

Para simular o escoamento do ar dentro do coletor de admissão, considerando o meio poroso que há no sistema, é necessário antes entender os fundamentos teóricos básicos e a matemática que as ferramentas de simulação utilizam para modelar esses fenômenos físicos. Apesar de ser utilizado um *software* comercial, é importante entender como são resolvidas as equações de governo do escoamento, como é tratado o fenômeno da turbulência, os valores médios dos campos de velocidade, e a formulação para o escoamento em meio poroso. Outro tópico que será abordado é relativo às técnicas de digitalização tridimensionais utilizadas para se obter um desenho com dimensões geométricas reais a partir de um componente físico.

2.1 *Dinâmica dos fluidos computacional*

Através da observação diária, é possível notar que o movimento dos líquidos e gases possui um comportamento bastante variado, dependendo do tipo de escoamento e do tipo de fluido. A dinâmica dos fluidos estuda esse fenômeno, e seu objetivo é saber o que acontece em um determinado arranjo, e entender o porquê (TRITTON, 2012).

2.1.1 *Fluido*

A principal diferença entre sólido e fluido é o comportamento que apresentam em reação às forças externas que lhes são aplicadas. Em termos gerais, enquanto os sólidos são capazes de suportar tensões de cisalhamento, os fluidos são incapazes de resistir a essas tensões. Qualquer que seja a força tangencial aplicada ao fluido, este irá mover-se e deforma-se continuamente ao longo da sua aplicação. Já os sistemas granulares são constituídos por um grande número de grãos e não se comportam completamente nem como sólidos nem como fluidos. Eles se empacotam como sólidos, mas escoam como fluidos. Os fluidos geralmente são separados em duas classes, líquidos e gases. Um líquido é difícil de ser comprimido e sua forma muda de acordo com o recipiente que o contém. Por outro lado, um gás é fácil de ser comprimido, e expande-se completamente preenchendo o recipiente que o contém. No entanto, no que toca ao escoamento, em particular no regime tratado neste trabalho, os gases também se comportam como incompressíveis (TRITTON, 2012). Um fluido, portanto, é qualquer substância que se deforma continuamente sob a ação de uma força tangencial. Como veremos adiante, quando a taxa de deformação é diretamente

proporcional à tensão de cisalhamento, se diz que o fluido é do tipo *newtoniano*, caso contrário temos um fluido *não-newtoniano*.

Os fluidos tratados nesse estudo são clássicos e satisfazem às condições abaixo

- Será considerado apenas o tipo de escoamento de fluido incompressível. Esse é o tipo de escoamento em que as variações de pressão não produzem variações significativas de densidade. Em escoamentos isotérmicos. Isso significa que a densidade é uma constante, caso contrário, será uma função da temperatura apenas.
- O fluido é do tipo newtoniano, sendo essa uma declaração sobre as propriedades físicas que afetam os estresses desenvolvidos dentro de um fluido como resultado de seu movimento.

Em resumo temos nesse trabalho um escoamento interno de fluido viscoso e incompressível, ou seja um fluido newtoniano, que é a principal característica do tipo de fluido que será encontrado no coletor de admissão automotivo.

2.1.2 Teorema de Transporte de Reynolds

O teorema de transporte de Reynolds compõe a base matemática para a obtenção dos teoremas de conservação que permitiram calcular a dinâmica do escoamento de um fluido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Vamos considerar uma região do espaço, de volume Ω_t - portanto permitimos que esta região se mova - delimitada por uma superfície envolvente $\partial\Omega_t$. Seja uma função (escalar, vetorial ou tensorial, mas no presente iremos usar vetorial) $\vec{f}(\vec{x}, t)$. Seja $\vec{n}(\vec{x}, t)$ o versor normal à superfície envolvente no ponto \vec{x} , no instante t . Vamos definir como $\vec{u}^b(\vec{x}, t)$ a velocidade com que se move a superfície envolvente em um ponto \vec{x} , no instante t . Desse modo, o Teorema de Transporte, nos diz que, sendo

$$\int_{\Omega_t} \vec{f}(\vec{x}, t) dV \quad (2.1)$$

a integral da função $\vec{f}(\vec{x}, t)$ no volume - note-se que tanto a função quanto a superfície envolvente são dinâmicas - a taxa de variação desta integral fica:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} \vec{f} dV = \int_{\Omega_t} \frac{\partial \vec{f}}{\partial t} dV + \int_{\partial\Omega_t} (\vec{u}^b \cdot \vec{n}) \vec{f} dA \quad (2.2)$$

Vamos usar na Dinâmica dos Fluidos este teorema (Teorema de Transporte de Reynolds) identificando o movimento do volume com o escoamento do fluido. Assim, identificamos

a velocidade do elemento de superfície $\vec{u}_b(\vec{x}, t)$ com o campo de velocidade do fluido na posição correspondente, $\vec{u}(\vec{x}, t)$:

$$\vec{u}_b \cdot \vec{n} = \vec{u} \cdot \vec{n} \quad (2.3)$$

Podemos agora substituir a equação 2.3 na equação 2.2 e obter uma nova formulação da equação de Reynolds específica para o escoamento de um fluido:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{\Omega_t} \vec{f} dV \right) = \int_{\Omega_t} \frac{\partial \vec{f}}{\partial t} dV + \int_{\partial\Omega_t} (\vec{u} \cdot \vec{n}) \vec{f} dA \quad (2.4)$$

Aplicando o teorema de Gauss, podemos transformar a integral de superfície da equação 2.4 e criar uma nova integral de volume:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} \vec{f}(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \vec{f}(\vec{x}, t) + \text{div}(\vec{u}(\vec{x}, t) \vec{f}(\vec{x}, t)) \right) dV \quad (2.5)$$

A fim de deixar explícita a aplicação do Teorema de Transporte de Reynolds para casos específicos da função, vamos tratar o caso das componentes de um campo vetorial

$$\vec{f} = \hat{e}_i f_i. \quad (2.6)$$

Neste caso, para cada componente teremos:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} f_i(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \left(\frac{\partial}{\partial t} f_i(\vec{x}, t) + \text{div}(\vec{u}(\vec{x}, t) f_i(\vec{x}, t)) \right) dV. \quad (2.7)$$

Para o tensor

$$\overleftrightarrow{\tau} = \hat{e}_i \tau_{ij} \hat{e}_j, \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} \tau_{ij}(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \tau_{ij}(\vec{x}, t) + \text{div}(\vec{u}(\vec{x}, t) \tau_{ij}(\vec{x}, t)) \right) dV. \quad (2.9)$$

Finalmente, para uma função escalar,

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} f(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \left(\frac{\partial}{\partial t} f(\vec{x}, t) + \text{div}(\vec{u}(\vec{x}, t) f(\vec{x}, t)) \right) dV. \quad (2.10)$$

2.1.3 Conservação de massa

Uma vez que identificamos a velocidade do movimento da superfície envoltória como a velocidade de escoamento do fluido (campo de velocidade), todo o material no interior do volume permanecerá dentro dele ao longo do tempo. Assim, fazendo a aplicação do Teorema de Transporte para uma função escalar representando o campo de densidade do fluido, $\rho(\vec{x}, t)$, temos:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} \rho(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \left(\frac{\partial}{\partial t} \rho(\vec{x}, t) + \text{div}(\vec{u}(\vec{x}, t) \rho(\vec{x}, t)) \right) dV = 0. \quad (2.11)$$

Desse modo,

$$\int_{\Omega_t} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \rho + \text{div}(\rho \vec{u}) \right\} dV = 0, \quad (2.12)$$

em qualquer domínio e qualquer instante inicial. Assim teremos a equação da continuidade (de fato, conservação de massa),

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0. \quad (2.13)$$

É conveniente, como veremos logo abaixo, aplicar o teorema de Reynolds para cada componente de um vetor f , definindo, por exemplo, $f_x = \rho \phi$, sendo ρ e ϕ campos escalares:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \vec{u}) = \left[\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \text{grad}) \phi \right] + \phi \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) \right] \quad (2.14)$$

Usando a conservação de massa da equação 2.13 temos que:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \vec{u}) = \left[\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad} \right] \rho \phi \quad (2.15)$$

Sendo assim, definimos a derivada material como sendo:

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad} \quad (2.16)$$

2.1.4 Conservação de momento

Em seguida passamos para a conservação da quantidade de movimento (momento). O momento dentro do volume Ω_t é dado por:

$$\int_{\Omega_t} \rho(\vec{x}, t) \vec{u}(\vec{x}, t) dV. \quad (2.17)$$

Usando a variação do momento (segunda lei de Newton), sendo $\vec{F}(\vec{x}, t)$ a força de volume agindo no fluido e $\overleftrightarrow{T}(\vec{x}, t)$ a força de cisalhamento.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega_t} \rho(\vec{x}, t) \vec{u}(\vec{x}, t) dV = \int_{\Omega_t} \vec{F}(\vec{x}, t) dV + \int_{\partial\Omega_t} \overleftrightarrow{T}(\vec{x}, t) \hat{n}(\vec{x}, t) dV, \quad (2.18)$$

Vamos aplicar o balanço de forças para o caso particular de um pequeno elemento de volume cúbico e coordenadas cartesianas, desconsiderando forças de volume, de modo que a força total por unidade de volume do fluido é igual o somatório do estresse em cada eixo de coordenadas dividido pelo volume $\delta x \delta y \delta z$. Sendo assim, para a componente x , chamando de p a pressão exercida sobre cada face do cubo, e τ_{ij} a componente do tensor de stress de cisalhamento gerando a força na direção i sobre a superfície do cubo cuja normal é \hat{e}_j (SCHLICHTING; GERSTEN, 2016):

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.19)$$

Dessa forma as componentes do momento para cada eixo coordenado serão:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z}, \quad (2.20)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}, \quad (2.21)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z}, \quad (2.22)$$

2.1.5 Equação de Navier-Stokes para um fluido newtoniano

As equações de Navier Stokes são equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos. São Equações Diferenciais Parciais (EDP) que permitem determinar os campos de velocidade e de pressão num escoamento.

Em muitos escoamentos, as tensões viscosas podem ser expressas como funções da taxa de deformação local ou taxa de deformação. Nos fluxos tridimensionais, a taxa de deformação local é composta pela taxa de deformação linear e pela taxa de deformação volumétrica (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A taxa de deformação linear de um elemento fluido possui nove componentes em três dimensões, seis das quais são independentes em fluidos isotrópicos (SCHLICHTING; GERSTEN, 2016). A taxa de deformação é denotada pelo símbolo s_{ij} . Neste caso existem três componentes de dilatação volumétrica, que são:

$$s_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad s_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad s_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.23)$$

Além disso temos seis componentes de deformação de cisalhamento linear:

$$s_{xy} = s_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.24)$$

$$s_{xz} = s_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.25)$$

$$s_{yz} = s_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.26)$$

A deformação volumétrica é dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \vec{u} \quad (2.27)$$

Em um fluido newtoniano, as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação. A forma tridimensional da lei de viscosidade de Newton para escoamentos compressíveis envolve duas constantes de proporcionalidade: a primeira, viscosidade (dinâmica), μ , para relacionar tensões a deformações lineares, e a segunda viscosidade, λ , para relacionar tensões à deformação volumétrica. As nove componentes de tensão viscosa, dos quais seis são independentes, são:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (2.28)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (2.29)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u} \quad (2.30)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.31)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.32)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.33)$$

Não se sabe muito sobre a segunda viscosidade λ , porque seu efeito é pequeno na prática. Para gases, uma boa aproximação de trabalho pode ser obtida tomando o valor $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$, (SCHLICHTING; GERSTEN, 2016). Os fluidos, neste trabalho, são considerados incompressíveis, portanto a equação de conservação de massa é $\operatorname{div} \vec{u} = 0$ e as tensões viscosas são apenas duas vezes a taxa local de deformação linear da viscosidade dinâmica.

As equação de Navier-Stokes pode ser escrita da forma mais útil para o desenvolvimento do método de volume finito, que são:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) \quad (2.34)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) \quad (2.35)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) \quad (2.36)$$

2.1.6 Tipos de escoamento - Número de Reynolds

Em seguida vamos transformar a equação de Navier-Stokes numa forma adimensional. Para isso vamos definir uma escala natural de comprimento, L , uma escala natural de velocidade, U , uma escala natural de tempo, $T = \frac{L}{U}$, e uma escala natural de pressão ρU^2 . Com isso alteramos as variáveis na equação para:

$$x' = \frac{x}{L} \dots, \quad u' = \frac{u}{U} \dots, \quad t' = \frac{t}{T}, \quad p' = \frac{p}{\rho U^2}. \quad (2.37)$$

Definindo o parâmetro $Re = \frac{UL}{\nu}$, onde $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, ficamos com a equação de Navier-Stokes adimensional:

$$\nabla' \cdot \mathbf{u}' = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t'} + \mathbf{u}' \cdot \nabla' \mathbf{u}' = -\nabla'(\Delta p)' + \frac{1}{Re} \nabla'^2 \mathbf{u}' \quad (2.38)$$

O coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re) é uma grandeza adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento. Ele é usado para prever a transição do escoamento laminar para o turbulento, e tem seu nome oriundo de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro hidráulico irlandês, quem primeiro popularizou seu uso em 1883 (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

Na equação 2.38 costuma-se chamar o termo da esquerda de "força de inércia" (o termo que porta informação da massa), o primeiro termo à direita de força de pressão, e o segundo de força viscosa. A razão entre o primeiro e o terceiro termos é da ordem do número de Reynolds (SCHLICHTING; GERSTEN, 2016):

$$Re \sim \frac{\text{força inercial}}{\text{força viscosa}} \quad (2.39)$$

O número de Reynolds é a razão de forças inerciais e forças viscosas dentro de um fluido que é submetido a diferentes velocidades de escoamento. O número de Reynolds quantifica a importância relativa desses dois tipos de forças para dadas condições de escoamento, e é um guia para quando o fluxo turbulento ocorrerá em uma situação particular.

A significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo) e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso de um fluxo de ar em uma tubulação, admite-se o valor de 2.300 como limite (TRITTON, 2012). Desta forma, para valores menores que 2.300 o

fluxo será laminar, e para valores maiores que 2.300 o fluxo será turbulento. Sendo assim subdividimos o fluxo de maneira simplificada em duas categorias, onde:

- Escoamentos com altos números de Reynolds, $Re > 2.300$, são considerados turbulentos, onde as forças inerciais são dominantes, e tendem a produzir turbilhões caóticos, vórtices e outras instabilidades no escoamento;
- Escoamentos com baixo números de Reynolds, $Re \leq 2.300$, são considerados laminares, onde as forças viscosas são dominantes.

2.1.7 Média de Reynolds para a equação de Navier-Stokes - RANS

Os campos de variáveis hidrodinâmicas de um escoamento turbulento são campos aleatórios. Cada campo possui uma densidade multidimensional de probabilidades. Em consequência, qualquer função das variáveis aleatórias num escoamento turbulento pode ter sua média estatística calculada como a integral do produto dessas funções pela densidade de probabilidades conjunta (POPE, 2000).

- O valor médio é entendido como a média tomada sobre todos os valores possíveis da grandeza, medida num mesmo instante em um número infinito de réplicas idênticas do experimento. Na prática, vamos necessitar, para ter um resultado satisfatoriamente acurado, um número muito grande de medidas tomadas em uma longa série de repetições de experimentos similares.
- Na prática, não temos essa série de medidas, e teremos que obter a média numa única amostra. Neste único experimento teremos que fazer a média baseados em medidas num intervalo de tempo e espaço.
- Na mecânica estatística esta mudança de conceito se baseia na hipótese de que, quando o intervalo de tempo se torna infinitamente grande, a média temporal converge para a média estatística (média no ensemble). Esta é a hipótese ergódica. Para tal, é necessário que o resultado da média temporal seja independente do instante inicial, e que o intervalo de tempo seja suficientemente longo. A primeira condição define o processo como sendo estatisticamente estacionário.

Quais as condições nas quais os valores médios obtidos com médias temporais e espaciais quando os intervalos são grandes convergem para as médias obtidas com as distribuições de probabilidades? Seja $\tilde{u}_T(t)$ o valor médio obtido num intervalo T :

$$\tilde{u}_T(t) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t + \tau) d\tau. \quad (2.40)$$

Note que a relação abaixo torna-se infinitamente pequena quando $T \rightarrow \infty$.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_T(t) - \tilde{u}_T(t_1) &= \frac{1}{T} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t + \tau) d\tau - \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t_1 + \tau) d\tau \right\} \\ &= \frac{1}{T} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}+t}^{-\frac{T}{2}+t_1} u(s) ds - \int_{\frac{T}{2}+t}^{\frac{T}{2}+t_1} u(s) ds \right\} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Desse modo, se os limites de $\tilde{u}_T(t)$ e $\tilde{u}_T(t_1)$ existirem quando $T \rightarrow \infty$, eles serão independentes do argumento do tempo. Assim sendo, para que a média temporal $\tilde{u}_T(t)$ seja igual à média estatística $\overline{u(t)}$ é necessário que esta seja independente do tempo:

$$\overline{u(t)} = U = \text{constante}. \quad (2.42)$$

Em geral o estudo da Física da turbulência requer as soluções temporais da equação de Navier-Stokes. Em geral, as soluções de escoamento interessantes para problemas de Engenharia, requerem apenas as médias temporais dos campos aleatórios. Neste problema que tratamos, especificamente, estaremos interessados apenas nessas médias temporais. Vamos precisar escrever as equações equivalentes às de Navier-Stokes para os campos médios. Para tanto, seguimos os passos propostos por Reynolds, separando os campos aleatórios em dois termos, suas médias mais suas flutuações em torno dessas médias:

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'; \quad \rho = \bar{\rho} + \rho'; \quad \dots \quad (2.43)$$

Equação de continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.44)$$

Fazendo a média:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.45)$$

Logo, subtraindo termo a termo,

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \quad (2.46)$$

Isto é, tanto o movimento médio quanto as flutuações obedecem a uma equação de continuidade. Com a ajuda da equação de continuidade podemos escrever a equação de Navier-Stokes:

$$\rho \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u \quad (2.47)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v \quad (2.48)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right\} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta w \quad (2.49)$$

Aplicando a média a essas equações,

$$\rho(\bar{\vec{u}} \cdot \nabla)U = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \Delta U - \rho \left\{ \frac{\partial(\overline{(u')^2})}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right\} \quad (2.50)$$

$$\rho(\bar{\vec{u}} \cdot \nabla)V = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \Delta V - \rho \left\{ \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{(v')^2})}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right\} \quad (2.51)$$

$$\rho(\bar{\vec{u}} \cdot \nabla)W = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \Delta W - \rho \left\{ \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{(w')^2})}{\partial z} \right\} \quad (2.52)$$

Nas equações acima já substituímos os valores médios das componentes da velocidade e da pressão por U, V, W e P .

2.1.8 Modelo k -Epsilon

O modelo de $k - \epsilon$ é um modelo baseado nas equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k) e sua taxa de dissipação (ϵ). O modelo $k - \epsilon$ foca nos mecanismos que afetam a energia cinética da turbulência.

Algumas definições preliminares são necessárias. Inicialmente temos que a energia cinética instantânea $k(t)$ do escoamento turbulento é a soma da energia cinética média $K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2)$ e da energia cinética de turbulência $k = \frac{1}{2}(\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2})$, sendo assim temos que:

$$k(t) = K + k \quad (2.53)$$

Além disso, se faz necessário usar extensivamente a taxa de deformação e as tensões turbulentas nas equações deste modelo de turbulência. Para facilitar os cálculos subsequentes, é comum escrever os componentes da taxa de deformação s_{ij} e a tensão τ_{ij} na forma de tensor (matriz):

$$s_{ij} = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} & s_{xz} \\ s_{yx} & s_{yy} & s_{yz} \\ s_{zx} & s_{zy} & s_{zz} \end{bmatrix} \quad e \quad \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

A decomposição da taxa de deformação de um elemento fluido em um escoamento turbulento para um componente médio e flutuante, $s_{ij}(t) = S_{ij} + s'_{ij}$, produz novos elementos da matriz:

$$s_{xx}(t) = S_{xx} + s'_x x = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial x} \quad (2.55)$$

$$s_{yy}(t) = S_{yy} + s'_y y = \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad (2.56)$$

$$s_{zz}(t) = S_{zz} + s'_z z = \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial z} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} s_{xy}(t) = S_{xy} + s'_x y &= s_{xy}(t) = S_{yx} + s'_y x \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial y} + \frac{\partial v'}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} s_{xz}(t) = S_{xz} + s'_x z &= s_{zx}(t) = S_{zx} + s'_z x \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} s_{yz}(t) = S_{yz} + s'_y z &= s_{zy}(t) = S_{zy} + s'_z y \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (2.60)$$

A dissipação de energia cinética turbulenta é causada pelo trabalho feito pelos menores redemoinhos (*eddies*) contra o estresse viscoso. A taxa de dissipação por unidade de volume é normalmente escrita como o produto da densidade ρ e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa, ϵ , definida como:

$$\epsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \quad (2.61)$$

É possível desenvolver equações de transporte similares para todas as outras grandezas de turbulência, incluindo a taxa de dissipação viscosa ϵ . A equação ϵ exata, no entanto, contém muitos termos desconhecidos e incomensuráveis. O modelo padrão $k - \epsilon$ possui duas equações modelo, uma para k e outra para ϵ , com base em sua melhor compreensão do processo relevante, causando mudanças nessas variáveis. Sendo assim, é possível resolver duas equações de transporte separadas.

O modelo padrão de $k - \epsilon$ do *Ansys Fluent* se enquadra nesta classe de modelos e tornou-se o campo de trabalho dos cálculos de engenharia prática dos estudos de escoamento no domínio do tempo desde que foi proposto por Launder e Spalding ([ANSYS, 2010](#)).

Usamos k e ϵ para definir a escala de velocidades ϑ e a escala de comprimento l representativas da turbulência em larga escala como segue:

$$\vartheta = k^{\frac{1}{2}} \quad l = \frac{k^{\frac{1}{2}}}{\epsilon} \quad (2.62)$$

Logo, para o modelo padrão de $k - \epsilon$, se faz necessário resolver as equações de transporte para k e ϵ abaixo, onde simplificaremos a notação de modo que $\vec{U} \equiv \hat{u}$:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \vec{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.64)$$

Essa equação de transporte para os valores de k e ϵ possui cinco constantes ajustáveis, que são: $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}$ e $C_{2\epsilon}$. O modelo $k - \epsilon$ padrão emprega valor para as constantes que são obtidas pelo ajuste abrangente de dados para uma ampla gama de escoamentos turbulentos:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09 \\ \sigma_k &= 1.00 \\ \sigma_\epsilon &= 1.30 \\ C_{1\epsilon} &= 1.44 \\ C_{2\epsilon} &= 1.92 \end{aligned} \quad (2.65)$$

O modelo de equações de transporte para k é derivado da equação exata, enquanto a equação de transporte do modelo para ϵ foi obtida usando o raciocínio físico e tem pouca semelhança com sua contrapartida matematicamente exata. Na derivação do modelo $k-\epsilon$, o pressuposto é que o fluxo é completamente turbulento e os efeitos da dissipação da energia cinética da turbulência para energia interna (vibração molecular) são desprezíveis. (ANSYS, 2010).

2.2 Porosidade

Em geologia, porosidade é a característica de uma matriz sólida conter no seu interior espaços vazios denominados como poros ou interstícios. Esses poros são mais usualmente preenchidos com fluidos. Os espaços podem ser maiores ou menores, tornando a matéria mais ou menos densa. Porosidade pode ser contrastada com permeabilidade: nem sempre uma rocha que contém fluidos em seu interior vai permitir que esse fluido flua (BEAR, 1972).

A aplicação da hipótese do *continuum* à dinâmica de fluidos em meio poroso introduz a necessidade de definir parâmetros médios macroscópicos para acomodar os fenômenos observados e habilitar a passagem do mundo microscópico para o macroscópico.

Os principais parâmetros médios são a porosidade e a permeabilidade. Seria teoricamente possível deduzir tais parâmetros. No entanto, para fins práticos eles devem ser obtidos através de experimentos reais onde os vários fenômenos relacionados a estes parâmetros são relatados.

A porosidade (n) é a fração do volume total de uma amostra porosa que é ocupada por poros ou espaços vazios de rocha. Considerando-se uma amostra porosa com um volume total (V_T) e um volume de poro (V_P), a porosidade n será definida como:

$$n = \frac{V_P}{V_T} \quad (2.66)$$

Se o cálculo da porosidade for baseado sobre a interconectividade dos poros no lugar do total de poros, teremos a porosidade efetiva. Pode-se ainda escrever a porosidade total em termos do volume de sólido da amostra porosa, sendo V_S o volume de sólidos do meio:

$$n = \frac{V_P - V_S}{V_T} = 1 - \frac{V_S}{V_T} \quad (2.67)$$

Porosidade (n), ou porosidade volumétrica, é definida como a proporção do volume do espaço vazio (U_v) para o volume (U_b) de um meio poroso (para uma amostra de rocha, por exemplo):

$$n = \frac{U_v}{U_b} = \frac{(U_b - U_s)}{U_b} \quad (2.68)$$

A medida da porosidade é muito importante para a engenharia de petróleo, pois ela determina a capacidade de armazenamento de um reservatório de gás e petróleo. Vários são os métodos utilizados para se determinar a porosidade de um material. Dentre estes pode-se citar a intrusão de mercúrio, expansão a gás, análise de imagens digitais, transmissão de raios gama e microtomografia de raios X (BEAR, 1972).

Fazendo um paralelo com o *solver* que será utilizado na solução dos problemas propostos nesse trabalho, o *software Ansys* tem à disposição várias opções de modelo para região porosa que podem ser usados para uma grande variedade de problemas monofásicos e multifásicos, incluindo fluxo através de camadas compactadas, filtros de papel, placas perfuradas, distribuidores de fluxo e bancos de tubos. Quando este modelo é utilizado, é definida uma zona da malha de volumes finitos em que o modelo de meio poroso será aplicado, sendo assim a perda de pressão no fluxo é determinada através dos dados fornecidos como entrada para o *solver* para aquela região determinada (ANSYS, 2017).

2.2.1 Lei de Darcy em meio poroso

Na dinâmica dos fluidos, a lei de *Darcy* é uma equação constitutiva fenomenológica que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso. A lei foi formulada por *Henry Darcy* com base nos resultados de experimentos, publicado em 1856 sobre o fluxo de água através de leitos de areia. Constitui também a base científica da permeabilidade de fluidos utilizados em ciências da terra (BEAR, 1972).

O coeficiente de permeabilidade (K), é um índice empregado para estabelecer parâmetros de permeabilidade dos meios porosos. Resumidamente, é um valor que representa a facilidade com que a água atravessa uma amostra. Como este índice é bastante pequeno numericamente, foi convencionado expressar seu resultado em forma polinomial.

Nos fluxos laminares através de meios porosos, a queda de pressão é tipicamente proporcional à velocidade, sendo assim a constante C_2 , o coeficiente de ordem 2, pode ser considerado zero. A constante C_2 é conhecida como fator comum, e é um parâmetro de controle da instabilidade do sistema. Ignorando a aceleração e a difusão convectivas, o

modelo de meio poroso reduz-se então à Lei de *Darcy* (ANSYS, 2017), onde:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha} \vec{v} \quad (2.69)$$

A queda de pressão que *ANSYS Fluent* calcula em cada uma das três direções de coordenadas (x,y,z) dentro da região porosa é dada por:

$$\nabla p_x = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{xj}} \nu_j \Delta n_x, \quad (2.70)$$

$$\nabla p_y = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{yj}} \nu_j \Delta n_y, \quad (2.71)$$

$$\nabla p_z = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{zj}} \nu_j \Delta n_z, \quad (2.72)$$

onde α_{ij}^{-1} são as entradas na matriz D da equação para as perdas viscosas e inerciais, ν_j são as componentes de velocidade nas direções x,y e z , e Δn_x , Δn_y e Δn_z são as espessuras do meio nas direções x,y e z (ANSYS, 2017).

2.3 Digitalização tridimensional

Scanner 3D é nome associado ao aparelho capaz de analisar um objeto real e transformá-lo em um modelo digital tridimensional. Existem várias tecnologias diferentes que podem ser usadas para construir um dispositivo de digitalização tridimensional, sendo que cada tecnologia possui suas limitações, vantagens e custos. Existem limitações que são associadas ao tipo de objeto que se deseja digitalizar, por exemplo, tecnologias óticas podem encontrar muita dificuldade com objetos brilhantes, espelhados ou transparentes, por outro lado há a vantagem de ser um método não destrutivo (STROBL; MAIR; HIRZINGER, 2011).

2.3.1 Digitalização 3D com contato

Nesta técnica, o objeto a ser escaneado precisa ser fixado em uma superfície extremamente plana e lisa. Então, um braço mecânico ou outro mecanismo move um sensor de toque até que ele encoste no objeto que está sendo digitalizado. Como a máquina sabe quanto

o braço se moveu até o ponto de contato, consegue determinar a posição daquele ponto. Realizando estas medidas em toda a superfície do objeto e juntando todos os pontos, o *software* pode então calcular as medidas e construir um modelo computacional em 3D do objeto.

Este tipo de método consegue fazer medidas com precisão muito alta. Entretanto, ele é bastante lento e normalmente não é usado para fazer modelos com um grande número de detalhes. Outro problema é que ele pode danificar peças muito frágeis ou medir errado materiais macios, que se deformam ao contato. Com estas características, seu uso mais frequente é na aferição de objetos industriais. Nesta aplicação, em vez de fazer modelos completos dos objetos, ele afere apenas as dimensões críticas de determinadas peças, fornecendo à engenharia de controle e qualidade uma boa visão de que os processos de fabricação estão atendendo ou não as especificações do projeto.

2.3.2 Digitalização 3D sem contato

Os *scanners* sem contato utilizam alguns tipos de radiação para fazer suas medições, que podem ser raios-x, *lasers*, infravermelho, campos magnéticos ou mesmo luz visível. As técnicas específicas para processar os dados obtidos e transformá-los em informações úteis dependem do tipo de cada radiação e isso varia de acordo com cada tecnologia de *scanners*.

A lógica geral de funcionamento de todo scanner 3D sem contato é a mesma. Ele conhece as propriedades naturais da radiação que usa. Estas propriedades são levemente alteradas quando a radiação interage com qualquer objeto. Ela pode ser refletida, refratada ou sofrer algum outro tipo de interferência. Ao medir o que aconteceu com a radiação que interagiu com o objeto, ele pode inferir informações sobre o que causou estas alterações.

Quando o *scanner* usa a radiação ambiente (como a luz, por exemplo) ele é denominado *scanner* passivo. Os que contém sua própria fonte de radiação são chamados *scanners* ativos. Existem também os sistemas híbridos que combinam informações de iluminação natural e *lasers*, por exemplo, para gerar um modelo final.

Existem tecnologias de *scanner* sem contato que para digitalizar um grande componente, cria uma nuvem de pontos e alguns pontos são definidos como âncora, para que o software seja capaz de mapear a superfície e a digitalização seja feita por partes. Dessa forma é possível obter dados da superfície do componente em processos separados, logo o *scanner* em não depende do objeto que será digitalizando, se tornando cada vez mais portátil (STROBL; MAIR; HIRZINGER, 2011).

Metodologia

Neste capítulo são apresentados os procedimentos executados desde a obtenção dos dados do objeto de estudo até a construção dos gráficos e pós-processamento dos resultados obtidos. Para isso é necessário entender quais são as etapas para transformar o modelo físico do objeto de estudo em um modelo digital, já que este trabalho se propõe ao estudo de um componente real, que é um coletor de admissão automotivo. A Figura 3.1 é um fluxograma de processo e exemplifica melhor quais são as etapas necessárias do começo ao fim.

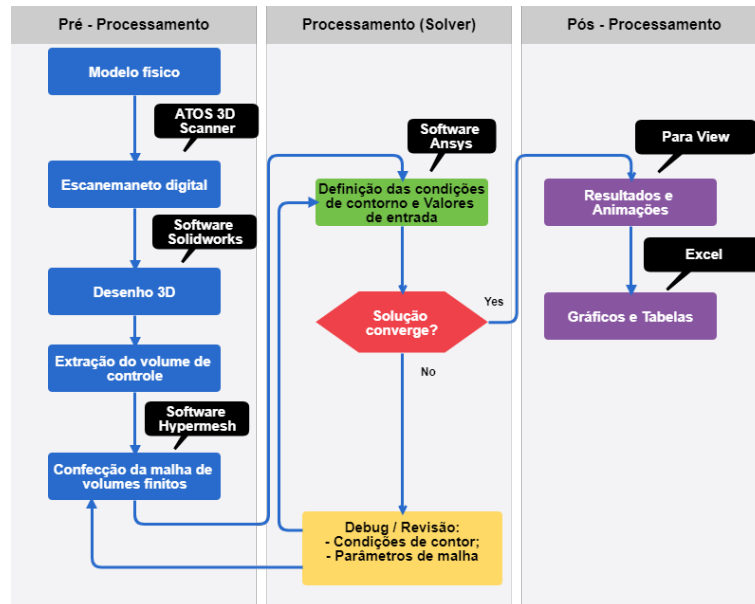


Figura 3.1: Gráfico de fluxo de processo do estudo do escoamento de um AIS

Foram utilizados para a execução desse trabalho diversos *softwares* específicos em cada fase do processo, sendo que todos os recursos, tanto em termos de *hardware* como de *software*, são provenientes do *Centro Universitário SENAI CIMATEC*. Essas ferramentas foram utilizadas em diversas fases do trabalho que podem ser classificadas em:

- Pré-processamento - Compreende todas as tarefas dedicadas à obtenção dos dados que servirão para simulação e a construção do modelo de malha de volumes finitos (domínio) que será simulado;
- Processamento - Compreende todas as tarefas relacionadas à solução das equações e cálculos, também conhecido como *Solver*;
- Pós-processamento - Compreende todas as tarefas dedicadas à visualização dos dados

obtidos do *Solver*, assim como a construção de gráficos, animações e tabelas de resultados;

3.1 Digitalização do modelo físico

Foi cedido pelo departamento de engenharia de produto da *Ford Motor Company South America* duas unidades do coletor de admissão do veículo Ford Ka, modelo 2015 que são equipados com o motor 1.0 TiVCT. Um exemplo do componente doado pode ser visto na Figura 3.2.



Figura 3.2: Foto do coletor de admissão cedido pela Ford.

Com os componentes em mãos, agora se fez necessário utilizar técnicas de digitalização tridimensional para efetuar o escaneamento do componente físico para um ambiente digital. Para isso foram utilizados dois equipamentos de marcas diferentes. Essa divisão foi necessária dada a complexidade da superfície do componente estudado, já que se trata de uma peça formada basicamente por dois tipos de materiais, borracha na parte do duto que é sanfonado e plástico rígido no restante do sistema. Cada equipamento possui características específicas que são necessárias para a execução do escaneamento em todas as partes do objeto estudado.

3.1.1 Equipamentos utilizados

O primeiro foi da marca *GOM Precise Industrial 3D Metrology*, que é conhecido como *ATOS Core Optical 3D Scanner*. Esse equipamento utiliza tecnologia óptica de digitalização sem contato, onde através de pontos pré definidos da superfície, câmeras de alta resolução coletam imagens que são processadas no computador a fim de gerar uma superfície digital do componente escaneado, um exemplo do equipamento está na Figura 3.3. O segundo equipamento é da marca *Steinbichler*, fabricante do *T-Scan CS*. Neste caso a

tecnologia utilizada é um híbrido de sensor óptico e principalmente laser. Através da tecnologia laser é possível obter dados mais precisos de geometrias complexas, um exemplo do equipamento está na Figura 3.4. Ambos os equipamentos pertencem ao Senai Cimatec e a atividade de digitalização foi feita no laboratório de digitalização tridimensional do Departamento de Pesquisas Industriais (DPI), que possui temperatura e luz calibradas nas condições ideais para a execução da tarefa.

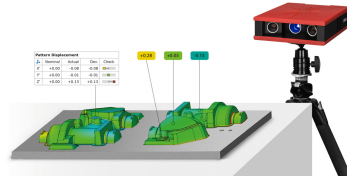


Figura 3.3: Atos Core - Optical 3D Scanner.



Figura 3.4: Steinbichler T-Scan CS.

Antes de iniciar o escaneamento é necessário uma preparação do modelo e a definição de *hardpoints*, que são pontos fixos que o *software* de escaneamento utiliza como referência. A preparação do modelo compreende três etapas básicas que são: desmontagem das partes, limpeza e aplicação de pó revelador.

A desmontagem é necessária para facilitar o posicionamento, garantir uma menor área de sombra e uma melhor posição para o operador do equipamento, já a limpeza é fundamental para uma boa aderência do pó revelador. Caso a superfície tenha gordura ou óleo é recomendado a aplicação de álcool, nos demais casos apenas passar um pano seco ou úmido já é suficiente. Após a limpeza é necessário a utilização de um pó revelador, neste caso foi usado o revelador não aquoso D-70 da marca *Metal Check*. Essa é uma etapa importante pois o revelador é fundamental para o funcionamento dos equipamentos.

Antes de executar a digitalização é necessário posicionar os *hardpoints*, que servem de âncora para o *software* que montará as imagens adquiridas, já que o processo de digitalização se dá por sobreposição de imagens. Os pontos de controle são fundamentais para a montagem das imagens e construção da superfície tridimensional, são necessários em ambos os equipamentos utilizados. Um exemplo de todo esse fluxo de trabalho pode ser visto no Gráfico 3.5, que detalha cada etapa. Em alguns casos se faz necessário o retrabalho da peça, sendo feita novamente a limpeza e aplicação do pó revelador, porém uma vez posicionados os pontos de controles, esses não devem ser modificados, pois são a referência fundamental do *software* de digitalização. Caso seja necessária a movimentação do *hardpoint*, então o processo de digitalização deve ser recomeçado em parte ou integralmente, a depender da estratégia utilizada no começo da tarefa.

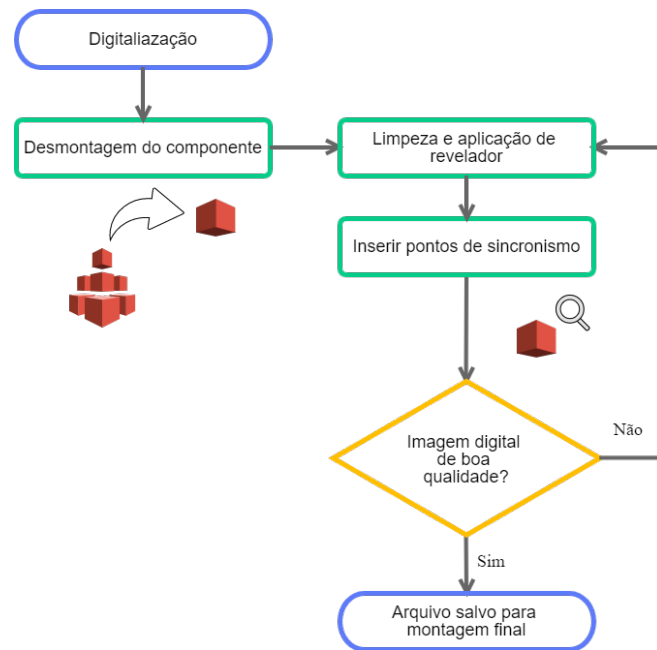


Figura 3.5: Gráfico de fluxo de digitalização.

3.1.2 Confecção do modelo digitalizado

A etapa de digitalização é feita para cada componente que foi desmontado de forma individualizada. Assim foram criados arquivos únicos com o escaneamento de cada parte que compõe o sistema. Essa divisão se faz necessária para garantir precisão durante o processo e limitar o movimento relativo dos componentes que são montados. Apesar de ter sido utilizado duas tecnologias diferentes, o princípio de funcionamento para a construção dos arquivos digitais de ambos os equipamentos é bastante similar. Em resumo, o que acontece é: através dos sensores que compõe os equipamentos o sistema faz milhares de medições da superfície de interesse, o *software* lista cada ponto medido em um sistema de coordenadas espaciais, e assim é formado uma nuvem de pontos. Cruzando as imagens com os pontos obtidos o sistema é capaz de fazer interpolações e delimitar pequenas unidades de superfícies que serão a base da criação de um arquivo de malha de elementos triangulares no formato STL (Linguagem Triangular Padrão). Um exemplo desse arquivo de saída pode ser visto na Figura 3.6.

Exclusivamente no caso do escaneamento do duto sanfonado, foi necessário utilizar o equipamento que tem tecnologia a laser, o *T-Scan CS*. Isso aconteceu porque o sistema com base na tecnologia óptica necessitava que a peça fosse movimentada, para obter imagens em diferentes ângulos, sendo que o equipamento de digitalização fica posicionado num local "fixo" (permitindo apenas pequenos ajustes, como mudança da altura do cabeçote e de seu ângulo de inclinação).

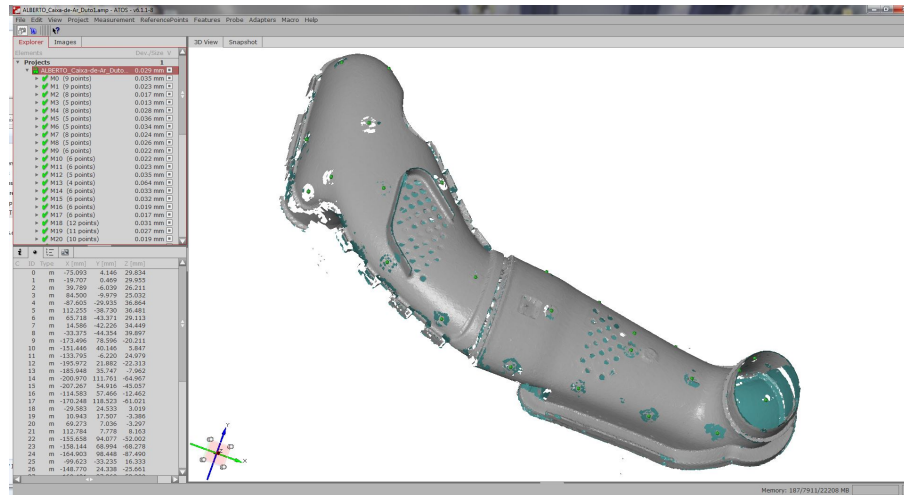


Figura 3.6: Superfície digitalizada.

Essas limitações porém se tornaram um problema, pois como o componente é feito de material flexível, cada alteração de posição provocava alterações geométricas, já que a peça se alongava ou comprimia a depender da posição em que era colocada, isso dificultava a identificação dos *hardpoints*, o que acaba por confundir o *software* resultando em uma falha no processo de digitalização óptica.

Um segundo problema enfrentado pela tecnologia óptica foi o fato da geometria sanfonada gerar muitas áreas de sombra, já que cada camada do sanfonado possui picos e vales que favorecem bastante a formação de sombras, já que a movimentação do sensor óptico é limitada e da peça escaneada também, isso se tornou um grande problema.

Essas dificuldades foram superadas utilizando a tecnologia laser, e para isso o componente foi posicionado em uma plataforma imóvel. O equipamento laser possui uma pistola que é manuseada por um operador e permite fazer a varredura do componente sem precisar movimentá-lo. Isso garante maior flexibilidade e reduz problemas oriundos da movimentação ou de sombras (que é o caso dos vales formados pela região sanfonada do objeto). Sendo assim o componentes escaneado permaneceu fixo na mesma posição durante todo processo como pode ser visto na Figura 3.7.

Após feito todo processo de digitalização, imagens do modelo físico são geradas dentro do *software* de escaneamento, neste momento se faz necessário reunir os arquivos oriundos de diferentes fontes que foram escaneados em separado e de diferentes sistemas em um único arquivo.

A depender da complexidade é possível escanear uma imagem de referência dos componentes fisicamente conectados, para auxiliar na montagem final em formato digital. Através dos pontos de controle definidos anteriormente (*Hardpoints*) é feita uma sobreposição e



Figura 3.7: Componente sanfonado posicionado para escaneamento à laser.

rearranjo das partes, sendo assim podemos garantir que ao final temos precisão tanto nos componentes individualmente escaneados como no conjunto montado em ambiente digital. Há ainda a possibilidade de posicionar de forma iterativa os componentes, caso seja de interesse estudar novas configurações do sistema. Essas técnicas foram utilizadas neste trabalho para obter uma montagem próxima da condição real do sistema.

Todo o processo de digitalização teve como objetivo final extrair com precisão a geometria externa do sistema. Sendo assim, podemos considerar que esse processo obteve como resultado final uma casca que representa toda a área externa dos componentes de interesse. Foi também suprimido do processo componentes como parafusos, abraçadeiras, olhais e suportes de borracha, já que são considerados irrelevantes para o estudo proposto. Ao final de tudo o resultado obtido pode ser visto na Figura 3.8.

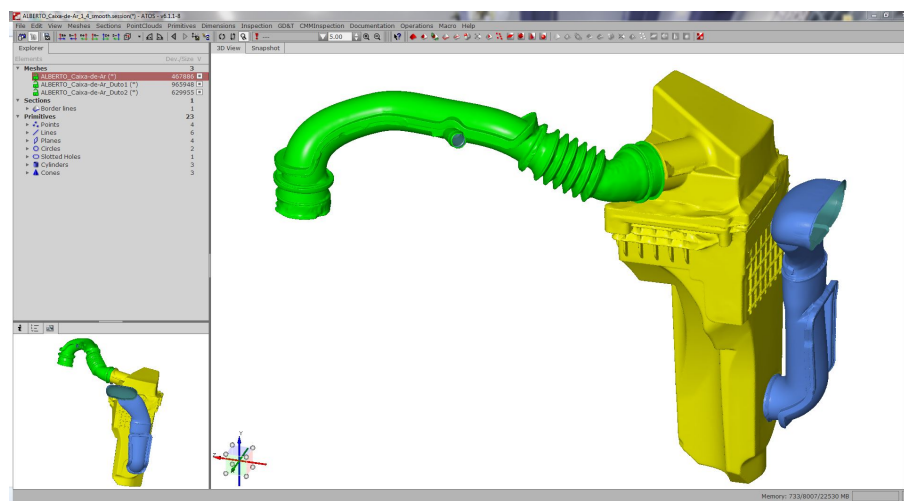


Figura 3.8: Montagem de todas as superfícies digitalizadas.

Entretanto, os dados coletados pelos equipamentos, apesar de possuir grande qualidade, ainda não estão prontos para serem manipulados, pois são considerados uma nuvem de pontos, logo ainda não possuem informações complexas de superfície que podem ser tratadas por *softwares* de desenho digital, como *Solidworks* por exemplo. Se faz necessário agora um tratamento dos dados obtidos para transformar os dados coletados numa superfície complexa, essa tarefa pode ser executada em outro módulo do *software*.

Sendo assim é finalizada toda a etapa de "confeção do modelo digitalizado", que após passar por diversas etapas e processos específicos, resulta em um produto final que é a cópia digital de alta precisão de um sistema de componentes físicos. Tudo isso foi necessário porque o trabalho proposto tem como objeto de estudo um sistema com dimensões reais que é aplicado na indústria, sendo assim se faz necessário garantir que todos os dados utilizados sejam representativos para essa condição.

3.2 Pré-processamento

Para fazer uma análise utilizando o método dos volumes finitos, é necessário discretizar o volume de controle em uma malha de volumes finitos, logo o que temos até então são informações geométricas de superfície que foram coletadas usando técnicas de digitalização, entretanto essa informação serve como base para uma etapa futura que será discutida agora. Basicamente será necessária a execução de duas etapas antes de se obter a malha pronta para o estudo proposto, que são: delimitar os limites do volume de controle e posteriormente confeccionar a malha de volume finitos. Para ambas as atividades foi utilizado um *software* dedicado às tarefas de pré-processamento de modelos e malhas de volumes finitos, o *Hypermesh*®¹⁴ da *Altair Engineering Inc.*

3.2.1 Delimitação do volume de controle

O volume de controle que se faz necessário delimitar compreende toda a porção interna do coletor de admissão onde o fluido, no caso o ar, ocupa espaço e escoamento durante o funcionamento do motor no veículo. Para isso foi utilizada uma técnica para definir uma espessura arbitrária na superfície digitalizada e assim obter um sólido, do qual será extraído o seu volume interno.

Durante a extração do volume interno são criadas malhas de superfície 2D com elementos do tipo triangulares. Esses elementos vão formar um volume que representa o interior do componente estudado, já que o objeto de estudo é o escoamento do fluido no interior desse componente e para isso é desconsiderado o volume do sólido ocupado pelo plástico que

compõe o componente. Um exemplo simplificado dessa região pode ser visto na Figura 3.9, onde as linhas externas representam o componente sólido, que no estudo aqui apresentado é feito de plástico. Já a malha representa o seu volume interno, por onde o fluido deverá escoar.

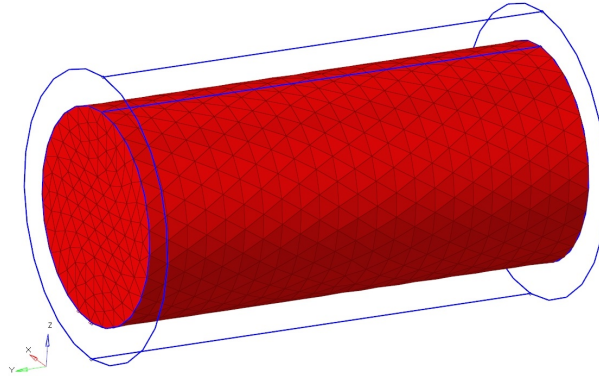


Figura 3.9: Duto delimitando região sólida e malha do volume interno.

Para o coletor de admissão digitalizado, essa tarefa se torna um pouco mais complexa. Dado que o sistema é formado por alguns componentes, se faz necessário efetuar a conexão dessas áreas de interesse para assim obter um volume único que represente o interior de cada componente através do qual o ar é conduzido e escoar.

Uma atenção especial é dada à região onde está instalado o filtro de ar, elemento poroso, que apesar de não ter sido digitalizada, é representada através de suas dimensões e posição no conjunto, já que se trata de um sólido de geometria simples. O filtro de ar não é representado como um componente e sim como uma região na malha onde são aplicadas condições de contorno específicas. Para isso, ao delimitar o volume de controle, é necessário subdividir a malha como podemos ver na Figura 3.10.

Assim como o filtro de ar, também são delimitadas as regiões por onde o ar entra e por onde ele sai, conhecidas pelo *solver* como regiões de *inlet* e *outlet*. Todas as demais regiões são definidas como *wall*, que são as paredes que definem as fronteiras do volume de controle.

3.2.2 Construção da malha de volumes finitos

Após definido o volume de controle e já de posse de uma malha 2D que delimita todas as regiões de forma a criar um único volume, a tarefa de confecção da malha volumétrica se torna bastante simples e rápida, sendo necessária apenas algumas etapas. Inicialmente a malha deve ser construída pela região do filtro de ar, dado que essa região precisa de uma malha estruturada e de elementos hexaédricos. A partir daí são construídas os

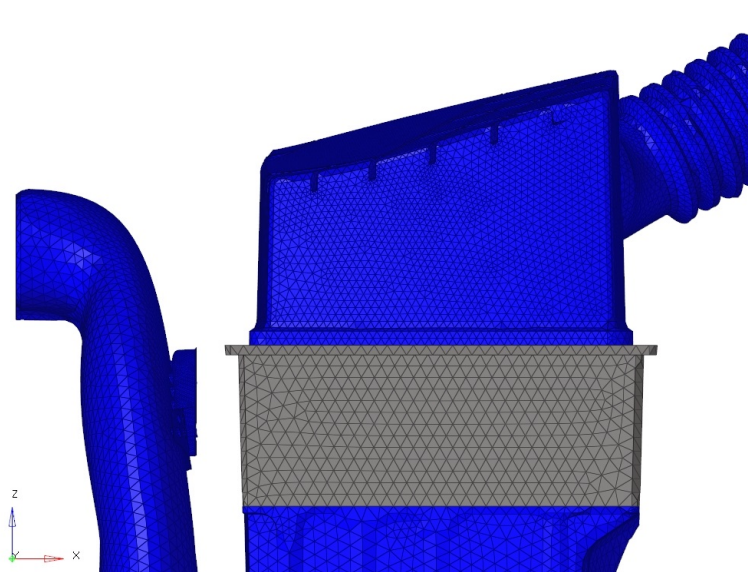


Figura 3.10: Detalhe da região da malha que representa o filtro de ar.

as malhas da região acima do filtro e abaixo do filtro. Para isso são utilizadas funções automáticas de criação de malha do *software Hypermesh*^{®14}, sendo necessário apenas definir os parâmetros básicos da malha que são listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabela dos parâmetros de malha usados no *Hypermesh*.

Parâmetro de malha	Valores
Element Size	2 mm
First Layer Thickness	0.01 mm
BL Growth rate	1.2
Number of layers	3
BL Parameters	User Controlled

Tabela 3.2: Tabela do estudo da convergência de malha no *Hypermesh*.

Versão	Malha	Total de elementos
Modelo 01	7,0 mm	699.438
Modelo 02	4,0 mm	1.050.154
Modelo 03	2,0 mm	1.398.873
Modelo 04	1,0 mm	1.888.478
Modelo 05	0,5 mm	2.448.027

Total de elementos

Essa estratégia de combinar elementos foi necessária para ganhar precisão e velocidade nas simulações, pois quanto mais elementos há no modelo, maior será o tempo de processamento requerido pelo *solver*. Os elementos do tipo hexa são melhores para representar a região da camada limite, porém para conectar seus vértices é necessária uma malha mais refinada (com maior número de elementos) e bem estruturada. Por outro lado, elementos

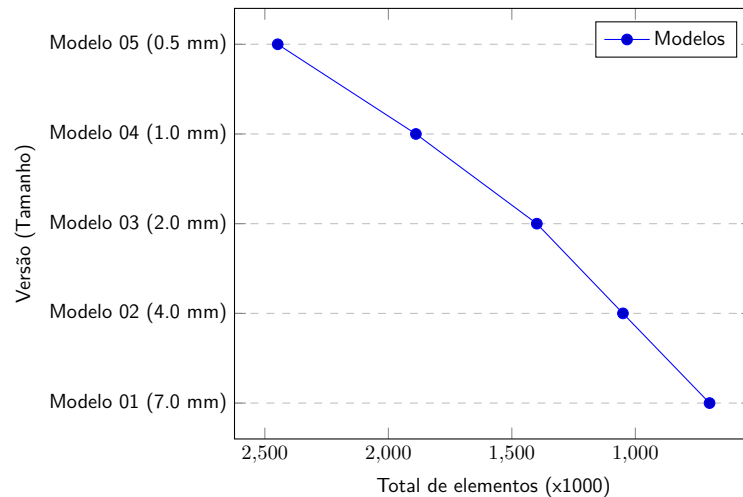


Gráfico 3.1: Gráfico do estudo da convergência de malha no *Hypermesh*.

do tipo penta são adequados para representar o domínio do fluido, pois sua flexibilidade permite representar grandes volumes com uma quantidade menor de elementos. Todas essas combinações buscam obter uma discretização das regiões a fim de garantir uma quantidade de elementos mais eficiente, um exemplo desses elementos utilizados na malha do estudo podem ser vistos na Figura 3.11.

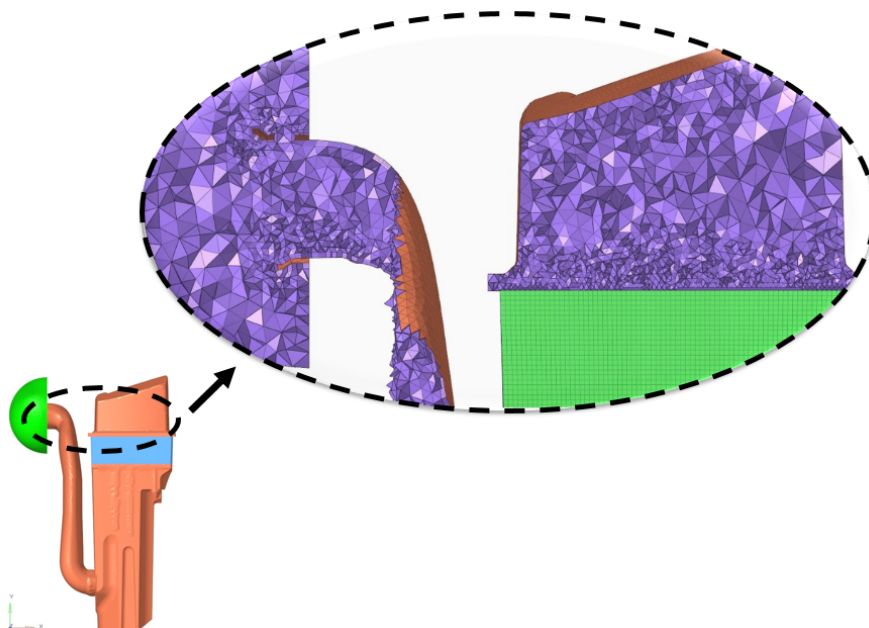


Figura 3.11: Figura em corte da malha com detalhe para os diferentes elementos utilizados.

Para se produzir o modelo que foi estudado, foi criada uma malha com tamanho total de 1,398.873 elementos de diversos tipos e um total de 405.973 nós que ligam esses elementos entre si. Para entender a composição desses elementos, podemos ver a Tabela 3.3, que apresenta um resumo detalhado da quantidade de elementos de cada tipo associados a

malha construída.

Tabela 3.3: Composição da malha relativa ao tipo elementos da biblioteca *Nastran*.

Tipo de elemento	Quantidade total
2D TRIA 3	100.228
2D QUAD 4	8.341
3D HEXA 8	154.550
3D PENTA 6	86.073
3D PYRAMID 5	12.874
3D TETRA 4	1,036.807

3.3 Solução das equações (Solver)

Para solução das equações de transporte, conservação de massa e momento, foi utilizado o *software* comercial *ANSYS[®] Fluent*, que permite a customização de soluções com amplas possibilidades. A malha que foi desenvolvida atende aos critérios de exigência do desenvolver do *solver*. Sendo assim, há uma compatibilidade necessária que foi atendida em todos os aspectos. Se faz necessário destacar essa informação haja vista que o desenvolvedor do *solver* não é o mesmo do software de pré-processamento, porém ambos se conversam.

Essa compatibilidade se faz necessária desde a configuração das condições de contorno, como escolha das propriedades que são aplicadas ao domínio estudado como os nomes que são atribuídos à cada domínio e região da malha que foi construída no pré-processador. Dessa forma podemos garantir que o solver não apresentará erros de leitura para com os arquivos criados em outra plataforma, sendo ambos totalmente compatíveis.

Os estudos com a plataforma *ANSYS[®]* exigem que seja criado um modelo com base no MVF ([MALISKA, 2004](#)), onde todo domínio é subdividido em pequenos elementos volumétricos. Os elementos volumétricos são agrupados de acordo com a área de interesse. No modelo apresentado basicamente há dois grupos de elementos volumétricos, aqueles que representam o domínio do fluido e aqueles que representam o domínio do meio poroso, por onde o fluido também escoar. Entretanto é necessário separar em grupos diferentes, já que será definido condições de contorno específicas para esse região da malha.

3.3.1 Definição das condições de contorno

O primeiro passo após carregar o arquivo da malha de volumes é definir qual tipo de solver será usado. O *Fluent* possui duas formulações para escoamento, uma com desempenho melhor para escoamento incompressível, chamada de *Pressure-Based Solver*, e

outra para escoamento compressível, a *Density-Based Solver*. Para o modelo desse estudo foi escolhido o *Pressure-Based Solver*, que tem melhor desempenho com escoamento incompressível, que é o caso do problema proposto.

Após definir o tipo do *solver* é necessário também escolher qual a formulação da velocidade e o tipo de regime do escoamento. Os valores de velocidade que serão usados na simulação são de grandeza absoluta, logo foi escolhido o tratamento *Absolute* para velocidade e o estudo será feito em regime permanente, por isso foi escolhida a opção *Steady*.

Finalizada as definições do *Solver*, se faz necessário escolher o modelo físico que o *software* usará para solução do problema. No caso apresentado será definido o modelo viscoso de k-epsilon (2 eqn) seguindo os parâmetros da Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros do modelo viscoso definidos no Fluent.

Parâmetro	Valor definido
Viscous Model	k-epsilon (2 eqn)
k-epsilon Model	Realizable
Near-wall Treatment	Standard Wall Functions
Model Constants - C2-Epsilon	1.9
Model Constants - TKE Prandtl Number	1
Model Constants - TDR Prandtl Number	1.2

A próxima etapa diz respeito às definições de material, para isso é importante que as regiões da malha estejam nomeadas da forma correta. Neste estudo temos apenas dois tipos de material, um fluido e um sólido. O material fluido possui apenas uma fase com o objetivo de simplificar o estudo e será definido como ar, toda região da malha volumétrica será alimentada com essa propriedades, o que significa que todo o interior do sistema está preenchido com esse único material.

Para o material sólido foi escolhido o alumínio, esse material será aplicado às paredes, que foram modeladas com elementos 2D, ou seja, não possuem volume definido, servem apenas para delimitar as fronteiras do sistema como uma espécie de casca. Já que não haverá trocas de calor com as paredes a escolha do alumínio foi arbitrária, com o único propósito de satisfazer um requisito do *software* de não deixar o campo material vazio.

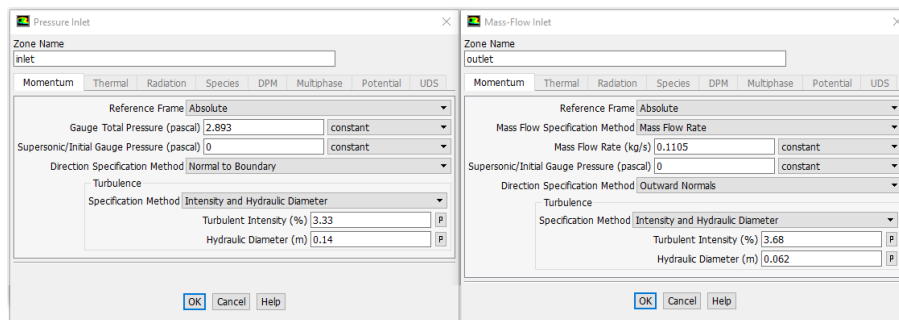
As propriedades de ambos os materiais foram obtidas através da biblioteca interna do *Software ANSYS® Fluent* como pode ser visto na Tabela 3.5. Caso fosse do interesse do estudo avaliar a troca de calor do fluido com as paredes, poderia ser criado um novo material com os valores exatos fornecidos pelo fabricante, para isso o *Fluent* permite que novos materiais sejam adicionados na sua biblioteca interna.

É necessário prescrever as condições de contorno para todas as regiões da malha, sendo

Tabela 3.5: Propriedades dos materiais da biblioteca do Fluent.

Propriedade	Valor definido
Densidade do ar (kg/m ³)	1.225
Viscosidade do ar (kg/m-s)	1.7894e-05
Densidade do alumínio (kg/m ³)	2719

importante nesse momento, além de definir os materiais, também definir qual ou quais são as entradas e saídas do volume de controle, para isso é usado um painel específico do *software*, como podemos ver na Figura 3.12.

Figura 3.12: Figura das condições de contorno para o *Inlet* e *Outlet* no *Fluent*.

3.3.2 Inicialização da Solução

Antes de inicializar a solução se faz necessário definir alguns controles do *solver*, critérios de convergência e por fim um valor inicial da solução para só assim poder iniciar o cálculo do problema.

A primeira definição a cerca das opções de solução que o *Fluent* requer é o tipo de esquema para o acoplamento pressão velocidade dos métodos de solução. Quando é definido uma solução *Pressure-Based Solver*, para um escoamento incompressível, existem quatro algoritmos de *Coupling Pressure-Velocity* fornecidos nas opções de esquema, que são:

- SIMPLE - Esse algoritmo usa as correções entre velocidade e pressão para forçar a conservação de massa (equação da continuidade) e obter o campo de pressão. A equação do *momentum* é resolvida com valores iniciais de pressão resultando no valor de fluxo de massa, é verificada a equação da continuidade, se não há continuidade é feita correção no fluxo de massa até obter continuidade. Verificando-se a continuidade o fluxo de massa é confirmado e o valor da pressão é calculado novamente e atualizado o campo de pressões.

- SIMPLEC - Esse algoritmo é semelhante ao *Simple* com a variação na alteração da equação de correção do fluxo nas faces.
- PISO - O PISO, (Pressure-Implicit with Splitting of Operators), parte da família de algoritmos Simple é baseado numa aproximação de ordem superior na relação de correção de pressão e velocidade. Este modelo incrementa duas correções adicionais: correção de vizinhança e correção de enviesamento (Skewness). Este processo reduz significativamente as dificuldades associadas com malha muito distorcida. Este algoritmo requer um pouco mais de tempo de cálculo por iteração, mas reduz drasticamente o número de iterações necessárias para a convergência, especialmente em problemas transientes.
- Coupled - Essa opção resolve as equações de correção do *momentum* e pressão separadamente. Esta solução tem uma convergência mais lenta. Se adequa melhor em escoamentos transientes com qualidade de malha pobre, ou valores com intervalos de tempo (time-step) altos.

Para o problema proposto, foi escolhido o esquema SIMPLEC, já que oferece a mesma *performance* que o SIMPLE porém com uma variação que favorece a correção do fluxo nas faces, fornecendo uma convergência mais eficiente de acordo com o manual teórico do *Fluent*.

Como principal critério de convergência será definido um valor mínimo para o cálculo dos resíduos que são plotados no gráfico de monitoramento da solução. Os valores que são monitorados durante a simulação e plotados no gráficos são: Velocidade nos três campos (X, Y e Z), K, ϵ e Continuidade (*Continuity*).

Para todas essas grandezas calculadas é admitido um valor mínimo da ordem de 10^{-3} como critério de convergência, sendo assim necessário que todos os valores de resíduo alcancem esse valor mínimo para que seja considerado que a simulação obteve um valor de convergência aceitável. Ao atingir esse valor, o solver encerrará as iterações e o último valor calculado é considerado como solução do problema.

Esse é o principal critério de convergência sugerido pelo *Fluent*, para um problema em regime permanente incompressível. Entretanto é possível definir outros critérios de convergência ou mesmo após conhecer uma análise do gráfico dos resíduos é possível limitar o número de iterações, considerando que para um mesmo problema há um número máximo de iterações que já vai resultar em uma solução que atenda as necessidades do problema proposto.

O próximo passo é definir valores iniciais para a solução e executar um comando para que o software prescreva esses valores iniciais que serão utilizados quando a simulação for

executada, botão *Initialize*. Todos os valores utilizados nesse problema no campo *Solution Initialization* estão na Tabela 3.6

Tabela 3.6: Valores do campo *Solution Initialization* do *Fluent*.

Propriedade	Valor definido
Initialization Methods	Standard Initialization
Relative Frame	Relative to Cell Zone
Initial Gauge Pressure (pascal)	0
Initial X Velocity (m/s)	16.46
Initial Y Velocity (m/s)	-19.59
Initial Z Velocity (m/s)	-14.77
Initial Turbulent kinetic energy (m ² /s ²)	1.77
Initial Turbulent Dissipation Rate (m ² /s ³)	89.41

O último passo para poder executar o cálculo da solução do problema é definir o número máximo de iterações e o valor do intervalo de retorno para arquivar os valores calculados no arquivo de resposta dentro do painel *Run Calculation*.

No problema proposto foi definido um valor máximo arbitrário de 5.000 iterações, valor considerado alto, aproximadamente o dobro das iterações necessárias para se obter um resultado com convergência. É importante definir um valor máximo, para caso o problema não obtenha uma convergência numérica aceitável o processo seja interrompido de forma automática e não consuma muito os recursos computacionais disponíveis de forma desnecessária. É recomendado corrigir esse valor após conhecer qual é a média de iterações necessárias para se obter uma solução aceitável. Isso evita o desperdício computacional.

O intervalo escolhido para o arquivo de resposta foi de uma iteração, o que significa que a cada iteração calculada pelo *solver*, será escrito os valores calculados no arquivo de resposta. Esse intervalo pode ser definido de acordo com as necessidades do pós processamento e do problema proposto.

Ao fim de todas essas definições é recomendado utilizar uma ferramenta que está disponível no painel *Run Calculation*, que verifica todos os valores atribuídos em todos os campos do *solver*, isso serve para garantir que todos os *inputs* necessários foram dados e garantir que o usuário não cometa erros que comprometam a execução da simulação. A ferramenta fica em um botão no painel chamado de "*Check Case...*". Após executar esse comando o *Fluent* retornará com uma caixa de diálogo avisando caso haja algum problema ou valor não fornecido que seja necessário, caso contrário será dada uma mensagem de confirmação para iniciar a simulação.

3.3.3 Monitoramento da Solução e Convergência

Quando a simulação é executada é possível monitorar e acompanhar o progresso através dos valores que são calculados em cada iteração para a velocidade nos três campos (X, Y e Z), K, ϵ e Continuidade (*Continuity*), como havia sido configurado no painel de critérios de convergência.

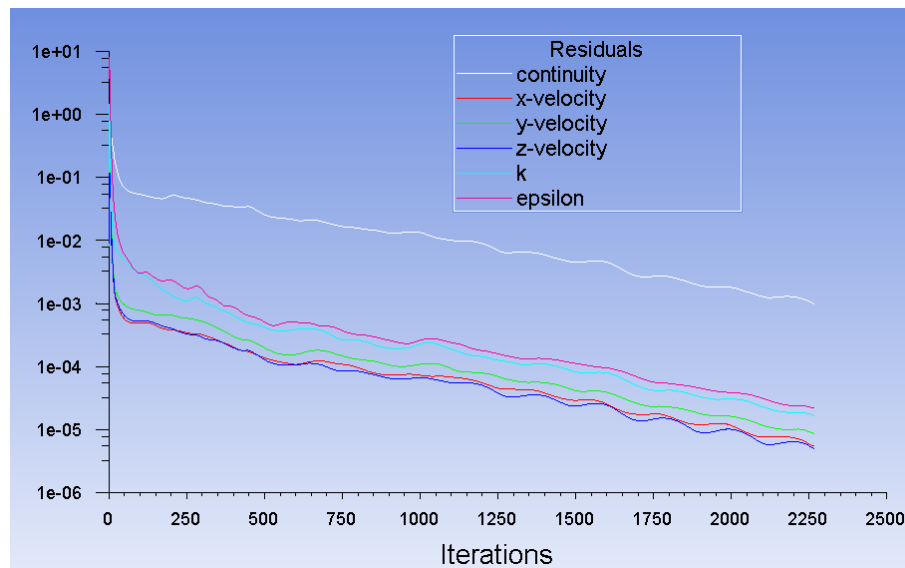


Figura 3.13: Figura do gráfico resíduos por iterações da simulação.

Sendo assim, para cada iteração o *solver* escreverá os valores atuais dos resíduos do método numérico utilizado, dessa forma é possível monitorar o progresso da simulação. Existe também uma ferramenta gráfica, que permite observar de forma visual o progresso da simulação e a velocidade de convergência do resultado, um exemplo está no Gráfico 3.13, que é construído pelo *software* durante a simulação e atualizado em tempo real na tela principal do programa.

Apenas quando o critério de convergência é atingido o *solver* para a simulação ou caso seja atingido o número máximo de iterações pré configurado. No caso apresentado na Figura 3.13 o critério estabelecido foi da ordem de 10^{-3} , o que significa que todos os valores do gráfico de resíduos devem atingir esse valor mínimo para que a simulação tenha sucesso. Esse é o valor padrão sugerido pelo desenvolvedor do solver e é considerado uma boa referência para esse tipo de problema (ANSYS, 2017).

Entretanto é importante sempre analisar o comportamento das curvas do gráfico de resíduos. É fundamental que o gráfico se desenvolva de forma progressiva ao valor do critério de convergência, reduções abruptas indicam uma falsa convergência, portanto é importante analisar todos os dados antes de concluir que a simulação obteve um resultado convergente ou não.

Resultados e Discussões

Os resultados obtidos através da simulação feita no *software Fluent* do pacote comercial *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1*, foram pós processados utilizando a ferramenta *ANSYS® CFD-Post*. Já que o *CFD-Post* pertence ao mesmo desenvolvedor do *Fluent*, existe uma maior integração entre ambas as ferramentas, não sendo necessária outras etapas de conversão ou pós processamento para efetuar a leitura dos dados obtidos pela simulação.

Este capítulo apresentará os resultados obtidos em diversos estudos feitos com base no modelo de volumes finitos criado, alterando apenas as condições de contorno para casos de interesses específicos, os estudos feitos foram:

- [Análise do campo de velocidades;](#)
- [Estudo de consideração do início do escoamento;](#)
- [Análise do impacto do filtro de ar no escoamento - elemento poroso;](#)
- [Análise da perda de pressão ao longo do escoamento;](#)
- [Análise do escoamento ao longo do domínio;](#)
- [Estudo de um fator de envelhecimento do filtro.](#)

4.1 Resultados

Existem uma grande quantidade de dados obtidos através de uma simulação de fluidodinâmica. Para isso foi importante entender que se faz necessário subdividir o domínio em regiões de interesse para analisar os dados de forma pontual. Através dos dados implícitos (malha de volumes finitos) e explícitos (constantes do problema) que foram fornecidos para executar a simulação, foram calculadas basicamente duas variáveis que são de maior interesse na análise dos resultados: O campo de pressão, e velocidade no domínio do fluido. A análise detalhada dessas variáveis através do objeto estudado será discutida nesse capítulo ao longo das próximas sessões.

4.1.1 Análise do campo de velocidades

O primeiro gráfico apresentado é o do campo de velocidades em todo o domínio, que pode ser mostrado utilizando-se os vetores com escala e cor proporcional ao campo de velocidade que se deseja observar. Um exemplo do dado obtido pode ser visto na Figura 4.1. Através desse gráfico podemos perceber a influência da geometria no campo de velocidades.

Toda vez que há uma alteração na seção do conduto, percebemos uma queda na intensidade do campo de velocidade. Isso satisfaz ao princípio de conservação da quantidade de massa e da quantidade de movimento, já que o escoamento é calculado considerando-se uma taxa de massa fixa na saída do sistema.

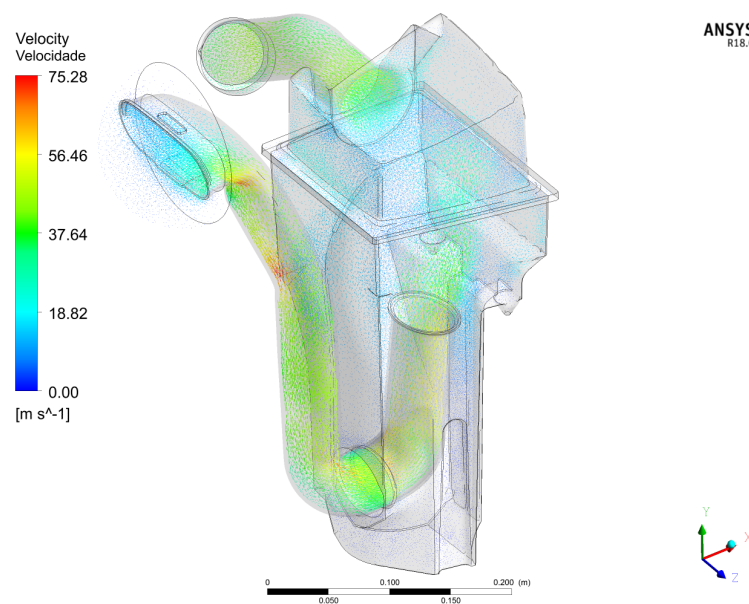


Figura 4.1: Gráfico de vetores do perfil de velocidades em todo o domínio do objeto de estudo.

Quando há alteração da seção do escoamento, temos variação na área, e isso influencia diretamente o cálculo do campo de velocidades. Quanto maior for a área, menor será a velocidade, pois só assim o princípio da conservação será obedecido. Pressão e velocidade são diretamente influenciadas pela área da seção do escoamento, por isso vemos que as regiões do gráfico onde o campo de velocidades é mais intenso são nos dutos e próximos às curvas, onde o fluido precisa acelerar para manter um fluxo constante.

O caso ideal para o componente apresentado seria uma geometria com poucas variações, pois a cada curva a redução e expansão da geometria resulta numa perda de pressão e aumento das resistências no fluxo do fluido, que vão prejudicar no funcionamento do sistema final. É desejado para esse projeto que o caminho do fluido seja aquele onde haverá a menor perda de pressão possível, uma vez que isso favorece o motor à combustão, aumentando o rendimento do sistema.

Através da Figura 4.1 é possível perceber como a variação da geometria influencia diretamente o campo de velocidades. Esse resultado é algo esperado, pois como temos uma geometria proveniente de um componente real, algumas complexidades são comuns nesse tipo de projeto. Dada a necessidade de se atender requisitos de espaço físico do projeto onde o componente será instalado, assim como seu processo de fabricação, tais requisitos são responsáveis por criar uma geometria que nem sempre favorece um bom fluxo. Por esses motivos é de fundamental importância o estudo do sistema utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional. Assim é possível prever o comportamento do sistema ainda na fase de projeto, e sugerir modificações que podem aumentar o desempenho do componente e o rendimento do motor.

4.1.2 Estudo de consideração do início do escoamento

Uma etapa importante antes de calcular a solução do problema de escoamento no método dos volumes finitos é definir uma região de entrada e saída do escoamento. Quando definimos a região de entrada, também conhecida como *inlet*, temos que nos preocupar com o fenômeno que se deseja observar. No caso do estudo apresentado, a região de entrada se dá numa zona de transição, onde o ar atmosférico será admitido para dentro do duto de admissão do motor. Para esse problema em específico, se adotarmos como região de entrada a superfície da seção circular do duto principal, a velocidade calculada nessa região será inicialmente uniforme, o que não é verdade, como podemos ver na Figura 4.2.

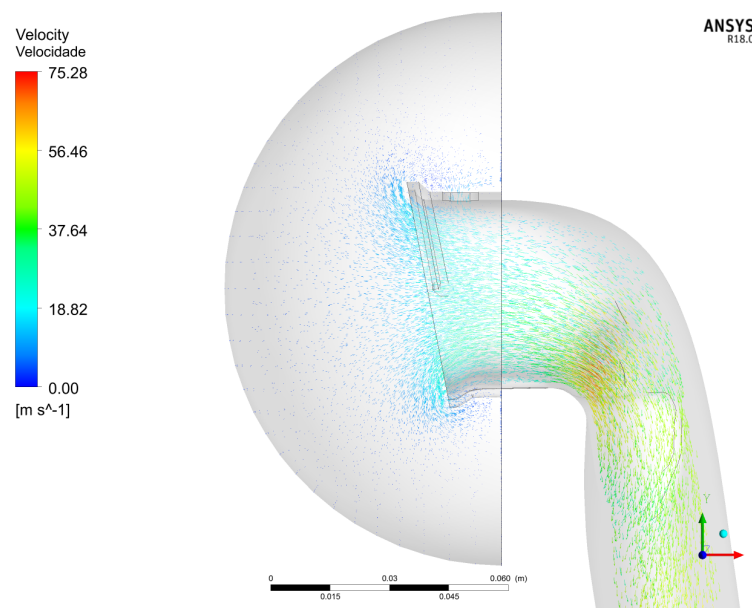


Figura 4.2: Gráfico de vetores do perfil de velocidades em detalhe no bocal de admissão na entrada do sistema.

O problema aqui apresentado também sofre influência do ângulo de abertura do bocal de entrada do sistema de admissão. Essa parte do sistema tem um desenho elíptico e uma leve inclinação que favorece a entrada do ar. Caso o problema seja iniciado imediatamente na superfície formada pelo bocal de entrada do sistema de admissão, a velocidade do ar naquela região seria nula, matematicamente representado por $0 \frac{m}{s}$, sendo assim poderíamos concluir que o escoamento parte do zero nessa região, o que não acontece de fato.

Para contornar esse problema foi definida uma "hipótese" no início do escoamento que tem como propósito simular o início da simulação num volume anterior ao do bocal de entrada, simulando uma condição atmosférica de transição. Para isso foi desenhada uma semi-esfera envolvendo o bocal do sistema de admissão. O resultado dessa consideração pode ser visualizado na Figura 4.2.

A dimensão dessa esfera foi calculada para ser três vezes maior que o volume do bocal de admissão. Essa medida é arbitrária, e foi considerada por se trata do menor volume necessário sem que houvesse grandes impactos na simulação, como tempo de processamento ou alteração dos dados obtidos. O principal resultado desse estudo é uma clara distribuição do perfil de velocidades na região do bocal de admissão, o que não seria possível observar sem a semi-esfera modelada. Essa distribuição é esperada e caso não fosse considerada nos resultados da simulação, poderia criar um resultado falso ou mascarado.

4.1.3 Análise do impacto do filtro de ar no escoamento - elemento poroso

O filtro de ar é modelado no sistema como uma região específica do domínio onde haverá uma consideração de região porosa, e para isso foi utilizado um modelo matemático pronto do *software Fluent*, conhecido como "Formulação Porosa de Velocidade Superficial", onde há dois termos para a equação que o descreve; o primeiro termo faz a tratativa das perdas viscosas com base na Lei de Darcy, e o segundo termo calcula as perdas inerciais.

Através dessa formulação, é possível determinar que todo fluido que atravessa essa região sofrerá uma queda de pressão e velocidade proporcional ao campo e a direção do fluido. Para que isso seja calculado é necessário, porém, medir ou estimar alguns parâmetros iniciais, como já foi exposto no capítulo 3.

Em termos teóricos, quando o fluido atravessa uma região porosa é esperado que nessa região o escoamento se comporte de forma laminar, por isso são usadas formulações específicas para o cálculo da velocidade e pressão nessa região. Tais formulações desprezam o fenômeno da turbulência dentro da zona porosa, já que não é possível que isso aconteça dada a natureza do meio onde ocorre o escoamento.

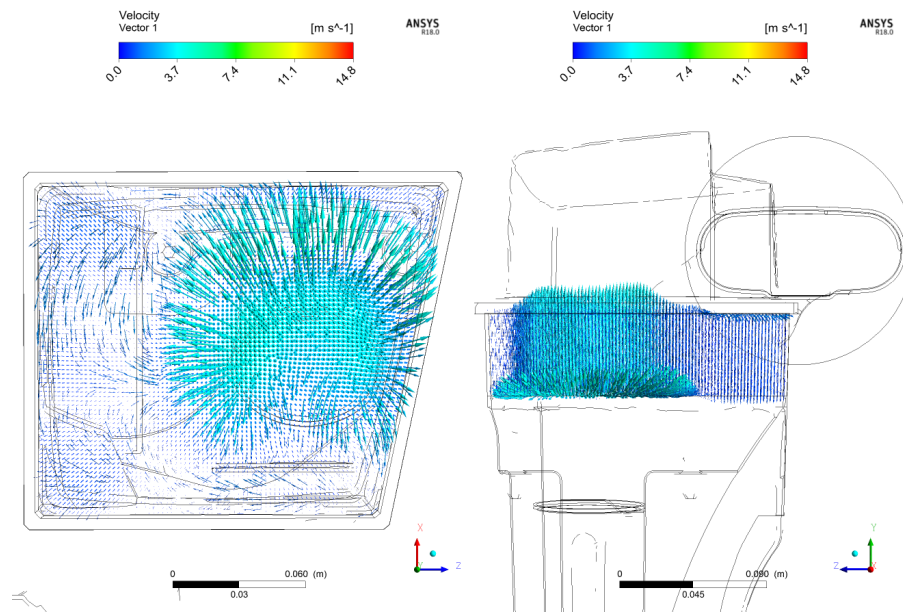


Figura 4.3: Figura com vista superior e lateral plotando os vetores do campo de velocidade na região porosa.

Através da análise da Figura 4.3, podemos notar a natureza laminar do escoamento, o que já é esperado pois é uma característica do escoamento neste meio poroso. Entretanto, também vemos alguns vetores que indicam uma zona de recirculação na região superior e inferior do filtro. Tal fenômeno é uma característica da geometria do sistema estudado, e para entender esse comportamento se faz necessário analisar todas as etapas do escoamento e o caminho que o fluido segue desde a entrada no sistema até sua saída.

A caixa de ar possui um grande volume "morto" abaixo da região do filtro. Isso serve para garantir que haverá a quantidade de ar necessária aos diversos regimes de funcionamento do motor a combustão. Sabemos que a vazão mássica do sistema de admissão é uma função da rotação do motor, e acontece que o regime de operação de um motor não estacionário tem grandes variações de rotação, logo pressão e velocidade sofrem variações abruptas em seu regime de funcionamento. Para evitar que as paredes do coletor de admissão colapsem ou que precisem ser extremamente reforçada (dadas essas grandes variações) e há uma "reserva" de ar caracterizada por esse grande volume adicional, abaixo da região do filtro.

Entretanto, esse grande volume acaba por criar uma condição única ao escoamento, pois como temos uma grande quantidade de massa de ar sendo forçada para retornar ao duto de saída, após o fenômeno da expansão causada pela mudança de geometria do sistema, alguns campos de recirculação são observados nos resultados obtidos. Parte do fluido que atravessa o filtro encontra um sistema com pressão diferencial mais alta, e isso provoca recirculações em determinadas áreas do filtro e um fluxo reverso que também é observado, como podemos ver na Figura 4.3.

Ao observar a Figura 4.4, podemos fazer uma análise do caminho que o escoamento segue. O fluido que percorre o duto principal até chegar na caixa de ar, chega na caixa com um perfil de velocidade média alto e mesmo após sofrer uma expansão contínua com um perfil relativamente alto, até que atinge a região do filtro e desacelera abruptamente. Essa condição é esperada e reflete a realidade, pois o filtro funciona nesse caso como uma resistência ao escoamento, e por isso provoca uma perda considerável no campo de pressão e velocidade do escoamento naquela região.

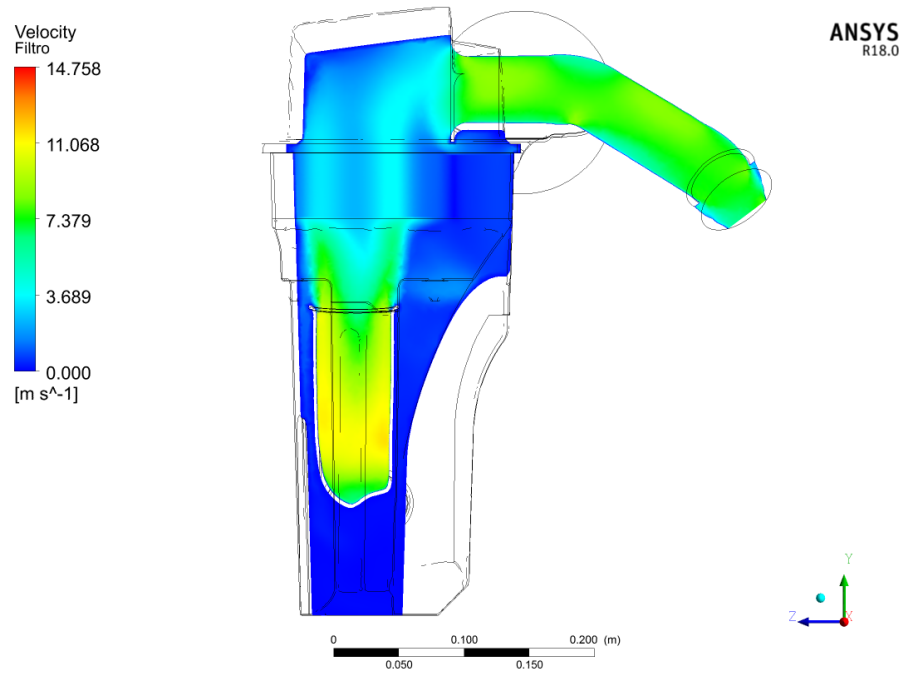


Figura 4.4: Figura com o corte longitudinal do domínio no plano ZY plotando o campo de velocidades.

As recirculações observadas dentro do volume que representa o filtro só são possíveis dada a natureza do componente, conforme já foi explicado. Entretanto, os filtros de ar de veículos automotivos são fabricados com fibras de celulose e confeccionados de forma a permitir o fluxo de ar em um único sentido do componente, que é longitudinal ao sentido do escoamento. Isso significa que só é permitido o fluxo em um sentido, dessa forma as componentes em X e Z são anuladas e isso força o escoamento em apenas uma direção, que é a Y, como pode ser visto na Figura 4.3. Por esse motivo o fenômeno só é observado na região superior ou inferior do filtro, que são zonas de transição da região porosa para o meio contínuo do escoamento. Apesar dessa condição, ainda assim é possível um fluxo reverso, exatamente como acontece no modelo estudado.

4.1.4 Análise da perda de pressão ao longo do escoamento

Uma maneira importante de se compreender a natureza do escoamento dentro do sistema é observar o gráfico de perda de pressão. Para isso foi definido algumas superfícies de controle que estão distribuídas ao longo do domínio estudado. Um gráfico esquemático identificando cada superfície de controle pode ser vista na Figura 4.5.

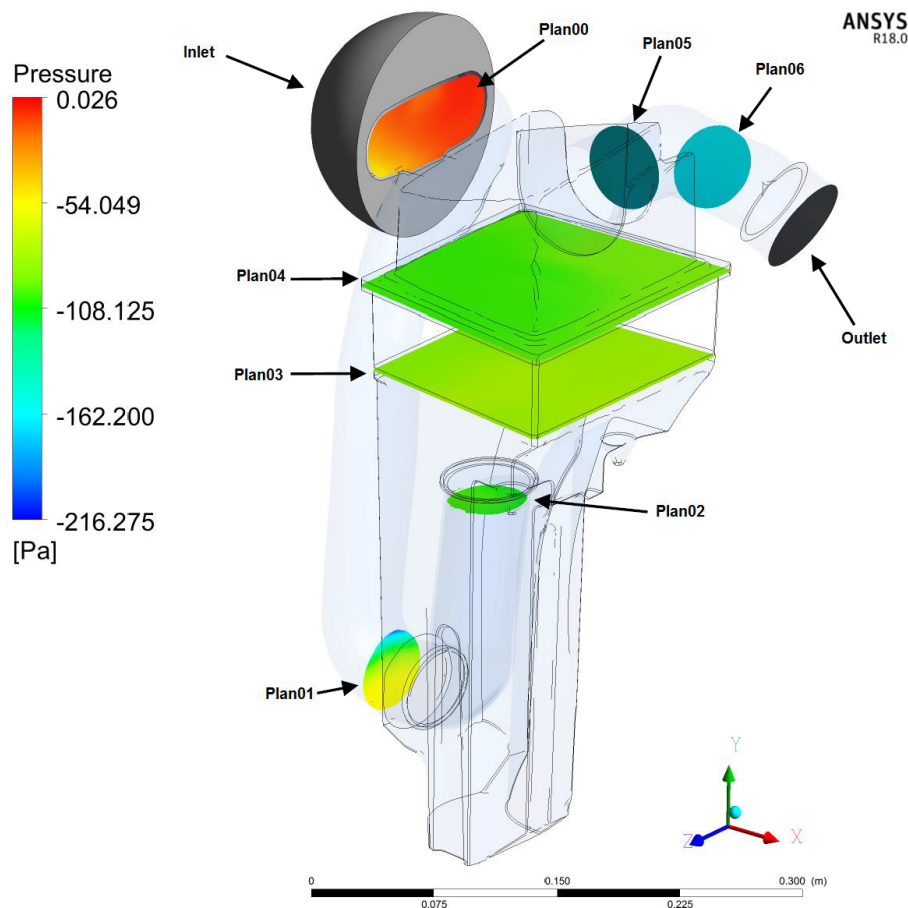


Figura 4.5: Figura com os planos de controle identificados ao longo do domínio de estudo.

As superfícies de controle foram distribuídas a fim de se obter a variação do campo de pressão quando o fluido escoar nas diversas regiões da geometria de estudo. Basicamente podemos observar três regiões onde há grandes eventos, que são:

- I A primeira região é o duto de entrada, que está entre o intervalo do "Plan00" e o "Plan02";
- II A segunda região é caixa de ar onde fica instalado o filtro de ar. Essa região está entre o intervalo do "Plan03" e o "Plan04";
- III A Terceira região é o duto de saída do escoamento que está entre o intervalo do "Plan05" e o "Outlet";

Após definidos os planos de controle, podemos utilizar as ferramentas de pós processamento para calcular o valor médio da pressão na superfície desejada, através da função do *ANSYS® CFD-Post: ave(Pressure)@inlet*. Com isso obtemos uma tabela com os valores de pressão para cada plano, os dados obtidos podem ser verificados na Tabela 4.1.

Após definido os planos de controle podemos utilizar as ferramentas de pós processamento para calcular o valor médio da pressão na superfície desejada, através da função do *ANSYS® CFD-Post: ave(Pressure)@inlet*. Com isso obtemos uma tabela com os valores de pressão para cada plano, os dados obtidos podem ser verificados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Perda de pressão ao longo da geometria do sistema de admissão de ar.

Região	Média de pressão [Pa]
Inlet	-0.204
Plan00	-15.736
Plan01	-82.586
Plan02	-101.826
Plan03	-81.968
Plan04	-97.487
Plan05	-158.461
Plan06	-163.885
Outlet	-167.988

Os dados da tabela estão com valor de pressão negativo, pois foi utilizada uma condição de contorno de fluxo de massa na saída do sistema, e com isso os valores de pressão são calculados com base nessa referência, sendo o valor de pressão mais alto na entrada do sistema e o valor mais baixo na saída. Esse é o principal indicativo do sentido do fluxo do escoamento. Essa condição representa de forma fiel o fenômeno físico real, pois o motor de combustão interna funciona aspirando o ar atmosférico para seu interior, logo a pressão nos dutos de admissão será de ordem muitas vezes menor que a da atmosfera.

Analisando a Tabela 4.1 podemos perceber a contribuição de cada região do domínio na perda de pressão do escoamento. Como se trata de um sistema real, esse estudo demonstra quais são as regiões de maior influência dentro do sistema e como pequenas regiões da geometria podem afetar de forma significativa o escoamento.

É possível observar que, mesmo antes do fluido atravessar o elemento poroso, o sistema já sofre uma queda na pressão, onde a magnitude dessa queda é maior que a metade do valor total calculado para o domínio inteiro. Toda essa resistência ao escoamento é fruto da geometria, pois cada vez que os dutos mudam de direção há perda. Também quando é alterada a área da seção circular e/ou se prolongam, mais perda de pressão é causada. Por esse motivo, podemos afirmar que quanto menos mudança de direção ou alterações na seção circular da geometria por onde há o escoamento, menor será o impacto causado no perfil de pressão e velocidade ao longo da geometria.

4.1.5 Análise do escoamento ao longo do domínio

Com base nos dados calculados de pressão durante o estudo do escoamento, é possível compreender os fenômenos ao longo do domínio estudado. Uma forma de se perceber o comportamento do escoamento é construir um gráfico com os dados da pressão média nos planos de controle, uma vez que através dessa análise podemos perceber o sentido do fluxo e a perturbação causada pelo fenômeno da recirculação na caixa de ar.

Para haver o movimento do fluido dentro do sistema é necessária que sempre exista uma diferença de pressão entre a entrada e saída do domínio e isso deve se repetir ao longo dos planos de controle. É importante que essa diferença final seja sempre para um valor maior na entrada do que na saída, o que é um pressuposto fundamental para o sentido do escoamento.

Uma breve análise do Gráfico 4.1 pode permitir a visualização desses fenômenos. Essa é uma análise fundamental para poder compreender o sentido do fluxo sem que seja necessária animações ou gráficos muito elaborados, pois é um comportamento básico e deve ser sempre atendido. Sendo assim o sentido do escoamento se dará no sentido da região de maior pressão para de menor pressão.

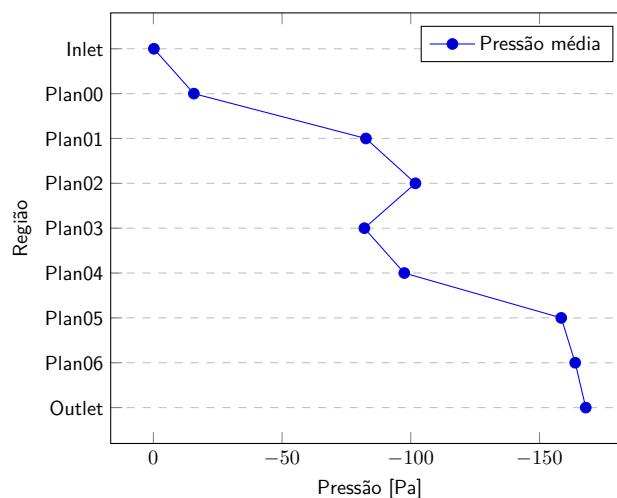


Gráfico 4.1: Gráfico de linha com a média de pressão ao longo da geometria do coletor de admissão de ar.

É importante que essa condição prevaleça ao longo do escoamento para garantir um fluxo constante no sistema. Entretanto, algumas perturbações podem ocorrer devido à geometria e isso foi observado nesse estudo. A região entre o "Plan02" e o "Plan03" possui um comportamento que é indicativo de fluxo reverso do escoamento, e isso pode ser percebido numericamente, pois o valor de pressão média nesse plano tem valor mais alto para o "Plan03" do que para o "Plan02", como pode ser visualizado no Gráfico 4.1.

Logo, nessa região haverá uma zona de recirculação, onde parte do fluido retornará. Coincidentemente essa zona é onde encontramos o filtro de ar. Mesmo com essa perturbação o escoamento sempre será no sentido da entrada para saída, pois a variação de pressão total é predominante para definir o sentido do escoamento no sistema. Essa análise sobre o gráfico indica uma conservação no sentido do escoamento, mesmo que haja pequenas recirculações provenientes de aspectos da geometria ou possíveis condições turbulentas, o sentido do fluxo será mantido.

4.1.6 Estudo de um fator de envelhecimento do filtro

O estudo de um fator de envelhecimento do filtro de ar no escoamento sugere qual será o comportamento do filtro ao longo de sua vida útil. Considerando um valor arbitrário de sujeidade, que é característico da impregnação de sujeira no elemento filtrante com o passar do tempo, isso significa dizer que a performance do filtro sofrerá impacto ao longo do tempo de uso. Para isso foi feita uma análise quantitativa, criando valores percentuais que foram aplicados aos parâmetros de cálculo da região porosa.

Para esse estudo foram definidos cinco casos de simulação, onde o primeiro caso, chamado de "Limpo" se trata da simulação com os dados originais do filtro de ar para a dimensão de permeabilidade e resistência inercial. Os demais casos são simulações com todas as condições de contorno semelhantes, porém com os dados que representam a região porosa acrescidos de um "Fator de Envelhecimento" de 25%, 50%, 75% e 100%. Esse fator tem como objetivo representar o que acontece com o elemento filtrante caso sua performance original seja reduzida em uma escala percentual de saltos de 25%. Os resultados desse estudo podem ser observados no Gráfico 4.2.

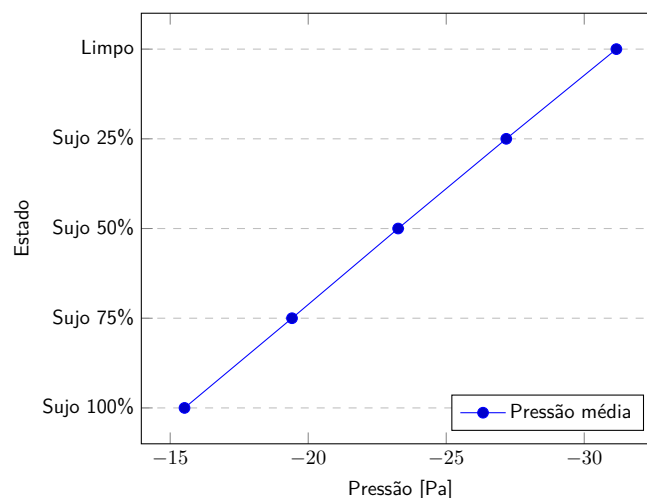


Gráfico 4.2: Gráfico da variação da perda de pressão dentro da região porosa para o estudo do fator de envelhecimento do filtro.

Analisando o Gráfico 4.2, podemos perceber que a relação entre perda de pressão dentro do filtro é diretamente proporcional, ou seja: se aumentarmos os parâmetros do filtro em 25% o resultado da perda de pressão na região porosa sofrerá de forma diretamente proporcional.

Vemos que o comportamento no gráfico é quase linear, o que reafirma o fenômeno observado anteriormente. Apesar desse comportamento linear da perda de pressão, os resultados desse estudo podem ser avaliados através de duas perspectivas, seja do ponto de vista do que acontece apenas na região porosa, seja ao observar o sistema como um todo.

O Gráfico 4.3 expõe os resultados da pressão média total entre a entrada e a saída para cada simulação do estudo do fator de envelhecimento do filtro. Nesse caso podemos perceber que o salto da perda de carga não é diretamente proporcional. E a justificativa disso se dá pelo fato que diferentes perfis de velocidade vão atuar de forma diferente numa mesma geometria, pois o escoamento após atravessar a região do filtro passará a ter um novo perfil de velocidade e pressão, e esse novo perfil vai interagir de forma diferente com a geometria final do objeto de estudo.

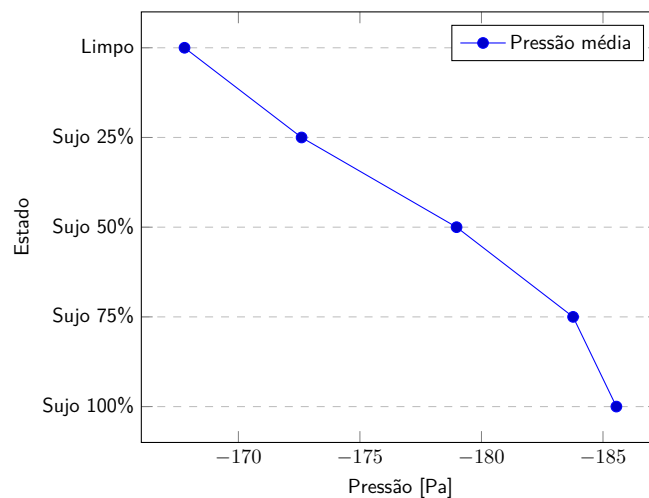


Gráfico 4.3: Gráfico de linha com a variação da pressão entre a região de entrada e saída para quatro diferentes estudos de condição do filtro de ar.

Na primeira região da simulação, todos os parâmetros são iguais, logo o escoamento terá o mesmo comportamento para todos os casos. Dentro da região porosa está provado que o comportamento será diretamente proporcional às características do filtro, e então a única região onde não temos uma previsão claro dos resultados para esse estudo é o que acontece após o filtro de ar.

Podemos perceber que no gráfico o aumento do fator de envelhecimento no filtro, provoca um crescimento na perda de pressão total do sistema. Para cada novo valor é dado um salto para uma condição pior, entretanto esse novo valor não é proporcional a perda de

pressão dentro do filtro. Os valores de pressão podem ser observado de forma integral na Tabela 4.2, onde esses dados representam o sistema como um todo e contrastam com os resultados da região porosa.

Tabela 4.2: Variação da perda de pressão na entrada e saída para o estudo do fator de envelhecimento do filtro.

Estado	Entrada/Saída $\Delta P [Pa]$
Limpo	167.784
Sujo 25%	172.600
Sujo 50%	178.976
Sujo 75%	183.770
Sujo 100%	185.551

4.2 Discussão

Como pode ser observado através dos estudos e dos resultados obtidos, existe uma grande contribuição da geometria dos dutos na perda de pressão do sistema. É de fundamental importância para a engenharia de produto o estudo prévio dos componentes ainda durante a fase de projeto.

Prever determinadas situações se torna estratégico para a indústria como um todo, e garante maior eficiência aos produtos desenvolvidos. Apesar do sistema de admissão de ar ser formado por alguns poucos componentes, um projeto mais eficiente pode gerar resultados expressivos no veículo como um todo, principalmente no desempenho do motor à combustão.

Através de ferramentas modernas de simulação computacional é possível avaliar diferentes propostas e indicar o melhor caminho para uma solução que atenda requisitos de funcionalidade, custos, estrutural e espaço físico.

A utilização das equações de *Navier-Stokes* é a melhor forma de se obter um resultado confiável, principalmente pela condição turbulenta do sistema, que é resolvido através de um modelo matemático de turbulência, o *k-epsilon*. Esses modelos matemáticos devem ser implementados através de um software de cálculos de volumes finitos, auxiliados de sistemas de computação de alto desempenho. Todos esses recursos são necessários para se obter respostas confiáveis e de forma rápida para atender as necessidades da indústria, gerando valor e garantindo competitividade.

O estudo do transporte ao longo do sistema, relativo à análise da perda de pressão, seja na região porosa ou não porosa, demonstra que há um comportamento relativo do escoamento com o gradiente de pressão. Sendo que exclusivamente no interior do elemento poroso

esse comportamento é linear e proporcional às características do filtro. Portanto, essa condição obedece a lei de Darcy e apenas através do fluxo na região do filtro de ar.

Esse resultado indica a complexidade do transporte ao longo dos dutos, principalmente quando há uma região porosa ao longo do escoamento. Isso prova que há uma grande dependência da modelagem correta de um escoamento com regiões porosas nos estudos de fluidodinâmica, para que sejam obtidos resultados confiáveis ainda nas fases do protótipo durante o desenvolvimento de produtos. Todas essas ações visam otimizar a performance do sistema, e obter produtos mais eficientes e competitivos.

Considerações finais

Após finalizado o estudo se torna mais claro o entendimento ao se fazer uma analogia com um sistema elétrico, onde cada volume dentro do domínio pode ser comparado à uma resistência e o escoamento do fluido seria o transporte de uma corrente elétrica ao longo desse sistema. Quanto maior for o sistema, mais resistência haverá ao escoamento.

Partindo desse pressuposto, fica claro que o sistema de admissão se torna uma barreira ao escoamento, porém é um mal necessário, pois faz ligação do ar atmosférico (em temperatura ambiente) até o motor de combustão interna. Caso o sistema de admissão não existisse, o motor acabaria por capturar ar mais quente que está ao seu redor e isso provaria uma perda de desempenho e o aumento do consumo do motor. Um segundo motivo que justifica a necessidade do sistema de admissão é o filtro de ar, responsável por garantir que partículas sólidas em suspensão no ar, não sejam aspiradas pelo motor de combustão.

Pelos motivos descritos anteriormente fica claro que, minimizar o impacto gerado pela geometria do sistema de admissão de ar é fundamental. Para isso é que as técnicas de fluidodinâmica computacional são necessárias, tais ferramentas permitem uma análise prévia do sistema com foco no desenvolvimento de um projeto mais robusto e eficiente.

5.1 O cenário atual da engenharia de desenvolvimento de produto

Foi percebido que a geometria de um coletor de admissão tem grande impacto no resultado obtida, porém é possível entender que para um veículo moderno o espaço físico é um desafio e projetar um componente do motor não é igual a 10 anos atrás, para isso é importante entender qual o atual cenário da engenharia de desenvolvimento de produto.

Requisitos legais, como emissões e normas de segurança veicular tornam a tarefa difícil, o veículo por si é menor e para acomodar o sistema no espaço disponível é necessária uma geometria flexível, que por esse motivo possui várias mudanças de rota e forma.

Cada vez que uma mudança de direção no fluxo é causada pela geometria, temos perda de pressão no sistema pois essas mudanças funcionam como uma fonte de resistência para o escoamento do fluido como um todo. Para isso as ferramentas de fluidodinâmica computacional se mostram fundamentais, pois permitem avaliar o comportamento do

sistema em diferentes cenários, auxiliando a engenharia na definição do melhor projeto para atender todos os requisitos do sistema.

Essa pesquisa tem impacto tecnológico, ambiental e principalmente econômico, pois apresenta o estado da arte no que diz respeito à um estudo multidisciplinar que envolve conhecimentos na área da física, matemática, informática e que são fundamentais para atender possíveis requisitos ambientais, políticos e econômicos da indústria atual. Essa é uma fórmula básica para garantir competitividade das empresas locais frente ao mercado globalizado.

5.2 Contribuições

A pesquisa tem contribuições significativas nos campos teóricos e práticos, já que é apresentada uma fundamentação teórica contextualizada que pode servir de fonte de estudo e inspiração para trabalhos futuros, assim como uma metodologia detalhada que permite que o leitor seja capaz de reproduzir as simulações em problemas semelhantes de forma prática e bem comentada.

Outra importante contribuição é o fato do estudo ter sido feito em um componente real, apresentando problemas que são cotidianos da indústria assim como de um sistema moderno e atual. Apesar da tecnologia do motor à combustão ser a mesma há mais de 100 anos, os métodos produtivos a eletrônica e novas tecnologias foram criadas com o objetivo de se obter uma eficiência maior dessas máquinas, logo o motor utilizado nesse estudo é considerado uma peça exemplar em estado de arte, agregando tecnologias modernas e com alta eficiência. Ao apresentar os resultados obtidos é definido um marco científico para futuros pesquisados que passam a ter acesso a informações atualizadas para uma condição moderna e real.

5.3 Sugestões para Futuras Pesquisas

Apesar de ter sido utilizado um software de simulação comercial, ainda se faz necessário um estudo de correlação do problema. Acredito que a construção de uma bancada de testes para obter dados experimentais seja uma proposta interessante, principalmente porque ainda se faz necessário o ensaio do filtro de ar para se obter suas curvas características. A construção de uma bancada de testes para ensaios de perda de pressão pode atender necessidades específicas da indústria e de pesquisas futuras.

Caso seja possível aliar ensaios de uma possível bancada com dados obtidos em dinâmô-

metros de motores, é capaz de se modelar o sistema todo em estado da arte e correlacionar diversos dados, inclusive considerando a influência do aumento da temperatura no sistema por conta da condução nas paredes e fontes de calor, como motor, radiador e transmissão.

Também é possível utilizar o mesmo modelo de volumes finitos para obter resultados como vibração e ruído, fazendo estudos de acoplamento fluido estrutura, sendo o motor a principal fonte de excitação do sistema. É possível também executar estudos com o ressonador de *Helmholtz* para eliminar ruídos não desejados, que geralmente são resolvidos com a adição de materiais isolantes caros ou ajustes de calibração do motor à combustão.

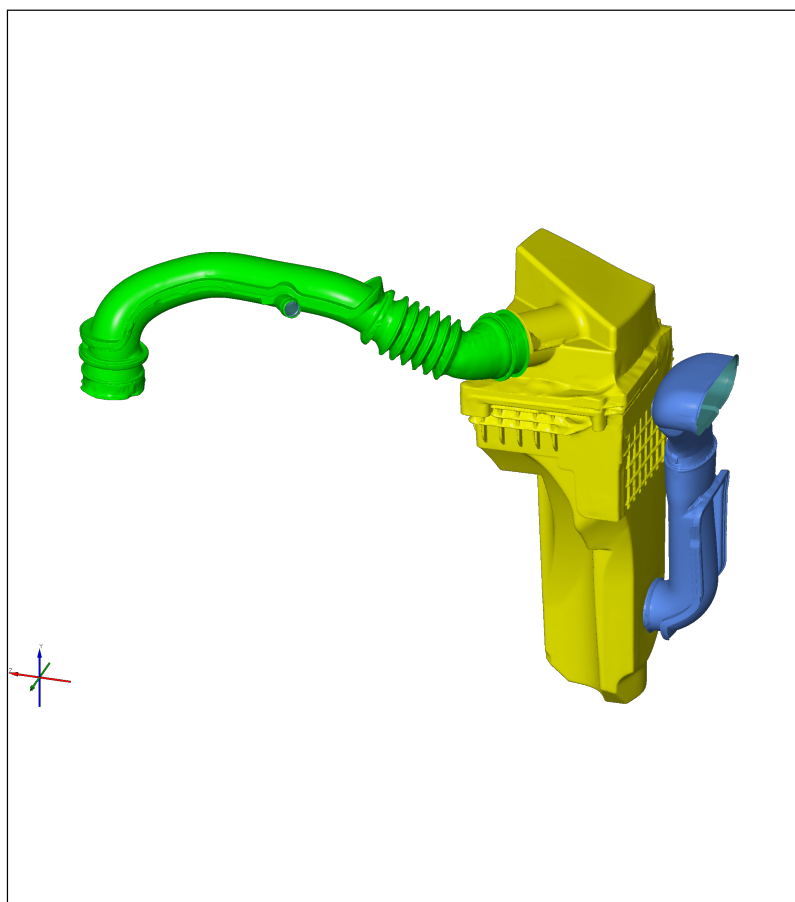
O estudo apresentado nesse trabalho foi feito sobre o sistema de admissão de ar de um motor moderno e de comercialização global, sendo assim tem fácil aquisição de peças e possibilidade de replicabilidade em outros centros de pesquisa ao redor do mundo, sendo possível a utilização do mesmo para diversas pesquisas futuras. Essa escolha foi proposital, pois abre um leque de possibilidades, principalmente pelo fato de ter sido escolhido um motor que já possui diversas tecnologias e aperfeiçoamentos em termos de engenharia.

Relatórios de escaneamento 3D

A.1 Relatório do sistema Gom de digitalização 3D

Overview 1

2/2



Inspetor:	Artur Ferreira	Projeto:	ALBERTO_Scan
Instituicao:	Senai CIMATEC	Peca:	Assembly
Dtpo:	DPI	Peca no:	1
Local:	Salvador - BA	Versao:	001
Data:	9/1/17	Charge-Nr.:	1

System: GOM Atos I STD
Alignment: manual
Temperature: 24° | Raster 1:4 | Poligonization: Smooth
Calibration Deviation: 0.019 Pixel | Scale Deviation: 0.002 mm
Camera Angle: 27.9 deg

gom
Optical Measuring Techniques
www.gom.com


A.2 Relatório do sistema T - SCAN de digitalização Pág. 01



T-SCAN CS QUALITÄTSURKUNDE T-SCAN CS CERTIFICATE OF QUALITY

Überprüfungsergebnisse Results of Verification

1) T-POINT CS mit T-TRACK CS T-POINT CS and T-TRACK CS	Toleranz / μm Tolerance / μm	max. Abweichung / μm max. deviation / μm
Kugelstab (L = 1000 mm) sphere gage (l = 1000 mm)	100 μm	46,9 μm
2) T-SCAN CS mit T-TRACK CS T-SCAN CS and T-TRACK CS	Toleranz / μm Tolerance / μm	max. Abweichung / μm max. deviation / μm
Kugelstab (L = 1150 mm) sphere gage (l = 1150 mm)	107,5 μm	61,6 μm
3) T-SCAN CS mit T-TRACK CS T-SCAN CS and T-TRACK CS	Toleranz / μm Tolerance / μm	max. Abweichung / μm max. deviation / μm
Präzisionskugel (Standardabweichung), $\varnothing = 100 \text{ mm}$ precision sphere (standard deviation), $\varnothing = 100 \text{ mm}$	50 μm	39,1 μm
Präzisionskugel (Durchmesserabweichung) precision sphere (diameter deviation)	25 μm	15,2 μm

28.01.2014 i. A 

Datum, Unterschrift
Date, signature

A.3 Relatório do sistema T - SCAN de digitalização Pág. 02



T-SCAN CS QUALITÄTSURKUNDE T-SCAN CS CERTIFICATE OF QUALITY

T-SCAN CS S/N	LTS1000079
T-TRACK CS S/N	CTT1200059
T-POINT CS S/N	CTP1000040
INVAR Endmaß S/N / INVAR gage S/N	00017
Kugelstab S/N / sphere gage S/N	00017
Präzisionskugel S/N / precision sphere S/N	313
Messraumtemperatur [°C] / room temperature [°C]	20,1 °C
Bearbeiter / person in charge	PS

Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich mit Normalen, welche auf nationale Normale der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder auf andere nationale Normale rückführbar sind, bei einer Referenztemperatur von 20° C. Alle Ergebnisse sind ein σ Angaben.

The calibration is performed by comparison with reference standards, which are traceable to the national measurement standards maintained by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) or to other national standards, at a reference temperature of 20° C. All results are based on one σ .

- ÜBERPRÜFUNG:**
- 1) Überprüfung der T-POINT CS Touchprobe mit T-TRACK CS-Kamera an einem INVAR-Endmaß (L = 1000 mm) in jeweils fünf räumlichen Ausrichtungen bei 2,8 m und 3,4 m Abstand.
 - 2) Überprüfung des T-SCAN CS Scanners mit T-TRACK CS-Kamera an einem Kugelstab (L = 1150 mm) in elf räumlichen Ausrichtungen bei 2,8 m und 3,4 m Abstand.
 - 3) Überprüfung des T-SCAN CS Scanners mit T-TRACK CS-Kamera an einer Präzisionskugel ($\varnothing = 100$ mm) bei 2,5 m, 3,0 m und 3,3 m Abstand.

- VERIFICATION:**
- 1) Verification of T-POINT CS touch probe and T-TRACK CS camera using an INVAR gage (L = 1000 mm) in five spatial orientations at 2.8 m and 3.4 m distance.
 - 2) Verification of T-SCAN CS scanner and T-TRACK CS camera using a sphere gage (L = 1150 mm) in eleven spatial orientations at 2.8 m and 3.4 m distance.
 - 3) Verification of T-SCAN CS scanner and T-TRACK CS camera using a precision sphere ($\varnothing = 100$ mm) at 2.5 m, 3.0 m and 3.3 m distance.

A.4 Discritivo técnico do revelador - D 70 Metal Check

METAL-CHEK		METAL-CHEK do Brasil Indústria e Comércio Ltda.		OD-LAB-12
Data	05/06/2006	Analisado Criticamente e Aprovado por:	DESCRITIVO TÉCNICO D 70	
Página	1 de 1			
Revisão	01	<i>Antônio Venanzi</i>		
Subst.	OD-LAB-12 de 05/10/2005			

1. **TIPO DE REVELADOR:**
Não aquoso.
2. **MÉTODO DE APLICAÇÃO:**
Aerossol, pulverização (pistola).
3. **TIPO DE SECAGEM:**
Normal.
4. **LIMPEZA PRÉVIA:**
E 59 (aerossol ou embalado), R 60 (aerossol ou embalado), R 501 (aerossol ou embalado), TMC 10 (aerossol ou embalado).
5. **TEMPO DE REVELAÇÃO:**
De acordo com o procedimento.
6. **TEMPERATURA DE TRABALHO:**
10°C a 52°C.
7. **LÍQUIDO PENETRANTE:**
Metal-Chek VP 30, Metal-Chek VP 31, Metal-Chek VP 34, Metal-Chek FP 91 e Metal-Chek FP 95, Metal-Chek FP 96 e Metal-Chek FP 97
8. **CAMPO DE APLICAÇÃO:**
Petroquímico, nuclear, *automotivo*, aeroespacial, naval, ferroviário, *siderúrgico* e indústrias diversas.
9. **TIPOS DE DEFEITOS:**
Porosidade e trincas.
10. **NORMAS / REFERÊNCIA:**
PETROBRAS N1596, PETROBRAS N 2370, ASME Seção V, AMS 2644.
11. **ÁREAS COBERTAS POR TIPO DE EMBALAGEM:**
D 70 (propelente Dymel 134A) - 40 metros lineares ou 4,5m² a 5,5 m².
D 70 (propelente Hi) - 20 metros lineares ou 4m² a 5 m².
D 70 (embalado)- 80 metros lineares ou 15m²
Nota: dependendo do local onde for realizado o ensaio poderão ocorrer variações.
12. **DOCUMENTOS EMITIDOS:**
Certificado de conformidade.
13. **CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO NORMA AMS 2644:**
Forma: d
14. **APRESENTAÇÃO DA EMBALAGEM:**
Embalado - embalagens de 01 L / 05 L / 18 L / 20 L.
Aerossol - caixas de papelão contendo 12 unidades.
15. **TIPO DE MATERIAL A SER EXAMINADO:**
Aço carbono/manganês, aços cromo/molibdênio, aços de baixa liga, aços inoxidáveis, austeníticos, ferríticos e martensíticos, ligas de níquel, titânio, ligas de cobre, alumínio, plásticos, cerâmica e revestimentos.

Bibliografia

- ANSYS, Inc. *ANSYS FLUENT Theory Guide*. 275 Technology Drive, Canonsburg, Pennsylvania, 15317, 2010. Release 13.0, November 2010. Disponível em: <<https://www.ansys.com/Resource-Library>>.
- ANSYS, Software Company Inc. *ANSYS FLUENT User's Guide*. 275 Technology Drive, Canonsburg, Pennsylvania, 15317, 2017. Release 18.1, Abril 2017. Disponível em: <<https://www.ansys.com/Resource-Library>>.
- BEAR, J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover, 1972. (Dover Civil and Mechanical Engineering Series). ISBN 9780486656755. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=lurrmlFGhTEC>>.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. *Fenômenos de transporte*. Livros Técnicos e Científicos, 2004. ISBN 9788521613930. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ze3uAAAACAAJ>>.
- COMPANY, FORD MOTOR. *Manual de Serviço Ford Ka 2015*. Av. Henry Ford, 2000 - Copec, Camaçari - BA, 42810-000, Brazil, 2015. Disponível em: <<https://www.ford.com.br/servicos>>.
- MALISKA, C.R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Livros Tecnicos e Cientificos, 2004. ISBN 9788521613961. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8i3qAAAACAAJ>>.
- POPE, S.B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521598866. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=HZsTw9SMx-0C>>.
- SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. *Boundary-Layer Theory*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 9783662529195. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=bOUyDQAAQBAJ>>.
- SCHRAMM, Dieter; HILLER, Manfred; BARDINI, Roberto. Introduction to vehicle dynamics: Modeling and simulation. In: _____. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. p. 1–15. ISBN 978-3-540-36045-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-36045-2_1>.
- STROBL, Klaus H.; MAIR, Elmar; HIRZINGER, Gerd. Image-based pose estimation for 3-d modeling in rapid, hand-held motion. In: IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Computer Society, 2011. (Shanghai International Conference Center).
- TRITTON, D.J. *Physical Fluid Dynamics*. Springer Netherlands, 2012. (The Modern University in Physics Series). ISBN 9789400999923. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=mrLvCAAQBAJ>>.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education, Limited, 2007.

ISBN 9780131274983. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=mJS2uAAACAAJ>>.

Estudo do escoamento em meio poroso de um coletor de admissão automotivo

Alberto Ruiz Vieira de Melo Filho

Salvador, Julho de 2018.