

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**VITOR JOSÉ ANDREOLA**

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM CÂMARA DE COMBUSTÃO  
COMPACTA PARA MACI**

**Alegrete  
2023**

**VITOR JOSÉ ANDREOLA**

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM CÂMARA DE COMBUSTÃO  
COMPACTA PARA MACI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Fuhr Santiago.

**Alegrete  
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

A559s Andreola, Vitor José  
Simulação de escoamento em câmara de combustão compacta para MACI.  
48 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2023.  
"Orientação: Gustavo Fuhr Santiago".

1. Motores Alternativos de Combustão Interna. 2. Escoamento com Tumble. I. Título.

**VITOR JOSÉ ANDREOLA**

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM CÂMARA DE COMBUSTÃO COMPACTA PARA MACI**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em: 27, de junho de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr Gustavo Fuhr Santiago  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich  
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **GUSTAVO FUHR SANTIAGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2023, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2023, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ADRIANO ROBERTO DA SILVA CAROTENUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2023, às 11:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1160334** e o código CRC **CA6BD51E**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao meu orientador Gustavo, pelas diversas horas dedicadas no auxílio da confecção deste trabalho e por tornar este possível;

À minha mãe, que mesmo de longe fez-se perto, sempre demonstrando apoio total e procurando ajudar em tudo que podia, e conseguiu;

À minha família por tornar a realização deste sonho possível;

À Bruna e ao Pregui, por terem sido os alunos que mais me ensinaram no decorrer da faculdade;

Ao Alvim, pelas tantas e tantas conversas e aprendizados, um exemplo de profissional e ser humano para mim;

Ao Léo e a Lari por todo suporte durante a pandemia, período que praticamente moramos juntos, e foi muito importante na minha caminhada até aqui;

Aos amigos em geral formados no decorrer deste percurso, tornando este muito melhor: Macedo, Takeshi, Herick, Sarturi, dentre tantos outros que impactaram na minha vida;

À galera do estágio, por terem sido sempre tão bacanas comigo e me ajudado a chegar até aqui;

Muito obrigado!!

## RESUMO

Neste trabalho foi simulada uma câmara de combustão compacta com geometria de válvulas e dutos para obter escoamento em *tumble* na admissão. A geometria compacta prevê que as válvulas de admissão estejam posicionadas verticalmente ao lado do cilindro, com as válvulas de descarga em posição oposta a estas na câmara de combustão. A câmara de combustão definitiva ficou com 13mm de altura máxima e com distância entre as cabeças das válvulas de admissão e descarga de 11mm, quando totalmente fechadas. O volume da câmara de combustão utilizado foi de 53,2cm<sup>3</sup> para uma comparação direta qualitativa com o motor AP 1.6, a gasolina, com 8,5:1 de relação de compressão, cujos dados de vazão de bancada de fluxo são encontrados na bibliografia. Os testes foram realizados a partir dos desenhos confeccionados em software CAD e as simulações por meio de um software CFD para uma diferença de pressão de 10 polegadas de coluna d'água, simulando um ensaio em bancada de fluxo. As simulações foram realizadas com o levantamento das válvulas de admissão dividido em 5 posições com intervalo equidistante entre elas, obtendo sempre vazão maior do que o cabeçote original. Obteve-se para o levantamento máximo de 7mm um aumento de 19,67% da área de admissão da válvula com um aumento de vazão de 51,57%. Já para o levantamento máximo de 9,3mm, a área é 64,73% maior com um incremento na vazão de 64,14%, em relação ao cabeçote original. Cabe ressaltar que esta melhoria é qualitativa, devido aos Motores Alternativos de Combustão Interna (MACI) terem vazão pulsante e a bancada de fluxo ter vazão contínua. Deste modo, houve aumento de rendimento volumétrico, embora não seja proporcional ao aumento de vazão dos testes realizados.

Palavras-Chave: MACI, Combustíveis Renováveis, Escoamento com Tumble.

## ABSTRACT

In this work, a compact combustion chamber was simulated with valve and duct geometry to obtain tumble flow at the intake. The compact geometry provides for the intake valves to be positioned vertically to the side of the cylinder, with the discharge valves positioned opposite to them in the combustion chamber. The final combustion chamber was left with a maximum height of 13mm and with a distance between the heads of the intake and discharge valves of 11mm when fully closed. The combustion chamber volume used was 53.2cm<sup>3</sup> for a direct qualitative comparison with the AP 1.6 gasoline engine, with 8.5:1 compression ratio, whose flow bench flow data are found in the bibliography. The tests were performed from the drawings made in CAD software and the simulations by means of CFD software for a pressure difference of 10 inches of water column, simulating a flow bench test. The simulations were performed with the intake valve lift divided into 5 positions with equidistant interval between them, always obtaining higher flow rate than the original cylinder head. For the maximum lift of 7mm an increase of 19.67% of the valve intake area was obtained with a flow rate increase of 51.57%. For the maximum lift of 9.3mm, the area is 64.73% larger with an increase in flow of 64.14% compared to the original cylinder head. It should be noted that this improvement is qualitative, due to the Alternative Internal Combustion Engine (ICE) having pulsed flow and the flow bench having continuous flow. Thus, there was an increase in volumetric efficiency, although it is not proportional to the increase in flow rate of the tests performed.

Keywords: MACI, Renewable Fuels, Tumble Flow.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo do gás carbônico associado ao biocombustível	17
Figura 2: Ciclo de produção do hidrogênio de maneira mais sustentável - Energia eólica e eletrólise	18
Figura 3: Cadeia simplificada da produção de biometano	19
Figura 4: Ciclo Usual - MACI's	21
Figura 5: Extremidades de admissão e compressão - PMI e PMS	21
Figura 6: Comparativo de ciclo Otto e Diesel, variando a taxa de compressão	22
Figura 7: Bancada de fluxo – Sistema de medição e análise	23
Figura 8: Admissão por tumble	24
Figura 9: Exemplo real de câmara de um MACI	25
Figura 10: Cabeçote de motor AP Volkswagen	25
Figura 11: Vista Explodida e Lateral - Componentes	28
Figura 12: Chapa Inferior	29
Figura 13: Chapa Intermediária	30
Figura 14: Chapa Superior	31
Figura 15: Tampa Superior	32
Figura 16: Cilindro	32
Figura 17: Válvula de Admissão e Descarga	33
Figura 18: Distribuição dos componentes individuais	34
Figura 19: Válvulas Paralelas	35
Figura 20: Válvulas Concêntricas	35
Figura 21: Lid - Saída de Fluxo - Cilindro	37
Figura 22: Lids - Entrada de Fluxo - Tubos 30°	37
Figura 23: Lids Complementares - Exemplo	38
Figura 24: Pressão Atmosférica - Entrada - Tubos 30°	38
Figura 25: Pressão Estática - Saída - Cilindro	39
Figura 26: Válvula de Admissão - Espessura Base + Levantamento	40
Figura 27: Válvula de Descarga - Fixada na Tampa Inferior	40
Figura 28: Faces - Passagem de Fluxo - Tubos 30°	41
Figura 29: Simulação – Cabeçote Original – Software CFD	41
Figura 30: Variação de Velocidade e Efeito Tumble	42
Figura 31: Parâmetro de Velocidade - Superfície - Cilindro	43
Figura 32: Vazão X Levantamento da Válvula (7mm) - Original x TCC	45
Figura 33: Vazão X Levantamento da Válvula (9,3mm) - Original x TCC	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do conjunto válvula e cabeçote original – 049H .....	26
Tabela 2: Resultados - Vazão - 2 Válvulas de Admissão - 7mm .....	44
Tabela 3: Resultados - Vazão - 2 Válvulas de Admissão – 9,3mm .....	44

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
CAD – Computer Aided Design  
CFD – Computational Fluid Dynamics  
CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis e Biogás  
GNV - Gás Natural Veicular  
ICE - Alternative Internal Combustion Engine  
MACI – Motor Alternativo de Combustão Interna  
MCE – Motor de Combustão Externa  
Sabesp - Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo  
UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Objetivos .....	15
1.1.1	Objetivo Geral .....	15
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1	Combustíveis com baixa emissão de carbono .....	16
2.1.2	Hidrogênio .....	17
2.1.3	Biometano.....	18
2.1.4	Álcoois .....	19
2.2	Motor Alternativo de Combustão Interna (MACI) .....	20
2.2.2	Funcionamento – MACI .....	20
2.2.3	Aplicações – MACI.....	22
2.3	Simulações de Bancada de Fluxo.....	22
2.4	Admissão por <i>Tumble</i> .....	23
2.5	Câmara de Combustão Compacta.....	24
3.	METODOLOGIA.....	25
4.	RESULTADOS .....	27
4.1	Desenho do Projeto – Componentes Individuais .....	27
4.1.1	Chapa Inferior .....	28
4.1.2	Chapa Intermediária – Volume da Câmara de Combustão .....	29
4.1.3	Chapa Superior.....	30
4.1.4	Tampa Superior .....	31
4.1.5	Cilindro.....	32
4.1.6	Válvulas de Admissão e Descarga .....	33
4.2	Montagem e Posicionamento das Válvulas .....	34
4.3	Simulações.....	35
4.3.1	Definição de Parâmetros Iniciais .....	36

4.3.2	Vedação - Criação de <i>Lids</i> .....	36
4.3.3	Definição das Condições de Escoamento .....	38
4.3.4	Teste de Funcionamento .....	39
4.3.5	Levantamento de Válvulas.....	39
4.3.6	Aplicação de Fluxo.....	40
4.3.7	Velocidade de Superfície .....	42
4.4	DISCUSSÃO .....	43
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
	REFERÊNCIAS .....	47

## 1 INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna em veículos automotivos estão sendo substituídos por modelos mais sustentáveis (GRAY, 2021). Entretanto para algumas aplicações específicas de motogeradores em setores como hospitais, frigoríficos e centros físicos de segurança de dados digitais (*datacenters*) os custos de implementação e operação são reduzidos quando comparados a bancos de baterias e inversores para potências elevadas. Cabe salientar que em situações como a queda de energia na rede elétrica torna-se necessário o apelo ao uso da combustão interna ou banco de baterias.

Neste cenário, a indústria automotiva com enfoque na melhoria contínua, em conformidade às normas regulamentadoras governamentais, busca oferecer bom desempenho somado a preservação ambiental, tornando um processo mais árduo do que realizado no período da criação inicial dos motores alternativos de combustão interna, meados do século XIX (STONE, 1999). A elevação do rendimento termodinâmico pode vir através da câmara de combustão compacta e do aumento do rendimento volumétrico por meio da admissão por *tumble*, sob cuja premissa este trabalho foi elaborado.

Alguns métodos de aumento da taxa de compressão do motor podem influenciar negativamente no seu comportamento, como grandes temperaturas em válvulas de exaustão, acarretando a autoignição com diminuição da potência e maior consumo de combustível. Uma alternativa para reverter esse problema é utilizar uma câmara compacta que mantém a válvula de descarga próxima da vela de ignição, permitindo o aumento da relação de compressão.

Vale ressaltar o objetivo de analisar um arranjo de válvulas opostas em câmaras de combustão, simultaneamente com admissão por *tumble* em um cabeçote. Além disso, obter a aquisição de parâmetros comparativos de medição da vazão do cabeçote comum por meio do fluxo de ar, realizado por um simulador computacional. Todo este desenvolvimento tem como origem e embasamento o projeto do Prof. Gustavo Fuhr Santiago denominado: Estudo de Parâmetros de Fluxo e Transferência de Calor em Arranjos Alternativos de Válvulas em Câmaras de Combustão de Motores, registrado na Unipampa sob o número 01.031.10.

## 1.1 Objetivos

Esta seção é dedicada para os objetivos, gerais e específicos, deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um cabeçote com câmara de combustão compacta e admissão por tumble, para motores alternativos de combustão interna, utilizando simulações computacionais, com objetivos qualitativos, para comparar seu rendimento volumétrico com uma referência padrão.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Compõe os objetivos específicos deste trabalho:

- 1) Dimensionar uma câmara de combustão compacta que permita um futuro aumento da relação de compressão;
- 2) Otimizar a admissão para melhorar o rendimento volumétrico;
- 3) Simulação de teste de fluxo no cabeçote convencional e no cabeçote desenvolvido;
- 4) Comparar os resultados específicos, tirando conclusões a respeito.

## 1.2 Justificativa

Câmaras compactas permitem o melhor controle da combustão, aumento na taxa de compressão do motor e melhoria na eficiência termodinâmica. Com esta alocação distinta das válvulas pode-se obter variação positiva do rendimento volumétrico, junto da possibilidade de maior espaço para as válvulas no cabeçote de Motores Alternativos de Combustão Interna (MACI).

Ainda existem combustíveis, tanto biocombustíveis quanto hidrogênio produzidos por eletrólise, que podem usar na sua obtenção fontes renováveis de energia elétrica, como a eólica e a fotovoltaica. Este trabalho visa utilizar estes combustíveis em MACI para aplicações de geração distribuída e motogeradores em setores críticos como: hospitais, frigoríficos e *datacenters*, como o do DTIC (Diretoria de Tecnologia da Informação e Comunicação).

Pretende-se assim realizar, baseado em motores já existentes de Ciclo Otto, a

melhoria do rendimento térmico e volumétrico destes para seu uso com combustíveis renováveis nas aplicações supracitadas.

A utilização simultânea de câmara de combustão com válvulas opostas e da admissão por tumble não é encontrada na literatura, motivando o presente trabalho.

## **2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA**

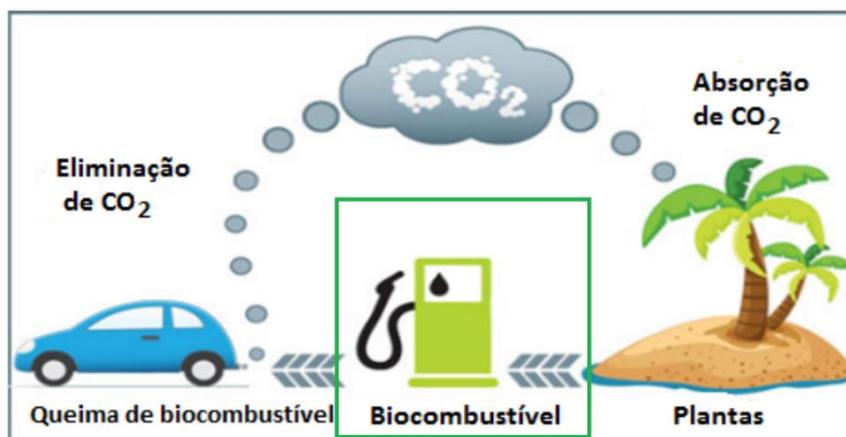
Este capítulo é dedicado aos conceitos utilizados para formulação deste trabalho.

### **2.1 Combustíveis com baixa emissão de carbono**

Os grandes impactos ao meio ambiente provenientes dos meios de transportes trazem um foco cada vez maior no uso de veículos com taxas menores de emissão de carbono, além de transportes que utilizem energias alternativas. Sendo considerada como possível solução, a eletricidade é cogitada como forma de energia para resolver este problema, entretanto conforme o aumento das dimensões do veículo de transporte a eletrificação destes torna-se mais difícil (GRAY, 2021).

Conforme pode ser observado em Gray (2021) existem formas de energia mais sustentáveis como biocombustíveis e hidrogênio, com grande relevância para o desenvolvimento deste trabalho, que podem ser aplicadas na descarbonização. Em algumas aplicações os veículos elétricos possuem limitações de bateria, reduzindo a capacidade de carga útil e cobertura, quando comparada aos combustíveis líquidos, por exemplo. Diante disso, alternativas como o biometano e o hidrogênio trazem boa competitividade de mercado, ainda que exijam estruturas de distribuição bem elaboradas (ADNAN, 2019). A figura 1 descreve o ciclo de carbono proveniente do uso de biocombustíveis em aplicações de automóveis, passando pelo processo de absorção do CO<sub>2</sub> exercido pelas plantas, gerando energia limpa em vez do modelo tradicional, em que não há absorção de CO<sub>2</sub> e ainda elimina CO<sub>2</sub> na atmosfera, intensificando o problema do efeito estufa.

Figura 1: Ciclo do gás carbônico associado ao biocombustível



Fonte: Adaptado de Universidade Federal de Uberlândia – Repositório Institucional – 2017

### 2.1.2 Hidrogênio

Segundo Crabtree (2008) a pureza do hidrogênio e seu uso em células de combustível transformam-no em bom substituto dos combustíveis de origens fósseis, ainda que as aplicações desta forma de energia em âmbitos relevantes exijam progressos elevados no modo de armazenamento e produção. Cabe ainda salientar o foco internacional de grandes potências mundiais no uso do hidrogênio como forma de conforto térmico aos residentes em locais para temperaturas de frio extremo, tais como: Alemanha, Rússia, Canadá, entre outros (MCKINSEY ENERGY INSIGHTS, 2016).

Sendo o elemento mais leve da tabela periódica, além de não ser tóxico e não provocar emissões danosas ao ambiente por possuir menor escala de emissão de gases ocasionadores do efeito estufa, o hidrogênio é, por vezes, considerado como o combustível do futuro (GUPTA, 2008).

Outra vantagem do uso do hidrogênio é poder ser armazenado de forma simples e em quantidades consideráveis, sendo aplicado como forma de geração de energia e deixando como resíduo apenas água (CRABTREE, 2008). A figura 2 tem como intuito demonstrar o ciclo de produção do hidrogênio de uma das melhores formas: com menor eliminação de CO<sub>2</sub> na atmosfera, ocorrendo por meio da captação da energia eólica – energia limpa e inesgotável – para posterior eletrólise separando as moléculas de hidrogênio e oxigênio.

Figura 2: Ciclo de produção do hidrogênio de maneira mais sustentável - Energia eólica e eletrólise



Fonte: Adaptado de Hydrogen Council

### 2.1.3 Biometano

Obtido por decomposição de matéria orgânica, o biometano é um gás inteiramente renovável, sendo um dos modelos de fonte de energia para o futuro, tendo custo baixo (WEILAND, 2010).

A produção deste gás ocorre em equipamentos biodigestores em sistemas de saneamento, aterros sanitários e usando resíduos da atividade agrícola. De acordo a CIBiogás (Centro Internacional de Energias Renováveis e Biogás), o biometano possui ampla capacidade de abastecimento para veículos com kits de gás natural veicular (GNV), fundamentados na Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), sendo possível a diminuição em até 90% das emissões de poluentes. ser mais barato quando o comparativo é a gasolina, e ter rendimento até 30% maior, quando comparado com outras formas de energia, como o etanol (CIBiogás, 2022).

No Brasil, a Sabesp (Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo) foi a pioneira na produção de biometano resultante do processo de saneamento básico. Tendo como referência um teor de 96% de pureza, o procedimento realizado cumpre com as exigências de regulamentação para aplicação em automóveis, sendo estas normas complementadas pela ANP, com possibilidade de vantagens ambientais e econômicas. A figura 3 ilustra de forma simplificada a cadeia de produção do

biometano, iniciando na coleta dos rejeitos orgânicos, passando pela decomposição por meio de bactérias, resultando na liberação do biogás. Posteriormente o biogás passa pelo processo de purificação, responsável pela eliminação do teor de carbono elevado e chegando à forma de biometano.

Figura 3: Cadeia simplificada da produção de biometano



Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e Abiogás (Associação Brasileira de Biogás)

#### 2.1.4 Álcoois

A referência mais antiga ao uso de álcool como combustível foi o Ford de quatro cilindros na corrida automobilística pioneira do Circuito da Gávea no Rio de Janeiro em agosto de 1925, no Brasil (CETESB, 2016).

Com o grande número de automóveis circulando e o alto consumo global de derivados do petróleo, o Brasil, através do Proálcool procurou implementar um sistema capaz de substituir dez por cento de todo este consumo por meio de uma fonte mais biosustentável: a cana de açúcar (GOLDEMBERG, 2006).

Um estudo feito em uma fábrica de açúcar e álcool, no Estado do Mato Grosso do Sul – Brasil, analisa a viabilidade econômica de cogeração por meio da queima do bagaço da cana de açúcar para geração de energia extra no Sistema Interligado

Nacional (SIN), obtendo bons resultados com produção superior a 40MWh, tornando-se competitiva com pequenas centrais elétricas e vindo a ser uma vantagem financeira na empresa utilizadora, além de preservar o meio ambiente (DE SOUZA, 2018).

## **2.2 Motor Alternativo de Combustão Interna (MACI)**

Os MACI são utilizados por grande parte dos veículos de transporte atuais e tiveram grandes aprimoramentos desde a sua criação, sendo a sua forma construtiva mais adaptável à aplicação visada por este trabalho. Pelos MACI ocorrem o trabalho do pistão na transformação do movimento de subidas e descidas em movimentos rotativos contínuos utilizando um sistema biela-manivela, junto dos processos de combustão (BRUNETTI, 2012).

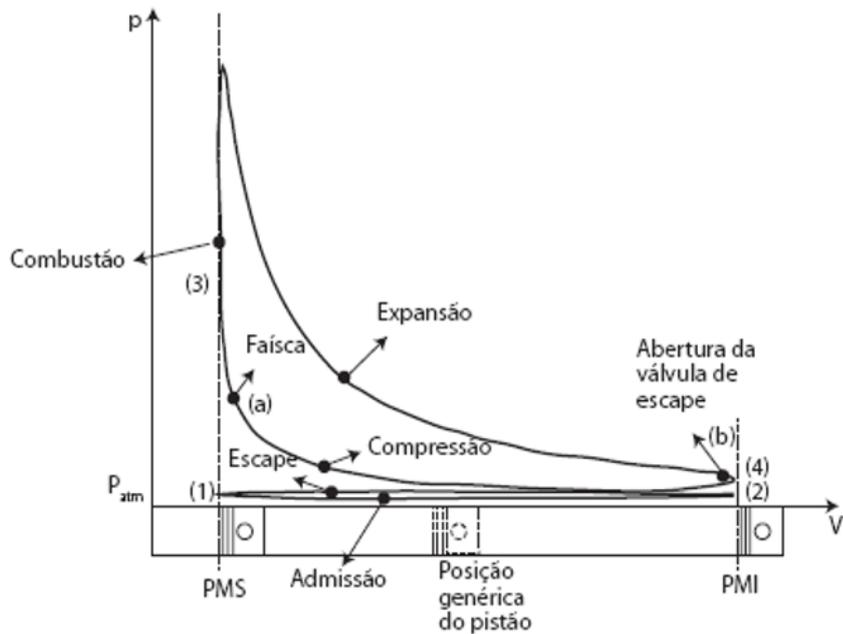
### **2.2.2 Funcionamento – MACI**

Baseando-se nos ciclos termodinâmicos divididos em expansão, compressão e variação de temperatura e pressão, os MACI empurram os pistões a partir da elevação de pressão no interior da câmara, proveniente da combustão. Tendo como foco a obtenção do controle da chama, consegue-se maior conservação dos componentes e taxas de emissões mais baixas de gases nocivos na atmosfera (HEYWOOD, 2018).

As etapas deste motor ocorrem em um período de quatro tempos. O primeiro deles é a admissão, em que a válvula é aberta possibilitando a entrada dos gases e do combustível, o segundo é denominada de compressão e ocorre quando a válvula corta a passagem da admissão e o pistão dá início a subida para realizar a combustão.

A combustão será iniciada por uma fagulha de ignição na parte interna do cilindro, acarretando na explosão (o mais controlada possível) do combustível, a partir disso tem-se, durante a descida do pistão dada pela pressão dos gases advindos da combustão, o terceiro tempo: expansão, realizadora do trabalho mecânico. No final neste ciclo tem-se a exaustão dos gases, com o pistão sendo elevado e a válvula de escape abrindo, sendo os gases oriundos da combustão liberados para a atmosfera, tornando possível a retroalimentação do ciclo, conforme pode ser observado na figura 4 (HEYWOOD, 2018).

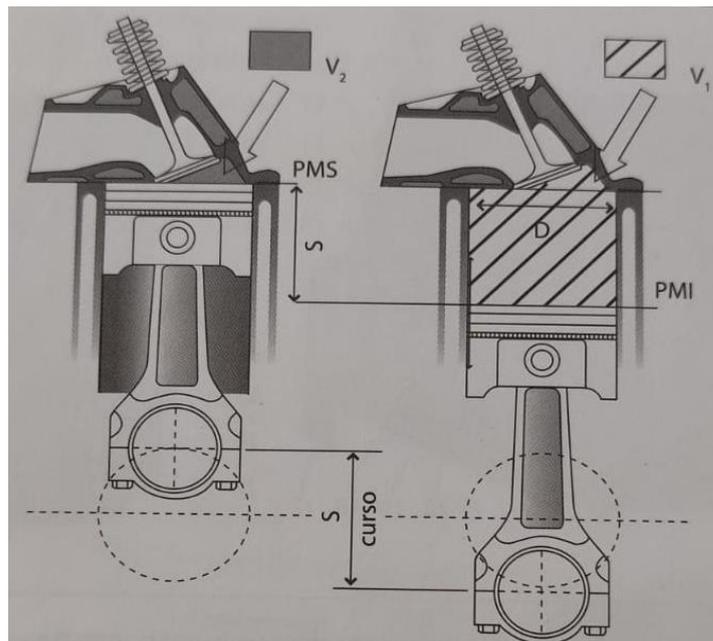
Figura 4: Ciclo Usual - MACI's



Fonte: Dedmd – Motores de Combustão Interna

Conforme pode ser observado na figura 5, o ciclo Otto ocorre com início e fim nos pontos mortos do motor, as extremidades, sendo o “PMS” o ponto morto superior, o começo da admissão, e o “PMI” o ponto morto inferior, o ponto de fim da admissão e início da compressão, já a letra “S” representa o curso do pistão e “D” o diâmetro do cilindro.

Figura 5: Extremidades de admissão e compressão - PMI e PMS



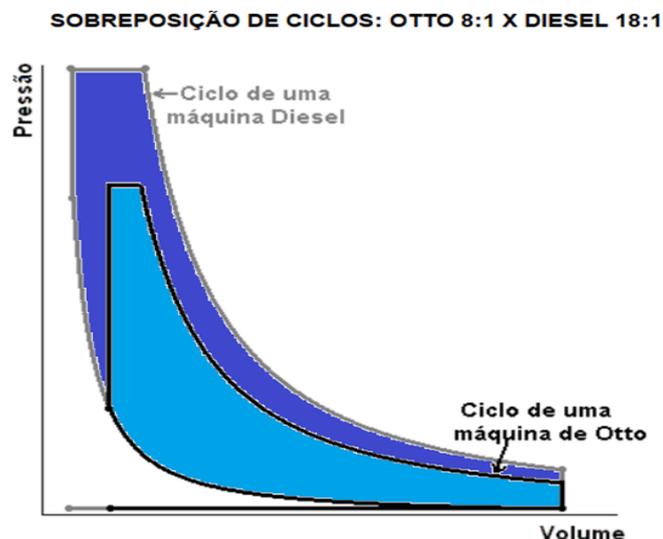
Fonte: Adaptado de Brunetti, 2012

### 2.2.3 Aplicações – MACI

A maior utilização dos MACI é em motores a gasolina e a diesel, separados em funcionamentos de 4 tempos e 2 tempos, sendo baseados nos ciclos de Nikolaus Otto e de Rudolf Diesel, respectivamente (FERGUSON, 2015).

De forma comparativa, tem-se a análise do diagrama pressão x volume. A figura 6 representa um ciclo Otto com taxa de compressão de 8:1, indicada pela cor azul clara, comparando com um ciclo Diesel de 18:1, na cor azul escura, sendo ambos com volumes máximos e suas cores representando a área de trabalho entregue em um ciclo ideal (UFRGS, 2022).

Figura 6: Comparativo de ciclo Otto e Diesel, variando a taxa de compressão



Fonte: Adaptado de Instituto de Física – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - 2022

É válida a observação do estágio final de compressão dos ciclos, em que o Diesel alcança uma pressão aproximadamente três vezes superior à do Otto, dada a sua taxa de compressão mais alta, além da possibilidade de uso de temperaturas maiores (UFRGS, 2022).

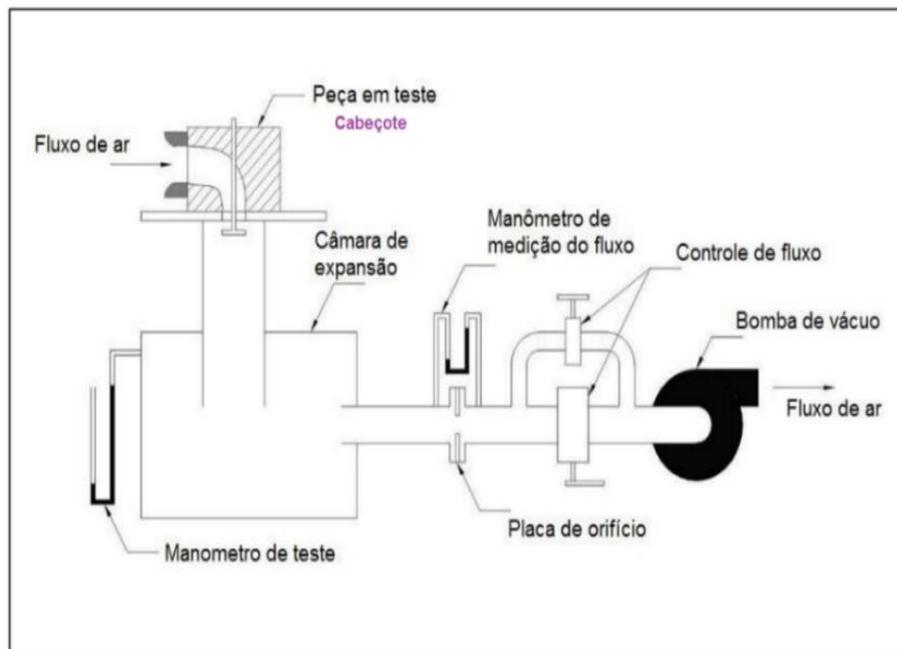
### 2.3 Simulações de Bancada de Fluxo

Uma das formas de descobrir qualitativamente se uma modificação melhorou o rendimento volumétrico de um MACI é testar seu cabeçote em uma bancada de fluxo (BERNARDI, 2015).

A partir do uso da bancada de fluxo ocorre a medição de perda de carga em escoamentos, como a vazão de ar em canais de admissão e exaustão em peças como cabeçotes, em circunstâncias experimentais (MORAES, 2018).

O gradiente de pressão entre dois pontos é o que ocasiona a passagem do fluxo de ar. No caso da bancada de fluxo, essa diferença de pressão ocorre por meio de uma fonte succionadora de ar, sendo avaliada por um sistema de medição, juntamente com o controle de fluxo, podendo ser observada na figura 7 (MORAES, 2018). O padrão para este teste é uma diferença de pressão com 10" de coluna d'água.

Figura 7: Bancada de fluxo – Sistema de medição e análise



Fonte: Adaptado de Decker, 2013.

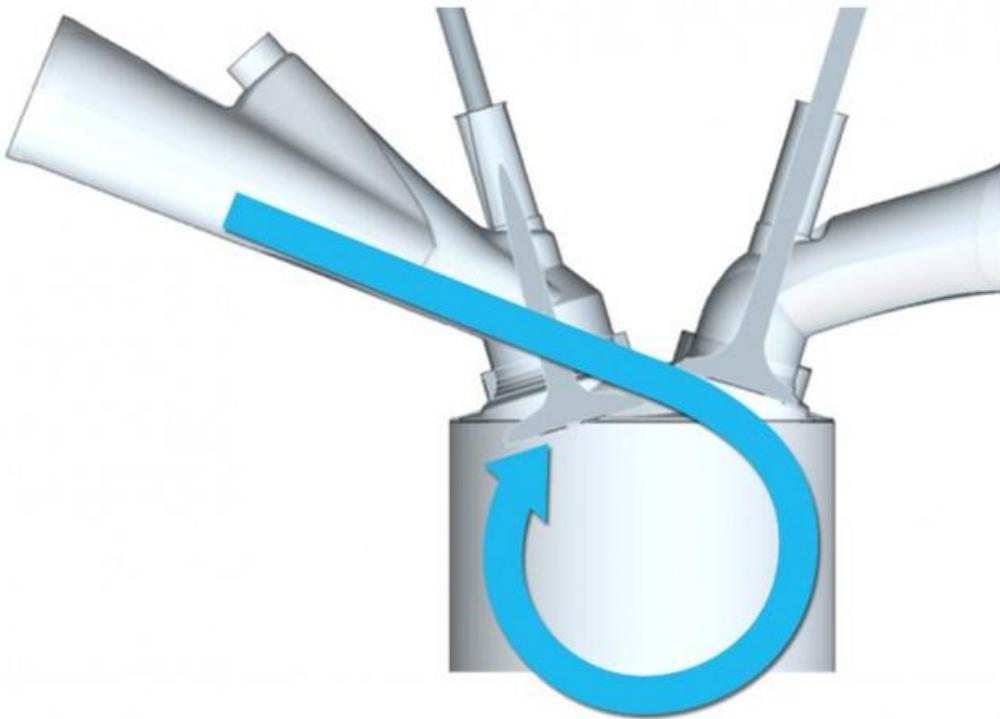
## 2.4 Admissão por *Tumble*

Estes experimentos ocorrerão através de simulações computacionais avaliando o rendimento volumétrico usando válvulas de admissão com dutos geradores de *tumble* (HEYWOOD, 2018).

*Tumble* é uma das três formas de turbulência induzida na mistura para melhorar a combustão. Ela é obtida utilizando um formato de duto retilíneo, com a inclinação semelhante à da sede de válvula, conforme pode ser visto na figura 8. A resultante disto é a geração de um vórtice com eixo perpendicular ao do cilindro (HEYWOOD, 2018).

A combustão de misturas turbulentas é mais rápida, logo mais eficiente, porque aproxima-se da combustão de volume constante do ciclo Otto ideal, levando tempo próximo de zero para acontecer ( $t = 0s$ ) (HEYWOOD, 2018). A turbulência em *tumble* também é usada nos cabeçotes atuais para melhorar o rendimento volumétrico.

Figura 8: Admissão por tumble



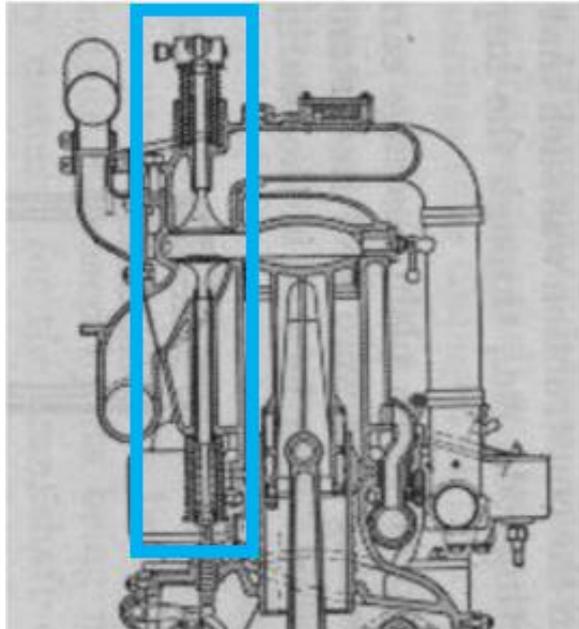
Fonte: Toyota, 2014.

## 2.5 Câmara de Combustão Compacta

O nosso modelo vai usar uma Câmara de Combustão Compacta (CCC) com válvulas opostas, ou câmara em H, que será modelada no software CAD. Este arranjo permite que o início da combustão se dê entre as cabeças das válvulas de admissão e descarga, evitando a ocorrência de autoignição quando a válvula de descarga está longe da vela (SANTIAGO, 2022). Isso permite, posteriormente, aumentar a relação de compressão do motor e por consequência seu rendimento termodinâmico (BORGNAKKE, 2009).

Um exemplo de câmara pode ser visto na figura 9, em que o diâmetro das válvulas não está restringido pelo diâmetro do cilindro como nos cabeçotes tradicionais. Isso ocorre por elas estarem ao lado do cilindro verticalmente.

Figura 9: Exemplo real de câmara de um MACI



Fonte: Sir Harry H. Ricardo – 1941

### 3. METODOLOGIA

O modelo definido como referência convencional de cabeçote é do motor Volkswagen 1.6 Alta Performance (AP), utilizado em automóveis como: Parati, Gol, Saveiro e Voyage, conforme modelo da figura 10.

Figura 10: Cabeçote de motor AP Volkswagen



Fonte: Cabeçotes Tecnomec

As válvulas selecionadas foram do modelo 0.49H. As válvulas e o cabeçote original possuem como parâmetros as descrições da tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do conjunto válvula e cabeçote original – 049H

Parâmetro	Descrição
Diâmetro do cilindro	81 mm
Diâmetro da válvula de admissão	38 mm
Diâmetro da válvula de exaustão	33,18 mm
Levantamento	9,3 mm
Duração da admissão	212°
Duração da exaustão	212°
Lobe center	110°
Cruzamento	42°
Área de passagem do ar na válvula de admissão	827,5 mm <sup>2</sup>
Área de passagem do ar na válvula de exaustão	729,4 mm <sup>2</sup>
Volume da câmara de combustão	44,5 cm <sup>3</sup>

Fonte: Moraes, 2018.

Baseando-se no motor de referência Volkswagen AP 1596 cilindradas, que utiliza uma relação de compressão de 8,5:1 para um volume unitário de = 399 cm<sup>3</sup> (equação 1):

$$Volume\ Unitário = Cilindrada / N^{\circ}\ de\ cilindros = 1596 / 4 = 399\text{cm}^3 \quad (1)$$

Chega-se num volume máximo de câmara de combustão de 399/(8,5-1) = 53,2 cm<sup>3</sup> (equação 2):

$$Volume\ Máximo\ de\ Câmara = Volume\ Unitário / (Relação\ de\ Compressão - 1) \quad (2)$$

Foi confeccionada uma câmara mais estreita próxima ao cilindro, passando ao lado dos parafusos de fixação do cabeçote, possuindo largura menor que do cabeçote original.

A área de passagem do ar na válvula de admissão é dada pela equação 3, a seguir:

$$A = \pi \cdot L_v \cdot \cos\beta \left[ D_s - 2w + \left(\frac{L_v}{2}\right) \cdot \text{sen}2\beta \right] \quad (3)$$

Na qual:

$L_v$  – Levantamento da válvula, em mm;

$\beta$  – Ângulo da sede, em graus;

$D_v$  – Diâmetro da válvula, em mm;

$w$  – Largura da sede, em mm.

Cabe salientar que esta equação é precisa para levantamentos até 25% do diâmetro da válvula.

O desenho do modelo tradicional de cabeçote e da válvula foi realizado no software CAD. Realizou-se uma comparação focada no desenvolvimento de uma câmara compacta com igual ou superior rendimento volumétrico em motores alternativos de combustão interna.

## **4.RESULTADOS**

O formato geométrico do desenho teve como objetivo facilitar possíveis mudanças no decorrer do trabalho, como variar o volume da câmara de combustão, por exemplo.

Com a geometria escolhida, limitando a largura da garganta, dada pela conexão da região do cilindro até as válvulas, foi possível colocar duas válvulas de admissão com 29mm de diâmetro cada, mantendo uma folga radial de 2mm com as paredes da câmara.

O dimensionamento da altura da câmara deve permitir um levantamento máximo da válvula de 9,3 mm, igual ao cabeçote original, além de uma folga de 3,7mm. A partir da equação 3, com levantamento de 2 válvulas, com 45° de sede e 3mm de largura de sede tem-se as áreas de passagem de válvula de admissão, ambas maiores em relação ao cabeçote original, de:

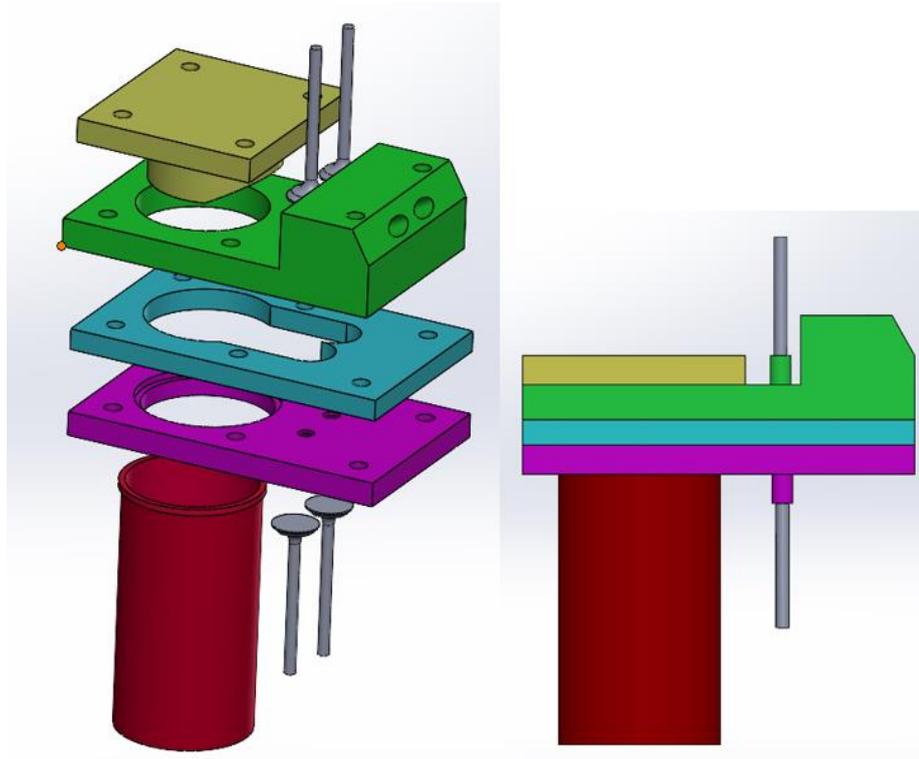
- Levantamento 7,0mm – 990,3mm<sup>2</sup> - 19,67% maior que no original;

- Levantamento 9,3mm - 1363,2mm<sup>2</sup>, 64,73% maior que no original.

### **4.1 Desenho do Projeto – Componentes Individuais**

O desenho consiste de três chapas principais, a chapa intermediária com a câmara de combustão, uma chapa inferior com as válvulas de descarga e o cilindro, e uma chapa superior com as válvulas de admissão, conforme pode ser visto na figura 11.

Figura 11: Vista Explodida e Lateral - Componentes



Fonte: Autoria Própria

#### 4.1.1 Chapa Inferior

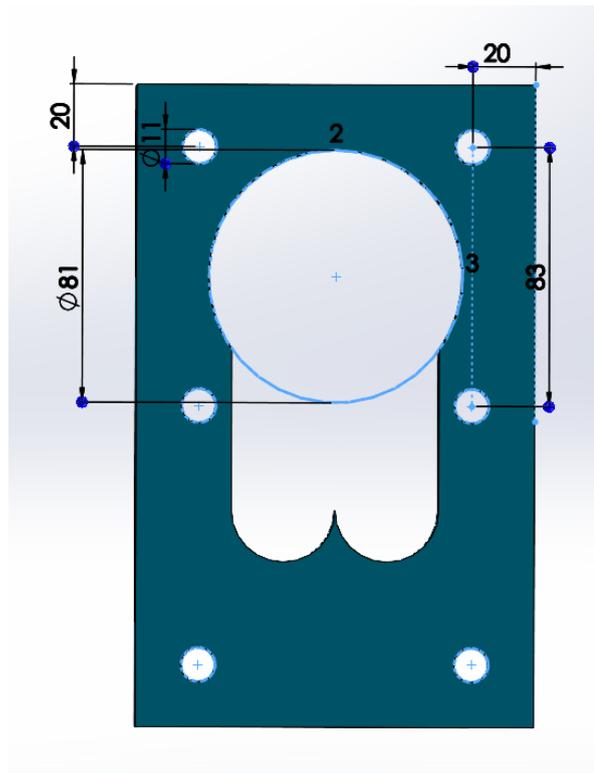
A partir da ideia de possuir chapas individuais para otimização do processo de montagem e simulação deu-se início à confecção da primeira chapa – chapa inferior - conforme pode ser observado na figura 12, de acordo com as especificações a seguir.

A chapa inferior é caracterizada por:

- Espessura de 15mm;
- Espaço para o cilindro com 81mm de diâmetro (baseado no tamanho do pistão original);
- Guia de válvula de 11mm de diâmetro (foco em impedir o movimento indesejado lateral das válvulas);
- Encaixe do cilindro na chapa inferior (maior estabilidade dos componentes);
- Espaço para os parafusos de fixação das chapas com 11mm de diâmetro (padrão original).



Figura 13: Chapa Intermediária



Fonte: Autoria Própria

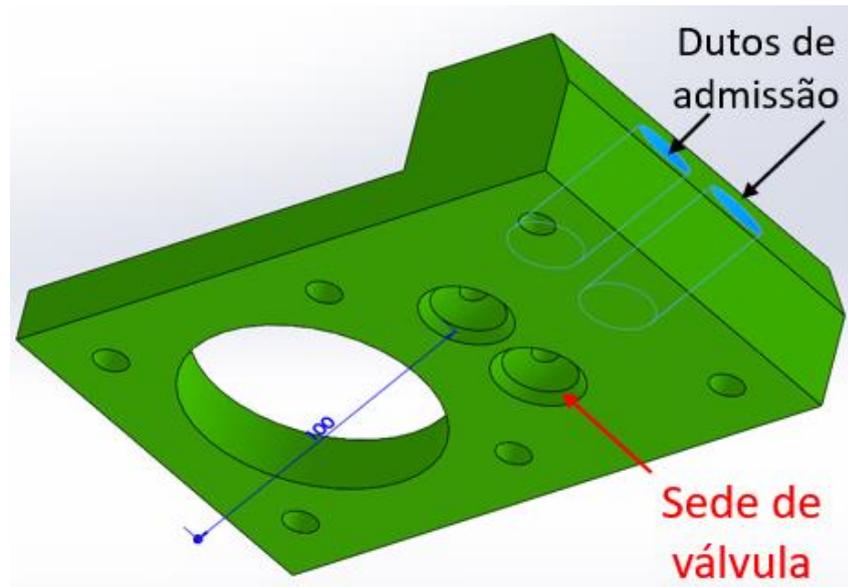
### 4.1.3 Chapa Superior

A chapa superior é responsável pela entrada do fluxo, para ela foi escolhido um ângulo de 30° gerando o efeito tumble (figura 14). Inicialmente a chapa teria 15mm de espessura, assim como as outras, porém com o aumento da retirada do material, maior é o volume morto. Logo, decidiu-se diminuir a altura da câmara para 13mm, obtendo um valor de volume adequado para o canal entre a câmara e o cilindro.

A chapa superior é caracterizada por:

- Espessura de 13mm (otimização do volume);
- Espaço para o cilindro com 81mm de diâmetro (continuando o caminho da chapa intermediária);
- Espaço para o acesso das válvulas (dado o diâmetro das válvulas de 29mm);
- Tubo de acesso do fluido com 30° (geração do efeito tumble);
- Espaço para os parafusos de fixação das chapas com 11mm de diâmetro (padrão original).

Figura 14: Chapa Superior



Fonte: Autoria Própria

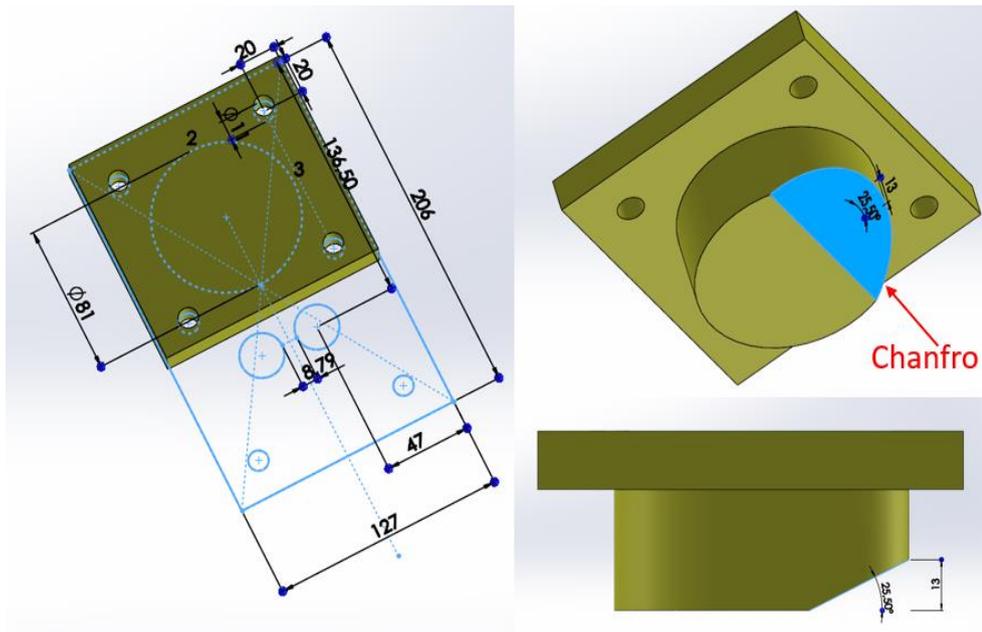
#### 4.1.4 Tampa Superior

Alinhado com as chapas teve-se a elaboração da última camada de superfície superior da câmara, representada na figura 15, tendo uma função essencial no volume da câmara, devido à influência dela nas perdas de cargas de admissão. Diante disto, a construção ideal da tampa para este trabalho teve um chanfro de 25,5° de inclinação e 13mm de espessura de corte, utilizando como base as chapas anteriores para sua confecção.

A tampa superior é caracterizada por:

- Altura máxima de 15mm (chapa de fixação) + 46mm (tampa cilíndrica);
- Chanfro de 25,5° e 13mm (melhoria do volume no projeto);
- Espaço para os parafusos de fixação das chapas com 11mm de diâmetro.

Figura 15: Tampa Superior



Fonte: Autorial Própria

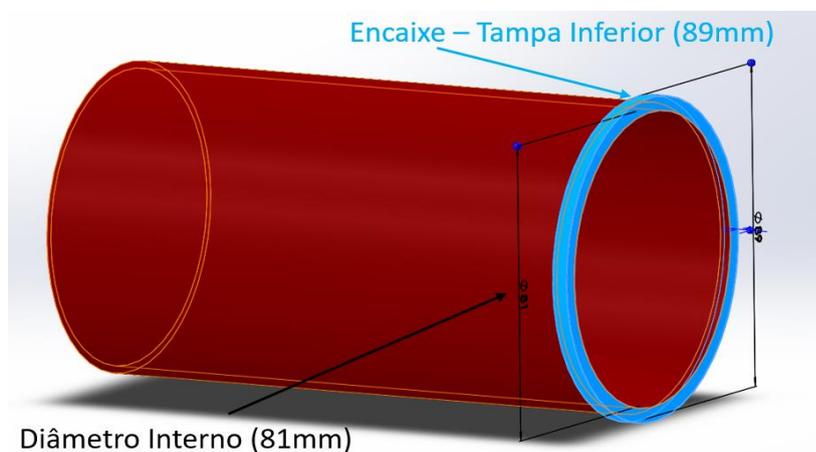
#### 4.1.5 Cilindro

O cilindro vinha como um dos componentes finais da montagem, necessitando ter espaço para a passagem de um pistão e ter um encaixe na tampa inferior, conforme pode ser observado na figura 16.

O cilindro é caracterizado por:

- Diâmetro interno de 81mm (padrão original);
- Altura de 150mm com uma parede de 2mm (dimensões adequadas ao projeto);
- Encaixe de 4mm de espessura e 8mm de aumento no diâmetro (ajuste com a tampa inferior).

Figura 16: Cilindro



Fonte: Autorial Própria

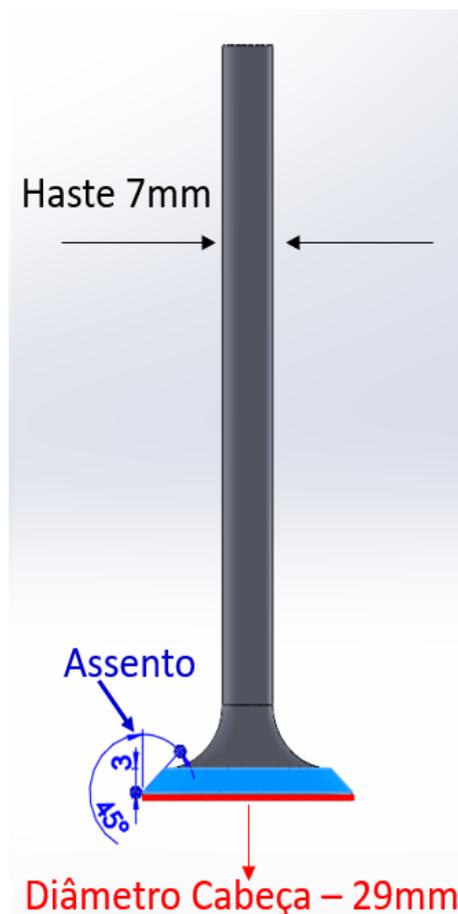
#### 4.1.6 Válvulas de Admissão e Descarga

Outro aspecto essencial neste trabalho é no trabalho de válvulas e sua influência na câmara de combustão, sendo 4 válvulas no total, 2 de admissão e 2 de descarga, com um diâmetro igual ao do cabeçote original, além de serem dimensionadas para que não se golpeassem. Uma destas válvulas está representada, podendo ser observada na figura 17.

A válvula é caracterizada por:

- Diâmetro da cabeça de 29mm;
- Haste com 7mm de diâmetro e 91mm de altura;
- Assento de 45° e 3mm de largura;
- Ressalto de 1mm (semelhante à original).

Figura 17: Válvula de Admissão e Descarga

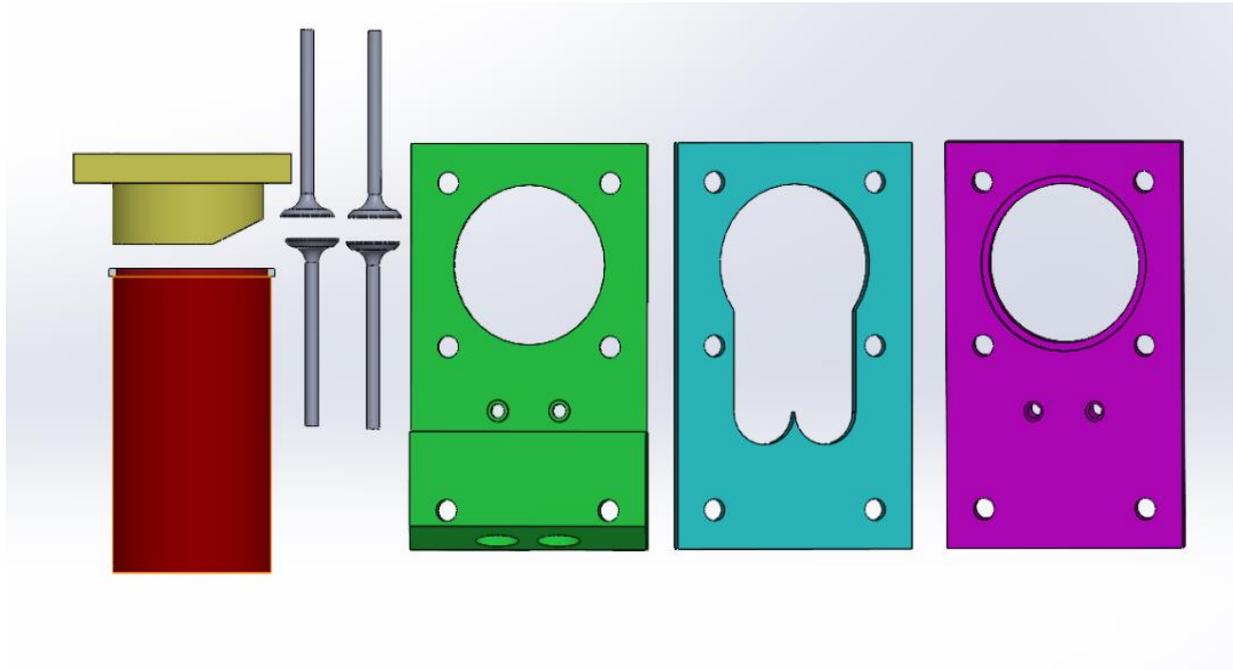


Fonte: Autoria Própria

## 4.2 Montagem e Posicionamento das Válvulas

Após a confecção individual das peças do desenho foi realizada a distribuição na folha de montagem para o processo de posicionamento de componentes destas, como pode ser observado na figura 18.

Figura 18: Distribuição dos componentes individuais



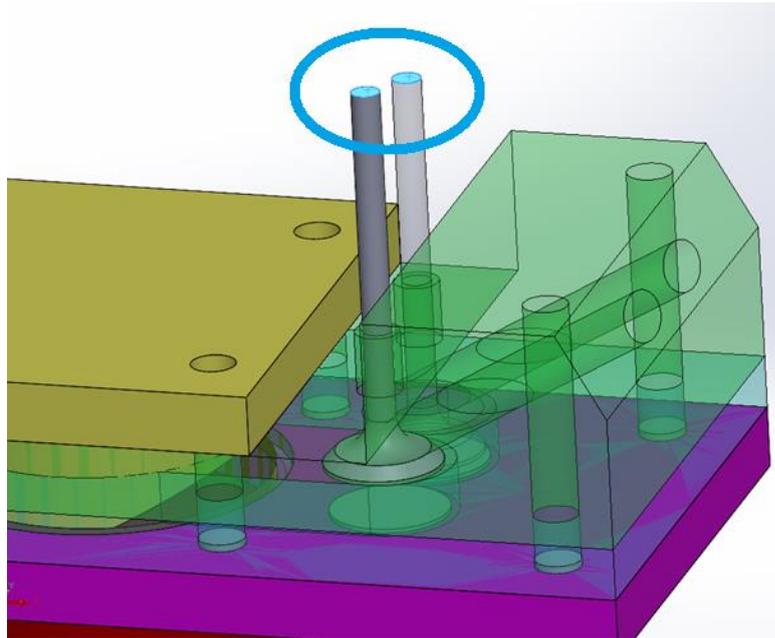
Fonte: Autoria Própria

De maneira geral a montagem dos componentes foi simples, alinhando os furos das chapas e encaixe do cilindro.

O principal a ser destacado é no posicionamento das válvulas, para que na parte da simulação tenham movimento simultâneo.

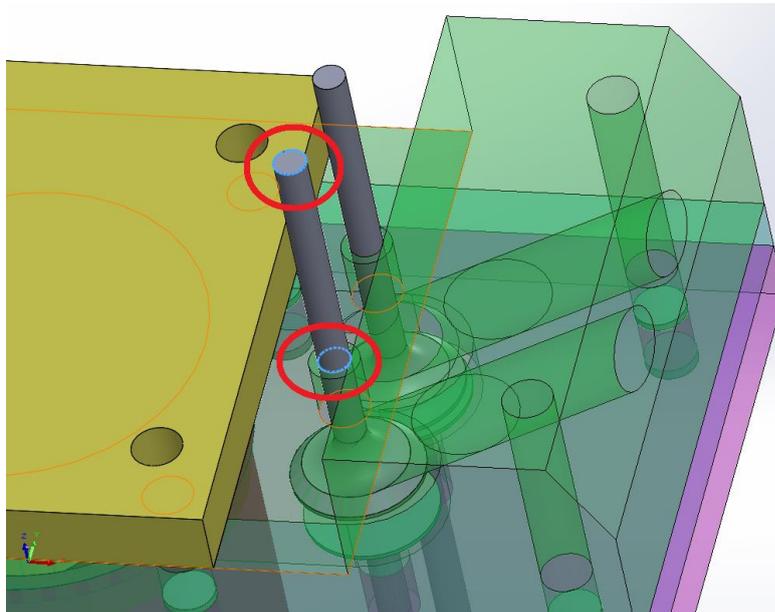
Este movimento ocorre abrindo paralelamente as válvulas de admissão, conforme pode ser visto na figura 19 e seguindo o caminho da tampa superior de forma concêntrica (figura 20), em que alguns componentes foram colocados de modo transparente para facilitar a visualização.

Figura 19: Válvulas Paralelas



Fonte: Autoria Própria

Figura 20: Válvulas Concêntricas



Fonte: Autoria Própria

### 4.3 Simulações

Com a finalização da etapa individual dos componentes, montagem e posicionamento das válvulas houve o avanço do projeto para o software CFD, simulando uma bancada de fluxo.

#### **4.3.1 Definição de Parâmetros Iniciais**

O ensaio em bancada de fluxo é altamente utilizado nos Estados Unidos da América como forma de melhorar o fluxo através do cabeçote. Portanto, o padrão de perda de carga é dado em polegadas de coluna d'água, e os resultados de vazão em pés cúbicos por minuto – CFM.

Para a correta medição de fluxo neste trabalho foi necessária a definição de parâmetros iniciais como:

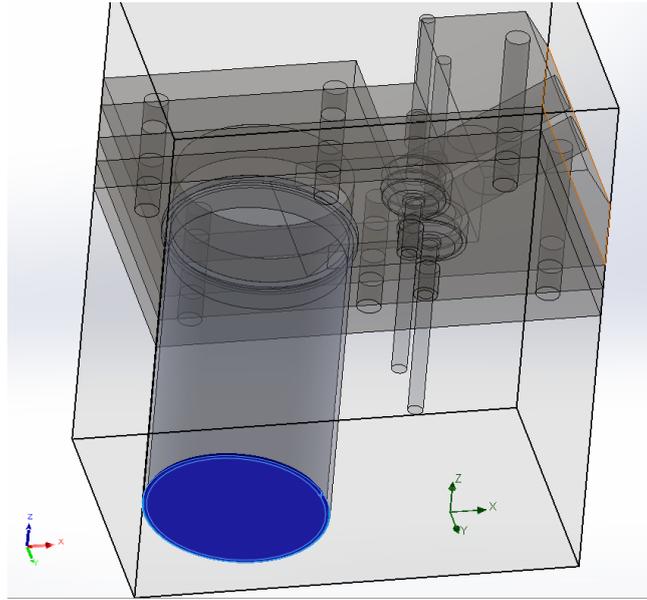
- Conversão das unidades de medidas para o SI (Sistema Internacional);
- Simulação do fluido por dentro da câmara de combustão e excluindo cavidades sem condições de escoamento (terminologia do software CFD);
- O fluido de simulação utilizado foi o ar.

#### **4.3.2 Vedação - Criação de *Lids***

A etapa de criação de *lids* (tampas de vedação) é essencial para o bom funcionamento do software CFD. Isso ocorre dado que a análise é realizada com a passagem do fluxo ao longo das peças do desenho realizado, de modo que orifícios destampados e sem condições aplicadas impedem a correta simulação do projeto.

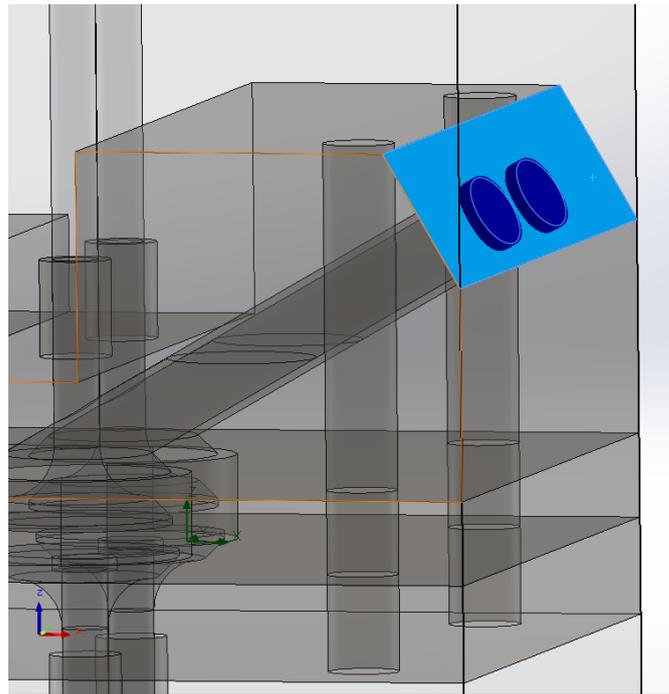
Diante disso, as faces mais importantes a serem definidas foram do cilindro – saída do fluxo – e dos tubos de passagem com 30°, com foco na geração do efeito *tumble*, conforme pode ser observado nas figuras 21 e 22.

Figura 21: Lid - Saída de Fluxo - Cilindro



Fonte: Autoria Própria

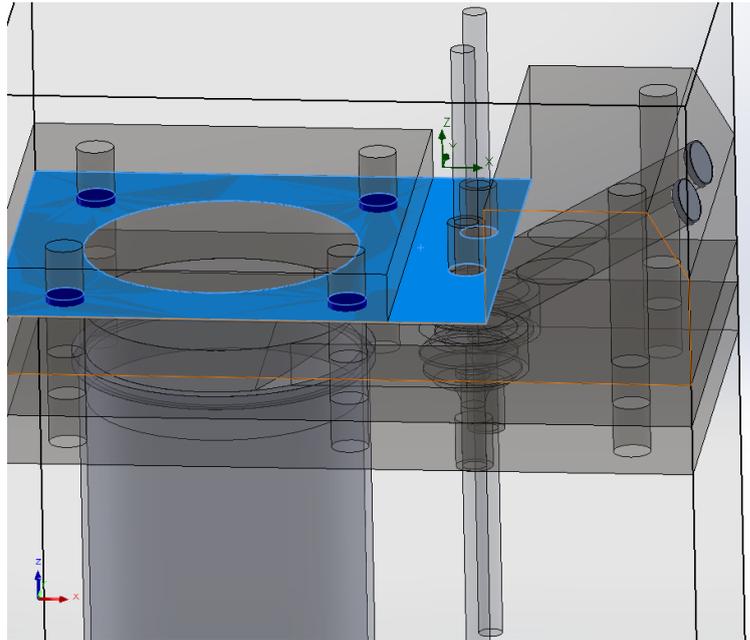
Figura 22: Lids - Entrada de Fluxo - Tubos 30°



Fonte: Autoria Própria

Após isso, foi necessário a criação de *lids* complementares para correta passagem do fluxo nas simulações, conforme exemplo demonstrado na figura 23.

Figura 23: Lids Complementares - Exemplo

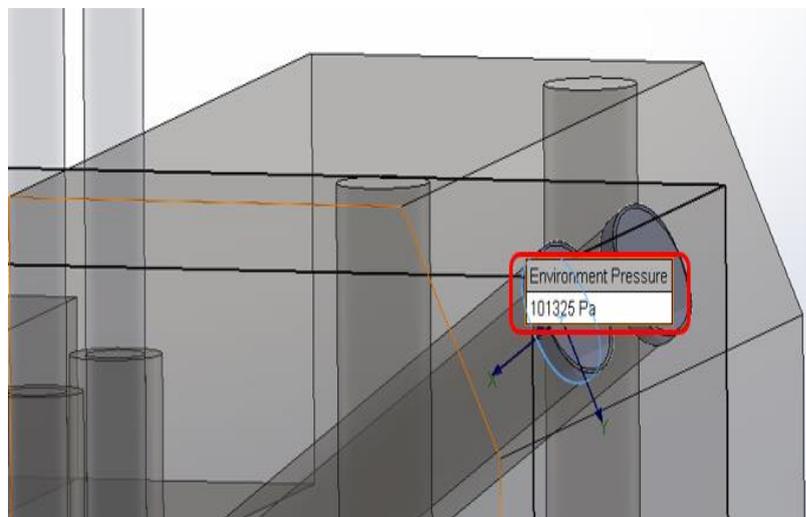


Fonte: Autoria Própria

### 4.3.3 Definição das Condições de Escoamento

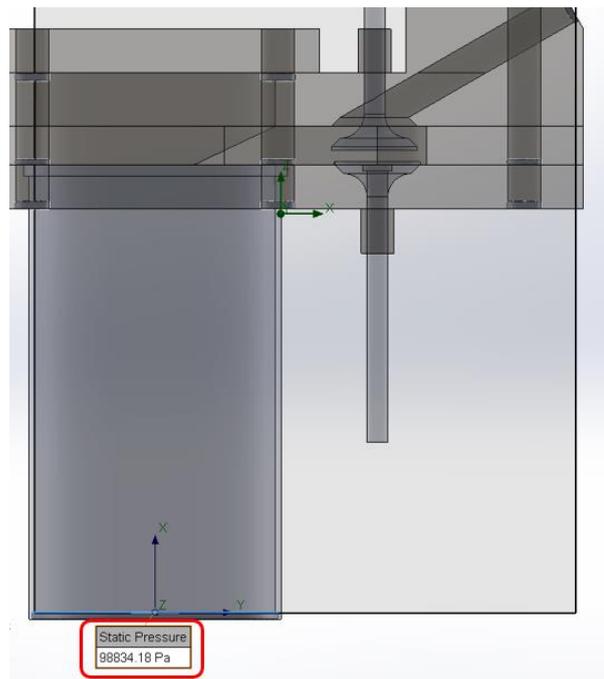
As condições do fluido aplicadas a simulação foram de 101325Pa, como pressão atmosférica de entrada nos tubos com 30°, e 98831.18Pa, como pressão estática de saída pelo cilindro, sendo equivalentes a uma perda de carga padrão de 10" de coluna d'água, conforme as figuras 24 e 25.

Figura 24: Pressão Atmosférica - Entrada - Tubos 30°



Fonte: Autoria Própria

Figura 25: Pressão Estática - Saída - Cilindro



Fonte: Autoria Própria

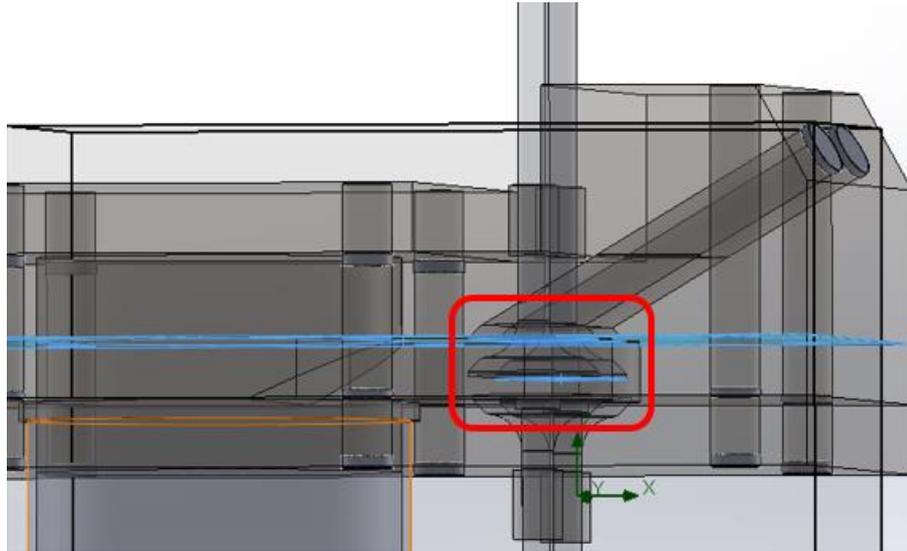
#### 4.3.4 Teste de Funcionamento

É essencial a correta aplicação das condições de escoamento e criação de *lids* adequadas à simulação. Um método de verificar se está devidamente ajustada é simulando o programa com os parâmetros já definidos. Vale salientar que inclusive este software CFD reconheceu a formação do vórtice com eixo perpendicular ao do cilindro (efeito *tumble*), que é um dos objetivos do projeto e analisou como correta a simulação.

#### 4.3.5 Levantamento de Válvulas

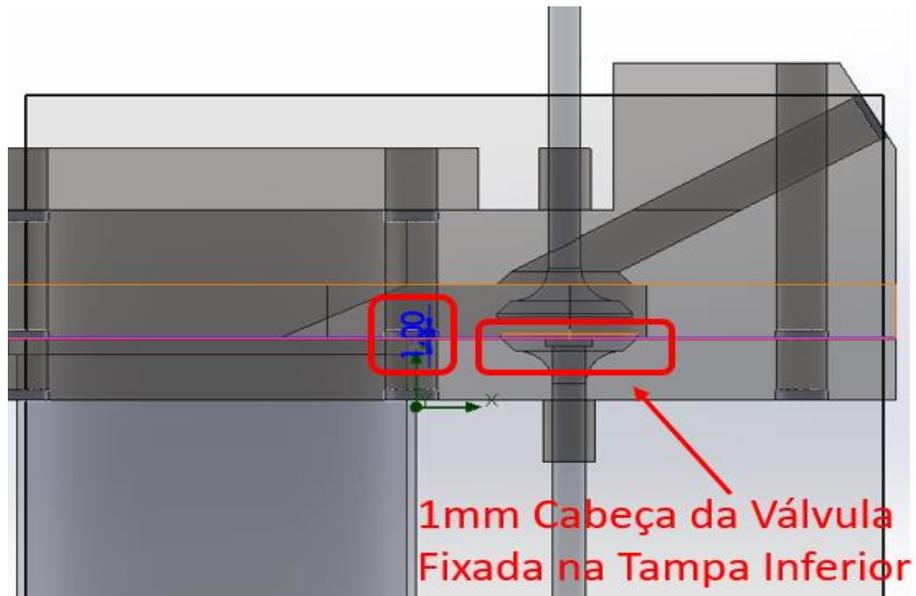
A variação do levantamento de válvulas constitui parte principal da análise e pode ser realizada por meio do posicionamento dos componentes, alterando suas distâncias. No caso deste projeto, a válvula possui 1mm de espessura e as variações ocorrem em 5 posições equidistantes, sendo uma destas representadas na figura 28, com 1mm de espessura da cabeça da válvula de admissão somada a 1,86mm de abertura de passagem de fluxo em direção à câmara de combustão, mantendo a válvula de descarga fixa (figura 26), sem abertura de passagem, na tampa inferior.

Figura 26: Válvula de Admissão - Espessura Base + Levantamento



Fonte: Autoria Própria

Figura 27: Válvula de Descarga - Fixada na Tampa Inferior

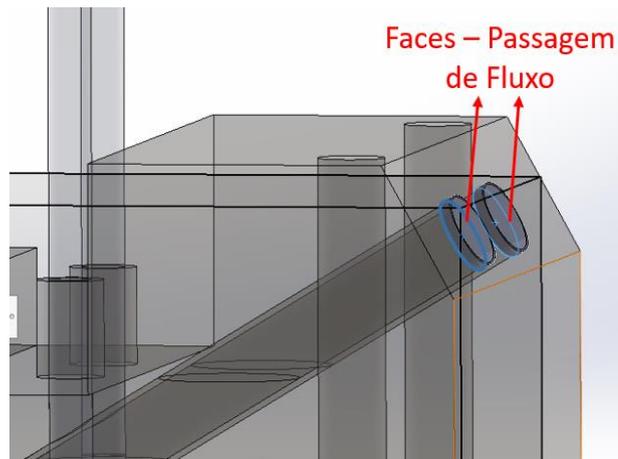


Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.6 Aplicação de Fluxo

Para a correta passagem do fluxo é necessária a seleção adequada da face de abertura. Neste caso, foi selecionada a face de passagem de fluxo na entrada, podendo ser vista na figura 28.

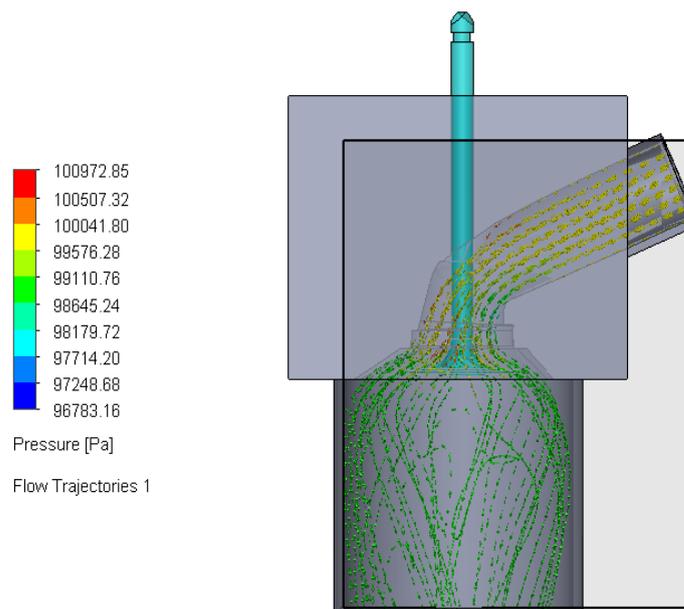
Figura 28: Faces - Passagem de Fluxo - Tubos 30°



Fonte: Autoria Própria

A simulação do fluxo de ar ocorreu por simulação computacional, capaz de reproduzir o processo de uma bancada de fluxo, com parâmetros de medição controlados da abertura da válvula de admissão em 5 intervalos iguais de levantamento, avaliando a vazão resultante. A figura 29 demonstra uma simulação para validação, feita neste software CFD, com uma aproximação do cabeçote original, resultando em valores próximos de 44,5cm<sup>3</sup> de volume morto, semelhante ao motor AP 1596 cilindradas. De forma final, houve uma análise dos dados obtidos e comparados aos originais com uma câmara de tamanho menor, oferecendo possibilidades de futuras melhorias neste espaço liberado.

Figura 29: Simulação – Cabeçote Original – Software CFD

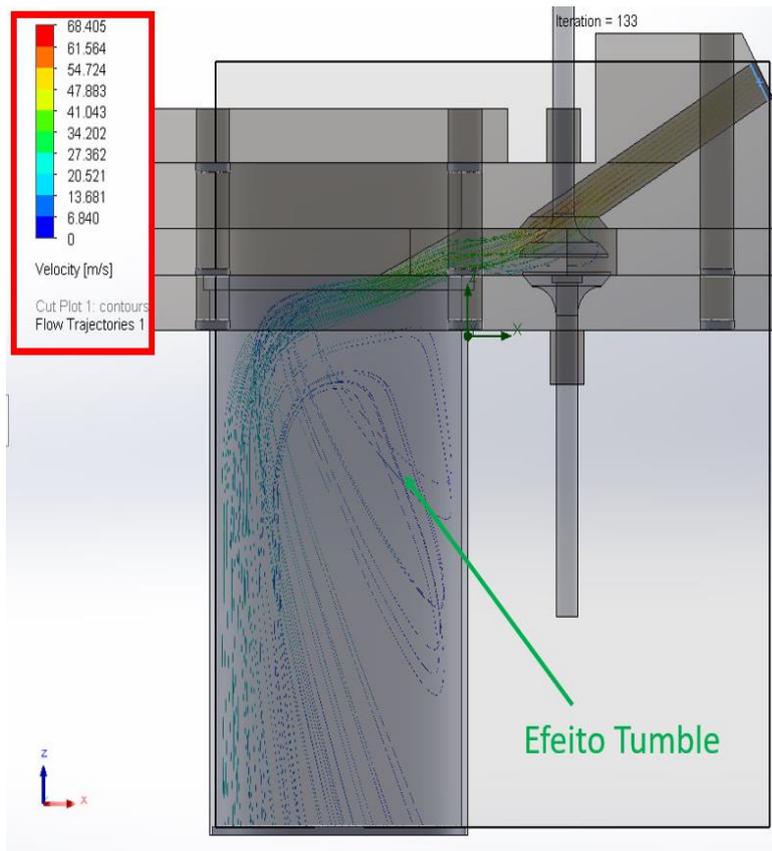


Fonte: Simulação Própria com Geometria Adaptada de MORAES, 2018.

Além disso, é possível observar a variação do escoamento por dentro do cabeçote, em velocidade, por exemplo, como mostrado na figura 30.

Cabe salientar ainda a verificação do efeito *tumble*, podendo ser comparada com a figura 12, no tópico 2.5 deste trabalho, e verificando a real ocorrência deste efeito no projeto.

Figura 30: Variação de Velocidade e Efeito Tumble



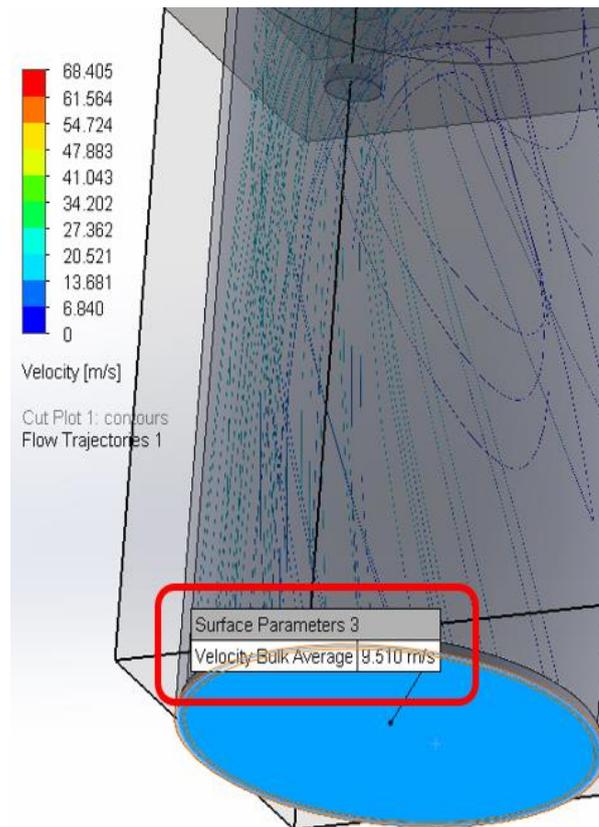
Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.7 Velocidade de Superfície

Com as condições de entrada e saída ajustadas, é possível visualizar parâmetros como a velocidade do fluido por região, como pode ser visto na figura 31.

Este processo foi utilizado para o posterior cálculo de vazão através da câmara de combustão deste trabalho.

Figura 31: Parâmetro de Velocidade - Superfície - Cilindro



Fonte: Autoria Própria

#### 4.4 DISCUSSÃO

Houve aumento de vazão através da câmara de combustão em todos os levantamentos de válvulas realizados, somado ao efeito *tumble* conseguido. Para 2 válvulas de admissão com um levantamento até 9,3mm, houve um aumento de 64,14% para o maior levantamento (9,3mm). Além disso, para o levantamento máximo de 7mm com 2 válvulas de admissão, encontrou-se um aumento da vazão de 51,57% para o maior levantamento.

Vale ressaltar ainda que estes valores ocorreram com um levantamento máximo menor de válvula em relação ao comando original, o que diminui a possibilidade de impacto entre as válvulas de admissão e descarga. Estes valores podem ser observados nas tabelas 2 e 3, e nas figuras 35 e 36.

De forma complementar, teve-se a geração do efeito *tumble*, como visto na figura 32, atingindo mais um objetivo do trabalho, melhorando a passagem de fluxo pelo canal. Além disso, obteve-se um aumento de 19,67% e 64,73% das áreas das válvulas de

admissão, para os levantamentos máximos de 7mm e 9,3mm, respectivamente, em relação ao cabeçote original, o que caracteriza mais uma melhoria obtida neste trabalho.

*Tabela 2: Resultados - Vazão - 2 Válvulas de Admissão - 7mm*

<b>2V - 7mm</b>	<b>m/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>CFM</b>	<b>% Aumento de Vazão</b>
1,40	3,63	0,01868	40,89	9,65%
2,80	5,84	0,03009	65,87	51,64%
4,20	7,93	0,04085	89,42	48,59%
5,60	8,85	0,04560	99,81	50,50%
7,00	9,57	0,04930	107,91	51,58%

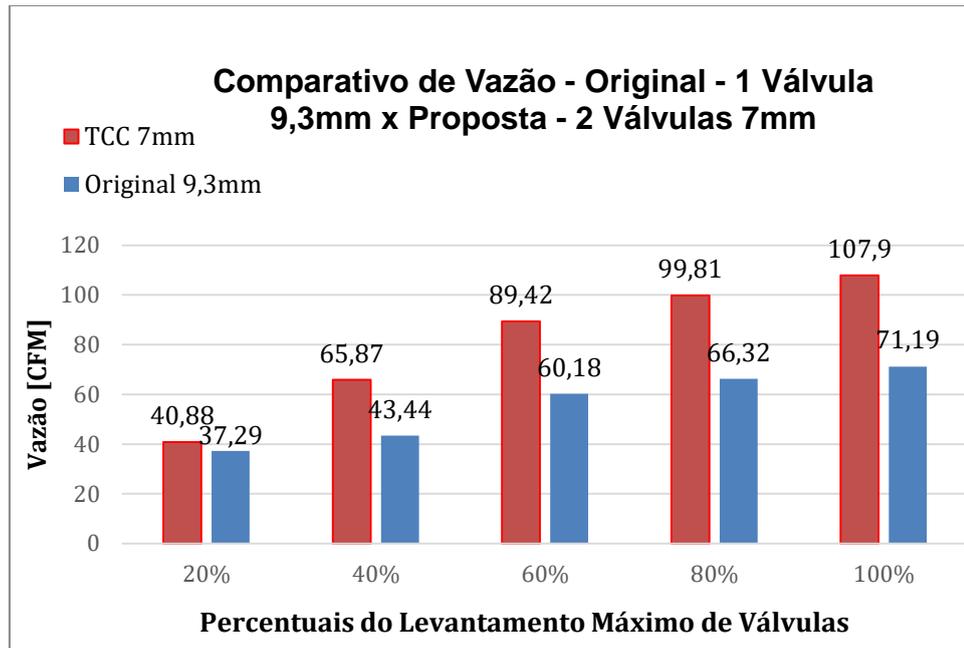
Fonte: Autoria Própria

*Tabela 3: Resultados - Vazão - 2 Válvulas de Admissão – 9,3mm*

<b>2V - 9,3mm</b>	<b>m/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>CFM</b>	<b>% Aumento de Vazão</b>
1,86	4,73	0,02435	53,29	42,92%
3,72	7,09	0,03651	79,91	83,96%
5,58	8,83	0,04552	99,63	65,55%
7,44	9,61	0,04952	108,39	63,44%
9,30	10,36	0,05339	116,85	64,14%

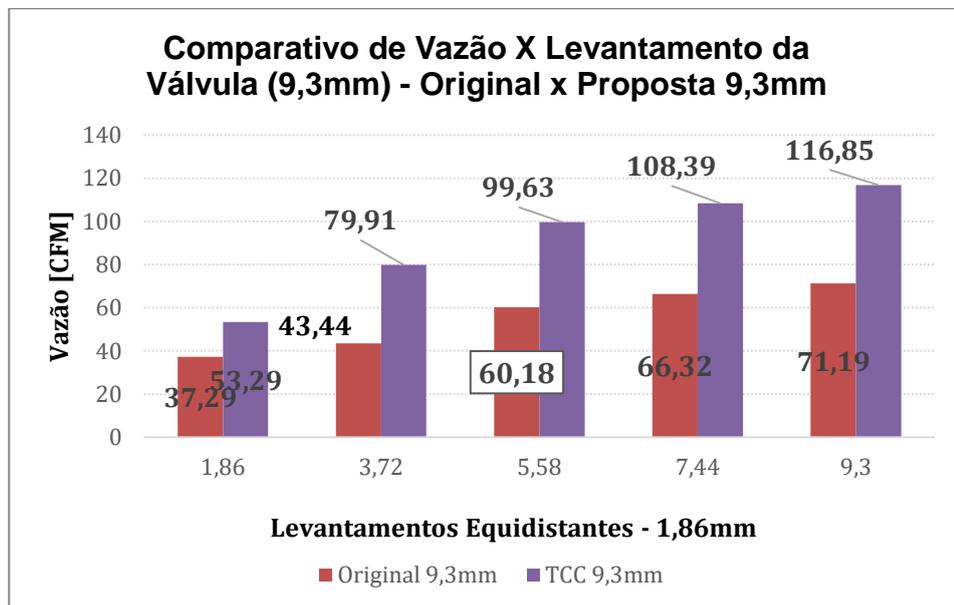
Fonte: Autoria Própria

Figura 32: Vazão X Levantamento da Válvula (7mm) - Original x TCC



Fonte: Autoria Própria

Figura 33: Vazão X Levantamento da Válvula (9,3mm) - Original x TCC



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Teve-se como foco a confecção de uma câmara de combustão compacta com válvulas de admissão verticais em relação ao cilindro e um formato geométrico de válvulas e dutos a fim de alcançar um escoamento *tumble* na admissão, além de obter uma vazão melhor que do cabeçote original. Deste modo, o desenho e modificações realizadas no software CAD possibilitaram um melhor resultado quando analisado pelo software CFD, satisfazendo as condições de projeto e ainda oferecendo uma margem maior de segurança para as válvulas não colidirem em relação ao cabeçote original AP 1.6 analisado, possuindo ainda um escoamento maior do que o original.

O projeto tem margem para aumento de compressão alterando o chanfro do projeto, a utilização de relação de compressão de 8,5:1 tem foco comparativo com o motor original. O teste de fluxo de passagem é majoritariamente realizado com o levantamento de válvulas, exclusivamente, de admissão, o que explica as válvulas de descargas terem sido fixadas na chapa inferior.

Uma característica deste projeto é possuir maior área de troca térmica na câmara de combustão, o que acarreta em uma perda de calor, entretanto esta perda abre margem para o uso de carga estratificada, reduzindo emissão de gases e melhorando o coeficiente de combustão eficiente da câmara. Além disso, por ter uma área de combustão com temperaturas menores do que do cabeçote original há vantagens no uso de combustíveis modernos e renováveis como o hidrogênio, além de uma possível otimização no processo de injeção de combustível.

De acordo com a modificação do ângulo da sede em relação à área, como tem-se uma válvula de 29mm, o levantamento de 25% deste valor é o mais preciso para a equação 3 deste trabalho, o que explica o grande aumento de vazão em relação a área. Sendo, ainda, este resultado cerca de 80% da vazão obtida com o levantamento máximo de 9,3mm, mesmo com um aumento de área aproximadamente 3,3 vezes menor que o levantamento de 9,3mm, que seria melhor aplicado para um diâmetro de válvula de 37mm ( $9,3 * 4 = 37,2\text{mm}$ ).

Como sugestão para trabalhos futuros fica a análise do formato da câmara e a utilização de carga estratificada para motores GDI (Injeção Direta de Gasolina), com toda a parte termodinâmica embarcada. Pode-se ainda realizar a variação do ângulo do tubo de admissão e suas consequências no rendimento volumétrico e gerações de turbulências, como forma de trabalho futuro.



ed., London: Blackie&Son, 1941.

SANTIAGO, G. F. **Notas de aula de Laboratório de Máquinas Térmicas**. Unipampa, 2022

SOUZA, Celso Correia de; et al. Cogeneration of electricity in sugar-alcohol plant: Perspectives and viability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 832-837, 2018.

STONE, Richard. **Introduction to internal combustion engines**. London: Macmillan, 1999.

TECNOMECC. **Cabeçotes Tecnomec**. Disponível em: <https://tecnomec.com.br/wp-content/gallery/vw-ap-41/cabecote-vw-ap-41-06.jpg>. Acesso em: 19 out. 2022.

TOYOTA. **Tumble flow (vertical vortex)**. 2014. Disponível em: <https://global.toyota/en/download/2610282/>. Acesso em: 18 out. 2022.

WEILAND, Peter. Biogas production: current state and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 85, n. 4, p. 849-860, 2010.