



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO, APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM  
SISTEMA DE ESCAPAMENTO PARA UM MOTOR DE  
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO DE QUATRO TEMPOS**

Lucas Todeschini Gomes

Lajeado, novembro de 2023



Lucas Todeschini Gomes

**DIMENSIONAMENTO, APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA  
DE ESCAPAMENTO PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA  
CICLO OTTO DE QUATRO TEMPOS**

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora(o): Prof. Dr. Rafael Crespo Izquierdo.

Lajeado, novembro de 2023

Lucas Todeschini Gomes

**DIMENSIONAMENTO, APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA  
DE ESCAPAMENTO PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA  
CICLO OTTO DE QUATRO TEMPOS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. Rafael Crespo Izquierdo – orientador  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Maria Madalena Dullius - avaliadora  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Guilherme Leite Lago - avaliador  
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado/RS, novembro de 2023

## RESUMO

O presente trabalho aborda o dimensionamento e fabricação de um sistema de escape para um veículo off-road, visando otimizar potência e torque do motor de combustão interna ciclo Otto de quatro tempos. A metodologia proposta baseia-se no projeto de dimensionamento do coletor e de seus respectivos tubos de união, na confecção e na realização de ensaios experimentais, a fim de avaliar a performance do motor. Os resultados evidenciaram um incremento na potência e torque, validando a eficácia da metodologia empregada. A análise comparativa entre o sistema construído e o anterior revela ganhos sem alterações na injeção eletrônica. A pesquisa contribui para o entendimento e aprimoramento de sistemas de escape, evidenciando a viabilidade técnica e a efetividade do método proposto.

**Palavras chave:** Sistema de Escape, Dinamômetro, Dimensionamento, Potência e Torque

## **ABSTRACT**

The present work addresses the sizing and manufacturing of an exhaust system for an off-road vehicle, aiming to optimize power and torque of a four-stroke Otto cycle internal combustion engine. The proposed methodology is based on the design of sizing the manifold and its respective junction pipes, in the manufacturing process, and in the execution of experimental tests to evaluate the engine's performance. The results showed an increase in power and torque, validating the effectiveness of the employed methodology. The comparative analysis between the constructed and the previous system reveals gains without alterations in the electronic injection. The research contributes to the understanding and improvement of exhaust systems, highlighting the technical feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** Exhaust System, Dynamometer, Sizing, Power and Torque.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna.....	14
Figura 2 – Os quatro tempos do motor ciclo otto.....	14
Figura 3 – Ciclo termodinâmico ideal para um motor Ciclo Otto.....	16
Figura 4 – Sistema de escape padrão.....	17
Figura 5 – Diferença entre um Coletor padrão e um header para performance.....	18
Figura 6 – Header 4-2-1.....	20
Figura 7 – Header 4-1-1.....	20
Figura 8 – Tubo de escape.....	21
Figura 9 - Estrutura de um catalisador.....	22
Figura 10 – Modelo de um silenciador.....	24
Figura 11 – Efeitos da contrapressão do sistema de escapamento na eficiência de motores.....	27
Figura 12 – Pressões no cilindro e nos coletores de admissão e escapamento de motor de quatro tempos.....	28
Figura 13 – Comprimento dos dutos para header 4-2-1.....	29
Figura 14 – Desempenho do motor x comprimento do tubo secundário de escape.....	30
Figura 15 – Exemplo de coletor e união estilo Buffle.....	33
Figura 16 – Modelo de coletor de união do tipo Merge.....	33
Figura 17 – Modelo de coletor de união Venturi merge.....	34
Figura 18 – Coletor de união tipo Split interference.....	35
Figura 19 - Exemplo de dinamômetro de motor.....	36
Figura 20 - Exemplo de dinamômetro de rolos.....	37
Figura 21 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho.....	40
Figura 22 - Dados técnicos do motor.....	44
Figura 23 - Disco graduado fixado na polia do virabrequim.....	45

Figura 24 - Marcador sinalizando ponto morto superior.....	45
Figura 25 - Marcador sinalizando graduação de início de abertura da válvula de escape.....	46
Figura 26 - Coletor de escape 4-1 versus tubos iniciais aproveitados.....	50
Figura 27 - Exemplo de corte em tubo para a formação do cone.....	51
Figura 28 - Cone unindo tubos primários.....	52
Figura 29 - Construção parcial do sistema de escape novo.....	53
Figura 30 - Dimensões do silenciador utilizado.....	54
Figura 31 - Sistema de escapamento completo.....	54
Figura 32 - Resultados do dinamômetro com escape antigo.....	56
Figura 33 - Resultados do dinamômetro com escape novo.....	57

## SUMÁRIO

RESUMO.....	2
ABSTRACT.....	3
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	4
LISTA DE GRÁFICOS.....	6
SUMÁRIO.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Tema.....	10
1.2 Delimitação do tema.....	10
1.3 Problema de pesquisa.....	11
1.4 Hipótese.....	11
1.5 Objetivo geral.....	11
1.6 Objetivos específicos.....	11
1.7 Justificativa.....	11
2 REVISÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Características de um motor de combustão interna (MCI) de ciclo otto.....	13
2.2 Sistema de escape.....	16
2.2.1 Header ou coletor de escape.....	18
2.2.2 Junções.....	19
2.2.3 Tubos de escape.....	21
2.2.4 Catalizadores.....	21
2.2.5 Silenciadores.....	23
2.3 Fenômenos do sistema de escape.....	24
2.3.1 Scavenging (teoria da energia cinética da limpeza do cilindro).....	24
2.3.2 Ruídos.....	25
2.3.3 Contrapressão.....	26

2.4	Características dos coletores.....	27
2.4.1	Sintonia dos tubos de escapamento.....	27
2.4.2	Tubo primário do sistema de escape.....	28
2.4.3	Tubo secundário do sistema de escape.....	30
2.4.4	Diâmetro dos tubos de escape.....	31
2.4.5	Coletor de união entre tubos primários e secundários.....	32
2.5	Dinamômetro.....	35
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
3.1	Metodologia da pesquisa.....	38
3.1.1	Tipo de pesquisa.....	39
3.1.2	Modo de abordagem.....	39
3.2	Dimensionamento do sistema de escape.....	39
3.2.1	Apuração dos dados do motor.....	41
3.2.2	Cálculos de dimensionamento do sistema.....	41
3.2.3	Fabricação do sistema de escape novo.....	41
3.2.4	Teste em dinamômetro do sistema de escape antigo.....	41
3.2.5	Substituição do sistema de escape antigo pelo novo.....	42
3.2.6	Teste em dinamômetro do novo sistema de escape.....	42
3.2.7	Comparação dos resultados.....	42
4	DESENVOLVIMENTO.....	43
4.1	Requisitos técnicos do sistema de escape.....	43
4.2	Característica do motor.....	44
4.3	Dimensionamento do sistema de escape.....	46
4.3.1	Cálculo do comprimento dos tubos do coletor de escape.....	47
4.3.2	Cálculo dos diâmetros dos tubos.....	48
4.3.3	Cálculo dos cones de união entre tubos.....	49
4.3.4	Cálculo do comprimento do tubo de escape.....	49
4.4	Fabricação do sistema de escape novo.....	49
4.4.1	Confecção dos tubos primários.....	49
4.4.2	Confecção dos cones de união.....	50
4.4.3	Confecção dos tubo secundários.....	52
4.4.4	Confecção do tubo de escape.....	53
4.5	Testes em dinamômetro.....	55
4.5.1	Testes em dinamômetro do sistema de escape antigo.....	55
4.5.2	Substituição do escape antigo pelo novo.....	56
4.5.3	Testes em dinamômetro do sistema de escape novo.....	56
4.6	Análise dos dados obtidos.....	57
	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de motores de combustão interna desempenha um papel crucial em nosso cotidiano, proporcionando uma série de benefícios e impactando diversos aspectos da vida moderna. Esses motores, presentes em veículos automotores, geradores de energia e máquinas industriais, são responsáveis por impulsionar o transporte e a produção de maneira eficiente. Eles fornecem a energia necessária para mover carros, caminhões e motocicletas, permitindo a mobilidade rápida e conveniente, conectando pessoas e mercadorias em todo o mundo. Além disso, esses motores também são usados em geradores de energia, fornecendo eletricidade em áreas sem acesso à rede elétrica, durante quedas de energia ou em locais remotos.

Ao longo dos anos, os motores de combustão interna passaram por uma evolução significativa, impulsionando avanços tecnológicos e transformando a indústria automotiva e outras áreas afins. Desde os primeiros motores rudimentares até os sofisticados sistemas de propulsão de hoje, é possível perceber melhorias notáveis em termos de eficiência, desempenho e sustentabilidade. Os primeiros motores a vapor deram lugar aos motores a gasolina e a diesel, que se tornaram os mais comuns. Com o tempo, foram introduzidas tecnologias como injeção eletrônica de combustível, turbocompressores e sistemas de controle de emissões, permitindo um consumo de combustível mais eficiente e reduzindo os impactos ambientais.

Nos motores naturalmente aspirados, um correto dimensionamento do sistema de escapamento pode desempenhar um papel crucial na sua eficiência e desempenho. Esse sistema é responsável por coletar e direcionar os gases de exaustão resultantes da queima de combustível para fora do motor. Um escapamento bem projetado pode otimizar o fluxo dos gases, reduzir a contrapressão e minimizar as perdas de energia, melhorando a eficiência geral do motor. Ao permitir uma saída rápida e eficiente dos gases de exaustão, o sistema de escapamento contribui para um aumento da potência, uma resposta mais rápida do acelerador e uma curva de torque mais suave.

A monografia aborda o dimensionamento e aplicação de um sistema de exaustão em um motor de aspiração natural aplicado a um veículo off-road, com o objetivo de otimizar seu desempenho, focando especificamente no aumento de potência e torque. O dimensionamento é realizado utilizando equações encontradas na bibliografia que levam em consideração a utilização das ondas de contra pressão geradas pela combustão da mistura de ar e combustível.

## **1.1 Tema**

Dimensionamento de um sistema de escapamento para um veículo off-road, visando um aumento de torque e potência de um motor de combustão interna ciclo otto de quatro tempos. Além disso, o tema do presente trabalho abrange a fabricação e os testes para avaliar o desempenho do sistema proposto por meio de procedimentos experimentais.

## **1.2 Delimitação do tema**

Neste estudo, foram adotadas as equações propostas por Bell (1980) para o dimensionamento do sistema de exaustão. Essas equações levam em consideração as propriedades do motor, como também o diâmetro, comprimento e tipo de conexão entre os tubos.

Foi realizada a confecção do sistema, além de testes em dinamômetro para que fossem validados ganhos ou perdas de desempenho.

### **1.3 Problema de pesquisa**

A problemática de pesquisa está relacionada em quantificar os ganhos ou perdas de desempenho de um motor específico, utilizando um sistema de escapamento dimensionado por equacionamentos presentes na literatura.

### **1.4 Hipótese**

Ao considerar exclusivamente o aprimoramento do desempenho em rotações médias e por meio do projeto de um sistema de escape que visa atender a essas condições, espera-se alcançar melhorias na faixa de rotação desejada. A validação desses aprimoramentos foi realizada por meio de testes em um dinamômetro.

### **1.5 Objetivo geral**

Dimensionar um sistema de exaustão para aumentar o desempenho de um motor de quatro tempos.

### **1.6 Objetivos específicos**

- a) definição e escolha do tipo de escapamento que foi utilizado considerando a aplicação do motor;
- b) dimensionamento do sistema de escape;
- c) fabricação do sistema de escape;
- d) avaliar o desempenho do motor com o escape antigo e com o sistema de escape novo através de testes em dinamômetro.

### **1.7 Justificativa**

O presente estudo justifica-se pelo fato de o sistema de escapamento presente no veículo off-road, no qual foi desenvolvido o trabalho, não ter sido dimensionado levando em consideração algum memorial de cálculo. Para sua

confeção, o construtor do veículo apenas utilizou um coletor original e uma seção de tubo, sem calcular diâmetros e comprimentos para confeccionar o sistema.

Em concordância com Pimentel (2021), é importante destacar que as modificações realizadas nas dimensões e no arranjo dos tubos do sistema de escapamento podem ter um impacto significativo no desempenho do motor. Essas alterações podem influenciar o fluxo de gases de escape, afetando diretamente a eficiência do motor e sua capacidade de gerar potência.

Além disso, é relevante observar que o veículo em estudo é de propriedade do autor do trabalho, sendo utilizado em momentos de lazer, especialmente em atividades conjuntas com seu pai. Esta conexão pessoal com o veículo confere uma perspectiva prática e vivencial ao estudo.

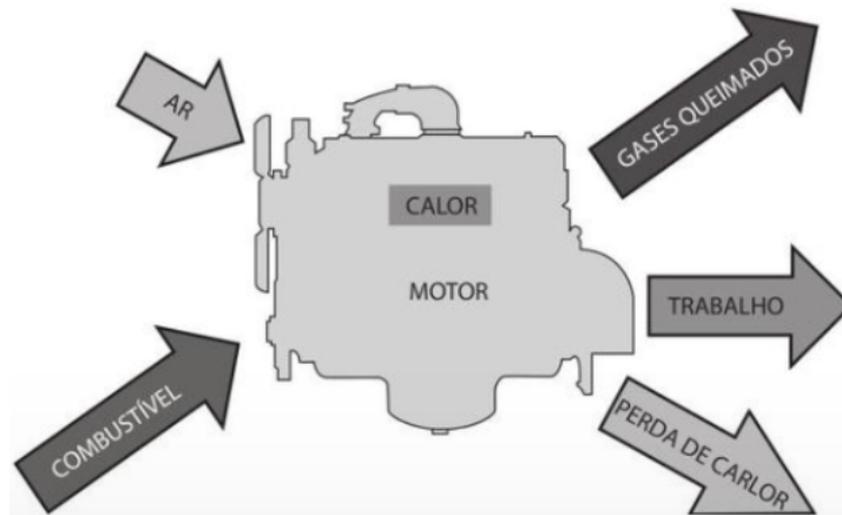
## **2 REVISÃO TEÓRICA**

O presente capítulo apresenta os conceitos considerados relevantes para o dimensionamento de um sistema de exaustão para um motor de combustão interna de quatro tempos. Os assuntos abordados incluem uma breve compreensão do funcionamento do motor ciclo Otto. Além disso, são mencionados os seus componentes e posteriormente é abordado o dimensionamento do sistema considerando fatores como o diâmetro e o comprimento dos tubos, a fim de garantir a eficiência e o desempenho adequados do motor.

### **2.1 Características de um motor de combustão interna (MCI) de ciclo otto.**

De acordo com Brunetti (2018) os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas capazes de transformar a energia química em trabalho mecânico por meio da combustão do combustível. Este trabalho é obtido por uma série de processos realizados em um produto chamado de fluido ativo, que, neste caso, é originado da mistura de ar/combustível na entrada do volume de controle e dos gases de combustão na saída. Na figura 1 é possível observar o volume de controle representado pelo bloco do motor, evidenciando a conversão do fluido ativo em energia mecânica e as formas de saída de um motor de combustão interna.

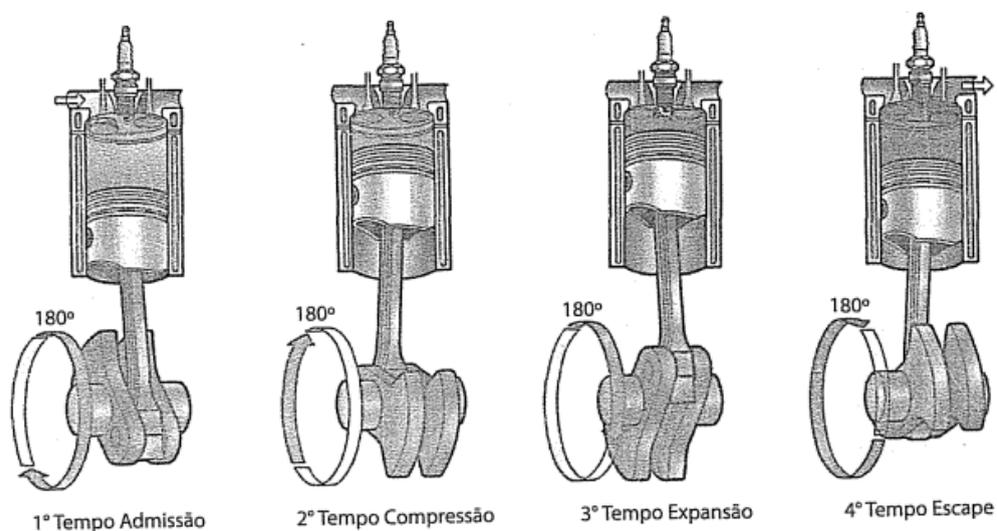
Figura 1 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna



Fonte: Brunetti (2018)

Para Vitto (2020), os motores de combustão interna de ciclo otto caracterizam-se pela necessidade do pistão em deslocar-se quatro vezes pelo cilindro para que sejam realizados os quatro ciclos de funcionamento, fazendo com que o virabrequim tenha que realizar duas voltas completas. Os ciclos de funcionamento dos motores de combustão interna de ciclo otto são apresentados na figura 2.

Figura 2 – Os quatro tempos do motor ciclo otto



Fonte: Brunetti (2018)

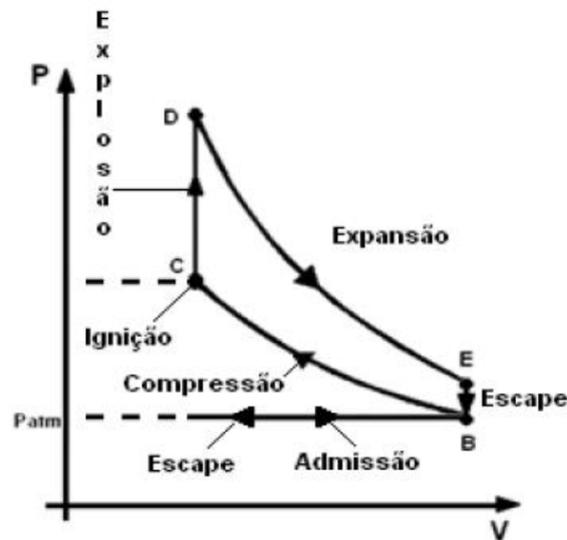
De acordo com Brunetti (2018), no primeiro tempo o pistão desloca-se pelo cilindro do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI). Esse deslocamento faz com que ocorra um diferencial de pressão no cilindro, ao mesmo tempo em que abre a válvula de admissão, possibilitando que a mistura de ar e combustível entre na câmara de combustão. No segundo tempo de funcionamento, a válvula de admissão é fechada para isolar a mistura admitida, enquanto o pistão desloca-se do PMI para o PMS pressurizando o cilindro e a câmara de combustão.

O terceiro tempo caracteriza-se pela centelha gerada pela vela de ignição quando o pistão está próximo ao PMS, provocando o início da combustão da mistura dentro do cilindro. Esse processo acaba gerando um grande aumento de pressão e temperatura, forçando o pistão para o PMI e, conseqüentemente, gerando trabalho por parte do sistema.

No quarto tempo, a exaustão dos gases provenientes da queima da mistura de ar e combustível é realizada. O escoamento desses gases ocorre pela abertura da válvula de escapamento, pela pressão no interior do cilindro ser maior que a pressão atmosférica e pelo deslocamento do pistão do PMI para o PMS. Ao final desse tempo inicia-se um novo ciclo.

O ciclo termodinâmico ideal para um motor de combustão interna de ciclo Otto compreende quatro processos reversíveis. Inicialmente tem-se a compressão isentrópica de B para C. Em seguida, um aumento de calor, com volume constante de C para D, é gerado, para, posteriormente, ocorrer a expansão isentrópica de D para E. Uma rejeição do calor é gerada com volume constante de E para B. (Ricardo, 2019). A Figura 3 ilustra as principais etapas do ciclo termodinâmico ideal de um motor Ciclo Otto.

Figura 3 – Ciclo termodinâmico ideal para um motor Ciclo Otto.



Fonte: Ricardo (2019)

## 2.2 Sistema de escape

De acordo com Rocha (2011), os sistemas de escapamento podem ser resumidos em quatro funções, nas quais exercem grande importância para um bom funcionamento de um MCI. São elas:

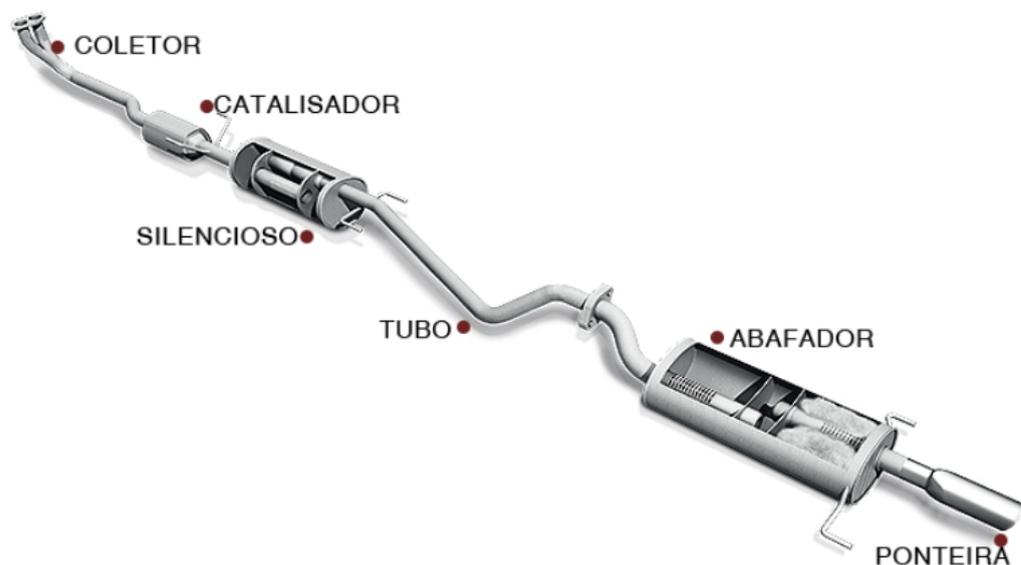
- 1) canalizar os gases oriundos da combustão que acontece no interior do cilindro para uma região afastada do motor;
- 2) reduzir os ruídos produzidos pelo motor. Comumente faz-se o uso de silenciadores, os quais conseguem reduzir em até 50 dB o ruído emitido;
- 3) diminuir a emissão de poluentes gerados nos motores. A queima dos combustíveis gera substâncias nocivas ao meio ambiente. O componente responsável por atenuar esses gases é o catalisador, que é o componente que realiza a oxidação do monóxido de carbono e dos hidrocarbonetos e reduz o óxido de azoto;
- 4) auxiliar no aumento de massa de ar admitida dentro do cilindro. A inércia dos gases da combustão que se deslocam no sistema gera uma sucção no sistema de admissão, melhorando a eficiência volumétrica do motor.

A descarga dos gases ao sistema é dividida em duas etapas. Na primeira etapa ocorre o escoamento dos gases queimados pela válvula de escapamento no momento de sua abertura. Isso acontece pelo diferencial de pressão existente entre o cilindro e a atmosfera. A segunda etapa consiste no deslocamento do pistão até o PMS, empurrando esses gases para fora da câmara de combustão (BRUNETTI, 2018).

Conforme Brunetti (2018), aproximadamente 80% dos gases são arrastados para fora do cilindro durante a abertura da válvula de escapamento, enquanto apenas 20% são empurrados pelo movimento do pistão. Neste processo, o pistão desloca um volume equivalente ao volume do cilindro, e, em uma condição idealizada, a movimentação do pistão deveria acontecer apenas após a pressão interna ser equivalente à pressão de descarga.

Segundo Plank (2005), os sistemas de escape padronizados geralmente são desenvolvidos para serem produzidos em larga escala, priorizando o baixo custo, a facilidade na manufatura e a redução da emissão de poluentes. O foco do componente padrão não é o melhor desempenho e muitas vezes podem limitar o potencial de um motor. A figura 4 apresenta um sistema de escape padrão e os seus principais componentes.

Figura 4 – Sistema de escape padrão



Fonte: blog.sigmacar (2023, imagem digital)

Os escapamentos com finalidade de uso em competições são bem diferentes dos pensados para produção em massa, pois são desenvolvidos de forma que se obtenha o melhor desempenho possível. O projeto do componente deve ser feito para que o escoamento dos gases tenha a menor restrição possível, maximizando o efeito da diferença de pressão nos dutos. (PLANK, 2005).

### 2.2.1 Header ou coletor de escape

De acordo com Pimentel (2022), os *headers* e os coletores têm a mesma função, porém os *headers* são projetados para alto desempenho tendo em vista as características do motor. Já os coletores são usados em sistemas de escape padrão. Os *headers* são desenvolvidos com dutos primários individuais para cada cilindro, possibilitando que os gases de um cilindro não pressurizem os outros. Sua função é canalizar os gases queimados e direcioná-los de maneira eficiente para o restante do sistema. A figura 5 apresenta um comparativo entre um *header* e um coletor padrão.

Figura 5 – Diferença entre um Coletor padrão e um *header* para performance.



Fonte: Do autor (2023)

Conforme Vitto (2020), um coletor de escapamento ideal deve possuir dutos independentes para cada cilindro, os quais são unidos em um único tubo ou conjunto de tubos, sempre respeitando as dimensões corretas que devem ser obtidas no projeto. Além disso, deve-se ter atenção quanto à ordem de ignição do

motor para que mais de um cilindro não descarregue os gases no mesmo instante de tempo.

### **2.2.2 Junções**

As junções têm como função unir os dutos primários em um único duto final. Para um motor de quatro cilindros, existem duas configurações que são mais utilizadas. Tais configurações são 4-1-1 e 4-2-1, que possuem uma junção e três junções, respectivamente. Na configuração 4-1-1, os quatro dutos primários unem-se em um único ponto específico, já no modelo 4-2-1 os dutos primários dividem-se em dois pares e posteriormente em um duto, canalizando para o restante do sistema (PIMENTEL, 2022).

Para Plank (2005), as junções construídas ou elaboradas com baixa qualidade tendem a ser prejudiciais ao sistema. Arestas salientes, soldas com acabamento ruim ou descontinuidades entre tubos podem gerar perda de carga no interior dos dutos, e por este motivo os *headers* com uma única junção foram os mais utilizados ao longo dos anos. O avanço das técnicas de fabricação e dos equipamentos atualmente utilizados contribui muito para que os *headers* com mais de uma junção possuam perda de carga praticamente insignificante. Na figura 6 é mostrada a configuração com três junções 4-2-1, já na figura 7 têm-se o modelo uma única junção 4-1-1.

Figura 6 – Header 4-2-1



Fonte: low-offset (2023, imagem digital)

Figura 7 – Header 4-1-1



Fonte: bahnbrenner (2023, imagem digital)

### 2.2.3 Tubos de escape

Os tubos de escape atuam como uma extensão dos coletores ou *headers*, unindo-os em um único duto, de maneira que, se forem dimensionados de forma correta, auxiliam no escoamento dos gases para fora dos tubos primários. Além disso, estes tubos podem aumentar e suavizar a entrega de torque fornecido pelo motor em médias rotações (GUPTA, 2018).

Segundo Gupta (2018), os tubos de escapamento podem servir para facilitar a montagem e desmontagem do escapamento. Geralmente eles são fabricados separados do restante do sistema e unidos por uma junção em algum ponto conveniente ao projeto. Na figura 8 é possível observar um exemplo de tubo de escapamento e um ponto de união.

Figura 8 – Tubo de escape



Fonte: Adaptado do autor (2023)

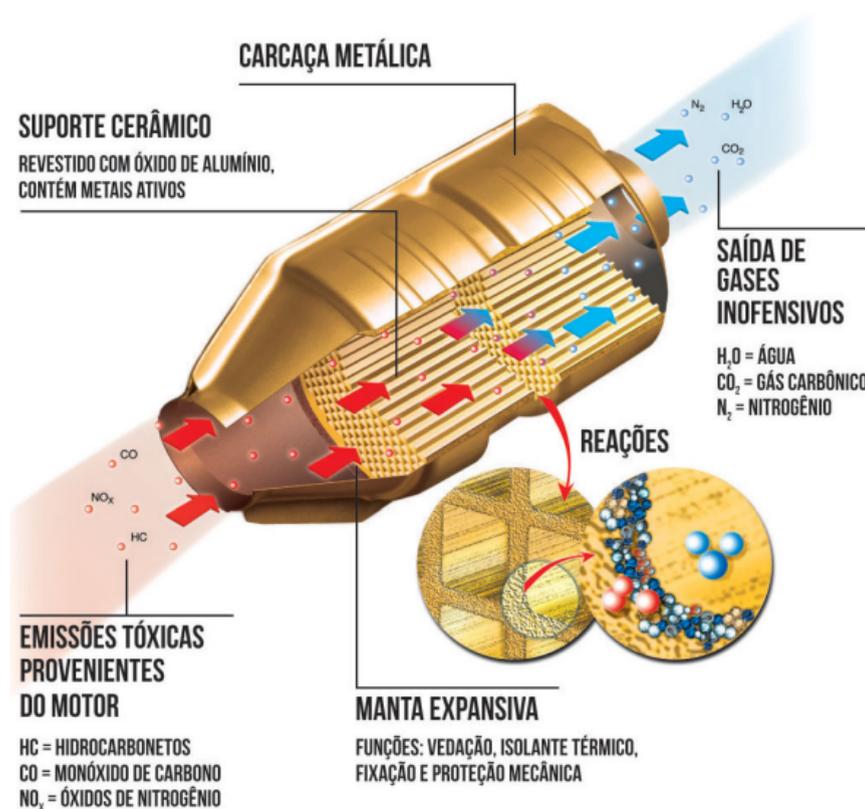
### 2.2.4 Catalizadores

O uso de catalisadores nos sistemas de escapamento tem como objetivo reduzir as emissões de poluentes, normalmente monóxidos de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, oriundos da combustão dos combustíveis

por meio de reações químicas. Além de contribuir positivamente para o meio ambiente e para os seres humanos e animais, proporcionam o crescimento e desenvolvimento de áreas de pesquisa, integrando as indústrias automotivas e de tecnologia catalítica. (BOLDT; SILVA; LEAL, 2013)

De acordo com Boldt, Silva e Leal (2013), os primeiros catalisadores eram constituídos basicamente por Paládio (Pd) e Platina (Pt), que são muito utilizados como conversores dos subprodutos gasosos da combustão. Ao longo dos anos, um dos desafios da indústria foi aprimorar o funcionamento, reduzindo cada vez mais o nível de poluentes que saem do escapamento por meio de diferentes materiais e superfícies reagentes. A figura 9 apresenta a estrutura de um catalisador.

Figura 9 - Estrutura de um catalisador



Fonte: Boldt, Silva e Leal (2013)

Ainda ,em concordância com Boldt, Silva e Leal (2013), os catalisadores são constituídos por basicamente por três componentes principais:

- Manta expansiva, que tem como finalidade a vedação, fixação mecânica do dispositivo e isolante térmico;
- O suporte cerâmico, que é revestido com diversos metais ativos que contribuem para que as reações químicas sejam realizadas;
- Carcaça metálica, que tem como função proteger e isolar o suporte dando a fixação ao componente.

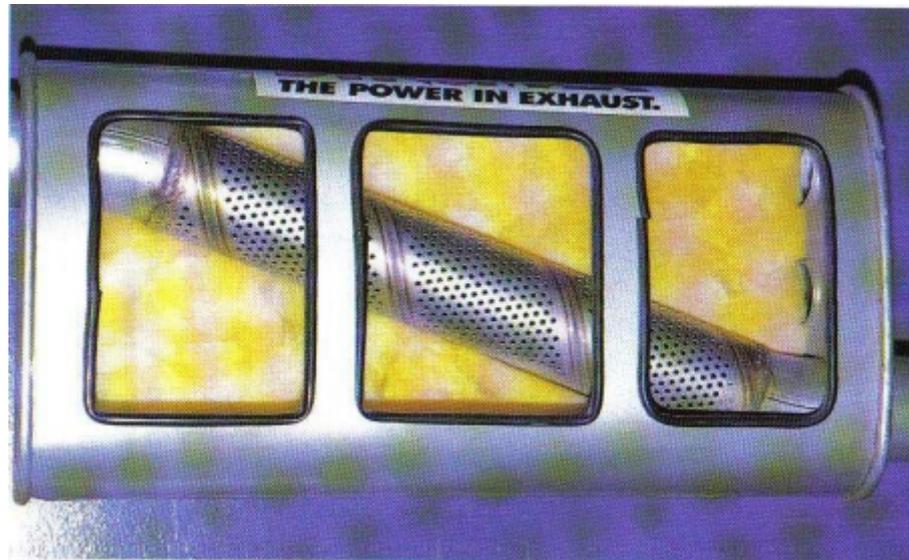
### **2.2.5 Silenciadores**

Conforme Rocha (2011), os veículos motorizados atualmente são uma das maiores fontes de ruídos presentes no nosso cotidiano e os silenciadores foram e são desenvolvidos com o objetivo de suprimir esse ruído. Os motores, durante seu funcionamento, podem gerar aproximadamente 125 dB, enquanto os silenciadores atuam de maneira a atenuar esse ruído, reduzindo em até 50 dB quando bem dimensionados.

Além de influenciar no nível de ruído, os silenciadores podem afetar a potência produzida por um motor. Isso ocorre porque no seu funcionamento criam mais uma restrição no escoamento dos gases, além de gerar contrapressão que é indesejada no sistema (PLANK, 2005).

Ainda, segundo o autor, os silenciadores consistem basicamente em tubo perfurado que fica alojado em uma carcaça metálica. Essa carcaça normalmente é preenchida com lã de rocha ou fibra de vidro, podendo possuir também câmaras de ressonância para as ondas geradas durante a exaustão dos gases. Os gases são forçados por uma série de furos pequenos, expandindo-os e reduzindo significativamente o ruído. Na figura 10 é mostrado um exemplo de silenciador na sua parte interna.

Figura 10 – Modelo de um silenciador



Fonte: Plank (2005)

## 2.3 Fenômenos do sistema de escape

### 2.3.1 Scavenging (teoria da energia cinética da limpeza do cilindro)

Conforme Heisler (1995), para eliminar os gases de exaustão da câmara de combustão, é possível utilizar a energia cinética desses gases para produzir uma onda de compressão e outra de expansão que reduz a pressão do gás no cilindro. Quando a válvula de escape é aberta, os gases da combustão são liberados com alta pressão, deslocando rapidamente para o tubo de escape, aumentando a velocidade de fluxo no sistema. Essa onda de compressão transfere sua energia de pressão para a coluna de gás na forma de energia cinética, fazendo com que a onda de pressão viaje para fora, aumentando a pressão no lado de compressão anterior e reduzindo a pressão no lado de expansão posterior do tubo. Quando o pistão atinge o ponto morto superior (PMS) no início do tempo de admissão e no final do tempo de escape, a onda de compressão já terá atingido o final do tubo. Em resumo, o mecanismo mais importante para eliminar os gases de exaustão é o uso da energia cinética dos gases de exaustão para produzir uma onda de compressão e outra de expansão, o que reduz a pressão do gás no cilindro.

Ainda, de acordo com o autor, durante o processo de exaustão do motor, a pressão dos gases de escape cria uma onda de compressão que se expande no tubo de escape e uma depressão na porta de escape, permitindo que os gases residuais sejam eliminados da câmara de combustão e que a carga fresca seja puxada para dentro. No entanto, a eficiência desse processo depende do comprimento adequado dos tubos de ramificação do coletor de escape, que devem ser equilibrados para permitir um fluxo adequado. Se os tubos são muito curtos, a depressão não será suficiente para puxar a carga fresca, enquanto, se forem muito longos, a resistência ao fluxo pode ser excessiva e retardar o processo. Em resumo, a criação de uma depressão na porta de escape durante a exaustão é crucial para o processo de limpeza e enchimento da câmara de combustão, mas isso depende do comprimento apropriado dos tubos de ramificação.

### **2.3.2 Ruídos**

Segundo Plank (2005), dois tipos de ruídos são gerados no sistema de escapamento. O primeiro é o ruído oriundo do pulso de expulsão dos gases do cilindro, que é chamado de ruído fundamental, diretamente afetado pela variação de rotação do motor. O segundo é originado pelo escoamento dos gases nos tubos de escape.

Conforme Pimentel (2021), o nível de ruído pode ser influenciado pela temperatura ambiente. Em temperaturas mais elevadas, a perda de energia é menor, uma vez que os gases tendem a manter mais calor ao saírem do sistema de escape. Isso faz com que as ondas sonoras retenham mais energia, resultando em um aumento do nível de ruído emitido. Já em temperaturas mais baixas, a diferença de temperatura entre os gases e o ambiente é maior, o que acarreta em uma maior perda de energia e, conseqüentemente, em um nível de ruído mais baixo.

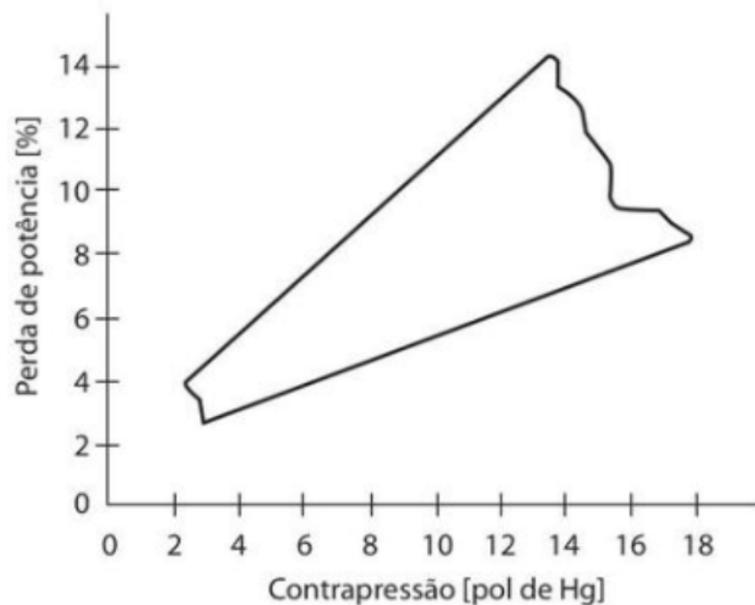
Ainda, em concordância com o autor, a direção do vento é um fator que também exerce influência no nível de ruído. Quando a direção do vento e a das ondas sonoras coincidem, elas são refratadas para baixo, resultando em um aumento do nível de ruído. Por outro lado, quando a direção do vento é oposta à das ondas sonoras, as mesmas são refratadas para cima, ocasionando uma redução de até 20 dB no nível de ruído.

### 2.3.3 Contrapressão

De acordo com Brunetti (2018), ao analisar o processo de remoção dos gases do motor através do sistema de escapamento, é possível observar como a contrapressão dos gases pode afetar a sua potência e eficiência. O autor aponta que os sistemas de escape devem ser projetados para minimizar a contrapressão na saída dos gases, uma vez que a energia necessária para expelir os gases é diretamente proporcional à contrapressão. Quando a contrapressão aumenta na saída do escapamento, há uma maior quantidade de gases residuais retidos no interior do cilindro, o que diminui a eficiência volumétrica do motor. Portanto, ter um sistema com baixa contrapressão contribui para uma boa eficiência e desempenho do motor.

A perda de potência do motor causada pela contrapressão pode ser visualizada na figura 11, que exibe uma grande dispersão nos resultados, influenciados por diversos fatores, como o cruzamento de válvulas e o movimento dos gases nos coletores. A análise indica que o sistema de escape deve ser cuidadosamente projetado para evitar restrições na saída dos gases, garantindo curvas suaves e formas arredondadas para minimizar a resistência do fluxo dos gases. Dessa forma, é possível impor a menor quantidade possível de obstáculos ao fluxo dos gases, prevenindo a perda de potência do motor e aumentando a sua eficiência (VITTO, 2020).

Figura 11 – Efeitos da contrapressão do sistema de escapamento na eficiência de motores



Fonte: Brunetti (2018)

## 2.4 Características dos coletores

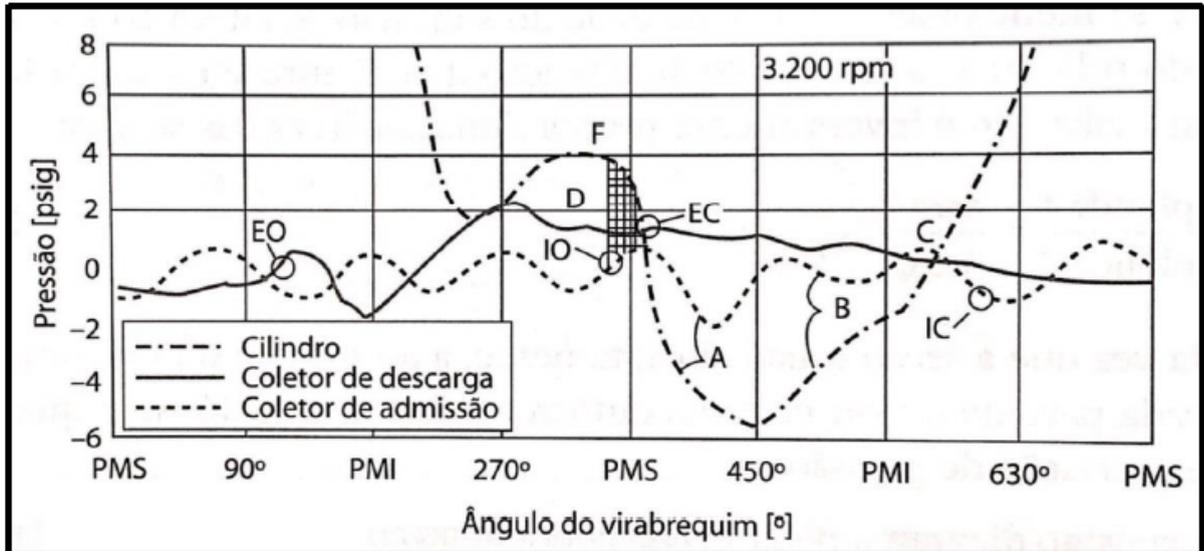
### 2.4.1 Sintonia dos tubos de escapamento

Segundo Brunetti (2018), os tubos de escapamento comportam-se como um tubo de órgão musical tampado em uma das extremidades. A sintonia do tubo de escape deve ser feita para que se obtenha uma melhor lavagem ou sobrealimentação em motores dois tempos, podendo gerar incrementos de até 30% na sua potência. Porém, nos motores de quatro tempos, os efeitos são muito menores. Os ganhos de potência nos motores com mais de um cilindro estão mais relacionados ao arranjo dos tubos, de maneira que a descarga de um cilindro deve ocorrer quando as válvulas dos outros estão fechadas.

Conforme a figura 12, é desejado que se tenha uma pressão menor dentro do coletor de escape no instante que acontece o overlap de modo que seja assegurada uma boa lavagem no cilindro. O comprimento do escapamento deve ser ideal para que o pulso de pressão que acontece logo após a abertura da válvula de escape

chegue na extremidade do tubo e retorne como uma onda de menor pressão atingindo a válvula de escape no instante do overlap (BRUNETTI, 2018).

Figura 12 – Pressões no cilindro e nos coletores de admissão e escapamento de motor de quatro tempos.



Fonte: Brunetti (2018)

#### 2.4.2 Tubo primário do sistema de escape

Conforme Bell (1980), o diâmetro dos tubos primários do sistema de escapamento influenciam diretamente em qual rotação o motor deverá atingir seu pico de torque. Aumentando o diâmetro dos dutos, o torque tende a ser em rotações mais elevadas. Além disso, se aumentar o comprimento dos dutos, a potência gerada pelo motor é priorizada em médias e baixas rotações, diminuindo consequentemente em altas velocidades. Dutos mais curtos fazem com que a potência seja aumentada em altas rotações. Para o cálculo dos dutos primários é utilizada uma relação entre a rotação do motor e o grau em que a válvula de escapamento se abre antes do PMI. Deste modo, obtém-se a seguinte equação para os modelos 4-1-1:

$$P = \frac{(850 \times (180^\circ + ED))}{rpm} - 3 \quad (1)$$

Onde:

$P$  é o comprimento do duto primário (Pol);

$ED$  é a abertura da válvula de exaustão antes do PMI em graus;

$rpm$  é a rotação do motor por minuto.

Para os *headers* 4-2-1, ilustrados na figura 13, o tubo primário é dividido em duas partes. A primeira deverá ter no mínimo 15 polegadas, e a segunda é obtida por uma subtração. A equação 2 apresenta o cálculo necessário para que se obtenha o comprimento do tubo secundário. Além disso, pode-se observar ainda na figura que o restante do comprimento do sistema é obtido pela soma do comprimento dos dutos primários acrescidos de três polegadas.

$$P2'' = P'' - P1'' \quad (2)$$

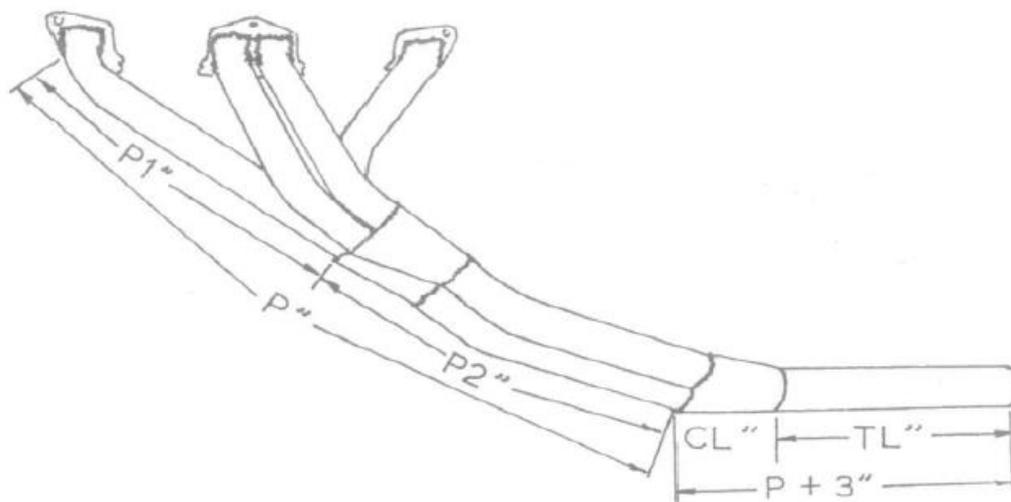
Onde:

$P1''$  é o comprimento do duto primário;

$P2''$  é o comprimento do duto secundário;

$P''$  é o comprimento total dos dutos primários.

Figura 13 – Comprimento dos dutos para *header* 4-2-1



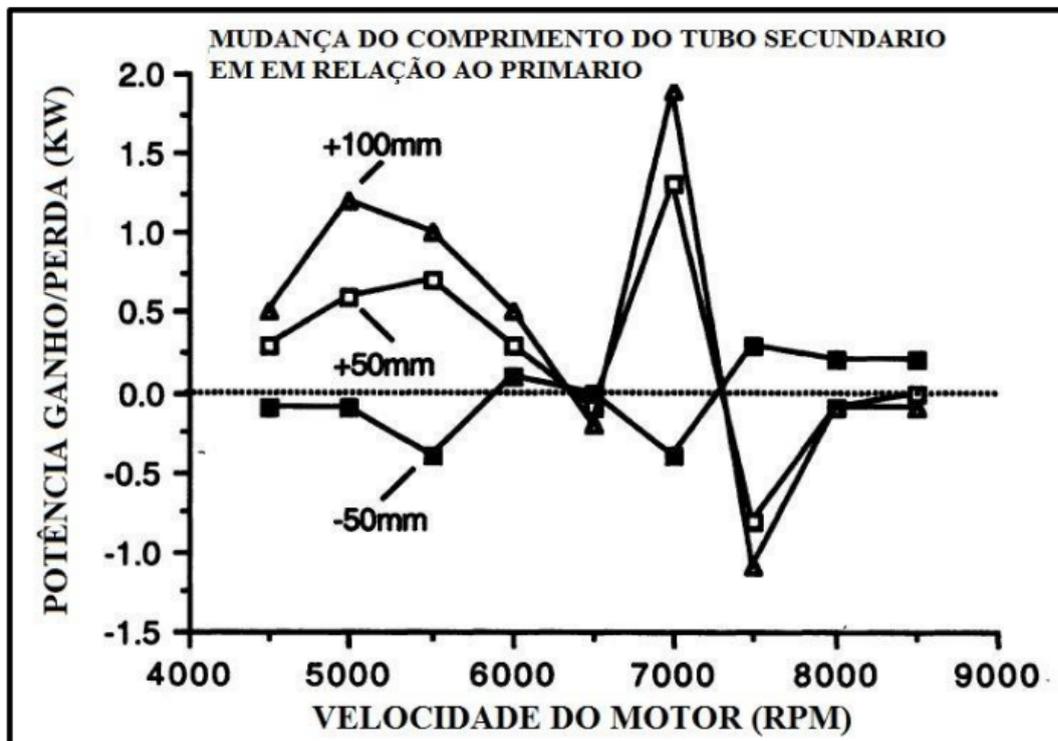
Fonte: Bell (1980)

### 2.4.3 Tubo secundário do sistema de escape

O tubo de escape secundário tem a função de direcionar para fora do sistema os gases vindos dos tubos primários. A união em um único tubo promove uma grande alteração nas ondas de pressão. Na saída dos gases do tubo primário, existe um grande diferencial de pressão. Isso provoca uma sucção no restante do sistema devido ao cruzamento de válvulas e ao pulso de pressão estar ligado aos outros três cilindros (quando for um motor de quatro cilindros), desde que não haja pulsos de outros cilindros no momento da saída. (BELL, 1980)

De acordo com Blair (1999), com o objetivo de se obter o comprimento ideal do tubo secundário, realizaram-se simulações com um motor real operando em diversas faixas de rotação a fim de conseguir o resultado desejado. Pode-se observar conforme a figura 14 um incremento ou perda de potência com a variação do tubo secundário e rotações do motor.

Figura 14 – Desempenho do motor x comprimento do tubo secundário de escape



Fonte: Adaptado de Blair (1999)

Para Bell (1980), o comprimento do tubo secundário pode ser obtido utilizando como base o comprimento dos tubos primários. Segundo ele, pode-se apenas utilizar o mesmo comprimento dos primários acrescidos de três polegadas, considerando também o coletor de união entre os tubos.

#### 2.4.4 Diâmetro dos tubos de escape

Conforme Vitto (2020), o diâmetro dos tubos dos coletores afeta o desempenho do sistema de escapamento. Se os tubos forem muito estreitos, a passagem dos gases pode ser limitada, retardando a onda de pressão que ocorre quando as válvulas se abrem. Por outro lado, se o diâmetro dos tubos for muito grande, a onda de pressão pode se dissipar muito rapidamente, resultando em uma perda de eficiência do coletor primário. Para motores de alta rotação, é mais adequado ter escapamentos curtos com diâmetros maiores, enquanto motores com menor rotação operacional se beneficiam de escapamentos longos com diâmetros menores.

Para Bell (1980), o cálculo do diâmetro de cada tubo primário do sistema de escapamento utiliza uma relação entre o volume do cilindro e o comprimento do duto primário, conforme apresentado na equação 3.

$$ID = \sqrt{\frac{cc}{(P+3) \times 25}} \times 2,1 \quad (3)$$

Onde:

$ID$  é o diâmetro interno do duto primário (Pol);

$cc$  é o volume de cada cilindro do motor;

$P$  é o comprimento do duto primário (Pol).

Conforme Bell (1980) para determinar o diâmetro do tubo de escape deve-se utilizar a equação 4.

$$ID3 = \sqrt{\frac{cc \times 2}{(P+3) \times 25}} \times 2 \quad (4)$$

Onde:

$ID3$  é o diâmetro interno do duto de escape (Pol);

cc é o volume de cada cilindro do motor;

$P$  é o comprimento do duto primário (Pol).

Para os *headers* 4-2-1, o diâmetro dos tubos primários e do tubo de escape são calculados seguindo as equações 8 e 9. Segundo Bell (1980), apenas para o cálculo do diâmetro dos tubos secundários P2 (figura 12) utiliza-se a equação 5.

$$ID2 = \sqrt{ID^2 \times 2} \times 0,93 \quad (5)$$

Onde:

$ID2$  é o diâmetro interno do duto secundário (Pol);

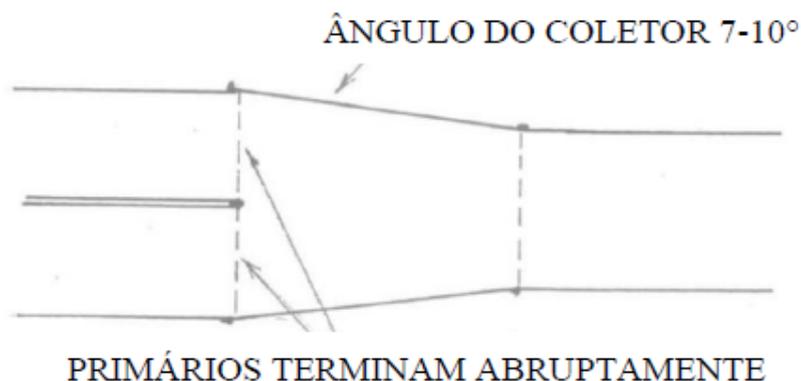
$ID$  é o diâmetro interno do duto primário (Pol).

#### 2.4.5 Coletor de união entre tubos primários e secundários

Um elemento crucial no sistema de escape é o coletor de união, que tem a função de conectar os tubos primários e o tubo secundário. O papel do coletor é fundamental para a equalização do sistema, pois é onde as ondas de pressão e expansão dos gases se encontram e provocam uma queda de pressão no sistema. O coletor pode ser projetado em quatro diferentes formatos: *Buffle*, *Merge*, *Venturi Merge* e *Split interference* (VITTO, 2020).

Segundo Bell (1980), o coletor de união do tipo *Buffle* possui tubos primários de escape que terminam abruptamente e conectam-se a uma câmara aberta e afunilada. Quando as ondas de pressão chegam ao fim do tubo primário, ocorre uma pressão negativa que auxilia na eliminação mais eficiente dos gases do cilindro. Entretanto, em altas rotações, as ondas de pressão podem retornar aos tubos primários dos outros cilindros, gerando uma contrapressão e reduzindo a eficiência de saída dos gases do cilindro. Este tipo de coletor é recomendado para motores de veículos de passeio ou competição com comandos leves que tenham duração de até 260°. Na figura 15 é possível observar um exemplo de coletor e união estilo *Buffle*.

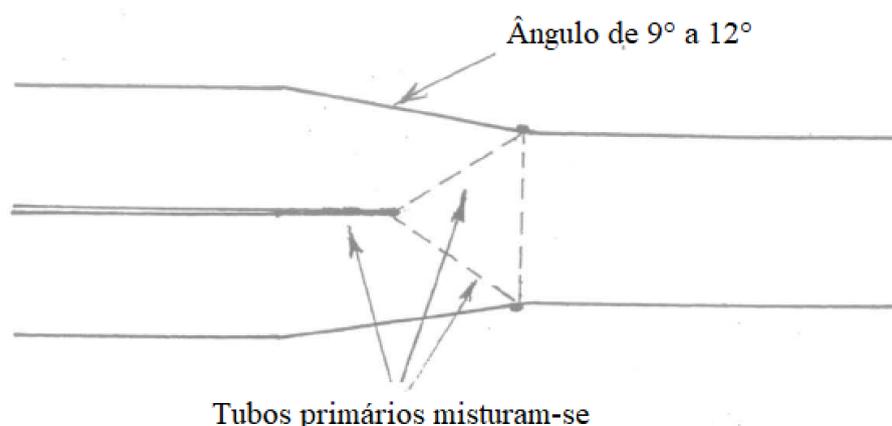
Figura 15 – Exemplo de coletor e união estilo *Baffle*



Fonte: Vitto (2020)

O Merge é um tipo de coletor que pode ser utilizado em motores de corrida de alto desempenho, caracterizados pelo seu amplo cruzamento de válvulas. Neste modelo, os tubos de escape não terminam abruptamente, mas se fundem e se misturam dentro do tubo. Isso ajuda a reduzir as ondas de pressão refletidas no tubo primário, mas também significa que o coletor não sincroniza mais os pulsos para ajudar na exaustão dos gases pela pressão negativa. No entanto, como esse coletor é projetado para motores que operam em uma faixa de rotação mais estreita, pode-se trabalhar melhor nos ângulos para melhorar a eficiência de saída dos gases no interior do cilindro. Os ângulos podem variar de  $7^\circ$  a  $10^\circ$ , e até  $12^\circ$  para motores que operam em uma faixa de rotação muito alta (BELL, 1980). Na figura 16 é apresentado o modelo de coletor de união do tipo *Merge*.

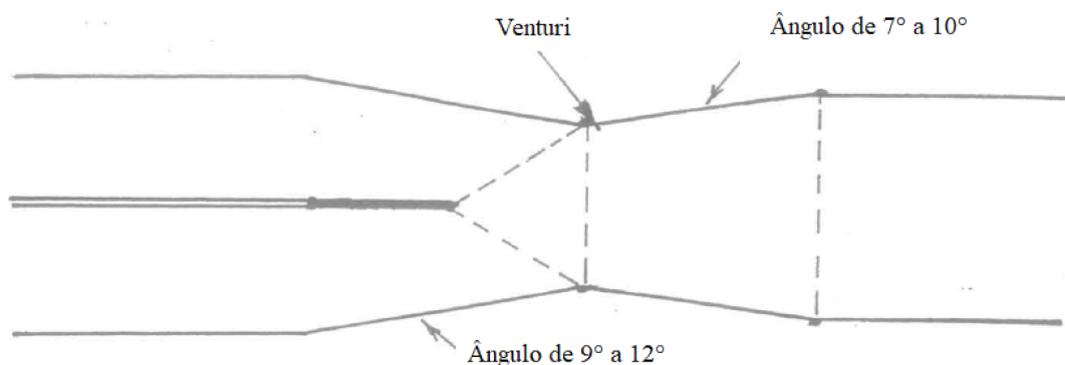
Figura 16 – Modelo de coletor de união do tipo *Merge*



Fonte: Adaptado de Bell (1980)

Ainda, segundo o autor, o modelo de coletor de união *Venturi merge* pode ser empregado em projetos em que o tubo de saída tem um diâmetro muito maior do que os tubos do coletor primário. Esse tipo de coletor apresenta uma seção convergente vinda dos tubos primários, seguida de uma seção divergente que se conecta ao tubo secundário, formando uma espécie de venturi. Essa configuração tem como objetivo aumentar a velocidade dos gases e reduzir as ondas de pressão do tubo primário, conforme ilustrado na figura 17. Dessa forma, o coletor é capaz de trabalhar de forma mais eficiente com os gases de saída do que com as ondas de pressão. Esse tipo de coletor é especialmente indicado para motores de grande porte, como os V6 ou V8, com cerca de 700 cm<sup>3</sup> a 800 cm<sup>3</sup> por cilindro, em que um coletor tipo *Merge* começa a perder eficiência devido às limitações de diâmetro dos tubos.

Figura 17 – Modelo de coletor de união *Venturi merge*

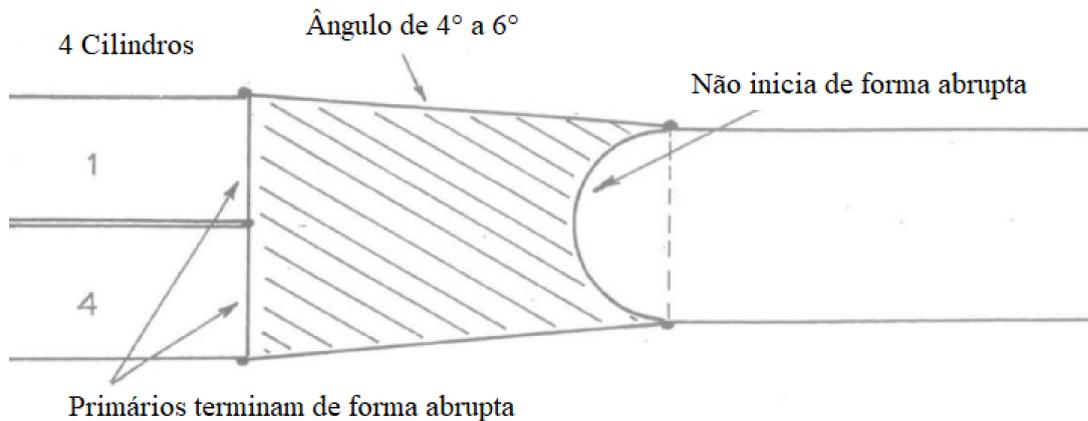


Fonte: Adaptado de Bell (1980)

De acordo com Bell (1980), o coletor tipo *Split interference* é utilizado para conectar tubos do coletor primário a seções intermediárias com tubos secundários, diferentemente de outros modelos, geralmente seguindo a configuração 4-2-1. Essa configuração proporciona um aumento útil na faixa intermediária de rotação, pois o vácuo criado nos tubos primários não se diluirá nos outros três tubos com os quais está conectado. Em vez disso, apenas um outro tubo faz parte do conjunto, o que significa que, em velocidades mais baixas do gás e, conseqüentemente, do vácuo, o tubo conectado não sentirá os efeitos. Isso facilita a equalização dos tubos. A figura

18 mostra essa configuração, onde os tubos primários 1 e 4 estão conectados juntos.

Figura 18 – Coletor de união tipo *Split interference*



Fonte: Adaptado de Bell (1980)

Para que seja calculado o comprimento do coletor de união, independente do modelo escolhido, leva-se em conta o diâmetro dos tubos anteriormente calculados. O ângulo recomendado do coletor é determinado com a equação 6 (BELL, 1980).

$$Lc = \frac{ID2 - ID3}{2} x CotA \quad (6)$$

Onde:

$ID2$  é o diâmetro na entrada do coletor (Pol);

$ID3$  é o diâmetro na saída do coletor (Pol);

$A$  é o ângulo do cone (graus);

$Lc$  é o comprimento do cone (Pol);

$Cot$  é a cotangente do ângulo.

## 2.5 Dinamômetro

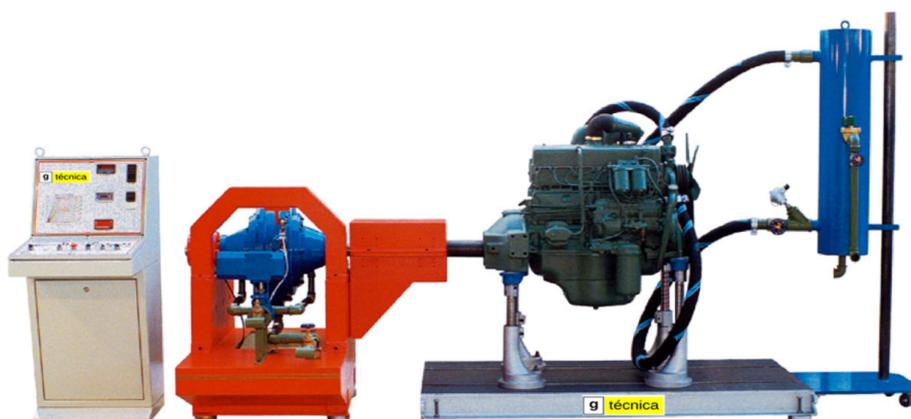
De acordo com Plank (2005), os dinamômetros são essenciais tanto para testes como para análises durante o processo de desenvolvimento de motores,

desempenhando um papel fundamental na indicação de caminhos para melhorias de desempenho. Em outras palavras, eles são uma ferramenta analítica que aponta direções para aprimorar o desempenho dos motores.

Os dinamômetros são capazes de medir o torque gerado por um motor em diferentes velocidades, enquanto o controle do acelerador é realizado a distância, geralmente em uma sala de visualização separada da sala do dinamômetro, onde a instrumentação necessária está instalada. O software do equipamento calcula a potência com base no torque medido. Portanto, os dinamômetros não medem diretamente a potência do motor, mas sim a força aplicada pelo motor em uma distância, ou seja, o torque. Existem vários tipos de dinamômetros que diferem em seus modos de operação, mas todos eles medem a velocidade e o torque produzido por um motor para determinar a potência. Existem dois modelos principais, sendo eles os dinamômetros de motor e o de rolos (PLANK, 2005).

Para Bell (1980), os dinamômetros de motor medem a saída de torque por meio de uma conexão direta entre o motor e o dinamômetro, que é montado no volante ou na polia do virabrequim, permitindo que os dados sejam registrados diretamente. Esses dinamômetros são comumente utilizados para o desenvolvimento e ajuste de motores, principalmente por grandes empresas automotivas que buscam criar ou aprimorar motores tornando-os mais potentes e eficientes. Eles também são bastante empregados em aplicações de corrida, onde o trabalho de desenvolvimento requer um ajuste fino do motor para atingir a potência ideal. Na figura 19 é apresentado um exemplo de dinamômetro de motor.

Figura 19 - Exemplo de dinamômetro de motor



Fonte: Gtécnica (2023, imagem digital)

Os dinamômetros de rolos são projetados para manter o motor no próprio veículo que está sendo testado. Essa abordagem é bastante conveniente, pois basta conduzir o veículo sobre os rolos, onde é possível medir a potência gerada pelas rodas. Esses dinamômetros são muito populares em oficinas de performance e tuning, já que são mais convenientes para o cliente e têm um custo inicial relativamente baixo. No entanto, esses equipamentos têm limitações em termos de sensibilidade em comparação com os dinamômetros de motor (BELL, 1980). A figura 20 apresenta um modelo de dinamômetro de rolos.

Figura 20 - Exemplo de dinamômetro de rolos



Fonte: Do autor (2023)

## **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste capítulo são apresentados os princípios metodológicos adotados para a realização deste estudo, assim como as estratégias selecionadas para a obtenção e análise das informações.

### **3.1 Metodologia da pesquisa**

Segundo Gil (2002), a pesquisa é descrita como um processo prático e metódico com o propósito de encontrar soluções para problemas. De maneira geral, a pesquisa se faz necessária quando existe escassez de informações sobre o tema em questão, podendo também ser empregada para validar teorias ou quando é preciso organizar e dar sentido a informações dispersas e desorganizadas.

De acordo com Lakatos e Marconi (2003), o método é caracterizado como um conjunto de atividades ordenadas e lógicas, buscando alcançar de forma eficaz e precisa o objetivo de produzir conhecimento válido e verdadeiro. Esse processo permite seguir um caminho definido, identificar erros e oferecer suporte aos pesquisadores na tomada de decisões. Além disso, o método proporciona segurança e economia no desenvolvimento da pesquisa.

### **3.1.1 Tipo de pesquisa**

O tipo de pesquisa adotado neste trabalho é fundamentado na abordagem da pesquisa investigativa intervencionista. De acordo com Vergara (1998), a pesquisa investigativa intervencionista busca mediar e intervir na realidade estudada com o intuito de promover mudanças. Não se trata apenas de explicar um estudo específico, mas também de intervir nele ativamente. Seu objetivo não se limita a oferecer sugestões para resolver o problema, mas visa resolver o problema de maneira efetiva e participativa.

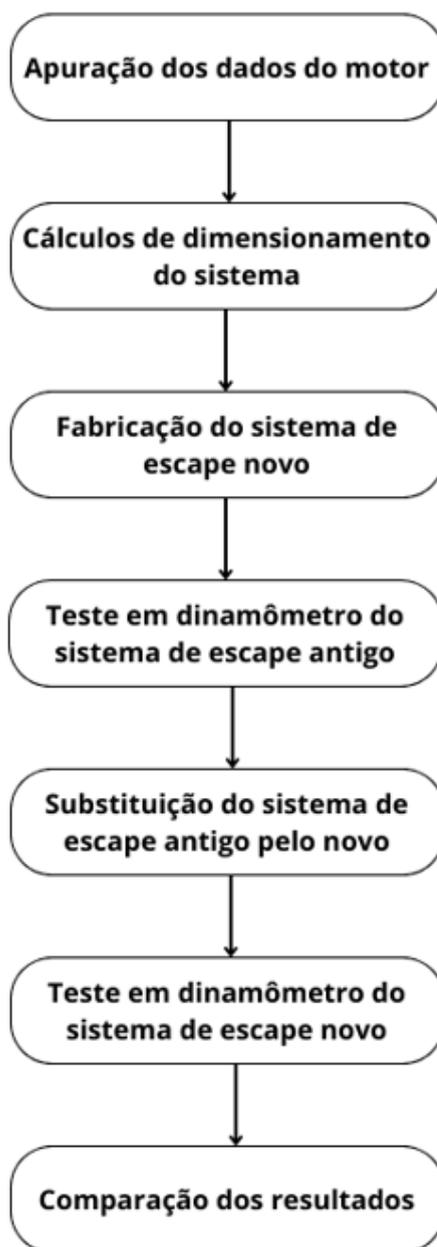
### **3.1.2 Modo de abordagem**

O estudo em questão adota uma abordagem quantitativa, apresentando resultados que são expressos em números e podem ser mensurados. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a abordagem quantitativa se refere ao que pode ser quantificado ou mensurado. Esse método resulta em dados numéricos e matemáticos, podendo ser demonstrado estatisticamente. A abordagem quantitativa tem como foco a previsão, a descrição e a explicação do problema por meio de dados que podem ser medidos ou observados.

## **3.2 Dimensionamento do sistema de escape**

Nesta etapa são apresentadas as etapas necessárias usadas para o desenvolvimento e execução do sistema de escapamento proposto. A sequência das atividades propostas são mostradas na figura 21.

Figura 21 - Fluxograma das etapas da metodologia do trabalho



Fonte: Do autor (2023)

### **3.2.1 Apuração dos dados do motor**

Para que o dimensionamento do sistema de escape fosse possível, foram necessárias informações importantes sobre o motor em que o componente foi desenvolvido. Informações iniciais sobre o motor como cilindrada, potência e torque são facilmente encontradas em manuais dos fabricantes, mas foram necessários dados mais específicos para o dimensionamento.

Foram necessárias informações sobre o comando de válvulas do motor. Esses dados foram coletados por meio de um disco graduado para visualização dos graus de rotação do virabrequim e de um calibre de lâminas para que fosse possível verificar o momento em que o came do comando de válvulas começa a atuar sobre a válvula.

### **3.2.2 Cálculos de dimensionamento do sistema**

Com as informações técnicas do motor, tornou-se possível a realização dos cálculos. Para o dimensionamento do sistema, considerando os comprimentos e diâmetro dos tubos nas seções, foram utilizadas as equações de um a seis apresentadas no capítulo 02.

### **3.2.3 Fabricação do sistema de escape novo**

O sistema de escapamento novo para o motor foi executado levando em consideração os resultados dos cálculos previamente feitos. Para que seja construído, utilizaram-se técnicas de fabricação do setor metalúrgico e ferramentas de corte, solda e dobra.

### **3.2.4 Teste em dinamômetro do sistema de escape antigo**

Nesta etapa foram realizados testes em dinamômetro do motor ainda com o sistema de escape antigo. O teste consistiu em três passagens com intervalo de um minuto entre elas. O resultado final foi a curva de torque e potência do melhor resultado.

### **3.2.5 Substituição do sistema de escape antigo pelo novo**

Neste momento, após os testes utilizando o sistema de escape antigo, foi realizada a substituição do mesmo pelo novo sistema de escape previamente fabricado.

### **3.2.6 Teste em dinamômetro do novo sistema de escape**

Nesta etapa foram feitos mais testes em dinamômetro do motor, porém com o sistema de escape novo. O teste seguiu o mesmo método dos anteriores, sendo o resultado considerado para posterior análise a melhor das três passagens.

### **3.2.7 Comparação dos resultados**

Nesta etapa foram analisados os resultados obtidos tanto do motor com o sistema de escape antigo quanto com o novo. A comparação dos dados coletados foi utilizada para a confirmação ou não de ganhos de torque e potência do motor.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta os procedimentos de cálculos e de coleta de dados para o dimensionamento do sistema de escapamento.

### 4.1 Requisitos técnicos do sistema de escape

Para que fosse possível dimensionar o sistema de escape, um dos requisitos é conhecer as características do motor e as condições de uso do sistema. Isto se deve ao fato de que essas condições impactam diretamente no dimensionamento dos componentes do sistema.

Alguns parâmetros iniciais para o projeto foram levados em conta para o dimensionamento do sistema de escape:

- a) trata-se de em um veículo off-road, que, neste caso, é utilizado em médias rotações na maioria do tempo;
- b) a rotação limite que o motor de 6000 RPM;
- c) foram empregados materiais comerciais para a confecção do componente;
- d) foram utilizados tubos de aço carbono para confecção do sistema de escape;
- e) as questões relacionadas aos materiais utilizados não foram consideradas pois o componente exerce apenas papel funcional.

## 4.2 Característica do motor

Para que fosse possível a realização do dimensionamento do sistema de escape, foram necessários dados técnicos do motor em estudo . As informações do motor AP-1800 de quatro cilindros são apresentadas na figura 22.

Figura 22 - Dados técnicos do motor

DADOS TÉCNICOS	
AP-1800 (Gasolina)	
Potência máxima	
Líquida NBR5484 (Cv)	98,0
Bruta SAEJ1349 (Hp)	102,0
Torque máximo	
Líquido NBR5484 (Nm)	147,0
Bruto SAEJ1349 (Nm)	149,0
Cilindrada (Cm <sup>3</sup> )	1781

Fonte: Adaptado de Volkswagen (1998)

Os demais dados relativos ao motor foram adquiridos por meio de medições em bancada. Para determinar os ângulos de avanço da válvula de escape, foi necessário remover a tampa de válvulas do motor e registrar as leituras usando um disco graduado preso na polia do virabrequim, como pode-se observar na figura 23. Além disso, um calibrador de folgas de 0,05 mm foi posicionado entre o balancim da válvula de escape e o respectivo came de acionamento. O acionamento do comando de válvulas e o movimento ascendente e descendente do pistão foi obtido girando o virabrequim com uma chave manual, para, assim, transmitir o movimento para os demais componentes do motor.

Com a tampa do motor removida e o disco graduado posicionado no local desejado, o pistão do cilindro que estava sendo feita a leitura foi colocado no ponto morto superior (PMS). A figura 24 ilustra o valor indicado no marcador.

Figura 23 - Disco graduado fixado na polia do virabrequim



Fonte: Do autor (2023)

Figura 24 - Marcador sinalizando ponto morto superior



Fonte: Do autor (2023)

O uso do calibrador de folgas permitiu determinar o exato momento de abertura e fechamento das válvulas. Quando o calibrador permanecia minimamente imóvel, indicava o momento preciso em que o came atuava sobre a válvula. Na figura 25 é mostrado o marcador apontando 30° antes do ponto morto inferior (PMI) no início de atuação do came.

Figura 25 - Marcador sinalizando graduação de início de abertura da válvula de escape



Fonte: Do autor (2023)

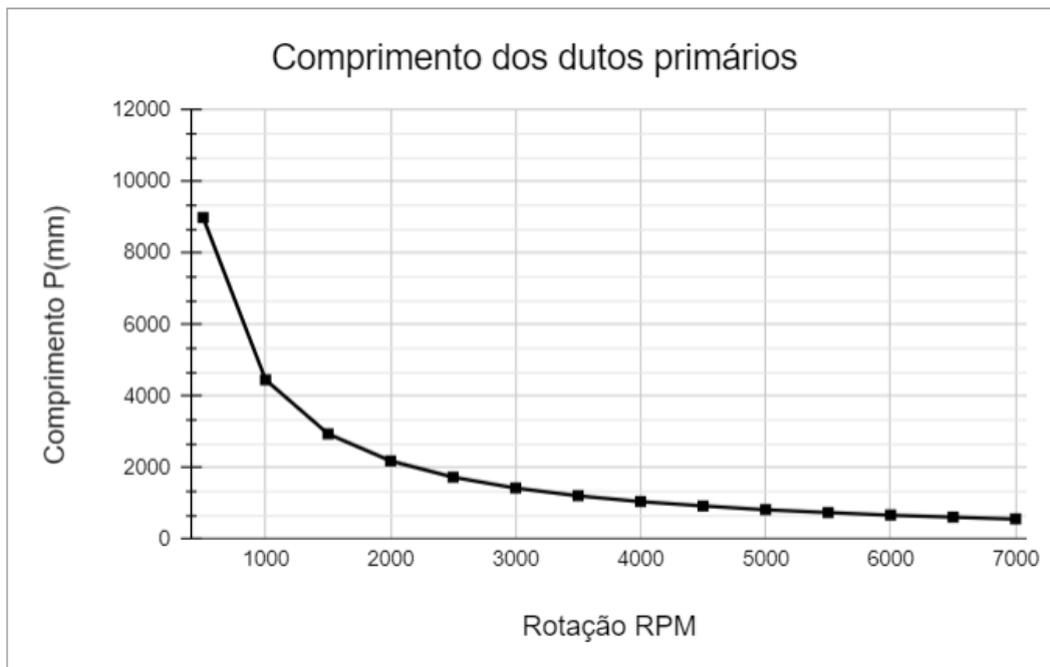
#### 4.3 Dimensionamento do sistema de escape

Esta seção apresenta os cálculos e os métodos utilizados para o dimensionamento do sistema de escapamento do tipo 4-2-1 para um motor AP-1800.

### 4.3.1 Cálculo do comprimento dos tubos do coletor de escape

O comprimento dos tubos do coletor de escape foi determinado por meio da equação (1) e um gráfico foi gerado relacionando o comprimento de tubo ideal e a rotação alvo do motor. Esses dados são mostrados no gráfico 1.

Gráfico 1 - Variação do comprimento dos dutos primários



Fonte: Do autor (2023)

Com relação ao gráfico 1, é possível observar uma redução contínua no comprimento do duto à medida que a rotação desejada aumenta. De acordo com Bell (1980), em faixas de rotação mais elevadas, o motor gera um maior número de pulsos por unidade de tempo, o que implica que o espaço necessário para que o pulso de pressão positiva percorra o sistema de escape e retorne ao cilindro deve ser menor. Por outro lado, em faixas de rotação mais baixas, ocorre a geração de menos pulsos por unidade de tempo, exigindo, portanto, um sistema de escape mais longo. Para este estudo definiu-se a rotação alvo de 6000 RPM, na qual o comprimento respectivo obtido foi de 26,75" ou 680 mm aproximadamente.

Considerando que o coletor desenvolvido segue o padrão 4-2-1, o comprimento dos tubos primários é determinado pela equação (2). Neste modelo de coletor, ocorre a combinação dos tubos que conectam os cilindros um e quatro,

assim como aqueles que unem os tubos dois e três, reduzindo de quatro para dois tubos.

#### **4.3.2 Cálculo dos diâmetros dos tubos**

Os coletores de escapamento do tipo 4-2-1 possuem três seções de tubos que se conectam em sequência, gerando a necessidade de diferentes diâmetros, que foram calculados por meio das equações propostas por Bell (1980), as quais foram previamente introduzidas neste estudo. Adicionalmente, os comprimentos dos tubos anteriormente calculados são empregados para a rotação alvo do motor.

De acordo com Vitto (2020), foram utilizados tubos com diâmetros encontrados comercialmente para a confecção dos tubos visto que os mesmos dificilmente seriam encontrados nas dimensões calculadas. Tendo como base o resultado originado da equação (3), de 41,27 mm de diâmetro calculado, foi empregado para a confecção do escapamento tubos de 1 ½” ou 38,1 mm de diâmetro externo. Esse modelo foi definido por ser uma bitola comercial desse material.

A próxima etapa foi o cálculo do diâmetro do segundo conjunto de tubos que compõem o sistema, os quais recebem um volume de gases expelidos por dois cilindros cada.

Utilizando o mesmo critério utilizado anteriormente, que tem como base o resultado proveniente das equações, escolheu-se o diâmetro de tubo comercial que mais se aproxima dos 54,28 mm calculados na equação (5). Para o diâmetro dos tubos secundários foi empregado o tubo de 2” de diâmetro externo.

Por fim, foi necessário determinarmos o diâmetro da terceira seção do sistema, que une os dois tubos remanescentes em um único que se segue até o final do escape. Deste modo, fez-se necessário o uso da equação (4) para determinarmos a seção do tubo.

De acordo com os resultados obtidos nas equações (4) e (5), sendo eles muito próximos, foi mantido o mesmo tubo de 2” de diâmetro externo nas duas seções.

### **4.3.3 Cálculo dos cones de união entre tubos**

Para que fosse feita a união das três seções de tubos do novo sistema de escapamento, empregou-se o modelo de união do tipo *Split Interference* conforme mostrado anteriormente na figura 18. Nos coletores de escapamento do tipo 4-2-1 existem três cones de união, sendo dois utilizados para unir dois tubos primários em um tubo secundário, além de um terceiro para unir os secundários em um terciário.

Para os cálculos foi utilizada a equação (6) vista anteriormente e como padrão para todos os cones, utilizou-se um ângulo de afunilamento de seis graus a fim de diminuir o comprimento do cone, com o objetivo de facilitar a construção do escape. Os dois primeiros cones, que são semelhantes e de acordo com os resultados obtidos provenientes da equação (6), possuem 135 mm de comprimento, já o terceiro foi fabricado com 250 mm de comprimento.

### **4.3.4 Cálculo do comprimento do tubo de escape**

O comprimento do tubo de escape foi obtido através do cálculo indicado na figura 13, que consiste em acrescentar em três polegadas o valor comprimento dos tubos primários obtidos na equação 1. Deste modo, o comprimento do tubo de escape calculado foi de 755 mm, totalizando assim um comprimento total de 1434 mm desde a saída do motor até o seu final.

## **4.4 Fabricação do sistema de escape novo**

Nesta etapa serão descritas as atividades realizadas para a confecção do sistema de escapamento que foi dimensionado anteriormente.

### **4.4.1 Confecção dos tubos primários**

Os dutos primários são, neste caso, os quatro tubos iniciais do sistema de escape. Deste modo, são os responsáveis pelo direcionamento dos gases logo após o cabeçote do motor para o restante do sistema. Como consequência disso, alojam-se dentro do cofre do motor e é necessário que sejam feitas diversas curvas nos tubos para o direcionamento dos gases para o local desejado.

O processo de fabricação desses dutos iniciais exigiria um grande esforço tanto de mão de obra, materiais e equipamentos para que fosse possível sua fabricação devido à complexidade na geometria. Por este motivo, adquiriu-se um coletor de escapamento do tipo 4-1 apresentado na figura 26 para que fosse aproveitada sua parte inicial, considerando que o diâmetro deste é semelhante ao que foi dimensionado. O coletor adquirido foi cortado de modo que o comprimento remanescente fosse de 420 mm.

Figura 26 - Coletor de escape 4-1 versus tubos iniciais aproveitados



Fonte: Do autor (2023)

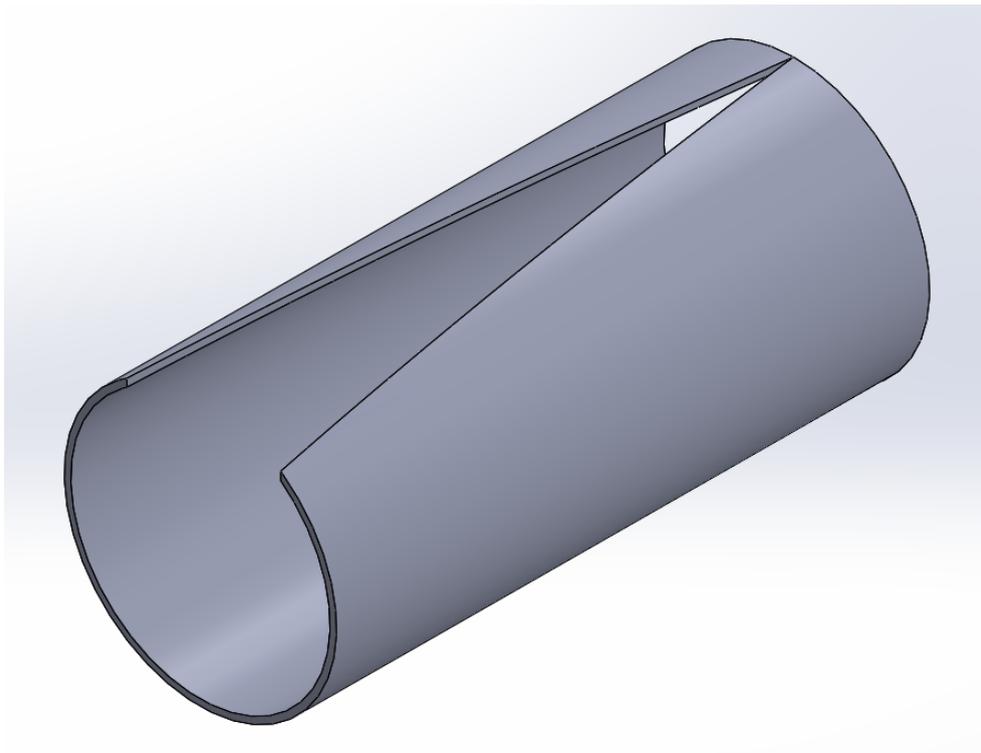
#### 4.4.2 Confeção dos cones de união

Os três cones de união que foram utilizados no novo sistema de escapamento foram fabricados a partir de chapas de aço carbono de 1,5 mm de

espessura. Em ambos, foi utilizado uma calandra de modo que as chapas foram conformadas em tubos.

Para que esses tubos formados fossem transformados em cones, foi necessário um corte em forma de triângulo conforme mostrado na figura 27, de modo que o perímetro remanescente tivesse a medida do diâmetro da saída do cone a a outra parte capaz de formar uma forma oblonga de modo a abranger os dois tubos anteriores.

Figura 27 - Exemplo de corte em tubo para a formação do cone



Fonte: Do autor (2023)

Após esse processo, as juntas foram soldadas por processo *Metal Inert Gas* (MIG) e por fim a parte onde foi unida com dois tubos teve de ser achatada através do uso de uma morsa, um martelo e uma bigorna, para que o formato oblongo pudesse ser obtido. Na figura 28 podem ser observados os cones de união já soldados nos tubos primários.

Para a confecção dos cones primários, foram necessárias duas chapas de 135 mm de altura e 195 mm de largura cada, já para o cone secundário, foi utilizada uma chapa com 250 mm de altura e 260 mm de largura.

Figura 28 - Cone unindo tubos primários



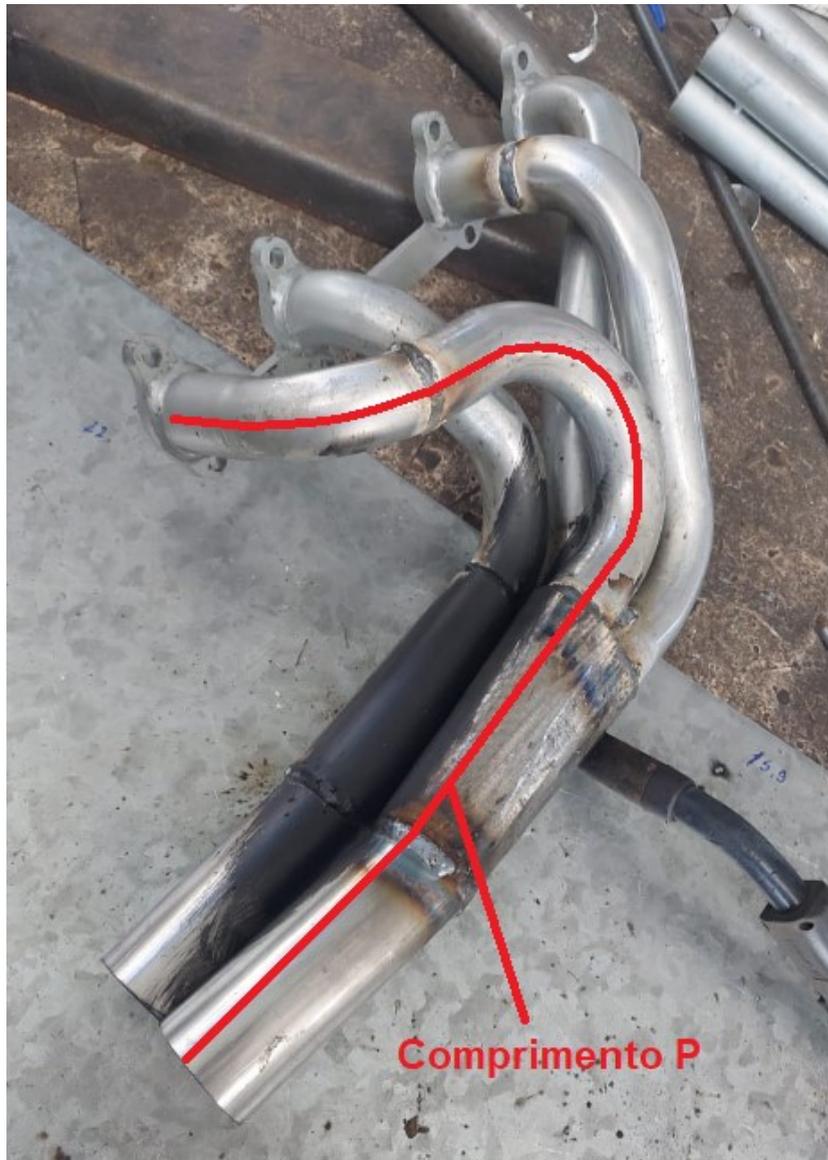
Fonte: Do autor (2023)

#### 4.4.3 Confeção dos tubo secundários

Os tubos secundários foram confeccionados a partir de duas partes de tubos de aço carbono de 2" ou 50,8 mm de diâmetro externo e com paredes de 1,5 mm. Seu comprimento foi definido em 125 mm respeitando, desta maneira, o comprimento P determinado no gráfico 1 anteriormente.

Na figura 29 podemos observar o resultado preliminar da construção do novo sistema de escape, além disso, têm-se as peças unidas de modo que o comprimento P de 680 mm fosse obtido.

Figura 29 - Construção parcial do sistema de escape novo



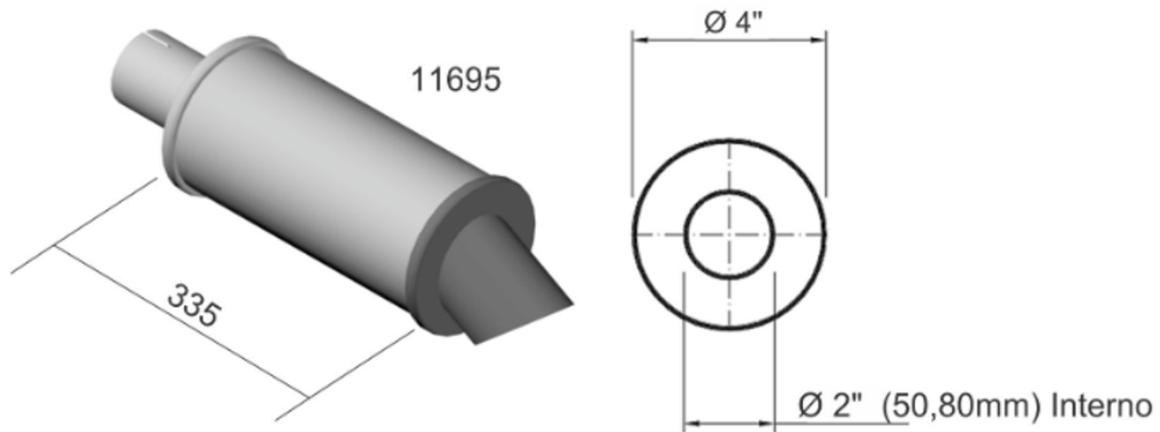
Fonte: Do autor (2023)

#### 4.4.4 Confeção do tubo de escape

O tubo de escape é a seção final do sistema de escape e ele abrange desde o segundo cone até o final do sistema. O tubo de escape foi confeccionado a partir do segundo cone de união e por meio de seções de tubos de 2" de diâmetro externo, além de um silenciador mostrado na figura 30 com diâmetro interno de 2" e comprimento de 335 mm a fim de atenuar o som emitido pelo motor mas sem interferir no escoamento dos gases pelo sistema. Na figura 31 podemos observar o

sistema de escapamento completo, totalizando 1434 mm aproximadamente de comprimento.

Figura 30 - Dimensões do silenciador utilizado



Fonte: Tuper escapamentos e catalisadores (2023, imagem digital)

Figura 31 - Sistema de escapamento completo



Fonte: Do autor (2023)

## **4.5 Testes em dinamômetro**

Nesta etapa serão descritas as atividades relacionadas aos testes executados em dinamômetro. Foram realizadas seis passagens pelo dinamômetro, três para o sistema de escape antigo e o restante para o sistema novo, para que fosse possível compará-las, seguiu-se os seguintes critérios:

- a) o combustível usado nos testes foi gasolina comum adquirida em posto de gasolina e sem nenhum incremento de aditivo;
- b) todos os testes foram realizados em um intervalo de três horas para que não houvesse variação de temperatura ambiente significativa;
- c) todas as passagens foram realizadas em quarta marcha;
- d) esperou-se um intervalo de um minuto entre cada passagem;
- e) não foram aplicadas correções no dinamômetro;
- f) todos os testes foram realizados no mesmo dinamômetro.

### **4.5.1 Testes em dinamômetro do sistema de escape antigo**

Para conduzir os primeiros testes, o veículo foi inicialmente devidamente fixado no dinamômetro, como ilustrado na figura 20, utilizando cintas de amarração que foram anexadas tanto ao equipamento quanto ao veículo. Após essa etapa inicial, o motor foi acionado e aguardou-se até que sua temperatura atingisse aproximadamente 80°C.

Uma etapa crucial envolveu a calibração do dinamômetro à rotação do motor, a qual foi estabelecida em 3000 rpm. Essa calibração foi realizada para assegurar a precisão e confiabilidade das medições obtidas. Os resultados desses testes iniciais estão apresentados na figura 32, destacando-se o melhor resultado dentre as três passagens realizadas.

Figura 32 - Resultados do dinamômetro com escape antigo



Fonte: Do autor (2023)

#### 4.5.2 Substituição do escape antigo pelo novo

Após os testes com o sistema de escapamento antigo, a substituição pelo componente novo foi necessária. Para realizar esse processo, aguardou-se aproximadamente 20 minutos, permitindo que a temperatura do motor diminuísse, tornando viável a remoção do componente antigo.

Durante a substituição, foram utilizadas luvas de couro como medida de proteção contra o calor. Além disso, empregaram-se uma chave catraca, duas extensões compatíveis e um soquete sextavado de 13 mm para afrouxar as oito porcas de fixação existentes. Após a remoção das porcas e do escapamento anterior, procedeu-se à montagem do novo componente, incluindo a colocação de novas juntas de vedação entre o coletor e o cabeçote do motor.

#### 4.5.3 Testes em dinamômetro do sistema de escape novo

Com o novo sistema de escapamento instalado e considerando ainda que o veículo e o dinamômetro já estão devidamente fixados e calibrados devido aos testes anteriores, foram possíveis de serem realizadas as três passagens

remanescentes. Porém, antes foi-se necessário acionar o motor novamente de modo que a sua temperatura voltasse aos 80°C aproximadamente.

Os testes com o novo sistema de escapamento seguiram os mesmos critérios dos anteriores e os resultados podem ser vistos na figura 33 onde é destacado o melhor resultado obtido das três passagens.

Figura 33 - Resultados do dinamômetro com escape novo



Fonte: Do autor (2023)

#### 4.6 Análise dos dados obtidos

Após os testes em dinamômetro concluídos tanto com o escapamento antigo, tanto com o confeccionado, além de dados obtidos em manuais da montadora, foi possível compararmos alguns resultados.

Primeiramente podemos observar os dados do motor que foram obtidos em um manual da Volkswagen, destacados na figura 22. Pode-se observar que a potência e o torque declarados do motor são 98 Cv e 147 N/m respectivamente. Esses valores são, segundo o manual do fabricante, valores no eixo do motor e com o sistema de escape e injeção eletrônica originais.

O segundo valor foi aferido por meio de testes realizados em um dinamômetro. Utilizando o sistema de escape que equipava o veículo naquele

momento, conforme previamente detalhado, foram registrados os valores de 95,7 Cv de potência e 145,3 Nm de torque. É importante destacar que essas medições foram feitas diretamente nas rodas do veículo, levando em consideração as perdas inerentes ao sistema de transmissão. Nestas circunstâncias, os valores do motor superaram os originais, uma vez que o sistema de escape era menos restritivo e combinado com uma injeção eletrônica programável.

O terceiro valor foi igualmente medido em um dinamômetro, mas desta vez utilizando o sistema de escapamento previamente dimensionado e fabricado. Como resultado, foram obtidos 96,7 CV de potência e 146,8 Nm de torque. Notavelmente, o desempenho com o novo sistema de escapamento superou o resultado anterior, ressaltando que não houve qualquer modificação nos mapas da injeção eletrônica em relação ao primeiro teste.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se o dimensionamento de um sistema de exaustão com a finalidade de aumentar o desempenho de um motor de quatro tempos e, também, desenvolveu-se um procedimento experimental em um dinamômetro para avaliar a performance do componente. Os resultados obtidos mostraram que o sistema de exaustão apresentou um desempenho levemente superior ao sistema já existente no veículo em estudo, justificando a importância do dimensionamento correto do sistema de escape no desempenho do motor.

Quanto à metodologia utilizada para o dimensionamento do sistema de escape, constatou-se que é importante conhecer a aplicação em que o motor será utilizado, uma vez que o sistema de escapamento pode influenciar diretamente o comportamento do mesmo. Neste estudo, por exemplo, a escolha do modelo de coletor do escape e do tipo de união entre os tubos foi essencial para melhorar o desempenho do motor.

A fabricação do sistema de escape foi realizada com base nas dimensões definidas na etapa de modelagem. Os tubos utilizados para a confecção do sistema foram adquiridos em medidas comerciais próximas às dimensões calculadas. Além disso, técnicas de metalurgia foram empregadas para fabricar e a unir todos os componentes. Medições foram realizadas após a confecção do sistema, evidenciando que o processo utilizado foi eficaz para o desenvolvimento do novo sistema de escape.

Os valores de potência e torque do motor foram avaliados por meio de um dinamômetro de rolos. As análises realizadas mostraram um leve aumento tanto na

potência quanto no torque com a implementação do sistema de escape fabricado, em comparação com o sistema anteriormente instalado. É importante destacar que essa melhoria foi alcançada sem efetuar qualquer modificação no sistema de injeção eletrônica. Além disso, vale mencionar que o sistema de escape inicial já apresentava menor restrição em comparação com o padrão de fábrica, e no motor estava instalado um sistema de injeção eletrônica programável no lugar de um original.

## REFERÊNCIAS

BELL, A. G. **Performance tuning in theory and practice**: four-strokes. Haynes Publishing Group, Somerset, 1980.

BOLDT, Thiago; SILVA, Adriano Willian da; LEAL, Cleverson de Souza. Uma análise físico-química dos catalisadores automotivos: estudo introdutório das propriedades e eficiência catalítica. **Revista técnico-científica**, SC, v. 2, n. 2, p. 6-10, out. 2013. Disponível em: <https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/view/1345>. Acesso em 02 abr. 2023

BLAIR, G. P. **Design and simulation of four-stroke engines**. Society of Automotive Engineers Inc, Warrendale, 1999.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2018.

Exemplo de dinamômetro de motor. Disponível em: <https://gtecnic.com.br/produto/dinamometro-p-teste-de-motores-a-combustao/>. Acesso em 30 abr. 2023.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2002.

GUPTA, Vasudev. Engine exhaust system development and optimization for FSAE vehicle. **International Journal of Scientific and Engineering Research**, v. 9, n. 10, p. 5-11, out. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/328631735\\_Engine\\_Exhaust\\_System\\_Development\\_Optimization\\_for\\_FSAE\\_Vehicle](https://www.researchgate.net/publication/328631735_Engine_Exhaust_System_Development_Optimization_for_FSAE_Vehicle). Acesso em 02 abr. 2023

Header 4-1-1. Disponível em: [https://bahnbrenner.com/vw\\_audi/products/446/TT\\_Race-Headers\\_MK1\\_8V\\_4\\_1\\_1\\_5\\_8](https://bahnbrenner.com/vw_audi/products/446/TT_Race-Headers_MK1_8V_4_1_1_5_8). Acesso em 02 abr. 2023.

Header 4-2-1. Disponível em:

<https://low-offset.com/workshop/4-2-1-headers-vs-4-1-headers/>. Acesso em 02 abr. 2023.

HEISLER, Heinz. **Advanced engine technology**, Warrendale, Pa: Sae International, 1995.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2003.

PIMENTEL, Gustavo Godoi. **Dimensionamento de um sistema de escape para motor de um protótipo de fórmula SAE**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2021.

PLANK, Melinda Rachel. **Engine optimisation and performance characteristics for a formula SAE race car**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - University of Southern Queensland, out. 2005.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo, RS: FEEVALE, 2013.

RICARDO, Lucas F. M. **Dimensionamento e otimização do sistema de escape de um motor de combustão interna de 600cc usando o software ricardo wave**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.

ROCHA, R. G. **Estudo de um método para projectar sistemas de escape de um motor de combustão interna a 4 tempos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Especialização em Engenharia Térmica) - Universidade do Porto, Portugal, jan. 2011.

Silenciador utilizado. Disponível em:

<https://escapamentos.tuper.com.br/produtos/silenciosos-universais/silencioso-11695>. Acesso em 04 nov. 2023

Sistema de escape padrão. Disponível em:

<http://blog.sigmacar.com.br/escapamento-esportivo-para-o-que-ele-serve/>. Acesso em 01 mai. 2023.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projeto e relatórios de pesquisa em administração**. 2. ed. São Paulo, SP: Atlas, 1998.

VITTO, Josué. **Dimensionamento e avaliação de um sistema de escapamento de motor de combustão interna ciclo-otto**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS, 2020.

VOLKSWAGEN DO BRASIL LTDA. **Manual de instruções Gol**. 1. ed. 1997.

Disponível em:

<https://www.manualdocarro.com.br/1998-volkswagen-gol-manual-do-proprietario/>.

Acesso em 28 ago. 2023