

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DEBORA KARLA MIKULSKI

SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UMA MOTOCICLETA DE COMPETIÇÃO

**CASCAVEL - PR
2020**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

DEBORA KARLA MIKULSKI

SISTEMA DE EXAUSTÃO DE UMA MOTOCICLETA DE COMPETIÇÃO

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Sergio Henrique Rodrigues Mota

**CASCAVEL - PR
2020**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceber consciência, discernimento, perseverança e saúde para realizar não apenas o sonho desta graduação como também todos os outros.

Aos meus pais, irmã e avós por me apoiarem e incentivarem desde o princípio sem medir esforços para tornar esta graduação possível.

A todos os professores que me transmitiram conhecimento, especialmente ao meu orientador, mestre e professor Sergio Henrique Mota Rodrigues, por toda dedicação e contribuição na elaboração deste trabalho.

Aos colegas de turma por toda a parceria nos grupos de estudo, e a todos os amigos pelo apoio e compreensão nos momentos em que a graduação se tornou minha prioridade.

RESUMO

O assunto proposto para o referido trabalho é o sistema de exaustão de motocicletas de competição. O tema aborda a análise do sistema de exaustão para motocicletas de competição de alta performance com motor monocilíndrico do tipo 4 tempos. O objetivo foi analisar o funcionamento e dimensionamento do sistema de escape, calcular e produzir um sistema baseado nas fórmulas pesquisadas, buscando atingir o aumento de potência no motor. A metodologia utilizada consistiu em coletar informações suficientes para a realização dos cálculos apropriados para o dimensionamento do escape, calcular e produzir o mesmo, realizando testes com a motocicleta para analisar a eficiência do projeto. Foi buscado, com o presente trabalho, atingir a precisão dos cálculos de dimensionamento, resultando na produção de um escapamento em que se obtém um aumento de desempenho do motor em comparação com o sistema de escape original. Por fim, os testes realizados comprovaram o aumento de potência da motocicleta com o escapamento desenvolvido e os objetivos foram plenamente atendidos.

Palavras-chave: Sistema de exaustão. Escapamento. Motocicleta de competição.

ABSTRACT

The subject proposed for this work is the exhaust system for competition motorcycles. The theme addresses the analysis of the exhaust system for high performance competition motorcycles with a single-stroke 4-stroke engine. The objective was to analyze the functioning and dimensioning of the exhaust system, calculate and produce a system based on the researched formulas, seeking to achieve an increase in engine power. The methodology used consisted of collecting sufficient information to carry out the appropriate calculations for dimensioning the exhaust, calculating and producing the same, carrying out tests with the motorcycle to analyze the efficiency of the project. It was sought, with the present work, to reach the precision of the dimensioning calculations, resulting in the production of an exhaust in which an increase in engine performance is obtained in comparison with the original exhaust system. Finally, the tests carried out proved the increase in motorcycle power with the exhaust developed and the objectives were fully met.

Keywords: Exhaust system. Exhaust. Competition motorcycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Componentes de um motor monocilíndrico a 4 tempos.	16
Figura 02 - Os quartos tempos do motor alternativo.....	17
Figura 03 – Sistema de escape para motor monocilíndrico.....	20
Figura 04: Sobreposição das Válvulas.	22
Figura 05: Comportamento da onda de pressão em um duto de escape com extremidade aberta.	25
Figura 07: Gráfico diâmetro do tubo principal.....	38
Figura 07: Modelo computacional do sistema de escape.....	41
Figura 08: Modelo computacional do sistema de escape com tubo principal dividido.....	42
Figura 09: Encaixe do tubo principal.	43
Figura 10: Detalhes do tubo principal.	43
Figura 11: Parte anterior do tubo principal do escape.....	44
Figura 12: Parte posterior do tubo principal do escape.....	44
Figura 13: Cone invertido.	45
Figura 14: Megafone completo.	46
Figura 15: Sistema de escape completo.	47

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01: Comprimento do tubo principal segundo Bell.....	28
Equação 02: Comprimento do tubo principal convertido para S.I.....	28
Equação 03: Conversão de RPM para RPS	30
Equação 04: Tempo para uma volta completa do motor.....	30
Equação 05: Diâmetro do tubo principal segundo Bell.....	31
Equação 06: Diâmetro do tubo principal convertido para S.I.....	31
Equação 07: Vazão mássica.....	33
Equação 08: Vazão volumétrica.....	33
Equação 09: Comprimento do megafone segundo Bell.....	34
Equação 10: Comprimento do megafone com constante definida.....	34
Equação 11: Volume do cilindro.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Resposta do motor com mudança na geometria.	27
Tabela 02: Comprimento do tubo principal de escape em milímetros.	29
Tabela 03: Diâmetro interior do tubo principal de escape em centímetros.	32
Tabela 04: Especificações dos ângulos de funcionamento das válvulas.	36
Tabela 05: Comprimento do tubo principal.	36
Tabela 06: Diâmetro do tubo principal.	38
Tabela 07: Comprimento do megafone.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.3.1 Caracterização	13
1.3.2 Delimitação da pesquisa	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	15
2.1.1 Componentes de um motor	15
2.1.2 Funcionamento de um motor ciclo Otto do tipo quatro tempos	17
2.2 PREPARAÇÃO DE MOTOR PARA MOTOCICLETAS DE COMPETIÇÃO	18
2.3 SISTEMA DE EXAUSTÃO	19
2.3.1 Componentes do sistema de exaustão	20
2.3.2 Funcionamento do sistema de exaustão	21
2.3.3 Sobreposição das válvulas	22
2.4 CARACTERÍSTICA DOS GASES	23
2.4.1 Propagação das ondas	24
2.4.2 Aproveitamento das ondas	26
2.4.3 Minimização da perda de carga	26
2.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXAUSTÃO	27
2.4.1 Equações para o comprimento do tubo principal	28
2.4.2 Equações para o diâmetro do tubo principal	31
2.4.3 Dimensionamento do megafone	33
3. METODOLOGIA	35
3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ESCAPE	35
3.2 MODELAMENTO E FABRICAÇÃO	40
3.2.1 Materiais e métodos de fabricação	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
REFERÊNCIAS	50
ANEXOS	53
ANEXO 01: FICHA TÉCNICA COMANDO TWB Nº1 CRF 230	53
ANEXO 02: REGULAMENTO CAMPEONATO BRASILEIRO DE MOTOCROSS - CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE MOTOCICLISMO	54

ANEXO 03: RESULTADO DO ENSAIO DINAMOMÉTRICO – DINAMÔMETRO DE ROLO SERVITEC.....	55
--	----

1. INTRODUÇÃO

O referido trabalho traz como tema a análise do sistema de exaustão em motocicletas de competições de alta performance, o objetivo foi analisar as fórmulas de dimensionamento para a produção de um escapamento, enfatizando o aumento de potência do motor.

Segundo Scaravonatto (2018), a preparação e a alteração do motor de uma motocicleta de competição são muito diferentes do que a de uma motocicleta usada na estrada. Para as pistas, dependendo da modalidade, o objetivo principal é a melhor performance da motocicleta dentro de um determinado trajeto. Assim, é buscada a máxima extração de desempenho do motor e o conjunto do mesmo é estudado e projetado como um todo.

Em um motor, a função do escapamento, segundo Passos (2015), é retirar os gases de combustão do sistema da forma mais eficiente possível. Um sistema de exaustão bem dimensionado reflete, significativamente, no desempenho do motor, pois se o comprimento e o diâmetro do escapamento forem ajustados para aproveitar as características de escoamento dos gases, há ganhos significativos de eficiência volumétrica.

As pesquisas bibliográficas realizadas na presente pesquisa serviram como base para possibilitar a compreensão dos cálculos do dimensionamento de um sistema de exaustão. Com as informações adquiridas, buscamos analisar as fórmulas aplicáveis para o melhor desenvolvimento do motor.

Por meio das análises, foram calculadas as dimensões dos componentes do escapamento e produzido um novo sistema de escape com o objetivo de aumentar a potência efetiva da motocicleta em comparação com o sistema de escape original. Para a conferência do estudo foram realizados testes dinamométricos, os quais resultaram em gráficos que possibilitam a observação dos resultados.

Este estudo foi aplicado em uma motocicleta de competição com motor monocilíndrico do tipo 4 tempos. A presente pesquisa traz um tema que, apesar de muito importante para o desempenho dos motores, foi menosprezado durante muito tempo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o dimensionamento dos tubos de escapamento de uma motocicleta de competição com motor monocilíndrico do tipo 4 tempos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Buscar as relações para o dimensionamento de um sistema de escape;
- Estimar as dimensões do sistema de escape para o propósito de aumento de potência efetiva;
- Compilar os resultados numéricos do estudo;
- Fabricar o sistema de escape de acordo com as dimensões calculadas;
- Realizar testes dinamométricos para avaliar a eficácia do projeto.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como citado, nas competições de alta performance, é buscado o melhor desempenho do motor por meio de sua preparação. Apesar de existirem alguns tipos de corrida e de categorias que permitem apenas motores originais, a grande maioria é adepta a melhorias dentro de determinadas especificações, este é o caso das categorias de motos nacionais em corridas que seguem o regulamento da Confederação Brasileira de Motociclismo (Anexo 03).

Esse fato coloca à frente aqueles que alcançam um rendimento maior das motocicletas, sendo que cada pequeno ganho de desempenho já é o suficiente para se obter vantagens. Assim, segundo Scaravonatto (2018), em uma motocicleta de competição, as adaptações e melhorias dos motores são efetuadas nos seus diversos sistemas.

As motocicletas utilizadas em competições possuem motores de combustão interna, do tipo quatro tempos e dois tempos, sendo o primeiro o mais utilizado. O funcionamento deste motor, denominado ciclo Otto, se baseia em quatro etapas: admissão, compressão, expansão e exaustão.

O quarto tempo descrito como exaustão também é chamado de sistema de escape, o qual, de acordo com Reiss (2015), tem como função tratar e conduzir os gases de combustão

para fora do motor da maneira mais eficiente possível. Nos campeonatos *off roads*, nas categorias em que a alteração do motor não é permitida, a melhoria do sistema de escape é bastante explorada como um meio de aumentar o desempenho da motocicleta.

De acordo com Passos (2015), um escapamento bem dimensionado reflete significativamente no desempenho do motor, trazendo um aumento de potência efetiva. Embora este seja um item alterado com alta frequência, seu dimensionamento não é tão simples. As equações para definição das dimensões de um escape não são encontradas facilmente, o que faz com que equipes e competidores recorram, muitas vezes, a opções de sistema de escapamento importado.

Esta pesquisa propõe analisar as equações de dimensionamento de um sistema de escape focando no propósito de aumento de potência. Cientificamente, este estudo será de grande contribuição para os competidores e preparadores de motos, pois apesar da relevância do tema, há uma baixa quantidade de pesquisas e bibliografias que tratam do assunto.

1.3.1 Caracterização

Esta pesquisa propõe analisar as fórmulas e geometrias apropriadas para o dimensionamento de um sistema de exaustão voltado para alta performance, haja vista que, atualmente, existem poucos materiais tratando sobre determinado assunto. Assim, a presente pesquisa parte do seguinte questionamento: É possível dimensionar um sistema de exaustão para melhorar o desempenho de uma motocicleta de competição?

1.3.2 Delimitação da pesquisa

O trabalho desenvolvido é voltado para a análise do sistema de exaustão de motocicletas de competição com motor monocilíndrico do tipo 4 tempos. Este estudo foi aplicado em uma motocicleta nacional do modelo Crf 230f que possui um motor monocilíndrico e é amplamente utilizada em categorias *off road*.

A motocicleta foi preparada para competições de Velocross e Motocross, nas quais os circuitos requerem o maior desenvolvimento do motor em média e alta rotação. A geometria do escapamento foi desenvolvida com o objetivo específico de aumento de potência nessas circunstâncias.

A fabricação do escapamento se volta apenas ao aumento de potência, sem considerar o nível de emissão de gases e ruídos. Com isso, foram levantadas informações somente sobre os tubos coletores do escape, desconsiderando os filtros e abafadores.

Logo, a restrição deste trabalho se encontra na demanda de aplicação do escapamento. Os cálculos se limitam a motores monocilíndricos de ciclo Otto do tipo 4 tempos, não sendo aplicáveis a motores do tipo 2 tempos ou multicilíndricos. Além de ser embasada em uma motocicleta de competição, em que o objetivo é o ganho de potência em altas acelerações, no caso de um motor para o qual se deseja um aumento de desempenho em baixa e média aceleração, por exemplo, a geometria do escapamento desenvolvido pode não ser a mais apropriada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Um motor a combustão é uma máquina que tem como função transformar energia térmica em energia mecânica. Em um motor de combustão interna, o trabalho é ocasionado por processos realizados pela mistura de ar e combustível, denominada “fluido ativo”. Os processos sofridos pelo fluido são chamados de “tempo”, que se repetem periodicamente, completando ciclos (BRUNETTI, 2012).

Os motores de combustão interna são classificados de acordo com o seu ciclo de funcionamento que, Segundo Varella (2015), é o conjunto de transformações que ocorrem na massa gasosa no interior da câmara de combustão, desde sua admissão até o processo de exaustão. Os dois tipos são: ciclo Otto, do qual o combustível é a gasolina, e o ciclo Diesel, que funciona com óleo diesel.

Os motores ciclo Otto também são conhecidos como motores de ignição por centelha, por utilizarem a energia elétrica da vela de ignição para dar início à reação de combustão. São divididos em dois grupos: motores a quatro tempos e motores a dois tempos, sendo o primeiro amplamente mais utilizado.

2.1.1 Componentes de um motor

Um motor é formado por um conjunto de peças e partes que devem trabalhar em harmonia para o seu devido funcionamento. Segundo Tillmann (2013, apud MIALHE, 1980), os componentes são responsáveis por fornecerem condições favoráveis para que os processos de transformação de energia aconteçam de forma eficiente e contínua.

Os principais componentes de um motor de combustão interna se dividem em dois grupos: os componentes fixos, compostos pelo bloco do motor, cabeçote e o cárter; e os componentes móveis, compostos pela camisa, pistão, biela, árvore de manivela ou virabrequim, árvore de comando de válvulas, válvula de admissão, válvula de escape e diversos outros componentes menores, mas não menos importantes (TILLMANN 2013).

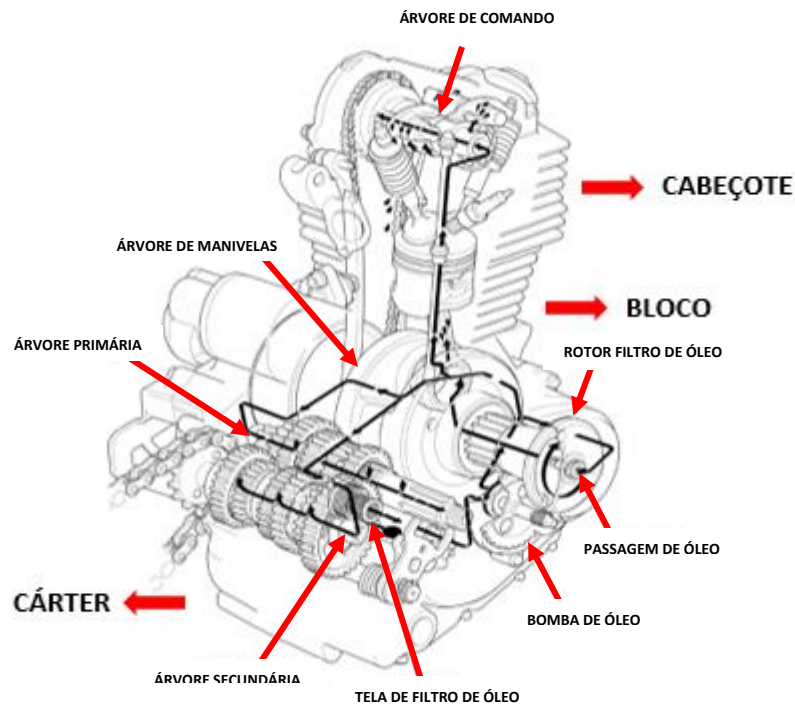


Figura 01: Componentes de um motor monocilíndrico a 4 tempos.

Figura: Diagrama do sistema de lubrificação – Manual CRF230f (HONDA).

- a) Bloco do motor: O bloco é o elemento estrutural do motor, nele estão contidos os cilindros de movimento do pistão e os tubos que formam suas paredes chamadas de “camisa”, além de dutos de lubrificação e outros componentes móveis.
- b) Cabeçote: O cabeçote é fixado na parte superior do bloco, acima do cilindro. Ele abriga o comando de válvulas, as válvulas e suas guias, bico injetor, vela de ignição e outros componentes.
- c) Cárter: O cárter é acoplado na parte inferior do bloco, e serve como um reservatório para o óleo de lubrificação do motor.
- d) Pistão: O pistão é o componente que recebe o movimento de expansão dos gases. São componentes que se movimentam dentro da camisa ou cilindros do bloco do motor.
- e) Biela: A biela é responsável pela ligação entre o pistão e o virabrequim. Ela transforma o movimento de subida e descida na câmara em movimento de rotação.
- f) Virabrequim: O virabrequim ou árvore de manivelas, é considerado o eixo do motor, o qual é instalado na parte inferior e possui mancais excêntricos que recebem movimento da biela.

g) Comando de válvulas: O comando de válvulas é um eixo com ressaltos excêntricos que tem a função de abrir as válvulas de admissão e escape, respectivamente, nos seus dimensionados tempos. Este é ligado ao virabrequim por meio de engrenagem, correia, ou no caso da motocicleta, por corrente.

h) Válvulas: Existem dois tipos de válvulas: de admissão e de escape. Elas são responsáveis pela entrada e saída dos gases resultantes da combustão dentro dos cilindros, e seus movimentos estão relacionados com a movimentação do pistão e o ponto de ignição, possibilitando o funcionamento do motor.

2.1.2 Funcionamento de um motor ciclo Otto do tipo quatro tempos

Segundo Brunetti (2012), nos motores a quatro tempos do tipo alternativo, os quatro cursos sofridos pelo movimento de vaivém de um pistão provocam, através da biela, duas voltas no eixo de manivela do motor, para que se complete um ciclo.

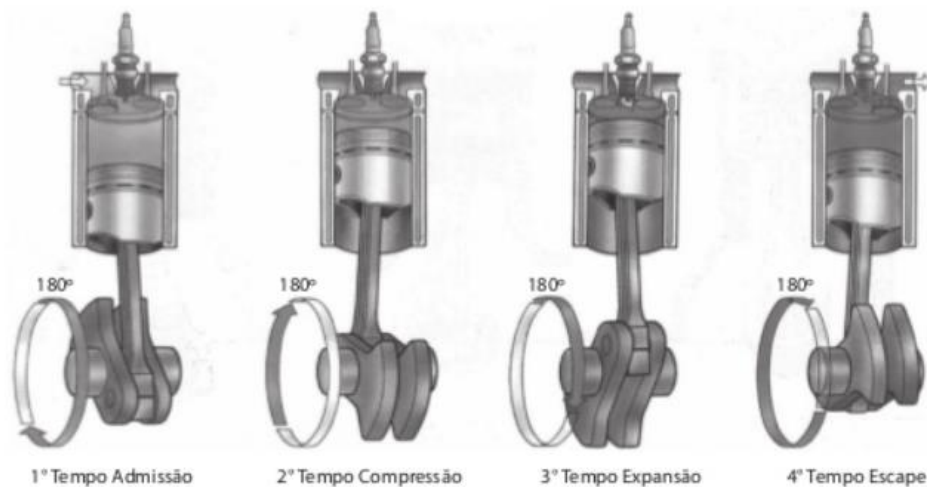


Figura 02 - Os quartos tempos do motor alternativo.

Fonte: Motores de combustão interna (BRUNETTI, 2012).

De acordo com Blair (1999), os quartos tempos ocorrem da seguinte maneira:

a) Admissão: Quando o ar é introduzido no cilindro e o pistão desloca-se do PMS (Ponto máximo superior) ao PMI (Ponto máximo inferior), aumentando o volume do cilindro do seu mínimo para o máximo. A válvula de admissão se abre no PMS e o cilindro se enche, idealmente, com uma massa de ar equivalente a um volume varrido à pressão e temperatura atmosféricas, e o combustível necessário para a futura combustão.

b) Compressão: Com as válvulas de admissão fechadas e o ar preso dentro do cilindro selado, este sofre um golpe de compressão quando o pistão se move do PMI para o PMS. O volume diminui de máximo para mínimo, a pressão e a temperatura sobem e o combustível evapora.

c) Expansão: Na conclusão do curso de compressão, a combustão ocorre a partir de uma faísca elétrica da vela de ignição. A pressão aumenta rapidamente para muitas dezenas de atmosferas, e a temperatura sobe para vários milhares de graus Celsius. Idealmente, tudo isso acontece no PMS instantaneamente. Conseqüentemente, o pistão desce empurrado pela diferença de pressão muito alta através dele, pelo lado superior e lado inferior. O volume do cilindro vai de PMS para PMI, gerando a expansão do fluido, que resulta no trabalho positivo do motor.

d) Escape: Com o pistão no PMI, a abertura da válvula de escape é acionada e o gás gerado pela expansão é expelido para fora do cilindro. O curso de exaustão ocorre quando o pistão se move do PMI para o PMS e o volume do cilindro diminui do máximo para o mínimo. Usando o corpo humano como uma analogia, o golpe de escape é um pouco semelhante aos pulmões cheios de ar quando abrimos a boca e permitimos que o ar saia dos pulmões, diminuindo o seu volume. Esse processo de exaustão é causado pela deflação de seus pulmões e pela saída de seu gás de escape pessoal, porque a atmosfera está em uma pressão mais baixa do que em seus pulmões.

2.2 PREPARAÇÃO DE MOTOR PARA MOTOCICLETAS DE COMPETIÇÃO

Segundo Routesafety (2015), a primeira motocicleta de que se tem relato foi criada por volta de 1885, utilizando motor do tipo ciclo Otto. A partir de então, as motocicletas passaram a se desenvolver, ganhando cada vez mais variedade em seus modelos e potências.

As competições automobilísticas começaram a ser praticadas na Europa, em suas várias categorias e modalidades, desde a criação da motocicleta. No Brasil, as competições surgiram por volta da década de 40, e por falta de pavimentação da época, muitas delas eram realizadas na terra, o que hoje é chamado de competição *off-road* (OLIVEIRA JUNIOR, *s.d.*).

A partir das competições *off-road* surgiu o motocross, que deu origem a várias outras modalidades de corrida em circuito com motocicletas. Essas corridas, nas quais o objetivo é completar o circuito em menor tempo possível, exigem motocicletas de alta performance.

Nesse tipo de competição, a potência dos motores reflete evidentemente na redução de tempo por voltas, com isso, o desempenho das motocicletas começou a ser explorado, dando início à arte da preparação.

A preparação de uma moto de competição consiste em alterar suas características originais, buscando o aumento do desempenho da motocicleta como um todo. Para que a preparação da moto funcione da melhor forma possível, é aconselhável que haja a alteração de todos os seus conjuntos, somando as melhorias realizadas no motor com os componentes externos (SCARAVONATTO, 2018).

Os motores regularmente utilizados em motocicletas de competição são os de combustão interna, e em sua grande maioria, do tipo quatro tempos, o que permite que sejam realizadas alterações em basicamente todos os seus ciclos.

São amplas as possibilidades de modificações para o aumento do desempenho de um motor de alta performance, como o aumento do diâmetro do pistão, a preparação do cabeçote, a alteração do comando de válvulas, as modificações nos sistemas de admissão e exaustão, polimentos para diminuição de atritos e outras transformações.

Entre os componentes que podem ser alterados para melhoria da performance, a alteração do sistema de exaustão pode ser considerada uma das modificações mais simples, por se tratar de um sistema externo, no qual no processo de modificação não se faz necessária a abertura do motor.

2.3 SISTEMA DE EXAUSTÃO

O sistema de escape é um dos principais componentes do motor, é ele quem garante o seu perfeito funcionamento, influenciando diretamente na eficiência do sistema. Sua função principal é eliminar os gases gerados pela queima da mistura ar-combustível gerada dentro do cilindro. Quando a válvula de escape se abre, resíduos de gás saem através do sistema de exaustão, fazendo com que o cilindro fique limpo e vazio. De acordo com Pereira (2017), se o escapamento for utilizado de forma que não fique obstruído, consegue balancear o nível de gasto de combustível, isto porque influencia diretamente a eficiência volumétrica do motor.

Segundo Bell (1981), como todas as outras áreas do motor de alto desempenho, o sistema de exaustão não pode ser considerado como uma entidade individual, ele é influenciado por todo o conjunto do motor e, por sua vez, afeta outras áreas, de modo que deve ser considerado como uma parte do todo.

De acordo com Rocha (2011), podem-se encontrar quatro funções de suma relevância no funcionamento do motor: a primeira é o direcionamento dos gases para fora do motor, a segunda é a suavização dos ruídos gerados, a terceira é a redução dos poluentes e a quarta é o aumento da massa de ar para dentro do cilindro.

2.3.1 Componentes do sistema de exaustão

O sistema de escape é composto por alguns componentes responsáveis por transportar as emissões devidamente filtradas para fora do veículo, de maneira menos nociva para o meio ambiente. O escape pode ser dividido em: coletor, catalisador e silenciador.

No caso de escapamentos para competições, segundo Reiss (2015), não há preocupações com os níveis de emissões e ruídos gerados, de igual modo, com o consumo de combustível. Logo, trabalhamos apenas com o dimensionamento do coletor de escape, desconsiderando os outros componentes.

O coletor de escapamento, por sua vez, é dividido em duas partes: tubos primários, que provêm do número de cilindros do motor, e tubo secundário, que se inicia após a junção de todos os primários. No caso do motor em estudo, que é da classe monocilíndrico, possuímos apenas um tubo principal, que segundo Bell (1981), é dividido da maneira ilustrada a seguir:

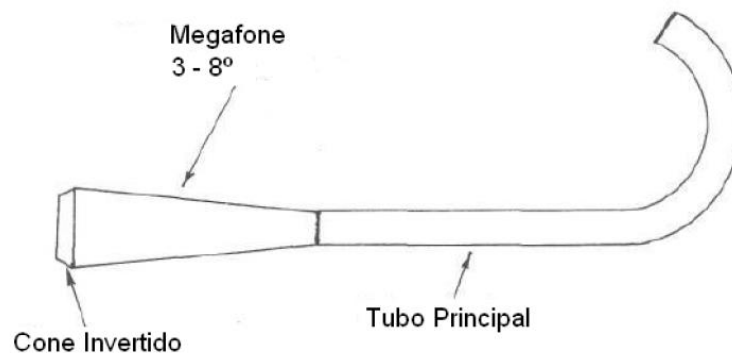


Figura 03 – Sistema de escape para motor monocilíndrico.

Fonte: Performance Tuning in Theory & Pratic (BELL, 1981).

O tubo principal se inicia logo na saída do cabeçote, e tem a função de direcionamento dos gases de exaustão. O megafone, conhecido como “ponteira de escape” está localizado junto ao tubo, com a função de se obter uma onda de pressão negativa mais forte no sistema (BELL, 1981).

A utilização deste sistema cria uma onda de sucção entre o tubo principal e o megafone, que controla a expansão do gás de escape, fazendo com que a perda de energia para a atmosfera seja diminuída. Desta maneira, segundo Bell (1981), temos um sistema mais eficiente do que se o tubo de escape terminasse diretamente na atmosfera.

2.3.2 Funcionamento do sistema de exaustão

Simplificando o funcionamento de um motor de combustão interna e seus estágios, podemos enxergar o motor como um eixo que recebe uma determinada força e provoca um movimento de rotação. Considerando que a potência é um torque aplicado a uma determinada rotação, e o torque é resultado da força gerada no processo de combustão, para se obter maior força devemos focar no aumento de energia liberada durante este processo (OLIVEIRA, 2014).

Um coletor de escapamento deve suprir a vazão dos coletores de admissão, de modo que consiga retirar os gases de combustão da maneira mais rápida possível do sistema. O diferencial de pressão criado no cabeçote é proporcional ao fluxo de massa que percorre o sistema. Assim, quando preparamos um cabeçote devemos levar em consideração que quanto mais alto for este diferencial de pressão, melhor será o rendimento do motor.

Após o processo de combustão, os gases estarão contidos dentro do cilindro em temperaturas e pressão bastante altas. Quando a válvula de escape se abre, um pulso supersônico percorre todo o duto de escapamento, arrastando consigo a massa de gases que tem velocidade muito menor, mas que ainda leva uma quantidade enorme de energia (PASSOS, 2015).

O que pretendemos é que os gases de escape sejam totalmente eliminados dos cilindros. Nos motores de corrida, o sistema de escape é ajustado de modo que as ondas de pressão geradas pelos gases de escape realmente "suguem" a carga do cilindro (BELL, 1981). Então, segundo Passos (2015), se ajustarmos o diâmetro e o comprimento do coletor, aproveitando essas características de escoamento, iremos obter significativos ganhos na eficiência volumétrica.

Para compreender o efeito de arraste que ocorre no escapamento, devemos analisar a lei da inércia. O princípio da sintonia de inércia que ocorre no escapamento é o de que os gases que estão sendo jogados para fora continuem com o movimento até mesmo depois que a válvula de escape for fechada, criando um vácuo parcial com uma ação de sucção resultante, também chamado de onda de pressão negativa (BELL, 1981).

Rocha (2011) explica que no curto momento em que as válvulas de escape não se fecharam por completo, e as válvulas de admissão estão começando a se abrir, o vácuo criado

no sistema de exaustão suga o fluido da câmara de combustão, tornando os ciclos mais rápidos. Portanto, precisamos aumentar a velocidade de saída dos gases para que esse vácuo aumente.

Porém, devemos nos atentar aos limites, pois grandes velocidades geram muita turbulência em qualquer fluxo, e isso cria uma resistência que é proporcional ao quadrado da velocidade de deslocamento. Por isso, com o aumento da resistência crescem também as perdas por bombeamento, pois o motor acaba gastando mais energia para conseguir expulsar os gases (ROCHA, 2009).

2.3.3 Sobreposição das válvulas

A sobreposição das válvulas, também chamada somente de *Overlap*, é algo bastante estudado na preparação de motores de alta performance. Trata-se do curto instante em que as válvulas de escape ainda não se fecharam por completo e as válvulas de admissão começam a abrir. Segundo Oliveira (2014), neste momento cria-se uma onda de pressão negativa no escapamento, que pode ser aproveitada para aumentar o diferencial de pressão entre o sistema de admissão e a câmara de combustão, contribuindo para a admissão mais rápida da mistura ar-combustível.

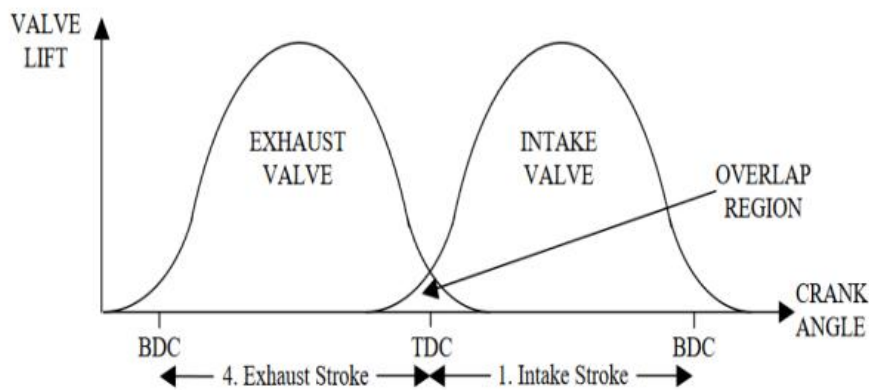


Figura 04: Sobreposição das Válvulas.

Fonte: Manueira (2016).

Manurera (2016) explica que quando as válvulas de exaustão e admissão estão abertas ao mesmo tempo, o limite de potência máxima do motor está aumentando, pois, como citado anteriormente, isso ajuda a câmara de combustão a encher mais rápido. Da mesma maneira que há parte da mistura entrando na câmara de combustão, existe a parte da mistura que é forçada

para fora, sem entregar um trabalho útil através da exaustão, essas circunstâncias provocam o aumento do consumo do motor, por isso, quando projetamos um motor para baixo consumo é ideal que o cruzamento das válvulas seja nulo.

Nos motores dimensionados para máxima potência, a sobreposição das válvulas é bastante benéfica, segundo Manurera (2016), as ondas de depressão alcançam a válvula de escape exatamente quando ela se abre novamente para a fase de exaustão do próximo ciclo, assim, o pistão tem que exercer menos força para remover os gases da mistura anterior, evitando sua reação com a nova mistura de combustível e aumentando a eficiência volumétrica, que é exatamente a relação entre o volume sugado para o cilindro e o volume varrido pelo pistão.

2.4 CARACTERÍSTICA DOS GASES

A abertura da válvula de escape coloca em contato dois ambientes com uma enorme diferença de pressão, a câmara de combustão, que contém os gases ainda em processo de expansão e o coletor de escapamento, que possui uma pressão próxima a do ambiente. De acordo com os artigos técnicos da *Gassatack* (s. d.), essa diferença bruta cria a onda de pressão que viaja pelo sistema de escape a uma velocidade superior à dos gases, colocando-os em movimento à medida que passa. A magnitude dessas ondas depende de como ocorre a abertura da válvula, em um comando de válvulas de alta performance em que a elevação das válvulas é rápida, a onda de pressão criada é bastante agressiva e nos permite tirar mais proveito dos seus efeitos.

De acordo com Bell (1981), a onda de pressão criada na exaustão se desloca na velocidade do som até a extremidade do tubo, à medida que sobem para a atmosfera as ondulações positivas acendem e produzem uma onda de pressão negativa, que provoca o efeito de sucção retornando ao longo do tubo de escape. A arte da sintonização do escape é determinar o comprimento e o diâmetro exatos dos tubos para que a onda de sucção retorne ao cilindro exatamente no período de sobreposição das válvulas.

Segundo Manurera (2016), no caso de motores 2 tempos o fenômeno de ressonância das ondas é muito importante, pois como não há válvulas que regulam a entrada e a saída de gases na câmara de combustão, são as ondas de pressão que regulam o volume de ar e, por isso, as mudanças de seção num escapamento para esses motores têm um impacto muito maior do que em um motor a 4 tempos. Embora sejam menos importantes, não significa que devem ser desconsiderados, como exemplo disso o autor cita as grandes equipes de corrida do Moto GP, que possuem motocicletas iguais com diferentes comprimentos, de acordo com as preferências

dos pilotos. Essa diferença demonstra a variação da característica das curvas de potência de uma motocicleta, que pode ser adaptada para mais ou menos potência em pontos específicos.

2.4.1 Propagação das ondas

Como explicado anteriormente, sempre que ocorre a fase de exaustão em um motor a quatro tempos, a onda de pressão criada viaja através do escapamento devido ao diferencial de pressão do sistema. O comportamento desta onda depende do que for enfrentado no final do tubo de escape, o artigo da *Gassatack* (s. d.) explica a propagação da onda nas diferentes possibilidades contidas em sistemas de exaustão:

- a) Uma extremidade parcialmente aberta: Dutos com divergências geométricas, como um bruto alargamento no diâmetro. Quanto maior é o aumento do diâmetro, maior é a reflexão da onda, que diminui sua densidade ao longo do tempo e se torna mais suave.
- b) Uma extremidade parcialmente fechada: Com uma diminuição bruta do diâmetro do escapamento o fenômeno de rarefação da onda ocorre na onda de depressão, diminuindo o efeito de sucção.
- c) Uma bifurcação ou garfo: Este é o caso da união de tubos em um sistema do tipo 2-1-2, por exemplo. Quando a onda chega à bifurcação, ela se divide, se a seção transversal for menor que a dos dois tubos, uma parte da onda retornará aos tubos iniciais, por conterem uma extremidade parcialmente aberta.
- d) Uma união: Em uma união a onda de pressão se comporta basicamente como em uma bifurcação, parte da onda segue o caminho até a saída do escapamento e outra parte volta ao cilindro como uma onda de depressão.
- e) Extremidade fechada: A onda de pressão bate na parede e retorna como outra onda de pressão com as mesmas características, este comportamento é semelhante a ondas de um lago. Este é o caso de ressonadores em motores dois tempos em que as câmaras são fechadas por válvulas eletrônicas.
- f) Extremidade aberta: Este é o caso que nos interessa, no qual a onda de pressão é refletida e retorna inteiramente ao sistema de escape como uma onda de depressão.

Para um sistema monocilíndrico, temos o comportamento da onda como descrito no último caso, em que a onda de pressão se transforma em uma onda de sucção, como representado na figura abaixo:

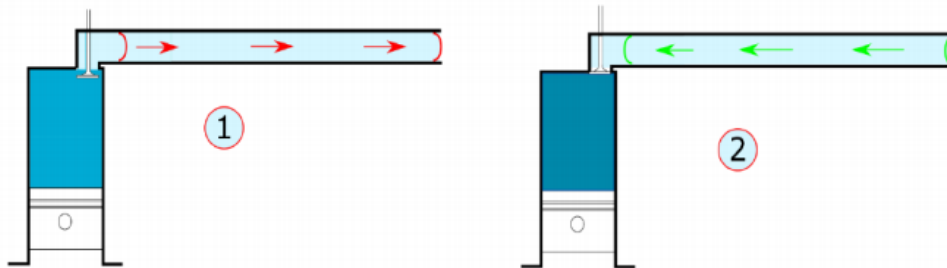


Figura 05: Comportamento da onda de pressão em um duto de escape com extremidade aberta.

Fonte: Manueira (2016).

Até o momento foi descrito o comportamento da onda de acordo com as situações encontradas no final do escapamento, porém é indispensável se atentar ao seu comportamento durante o seu retorno ao cilindro. O ideal é que a onda de depressão retorne no momento de sobreposição das válvulas, contribuindo para a limpeza dos cilindros e possibilitando que seja introduzida uma maior quantidade de mistura do fluido ativo, aumentando a eficiência do motor. Porém, este fato só ocorre em regimes específicos determinados no dimensionamento do sistema de exaustão, se isso não for definido, nós estaremos nos beneficiando do comportamento das ondas.

De acordo com a *Gassatack* (s. d.), se a onda de depressão retornar no momento em que as válvulas estiverem fechadas, ela se comportará como uma extremidade fechada e viajará novamente em direção à saída do escapamento. Por outro lado, se a onda retornar no momento em que a válvula de escape estiver totalmente aberta, os gases de exaustão terão mais dificuldade para sair, e neste regime a motocicleta permanecerá “presa”, como se não houvesse combustível. Este comportamento reflete em uma inflexão na curva de torque, diminuindo drasticamente a potência do motor.

Conhecer o comportamento da onda é o ponto inicial no dimensionamento de um sistema de exaustão, tendo este domínio, o sistema pode ser otimizado para o aumento do pico de potência em uma faixa de rotação determinada.

2.4.2 Aproveitamento das ondas

Tendo definido que o momento perfeito para que ocorra o retorno da onda de pressão é durante o *Overlap*, para se obter o melhor aproveitamento da propagação da onda, Oliveira (2016) diz que devemos nos atentar a três coisas: a velocidade da onda, o espaço que ela percorre e o tempo necessário para percorrer este espaço.

Ainda segundo Oliveira (2016), embora a velocidade da onda seja constante e alguns autores utilizem apenas a velocidade do som para a sua definição, ela é algo difícil de se mensurar, pois depende de diferentes variáveis. O comprimento é equivalente ao tempo, que aqui é o alvo proveniente da rotação pré-determinada que define o período de sobreposição das válvulas. A partir deste, é possível definir o comprimento do tubo para que a onda retorne ao cilindro no momento exato.

Variando o comprimento do escapamento pode-se dimensioná-lo para o aumento de desempenho em qualquer faixa de rotação, porém, é mais eficaz fazê-lo em altas rotações, em que as ondas de pressão são maiores e aumenta o risco de se comportarem de maneira conturbada (GASSATACK, s. d.).

Manurera (2016) diz que se deve atentar ao diâmetro, pois do ponto de vista dinâmico do fluido, uma seção transversal maior causará uma diminuição na velocidade, reduzindo a pressão e suavizando as ondas de pressão e depressão, assim desperdiçando o efeito benéfico de ressonância da onda.

2.4.3 Minimização da perda de carga

A minimização da perda de carga no dimensionamento de um sistema de exaustão consiste em diminuir os atritos que podem prejudicar a fluidez dos gases nos tubos do coletor. Segundo Manurera (2016), embora este objetivo seja simples de se explicar, não é simples de se alcançar. Este ponto busca maximizar o fluxo de massa, minimizando quaisquer restrições de fluxo que possam ocorrer no sistema.

Se o comportamento dos fluidos for analisado em um local de variação de pressão em qualquer ponto do coletor, será encontrada uma mistura de ondas que viajam em várias direções, provenientes do cilindro ou dos adjacentes, ou refletidas em cada uma delas. Em circunstâncias de regime máximo, fica evidente que se deve evacuar o quanto antes os gases de exaustão do cilindro, portanto é importante facilitar a fluidez dos gases no escapamento, fazendo o que for

possível para suavizar as curvas e as mudanças de seções. Para isso, é necessário não só de um duto com diâmetro suficiente para evacuar os gases de maneira eficaz, mas também minimizar as singularidades, como cotovelos, alargamentos, estreitamentos e outras dificuldades que possam prejudicar o fluxo do gás (GASSATAACK, s. d.).

2.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE EXAUSTÃO

Bell (1981) enfatiza que o sistema de exaustão não pode ser considerado como uma entidade individual, pois é um sistema que é afetado e afeta as outras áreas do motor como um todo. Como já citado, a sua função é eliminar os gases do cilindro da forma mais eficiente possível, e em motores de alta performance o sistema de escape é sintonizado de modo que as ondas de pressão possam ajudar nesta limpeza.

O princípio da sintonia da inércia é que o peso dos gases de exaustão faça com que eles continuem em movimento até mesmo depois que as válvulas de escape tiverem se fechado, e o vácuo criado neste instante resulte nas ondas de sucção que podem ser usadas de maneira a contribuir para a limpeza dos cilindros. À medida que a velocidade do motor aumenta, o tempo disponível para a exaustão efetiva do cilindro diminui, daí a necessidade de usar essa ação para esvaziar o cilindro mais rapidamente.

O comprimento e diâmetro dos tubos de escape devem ser determinados de acordo com essa sintonia acústica. Considerando que a velocidade dos gases de exaustão é em torno de 60 a 90 metros por segundo, e que as ondas de pressão criadas no processo de exaustão se movimentam a uma velocidade em torno de 457 a 518 metros por segundo, o ponto em que queremos chegar é o dimensionamento dos tubos de escape para que a onda de sucção retorne ao cilindro durante o período de sobreposição das válvulas, para que a evacuação ocorra com maior eficiência (BELL, 1981).

De acordo com Martins (2019 apud MAVRIGIAN, 2014), o dimensionamento do duto primário de escape é o que tem maior influência sobre a eficiência do motor. O autor apresenta uma tabela com as características da geometria do escapamento e o resumo da resposta prevista no motor:

Tabela 01: Resposta do motor com mudança na geometria.

Característica do duto primário	
Diâmetro muito pequeno	Pode criar uma contrapressão excessiva
Diâmetro muito grande	Pode melhorar o pico de potência, mas o torque em baixa rotação e a potência média são reduzidos

Curtos	Adequados para maior faixa de RPM
Longos	Adequados para menor faixa de RPM
Longos com diâmetro pequeno	Maior torque em baixas RPM
Curto com diâmetro grande	Maior torque e potência em RPM mais altas

Fonte: MARTINS (2019, p. 18 apud MAVRIGIAN, 2014).

2.4.1 Equações para o comprimento do tubo principal

De acordo com Bell (1981), o comprimento do tubo principal do escape é o primeiro parâmetro a ser calculado em qualquer tipo de sistema, as equações propostas pelo autor são bastante simples e facilitadas baseadas em seus ensaios.

Para o comprimento do tubo principal em motores monocilíndricos, temos a Equação 1:

$$L = \frac{850 (Ave + 180)}{N} - 3 [in] \quad (01)$$

Onde:

L: comprimento do tubo principal

N: velocidade do motor em rotações por minuto

AVE: grau de abertura da válvula de escape antes do ponto morto inferior.

O autor não descreve a procedência dos valores constantes utilizados na equação, e todas as suas equações foram criadas de maneira empírica. As equações apresentadas por Bell (1981) estão no sistema inglês, assim, devemos converter os valores de polegadas para milímetros, que se apresenta no aspecto abaixo (02).

$$L = \frac{21590 (Ave + 180)}{N} - 76,2 [mm] \quad (02)$$

A rotação deve ser definida por meio das especificações do motor, e para o cálculo devemos selecionar a velocidade da qual buscamos aumentar o desempenho. O ângulo de abertura da válvula de escape antes do ponto morto inferior pode ser medido no motor, porém, se tivermos as especificações do comando de válvulas, este valor estará presente em seu

catálogo de especificações, e isto facilitará bastante. Segundo Bell (1981), se for necessário, o tubo de escape pode ser duas ou três vezes maior que este comprimento, desde que seja mantido, efetivamente, um valor múltiplo do calculado. Este ajuste se faz necessário em veículos em que o escapamento dimensionado não se enquadra na região disponível para o mesmo.

Por meio das equações propostas por Bell é possível observar que o comprimento do tubo é inversamente proporcional ao aumento da rotação do motor, em outras palavras, quanto mais alta for a rotação da qual buscamos aumentar o desempenho, menor será o comprimento do escapamento. Segundo Rocha (2011), o movimento das válvulas de admissão e escape está relacionado diretamente com a velocidade do motor, quanto maior esta for, menor será o tempo em que as válvulas permanecerão abertas. O autor transformou para o sistema internacional uma tabela disposta por Bell, na qual podemos observar os resultados em milímetros do comprimento do escapamento, de acordo com suas equações, variando a velocidade de rotação do motor e o grau de abertura da válvula de escape.

Tabela 02: Comprimento do tubo principal de escape em milímetros.

N [RPM]	°APMI								
	50	55	60	65	70	75	80	85	90
2000	2406,7	2460,6	2514,6	2568,6	2622,6	2676,5	2730,5	2784,5	2838,5
2500	1910,1	1953,3	1996,4	2039,6	2082,8	2126,0	2169,2	2212,3	2255,5
3000	1579,0	1615,0	1651,0	1687,0	1723,0	1759,0	1794,9	1830,9	1866,9
3500	1342,6	1373,4	1404,3	1435,1	1465,9	1496,8	1527,6	1558,5	1589,3
4000	1165,2	1192,2	1219,2	1246,2	1273,2	1300,2	1327,2	1354,1	1381,1
4500	1027,3	1051,3	1075,3	1099,3	1123,2	1147,2	1171,2	1195,2	1219,2
5000	916,9	938,5	960,1	981,7	1003,3	1024,9	1046,5	1068,1	1089,7
5500	826,7	846,3	865,9	885,5	905,2	924,8	944,4	964,0	983,7
6000	751,4	769,4	787,4	805,4	823,4	841,4	859,4	877,4	895,4
6500	687,8	704,4	721,0	737,6	754,2	770,8	787,4	804,0	820,6
7000	633,2	648,6	664,0	679,5	694,9	710,3	725,7	741,1	756,6
7500	585,9	600,3	614,7	629,1	643,5	657,9	672,3	686,6	701,0
8000	544,5	558,0	571,5	585,0	598,5	612,0	625,5	639,0	652,5

Fonte: ROCHA (2011, p. 10 apud BELL, 1981).

Bell (1981) diz que mudar o comprimento dos tubos tende a balançar a curva de potência do motor em torno do torque máximo. Um comprimento maior dos tubos aumentaria a faixa de baixa velocidade do motor aumentando os picos de potência em média rotação e, conseqüentemente, os diminuindo em alta rotação. Com os tubos principais mais curtos conseguimos um aumento de potência em altas rotações e uma redução na faixa intermediária.

Rocha (2011) fez algumas analogias sobre as equações de Bell, buscando esclarecer o resultado das variáveis calculadas.

Primeiramente o autor considerou um regime de 5000RPM apenas como forma de demonstração, transformando pra rotações por segundo, temos a Equação 3:

$$N = \frac{5000 \text{ RPM}}{60} = 83,33 \text{ RPS} \quad (03)$$

Sabendo que uma volta é equivalente a 360° e tendo a velocidade em rotações por segundo, conseguimos obter o tempo de uma rotação completa do motor (Equação 4):

$$t_{360} = \frac{1}{83,33 \text{ RPS}} = 0,012 \text{ s} \quad (04)$$

Tendo o tempo estimado de uma volta do motor, Rocha (2011) analisa o tempo que a onda de pressão tem para percorrer o seu caminho, que se inicia no cilindro e se movimenta até o final dos dutos de escapamento, chegando à atmosfera e retornando novamente. Para isso, o autor adotou 200° APMI como uma média de valor de deslocamento desde a abertura da válvula de escape até a sua sobreposição com a válvula de admissão.

$$t_{200} = \frac{200 \times 0,012}{360} = 6,67 \text{ ms}$$

Para obter comparações, o autor também calculou um possível regime com o mesmo valor de rotação do motor, porém com uma abertura de válvula de 40° APMI.

$$t_{40} = \frac{40 \times 0,012}{360} = 1,33 \text{ ms}$$

De acordo com Rocha (2011), com estes resultados, podemos observar que a velocidade do motor não é a única variável que influencia substancialmente o tempo que a onda possui

para realizar seu caminho, pois o ângulo de abertura das válvulas também interfere imensamente nos resultados. Assim, quanto mais cedo a válvula de escape se abrir, maior deverá ser o comprimento adequado dos dutos de escape, pois o tempo decorrente para o período de sobreposição das válvulas aumentará, e este está diretamente ligado com tempo de percurso das ondas.

Desta maneira, temos uma representação mais esclarecida dos resultados que mostram que uma variação de velocidade e mudança de comando de válvulas podem interferir no dimensionamento do comprimento do escapamento.

2.4.2 Equações para o diâmetro do tubo principal

Tendo o comprimento do tubo principal definido, pode-se trabalhar nas equações de dimensionamento do seu diâmetro, ainda de acordo com Bell (1981), que o relaciona com o comprimento total e a cilindrada do motor. Novamente o autor não descreve a procedência de suas equações, que de forma empírica se apresenta da seguinte maneira (5):

$$Di = \sqrt{\frac{cc}{(L + 3) \cdot 25}} \cdot 2,1 [in] \quad (05)$$

Onde:

Di: diâmetro interno do tubo principal

cc: cilindrada do motor em cm^3

L: comprimento do tubo principal em polegadas.

Convertendo a equação do sistema inglês para o sistema internacional para possuímos o resultado do diâmetro em milímetros, temos a seguinte equação (6):

$$Di = \sqrt{\frac{cc}{(0,98425 \cdot L) + 75}} \cdot 53,34 [mm] \quad (06)$$

Visto que o diâmetro interno do tubo principal depende do seu comprimento, por consequência também terá variações de acordo com a velocidade do motor e o ângulo de movimentação das válvulas. Bell (1981) diz que motores para veículos de passeio geralmente funcionam suficientemente bem com os tubos de escape, possuindo o mesmo diâmetro de saída do cabeçote, entretanto os motores de corrida exigem mais exatidão para obter melhor desempenho.

Segundo Bell (1981), o diâmetro pode ser ajustado de acordo com o pico de torque desejado, geralmente uma redução de 0,125 polegadas no diâmetro principal move o pico de torque em cerca de 500 a 600 RPM em motores maiores, e 650 a 800 RPM em motores menores que duas mil cilindradas.

Para melhor observação, novamente Rocha (2011) disponibiliza uma tabela com resultados de diâmetros baseados nas equações de Bell, em que o autor varia as rotações e apresenta os valores para diferentes cilindradas de motores monocilíndricos.

Tabela 03: Diâmetro interior do tubo principal de escape em centímetros.

N	L @ 70° APMI	cc [cm ³]		
		125	250	500
2000	2622,6	11,6	16,4	23,1
2500	2082,8	12,9	18,3	25,9
3000	1723,0	14,2	20,0	28,3
3500	1465,9	15,3	21,6	30,6
4000	1273,2	16,4	23,1	32,7
4500	1123,2	17,4	24,5	34,7
5000	1003,3	18,3	25,9	36,6
5500	905,2	19,2	27,1	38,4
6000	823,4	20,0	28,3	40,1
6500	754,2	20,9	29,5	41,7
7000	694,9	21,6	30,6	43,3
7500	643,5	22,4	31,7	44,8
8000	598,5	23,1	32,7	46,3

Fonte: ROCHA (2011).

Rocha (2011) explica que o diâmetro do tubo principal de escape deve ser capaz de expelir todos os gases de combustão no período em que a válvula de escape está aberta, consequentemente, quanto maior for a cilindrada do motor, maior será a massa que deve ser retirada. O autor apresenta alguns conceitos básicos de vazão para analisarmos as equações.

Sendo a vazão mássica a multiplicação de peso específico e vazão volumétrica (7):

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V} \quad (07)$$

E vazão volumétrica ser o resultado de área multiplicada pela velocidade (8):

$$\dot{V} = v \times A \quad (08)$$

Ao obtermos um maior fluxo de massa considerando a mesma velocidade, é necessário aumentar a área da seção transversal, portanto quanto maior for a cilindrada ou volume do motor, maior deverá ser o diâmetro para suprir a vazão.

Outro fato que podemos observar é que quanto maior é a velocidade do motor, o diâmetro também aumentará, pois como já explicado anteriormente, com o aumento da velocidade o tempo de movimentação das válvulas diminui. Desta maneira, quanto maior a velocidade do motor, menor é o tempo decorrente para retirar os gases de exaustão de dentro do cilindro, sendo necessário aumentar a vazão mássica, que está diretamente ligada ao aumento do diâmetro do tubo de escape (ROCHA, 2011).

De acordo com Bell (1981), apesar de – em teoria – parecer simples de se obter o dimensionamento exato do escapamento, existem diversas variáveis presentes em um motor que podem inibir os resultados esperados por meio dos cálculos, como particularidades do cabeçote, variações do comando, coletores de admissão entre outras. Certamente os resultados obtidos por meio das equações de definição do diâmetro interno terão que ser adequados aos diâmetros de tubos comercialmente disponíveis.

2.4.3 Dimensionamento do megafone

Bell (1981) esclarece que o megafone ou ponteira é responsável por controlar a expansão dos gases de escape e criar um pulso negativo mais forte no escapamento. Este pulso aumenta as ondas de sucção e diminui a perda de energia do sistema.

Nos escapamentos de motocicletas, normalmente a ponteira de escape também é responsável por alocar o silenciador e o catalisador, porém como desconsideramos estes em sistemas no caso de motores de competição, serão analisadas as equações de dimensionamento levando em conta apenas o aproveitamento da onda de depressão.

Para o comprimento do megafone, Bell (1981) apresenta a equação abaixo (9), na qual relaciona o diâmetro do coletor ou tubo de escape com o diâmetro da ponteira, que a mesma propõe de forma empírica que deve ser entre 3.1/2” e 4”.

$$Lm = \frac{Dim - Di}{2} \times Cot A \quad (09)$$

Na presente equação, temos o comprimento do megafone representado por Lm , Di como o diâmetro do tubo principal e Dim como o diâmetro do megafone, todos em milímetros. Se faz presente também, a variável $Cot A$, que se refere à cotangente do ângulo de inclinação. Tal inclinação não é utilizada em motores a quatro tempos e, Bell (1981) não descreve exatamente qual o valor a ser utilizado neste caso, entretanto o autor menciona que em seus testes realizados em motores dois tempos ele obteve o ângulo de 8° como o melhor retorno na onda de pressão. Deste modo, é utilizado o valor da cotangente de 8° como uma constante na equação, que se apresenta da maneira abaixo (10):

$$Lm = \frac{Dim - Di}{2} \times 7,115 \quad (10)$$

De acordo com Bell (1981), para restabelecer o máximo possível de potência é necessário encaixar um “cone invertido” na saída do megafone. Este, por sua vez, supre a potência em seu pico, e beneficia o aumento de potência em médias rotações. Novamente de forma empírica, o autor propõe que este cone deve ter um comprimento entre 1.1/4” e 1.3/4”, e um diâmetro de saída 3/4” a 1” menor que o diâmetro do megafone.

Deste modo, temos o dimensionamento do megafone baseado exclusivamente na experiência e testes realizados por Bell (1981).

3. METODOLOGIA

As revisões da literatura têm a característica de analisar e sintetizar as informações disponibilizadas por diversos estudos relevantes publicados sobre um determinado tema, de forma a resumir o corpo de conhecimento existente e levar a concluir sobre o assunto de interesse (COOPER & HEDGES, 1994).

O propósito deste trabalho foi trazer uma pesquisa bibliográfica integralmente suficiente para ser usada como base de informações para o dimensionamento de um sistema de exaustão de uma motocicleta de competição com motor monocilíndrico do tipo 4 tempos.

As informações coletadas em livros e artigos científicos aqui citadas, apresentam explicações de diversos autores dispostas de uma forma acessível. Foi buscado encontrar parâmetros e equações para o dimensionamento de um sistema de exaustão que aumentasse o desempenho de um motor de competição de alta performance.

Com as equações definidas, foram estimados os valores de diâmetro e comprimento do tubo de escape e dimensões do megafone que melhor se adaptassem às necessidades de um motor com desempenho em altas rotações.

Os resultados numéricos foram representados por meio de tabelas e gráficos que podem retratar, de forma direta e explícita, as variações entre os sistemas de escape que podem ser definidos para o motor em estudo.

Após realizar os cálculos e comparações, foi executada a fabricação do escapamento de acordo com as dimensões definidas. Com o escapamento pronto, foram realizados dois ensaios dinamométricos em um equipamento de rolo, nos quais foi possível visualizar o resultado do dimensionamento.

3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ESCAPE

Para iniciar os cálculos de dimensionamento do coletor baseado nas equações de Bell (1981) deve-se buscar as variáveis aplicáveis nas equações. A equação para o comprimento do tubo principal requer o valor da abertura da válvula de escape em graus antes do ponto morto inferior, este valor pode ser buscado nos dados do fabricante de comando, ou ser medido diretamente no motor. Certamente, conhecer o modelo do comando para buscar o valor diretamente em catálogo facilitará bastante o trabalho.

Desta maneira, de acordo com o catálogo do fabricante *TWB comando CRF230 estágio I*, tem-se as informações abaixo, em que o valor apresentado para o grau de abertura da válvula de escape é de 55,5° antes do ponto morto inferior.

Tabela 04: Especificações dos ângulos de funcionamento das válvulas.

	Admissão	Escape
Abertura	22,5 °APMS	55,5 °APMI
Fechamento	59 °DPMI	22 °DPMS

Fonte: Ficha comando CRF230 estágio I – TWB.

Por se tratar de uma motocicleta de competição para circuitos, como citado anteriormente, o objetivo foi o aumento de desempenho do motor em médias e altas rotações. Com isso, foi analisada a faixa de rotação do motor que possui um valor máximo de 10000 RPM, e definido o dimensionamento para a faixa de 8000 RPM, em que a potência está próxima do seu pico.

Aplicando os valores definidos na equação proposta por Bell para o comprimento do tubo principal do escapamento, temos os resultados abaixo:

Tabela 05: Comprimento do tubo principal.

COMPRIMENTO TUBO PRÍNCIPAL		
Ave (°APMI)	RPM Motor	Comprimento (mm)
55,5	5000	940,69
55,5	5500	848,24
55,5	6000	771,21
55,5	6500	706,02
55,5	7000	650,15
55,5	7500	601,73
55,5	8000	559,36
55,5	8500	521,97
55,5	9000	488,74

Fonte: Autor (2020).

Como citado anteriormente, é possível observar que quanto maior a rotação especificada, menor deverá ser o comprimento do tubo de escape para um aumento de

desempenho. Com isso, foi realizado o gráfico abaixo, que apresenta possíveis resultados para a mesma motocicleta, variando apenas a rotação.

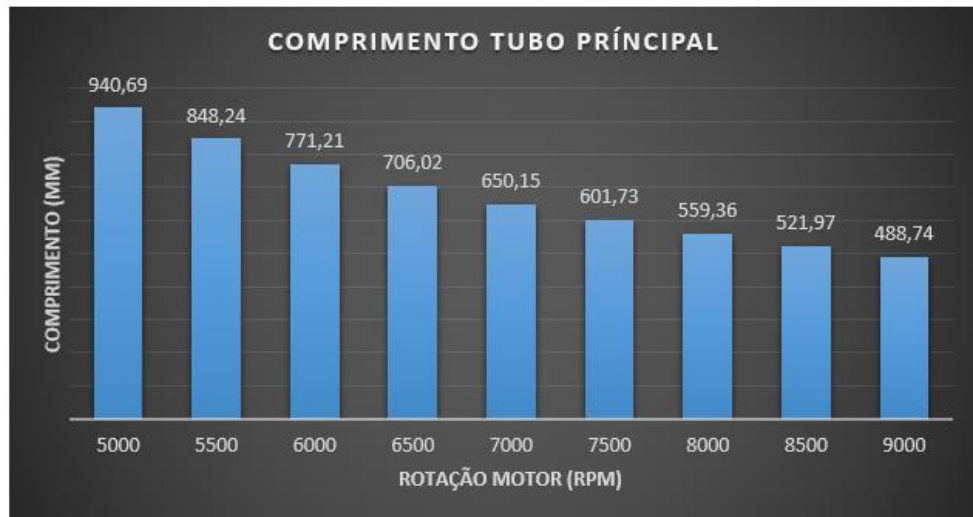


Figura 06: Gráfico comprimento do tubo principal.

Fonte: Autor (2020).

Definido o comprimento do tubo principal, pode-se partir para a definição do diâmetro interno, que pelas equações de Bell (1981), se dá em função do comprimento calculado e a cilindrada do motor em cm^3 .

A motocicleta em estudo segue as especificações do regulamento da Confederação Brasileira de Motociclismo (Anexo 03) na categoria nacional, em que as dimensões do cilindro são limitadas. O pistão possui 66,5mm de diâmetro, e o comprimento do curso é de 66,2mm. Com estes dados, podemos calcular a cilindrada real do motor por meio da seguinte equação (11):

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (11)$$

$$V = \frac{\pi \cdot 6,65^2}{4} \cdot 6,62 = 229,92 \text{ cm}^3$$

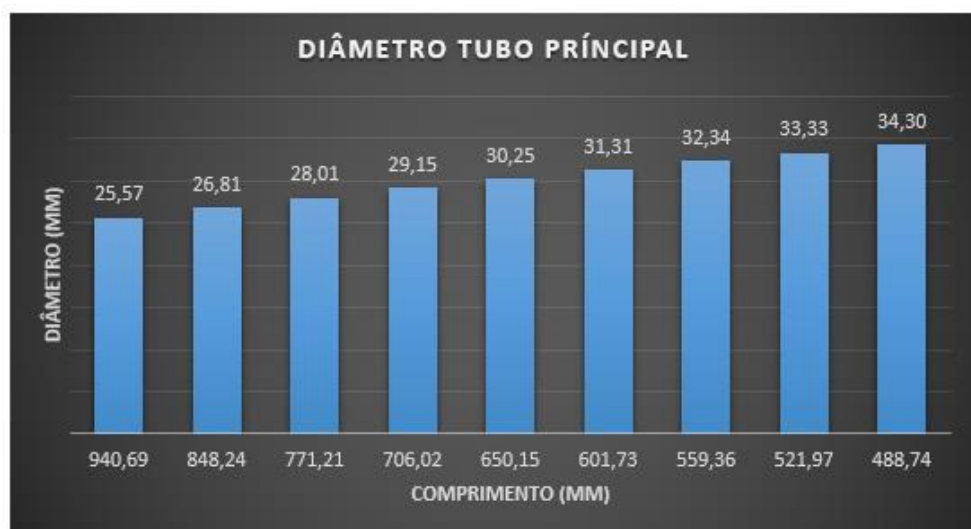
Tendo a cilindrada real do motor e os possíveis comprimentos para o tubo de escape, o seguinte passo é aplicar os valores na equação de dimensionamento do diâmetro do tubo principal proposta por Bell (1981), que apresenta os resultados abaixo:

Tabela 06: Diâmetro do tubo principal.

DIÂMETRO TUBO PRÍNCIPAL		
CC (cm ³)	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
229,92	940,69	25,57
229,92	848,24	26,81
229,92	771,21	28,01
229,92	706,02	29,15
229,92	650,15	30,25
229,92	601,73	31,31
229,92	559,36	32,34
229,92	521,97	33,33
229,92	488,74	34,30

Fonte: Autor (2020).

Aqui, novamente é possível observar as variações do resultado do diâmetro em função do comprimento, decorrente da rotação especificada para o motor. O gráfico a seguir demonstra os possíveis diâmetros de escape para o mesmo motor, variando o comprimento.

**Figura 07:** Gráfico diâmetro do tubo principal.

Fonte: Autor (2020).

Com o comprimento de 559,36mm definido através da rotação de 8000RPM, tem-se o resultado do diâmetro de 32,34mm. Entretanto, de acordo com Bell (1981), é necessário, ao final dos cálculos, avaliar os diâmetros comerciais de tubos e adotar o valor mais aproximado.

A partir da definição do diâmetro do tubo principal é calculado o comprimento do megafone, novamente baseado nas equações de Bell (1981). O comprimento do megafone provém do diâmetro do tubo e do diâmetro do próprio megafone, do qual Bell diz que deve ser entre 3.1/2” e 4”. Por possuir pouco espaço para a ponteira do escapamento na estrutura da motocicleta, optamos pelo diâmetro de 3.1/2”, que em milímetros resulta em 88,9mm.

Tabela 07: Comprimento do megafone.

COMPRIMENTO DO MEGAFONE		
Diametro Principal (mm)	Diametro Megafone (mm)	Comprimento Megafone (mm)
25,57	88,90	225,31
26,81	88,90	220,87
28,01	88,90	216,63
29,15	88,90	212,56
30,25	88,90	208,65
31,31	88,90	204,87
32,34	88,90	201,22
33,33	88,90	197,68
34,30	88,90	194,24

Fonte: Autor (2020).

Por meio das equações de dimensionamento do megafone foi definido o diâmetro externo de 88,9mm e comprimento de 201,22mm. Novamente é importante salientar que por se tratar de uma motocicleta de competição, o dimensionamento do megafone tem como foco apenas o comportamento das ondas de pressão, desconsiderando os sistemas de silenciadores e catalisadores, que normalmente em uma motocicleta de estrada devem ser dimensionados como parte do megafone.

Para se obter o dimensionamento completo do megafone é necessário definir as dimensões do cone invertido. Neste passo, existem apenas valores empíricos propostos por Bell (1981) e foram definidas as medidas que melhor se encaixaram na motocicleta. O autor propõe

que o comprimento do cone invertido deve ser entre 31,75mm e 44,45mm e que o diâmetro da saída deve ser entre 19,05mm a 25,4mm menor que o diâmetro do megafone.

Desta maneira, sem ter mais informações sobre as consequências da variação das dimensões do cone invertido, foram definidos os valores dos quais fosse obtido um encaixe mais harmônico visualmente no megafone, dentro da faixa de dimensões proposta por Bell. O comprimento definido foi de 38,10mm como uma média dos valores apresentados, e o diâmetro da saída estabelecido foi de 63,50mm, o menor dentro dos propostos, apenas por questão de *design*.

Tendo todos os valores do sistema de escape definidos, é importante se atentar a dois pontos: o primeiro é diâmetro comercial dos tubos, adaptar os diâmetros calculados ao mais próximo possível, e o segundo passo é verificar o espaço onde será acoplado o escapamento e se as dimensões definidas serão coerentes com o mesmo.

O diâmetro calculado para o tubo principal foi de 32,34mm, o tubo comercial com valor mais próximo é o de 1.1/4" que em milímetros possui 31,75mm de diâmetro interno. As dimensões do megafone já foram todas pré-definidas em polegadas, assim não terão necessidade de ser adaptadas.

Para o comprimento do tubo principal de 559,36mm, obtido através dos cálculos para a rotação definida de 8000RPM, temos uma barreira, as medidas da estrutura da motocicleta requerem um tubo de escape de no mínimo 1000mm. Por consequência, tivemos que utilizar outro método citado por Bell (1981), que diz que ao final dos cálculos o comprimento do tubo principal pode ser efetivamente o dobro ou triplo do valor calculado.

3.2 MODELAMENTO E FABRICAÇÃO

O objetivo deste trabalho foi encontrar um método simples para o dimensionamento de um sistema de escape para uma motocicleta de competição. Tendo o aumento de desempenho do motor como ponto principal deste estudo, foi compreendido que a melhor maneira de desenvolver um sistema de escape para alta performance é aumentando a eficiência volumétrica do motor por meio do dimensionamento do escapamento, embasado no escoamento dos gases e diminuição das perdas de cargas. Portanto, a fabricação do escape foi desenvolvida com base nestes pontos.

Os tubos de um sistema de escape precisam ser curvados para se encaixarem no motor, assim, tendo as medidas do conjunto definidas é importante planejar a maneira de realizar as

conformações dos tubos, para que as curvaturas e possíveis restrições ocorram da maneira mais suave possível com foco na minimização da perda de carga. Diante disto, é necessário avaliar a geometria do escapamento considerando o meio em que o sistema será instalado anteriormente à sua fabricação.

O desenvolvimento de um projeto ou esboço do sistema de escape é essencial para viabilizar o seu processo de fabricação. Nesta etapa, foi optado pela criação de um modelo computacional para facilitar a definição das geometrias. O *software* utilizado foi o SolidWorks que se trata de um programa computacional gráfico com tecnologia CAD (*Computer Aided Design*), que permite a criação de objetos com modelagem 3D em uma variedade de possibilidades.

O modelo foi desenvolvido através das dimensões definidas para o escapamento e as medidas do quadro estrutural e motor da motocicleta, de maneira que se encaixasse da melhor forma, evitando curvas muito bruscas.

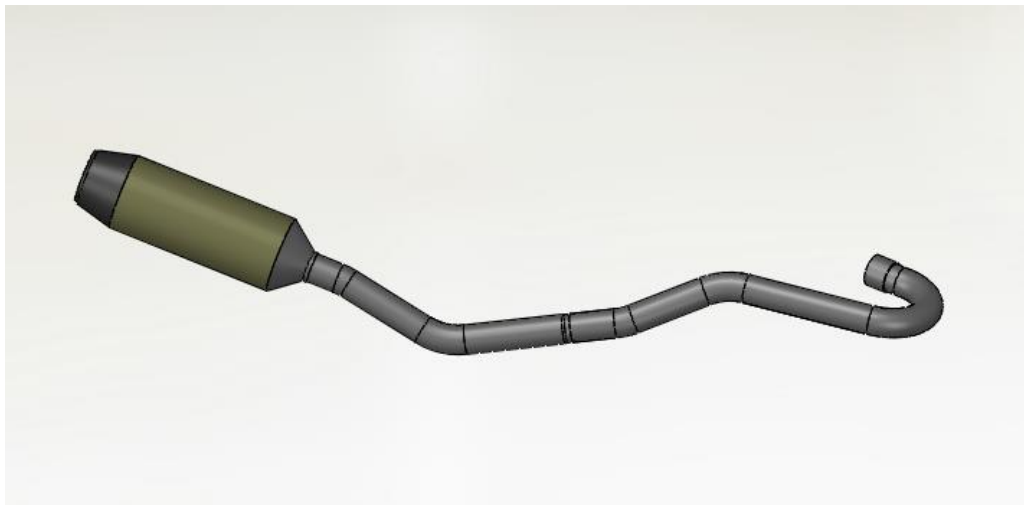


Figura 07: Modelo computacional do sistema de escape.

Fonte: Autor (2020).

Diante das características do quadro estrutural da motocicleta, foi necessário dividir o tubo principal em duas partes, pois não seria possível integrar um sistema de escape completo na motocicleta. Neste caso, a divisão foi estabelecida em uma parte onde é possível anexar suportes para fixar o sistema na estrutura da motocicleta.

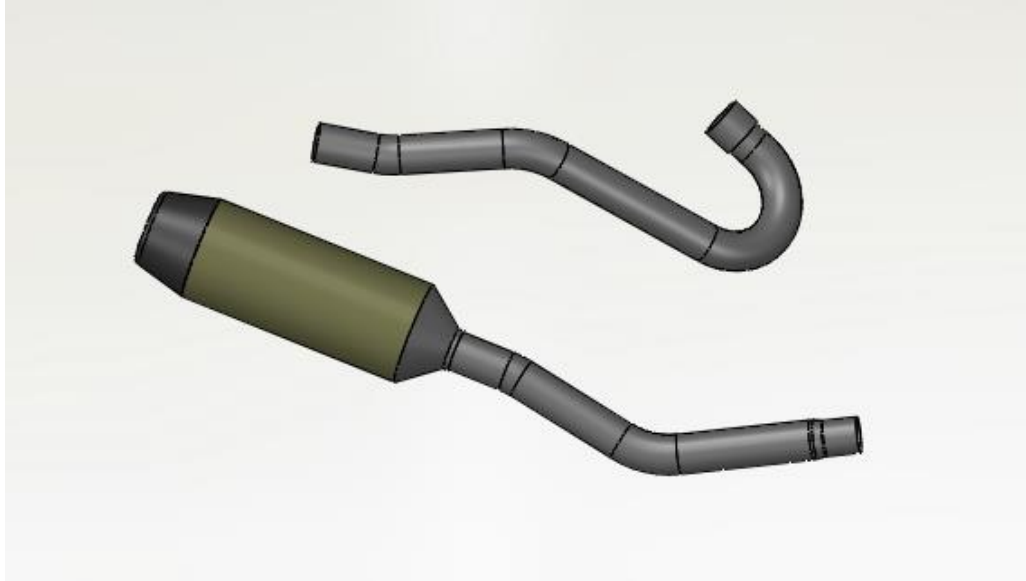


Figura 08: Modelo computacional do sistema de escape com tubo principal dividido.

Fonte: Autor (2020).

3.2.1 Materiais e métodos de fabricação

Tendo a definição das dimensões e geometrias do sistema de escape, deve-se definir os materiais e métodos de fabricação, estes serão distintos para cada parte do sistema.

Para o tubo do coletor, de acordo com Passos (2015), o aço inoxidável é o material com melhor custo benefício por possuir um baixo nível de oxidação, porém a alta concentração de carbono do aço inoxidável comum (AISI 304) o fragiliza quando submetido a altas temperaturas. Então, para um sistema de escape em que as temperaturas são elevadas é recomendável utilizar tubos de liga AISI 304L que contêm uma concentração de carbono mais baixa do que no aço inox comum.

O tubo principal foi dividido em duas partes, conforme o projetado. Os encaixes e suportes foram soldados, lixados e polidos com atenção para que não houvesse caroços de solda ou quaisquer outras restrições que influenciassem o escoamento dos gases.



Figura 09: Encaixe do tubo principal.

Fonte: Autor (2020).

A curvatura inicial do tubo, que fica na saída do motor, foi adquirida de acordo com as dimensões especificadas. Por se tratar de uma curva brusca, conformar um tubo inicialmente reto neste grau em uma conformadora de tubos comum causaria deformações na seção transversal do perfil, que poderia influenciar negativamente o escoamento dos gases.



Figura 10: Detalhes do tubo principal.

Fonte: Autor (2020).

As demais partes do tubo principal foram curvadas em uma conformadora de tubos manual e unidas por soldagem.



Figura 11: Parte anterior do tubo principal do escape.

Fonte: Autor (2020).



Figura 12: Parte posterior do tubo principal do escape.

Fonte: Autor (2020).

No megafone, a carcaça foi produzida em alumínio escovado de acordo com as dimensões definidas. O cone invertido foi adquirido comercialmente com medidas mais próximas possíveis das calculadas.



Figura 13: Cone invertido.

Fonte: Autor (2020).

Conforme mencionado anteriormente, os componentes presentes no interior do megafone não serão abordados neste estudo, por se tratar de um sistema de escape utilizado em uma motocicleta de competição em que o sistema é dimensionado levando em conta apenas o aumento de desempenho do motor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Encontrado o valor de abertura da válvula de escape de $55,5^\circ$ APMI para o motor de $229,92\text{cm}^3$, com velocidade estabelecida em 8000 RPM, por meio das equações propostas por Bell (1981) foram obtidos os seguintes resultados:

Comprimento do tubo principal = $559,36 \times 2 = 1118,72\text{mm}$

Diâmetro do tubo principal = $31,75\text{mm}$ ou $1.1/4''$

Comprimento do megafone = $195,50\text{mm}$

Diâmetro do megafone = $88,9\text{mm}$ ou $3.1/2''$

Comprimento do cone invertido = $38,10\text{mm}$ ou $1.1/2''$

Diâmetro do cone invertido = $63,50\text{mm}$ ou $2.1/2''$

Desse modo, foi realizada a produção do escapamento de acordo com a necessidade de aplicação, que se trata do aumento de desempenho em médias e altas rotações. O sistema de escape resultou em componente com *design* demasiadamente agradável, que basta ser unido e montado na motocicleta.



Figura 14: Megafone completo.

Fonte: Autor (2020).



Figura 15: Sistema de escape completo.

Fonte: Autor (2020).

Após realizar o dimensionamento e fabricação do escape de acordo com as análises realizadas sobre o funcionamento do sistema de exaustão e as variáveis que o influenciam, foi realizado um teste de desempenho da motocicleta.

Foi elaborado um ensaio dinamométrico em um equipamento de rolo, que mede a potência efetiva e torque da motocicleta e gera gráficos nos quais é possível observar os resultados numéricos.

O sistema de escape dimensionado foi montado na motocicleta conduzida ao ensaio realizado no dinamômetro, em seguida aguardamos alguns minutos como procedimento padrão para o resfriamento do motor. Posteriormente, o sistema de escape original da motocicleta foi montado e submetido a mais um teste, com isso foram obtidos os resultados a seguir, que podem ser visualizados no Anexo 03.

a) Motocicleta com escapamento dimensionado:

Potência: 17,12cv

Torque: 1,77 Kgf.m

b) Motocicleta com escapamento original:

Potência: 16,43cv

Torque: 1,74 Kgf.m

A princípio, o ganho de 0,69cv de potência não parece tão significativo, porém, se a potência total da motocicleta, que é relativamente baixa, for analisada, o aumento da potência

efetiva resulta em 4,19%. Este aumento de desempenho é bastante satisfatório em um motor em que a única alteração foi o sistema de escape.

Observando o resultado gráfico do teste, também é possível visualizar que a potência da motocicleta com o escapamento dimensionado permaneceu bastante próxima à potência da motocicleta com o escapamento original em baixas rotações. Entretanto, acima de 6000 RPM o aumento de desempenho ocorreu de forma progressiva, atendendo aos objetivos do trabalho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O princípio deste trabalho foi analisar o funcionamento e as equações de dimensionamento de um sistema de exaustão de uma motocicleta de competição com foco no aumento de potência. Apesar de existirem poucos autores que retratam sobre este assunto, o resultado geral da pesquisa foi satisfatório.

Ainda que as equações de dimensionamento tenham sido baseadas apenas em um autor, foi possível compilar diversos estudos teóricos que resultaram em uma explicação íntegra sobre o funcionamento de um sistema de exaustão e os componentes e variáveis que o influenciam, bem como a sua própria influência e funcionalidade em um motor.

Pode-se dizer que os objetivos foram plenamente atendidos, pois além de realizar o dimensionamento completo do sistema de escape, analisando os possíveis resultados e obtendo êxito na produção do escapamento, o resultado do teste de desempenho comprovou o aumento de potência efetiva da motocicleta.

Por conseguinte, este estudo se tornou de grande contribuição científica para os preparadores de motocicletas de competição, que poderão utilizar esta pesquisa como uma base para realizar o dimensionamento de um sistema de escape para motores monocilíndricos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à complexidade da pesquisa, foi preciso delimitar o estudo a um modelo específico de motor a 4 tempos monocilíndrico. Neste caso, fica como sugestão para trabalhos futuros o estudo do comportamento de um sistema de exaustão para motocicletas com motor multicilíndrico ou até motores do tipo 2 tempos.

Outra análise que pode ser realizada, é do comportamento das propriedades térmicas com ênfase na transferência de calor e estudo dos possíveis materiais a serem utilizados no sistema de escape, visto que a seleção dos materiais para fabricação foi baseada apenas em citações empíricas.

Fica sugerida também, uma pesquisa sobre as características dos componentes utilizados em sistemas silenciadores e abafadores, pois não foi encontrado nenhum estudo científico sobre tal.

Em conclusão, existem diversas análises que podem ser feitas em um sistema de exaustão, considerando o comportamento dos fluidos, as propriedades termodinâmicas e a transferência de calor e massa, o que o torna um componente atrativo de ser estudado do ponto de vista da engenharia.

REFERÊNCIAS

- BELL, A. Grahan. **Performance Tuning in Theory & Pratic Four Strokes**. Haynes Publishing Group, [S.l.] 1981.
- BLAIR, Gordon P. **Design and Simulation of Four-Stroke Engines**. Edição ilustrada. Warrendale, Pa. EUA: Society of Automotive Engineers, 1999.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. Volume 1. Blucher, 2012.
- CANAL DA PEÇA. **Escapamento Otto**. [S.l.] 2014. Disponível em: <https://www.canaldapeca.com.br/blog/escapamento-otto/>. Acesso em 31 de mar. de 2019 às 10h 00min.
- COOPER, H.; HEDGES, L.V. The Handbook of Research Synthesis. New York: Russell Sage Foundation, 1994. In: MANCINI, M.C.; SAMPAIO, R. F. **Quando o objeto de estudo é a literatura: estudos de revisão**. Rev. bras. fisioter. vol.10 no.4 São Carlos Oct./Dec. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-35552006000400001. Acesso em 19 de maio de 2019 às 08h 20min.
- PERISCÓPIO. **Escapamento esportivo para motos: como escolher**. [S.l.] 2017. Disponível em: <http://jornalperiscopio.com.br/site/escapamento-esportivo-para-motos-como-escolher/>. Acesso em 11 maio de 2019 às 09h 00min.
- SCARAVONATTO, Fabio. **Preparação de motores: qual sua essência?** [S.l.] 2018. Disponível em: <https://ntrmoto.com.br/blog/preparacao-de-motores-qual-sua-essencia/>. Acesso em 11 de maio de 2019 às 09h 20min.
- ROUTESAFETY. **A primeira motocicleta**. [S.n.: S.l.] 2015. Disponível em: <http://routesafety.blogspot.com/2015/01/a-primeira-motocicleta.html>. Acesso em 11 de maio de 2019 às 10h 40min.
- TUDOMOTO. **Tudo o que você precisa saber sobre escapamentos**. [S.n.: S.l., s.d.] Disponível em: <https://tudomoto.com/moto/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-escapamentos/>. Acesso em 12 de maio de 2018 às 08h 20min.
- OLIVEIRA, Guilherme. **Project Cars #05: Uma pequena aula sobre cálculo de coletores e sistema de escape**. [S.n.: S.l.] 2014. Disponível em: <https://www.flatout.com.br/project-cars-05-uma-pequena-aula-sobre-calculos-de-coletores-e-sistemas-de-escape/>. Acesso em 29 de março de 2020 às 16h 40min.
- OLIVEIRA JUNIOR, Domingos Ramos de. **História do início do motocross mundial**. [S.n.: S.l., s.d.]. Disponível em: <http://www.motooffroad.com.br/noticias/468-historia-do-inicio-do-motocross-mundial>. Acesso em 12 de maio de 2019 às 08h 20min.
- PASSOS, Rodrigo. **Sistemas de escapes: coletores, dutos e emissões**. [S.l.] 2015. Disponível em: <https://www.flatout.com.br/sistemas-de-escape-coletores-dutos-e-emissoes-parte-1/>. Acesso em 07 de abr. de 2019 às 08h 00 min.

REISS, Jason. **Tech: Five Tips On Building A Set Of Bad-Ass Race Headers.** [S.l.] 2015. Disponível em: <http://www.dragzine.com/news/tech-five-tips-on-building-a-set-of-bad-ass-race-headers/>. Acesso em 06 de abr. de 2019 às 17h 00min.

ROCHA, Rodrigo Gomes. **Estudo de um método para projectar sistemas de escape de um motor de combustão interna a 4 tempos** - 2011. 79 folhas. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Portugal, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60412/1/000147136.pdf>. Acesso em 07 de abr. de 2019 às 10h 00 min.

TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas.** [S.l.] 2013. Disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf. Acesso em 8 de fev. de 2019 às 10h 00min.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Princípios de Funcionamento dos Motores de Combustão Interna.** Seropédica – RJ, 2013. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/principios_de_funcionamento.pdf. Acesso em 7 de fev. de 2019 às 16h 00min.

GASSATAACK, **El Sistema de escape,** [S.n.: S.l., s.d.]. Disponível em: <http://www.gassattack.com/articulos%20tecnicos/escapes.pdf> Acesso em 30 de mar. de 2020 às 00h 00min.

MANUNERA, José Cabrera. **Diseño del sistema de escape de un motor de combustión de 4 tiempos para la competición MotoStudent.** Universidad de Sevilla Sevilla, 2016.

PEREIRA, Douglas Elias Borges, **Influencia do Sistema de Escape.** Universidade de Rio Verde, 2017.

ANEXOS

ANEXO 01: FICHA TÉCNICA COMANDO TWB Nº1 CRF 230

COMANDO CRF 230 TWB Nº 01

Marca do veículo	HONDA
Modelo	CRF230
Ano	TODOS
Código do comando TWB	TWB 001

ITEM	ADMISSÃO	ESCAPE
Folga Válvulas (mm)	0,10	0,10
Levante (mm)	9,79	9,71
Permanência em 1,00 mm	270,5	266
Permanência em 1,27 mm	261,5 Graus	257,5 Graus
Lobe Center	97 Graus DPMS	96 GRAUS APMS
Abertura	22,5 Graus APMS	55,5 Graus APMI
Fechamento	59 Graus DPPI	22 Graus DPMS
Necessidade de uso de molas especiais	Sim	Sim
Comp. instalação mola externa (mm)		
Límite RPM máximo recomendável	10500 RPM	10500 RPM
Límite RPM máximo de segurança	11000 RPM	11000 RPM

**ANEXO 02: REGULAMENTO CAMPEONATO BRASILEIRO DE MOTOCROSS –
CONFEDERAÇÃO BRASILEIRA DE MOTOCICLISMO.**

Nacional - As motos deverão preservar as características e aparência externa originais do modelo do fabricante, com motos homologadas de fabricação nacional com até **230cc** e **250cc** e de venda ao público, Não serão admitidos kits de aumento de cilindrada, Não é permitido uso de peças especiais ou importadas, somente originais do modelo da categoria; carburador, suspensão e freios são permitidos apenas os itens originais, trabalhados dentro da categoria, também os aros de rodas deverão permanecer nos diâmetros originais. Para a categoria **230cc**, a medida máxima para o pistão é de **66,5** de diâmetro e **66,2** de curso do mesmo e na **TTR230** a medida máxima é de **71,0** de diâmetro e **58,0** de curso do mesmo. Permitido alterar: acelerador, guidão, manetes, mesas, pedaleiras, cdi, relação e escape, A fórmula para cálculo de capacidade cúbica (cc) é: $(D \times D \times C \times \text{PI} \div 4)$ onde: D = diâmetro do pistão / C = curso do pistão / PI = 3.1416. Parágrafo único: Para as classes com limite de cilindrada a tolerância é 2%.

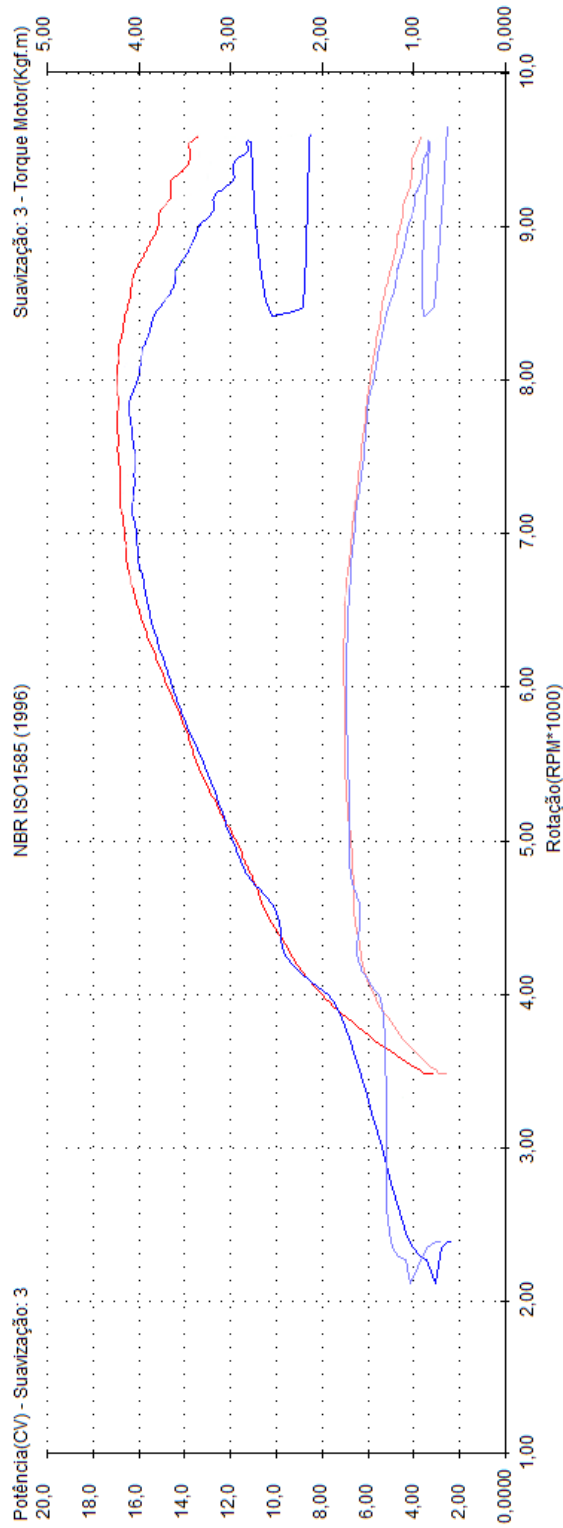


www.cbm.esp.br

Confederação Brasileira de Motociclismo – CNPJ 47.459.185/0001-60
Rua Eduardo Santos Pereira, 1755, Vila Célia – Campo Grande/MS – CEP: 79.020-170
(67) 3306-0969



ANEXO 03: RESULTADO DO ENSAIO DINAMÔMETRICO – DINAMÔMETRO DE ROLO SERVITEC.



■ ARQUIVO : CRF230 Douglas Dogster_005.cor
 DATA CRIAÇÃO : 08/05/2020 - 08:24:18
 CORREÇÃO (1,12) : NBR ISO1585 (1996)
 Máximo(a) Potência : 17,12 CV@8 RPM*1000
 NOTAS : teste escape DES modelo médio, motor original

■ ARQUIVO : CRF230 Douglas Dogster_009.cor
 DATA CRIAÇÃO : 08/05/2020 - 08:24:18
 CORREÇÃO (1,12) : NBR ISO1585 (1996)
 Máximo(a) Potência : 17,12 CV@8 RPM*1000
 NOTAS : teste escape DES modelo médio, motor original

■ ARQUIVO : CRF230 Douglas Dogster_009.cor
 DATA CRIAÇÃO : 08/05/2020 - 09:23:41
 CORREÇÃO (1,12) : NBR ISO1585 (1996)
 Máximo(a) Potência : 16,43 CV@8 RPM*1000
 NOTAS : teste escape original, motor original

■ ARQUIVO : CRF230 Douglas Dogster_009.cor
 DATA CRIAÇÃO : 08/05/2020 - 09:23:41
 CORREÇÃO (1,12) : NBR ISO1585 (1996)
 Máximo(a) Torque Motor : 1,74 Kgf.m@6 RPM*1000

Impresso em: 08/05/2020 - 10:46:08