UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Estudo da influência da duração de injeção e do número de “*Swirl*” no desempenho e emissões de motor Diesel.

PEDRO DE SOUSA LEAL SANTOS

São Paulo

2017

PEDRO DE SOUSA LEAL SANTOS

Estudo da influência da duração de injeção e do número de “*Swirl*” no desempenho e emissões de motor Diesel.

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo
2017

PEDRO DE SOUSA LEAL SANTOS

Estudo da influência da duração de injeção e do número de “*Swirl*” no desempenho e emissões de motor Diesel.

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração: Engenharia
Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Francisco Emilio
Baccaro Nigro

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Santos , Pedro de Sousa Leal

Estudo da influência da duração de injeção e do número de “swirl” no desempenho e emissões de motor Diesel/ P. S. L. Santos – versão corr.-- São Paulo , 2017.

130 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Centro de Engenharia Automotiva.

1.Motores diesel 2.Swirl 3.Poluição atmosférica Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II.t.

Dedico este trabalho à minha esposa Isabella e ao meu filho Joaquim.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a minha família, em especial a minha Esposa Isabella e Filho Joaquim e ao professor orientador Prof. Dr. Francisco Emilio Baccaro Nigro por ser um mestre na arte da condução e orientação de seus alunos através do Dom que Deus lhe deu de guiar seus próximos na arte de ensinar Ciência.

O não necessitar é uma prerrogativa de Deus, portanto quanto menos eu necessitar ter ou ser, mais próximo de Deus eu estarei.

(Sócrates)

RESUMO

Este trabalho buscou estudar os efeitos do nível de *Swirl* e alteração da massa de combustível injetada nas emissões de poluentes de um motor Diesel. Foram selecionados 15 cabeçotes de uma população de 100 cabeçotes e agrupados pelo nível de *Swirl*. Como o motor testado utiliza 5 cabeçotes, 15 cabeçotes foram separados e classificados em 3 categorias pelo nível de *Swirl*. Em seguida, o motor foi montado com as 3 categorias de cabeçotes no dinamômetro com o objetivo de levantar os efeitos nas emissões de gases e parâmetros de desempenho do motor. Foram medidas as emissões de NOx, CO, THC, fuligem, fumaça e consumo de combustível nos 13 pontos do ciclo ESC, complementadas com medições de torque e potência à plena carga. Além disso, nas condições de plena carga foi explorado o efeito da alteração da massa de combustível injetado, pela mudança do ponto final de injeção, nos parâmetros de desempenho e emissões.

Palavras-Chave: *Swirl*. Motor diesel. Emissões de poluentes.

ABSTRACT

This work aimed at the investigation of the effects of the level of Swirl and the amount of fuel mass injected in the emissions of pollutants on a diesel engine. Cylinder heads were selected from a population of 100 cylinder heads and then grouped by Swirl level. As the engine used in the tests have 5 cylinder heads, 15 cylinder heads were separated into 3 categories by the Swirl level. The engine was mounted with the 3 Swirl level cylinder heads categories with the aim to investigate all effects on emissions and performance such as NO_x, CO, THC, soot, smoke, fuel consumption, power and torque. The tests were performed following the ESC cycle and exploring the full load curve behavior with changes of the end of injection point, therefore altering the amount of fuel mass injected.

Keywords: Swirl. Diesel engine. Emission pollutant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Estrutura dos vórtices gerados dentro da câmara de combustão	21
Figura 2.2.1 – Formato da cabeça do pistão propostos	26
Figura 2.2.2 – Efeito do <i>Swirl</i> nas emissões de particulado.....	26
Figura 2.2.3 – Diferentes desenhos da cabeça do pistão.....	27
Figura 2.2.4 – Efeito do formato da cabeça do pistão nas emissões de particulado....	28
Figura 2.2.5 – Efeito do <i>Swirl</i> na razão de combustão	29
Figura 2.3.1 – Efeito do ângulo de cone nas emissões de NOx.....	30
Figura 2.3.2 – Efeito do ângulo de spray nas emissões de NOx.....	31
Figura 2.4.1 – Efeito da pressão de injeção na razão de liberação de calor.....	32
Figura 2.4.2 – Efeito da pressão de injeção no atraso de ignição.....	33
Figura 2.4.3 – Efeito da pressão de injeção.....	33
Figura 2.4.4 – Efeito da pressão de injeção em emissões, $P_{inj} = 80$ e 140 MPa.....	34
Figura 2.4.5 – Contornos de temperatura para diferentes pressões de injeção.....	36
Figura 2.5.1 – Efeito do <i>Swirl</i> na emissão de fuligem e NOx em alta carga.....	37
Figura 2.5.2 – Efeito de diferentes pressões de injeção na câmara de combustão.....	38
Figura 2.5.3 – Efeito de diferentes pressões de injeção na câmara de combustão.....	39
Figura 2.5.4 – Colisão entre chamas advindas do centro e da parede do cilindro.....	40
Figura 2.5.5 – Emissão de fumaça em função do <i>Swirl</i> e <i>Tumble</i>	41
Figura 2.5.6 – Emissão de NOx e CO em função do <i>Swirl</i> e <i>Tumble</i>	42
Figura 2.5.7 – Razão de liberação de calor em função do <i>Swirl</i> e da pressão	42
Figura 2.5.8 – Iteração das chamas e gradiente de velocidade.	43
Figura 2.6.1 – Spray formado na saída do injetor	44
Figura 2.6.2 – Variação da penetração de spray em função das pressões de injeção..	45
Figura 3.1 – Equipamentos utilizados para medição do número de <i>Swirl</i>	49
Figura 3.2 – Analisador de gás Horiba.....	50
Figura 3.3 – Medidor de fumaça.....	50
Figura 3.4 – Medidor de opacidade.....	51
Figura 3.5 – Medidor de torque.....	51
Figura 3.6 – Medidor de vazão de combustível.....	52
Figura 3.7 – Ciclo ESC 13 pontos.....	52
Figura 3.2.1 – Número de <i>Swirl</i> para 100 cabeçotes medidos.....	55

Figura 3.3.1 – Montagem do motor antes dos testes no dinamômetro	56
Figura 3.3.2 – Fotos durante os testes do motor no dinamômetro.....	57
Figura 4.1.1.1 – Emissão de NOx para grupos de cabeçotes.....	60
Figura 4.1.1.2 – Emissão de NOx para 100% de carga.....	61
Figura 4.1.1.3 – Emissão de NOx para 75% de carga.....	62
Figura 4.1.1.4 – Emissão de NOx para 50% de carga.....	62
Figura 4.1.1.5 – Emissão de NOx para 25% de carga.....	63
Figura 4.1.2.1 – Emissão de fumaça para grupos de cabeçotes.....	64
Figura 4.1.2.2 – Emissão de fumaça para 100% de carga.....	65
Figura 4.1.2.3 – Emissão de fumaça para 75% de carga.....	65
Figura 4.1.2.4 – Emissão de fumaça para 50% de carga.....	66
Figura 4.1.2.5 – Emissão de fumaça para 25% de carga.....	66
Figura 4.1.3.1 – Emissão de THC para grupos de cabeçotes.....	67
Figura 4.1.3.2 – Emissão de THC para 100% de carga.....	68
Figura 4.1.3.3 – Emissão de THC para 75% de carga.....	68
Figura 4.1.3.4 – Emissão de THC para 50% de carga.....	69
Figura 4.1.3.5 – Emissão de THC para 25% de carga.....	69
Figura 4.1.4.1 – Emissão de CO para grupos de cabeçotes.....	70
Figura 4.1.4.2 – Emissão de CO para 100% de carga.....	71
Figura 4.1.4.3 – Emissão de CO para 75% de carga.....	71
Figura 4.1.4.4 – Emissão de CO para 50% de carga.....	72
Figura 4.1.4.5 – Emissão de CO para 25% de carga.....	72
Figura 4.1.5.1 – Consumo de combustível no ciclo ESC.....	73
Figura 4.1.5.2 – Consumo de combustível à 100% de carga.....	74
Figura 4.1.5.3 – Consumo de combustível à 75% de carga.....	74
Figura 4.1.5.4 – Consumo de combustível à 50% de carga.....	75
Figura 4.1.5.5 – Consumo de combustível à 25% de carga.....	75
Figura 4.1.6.1 – Emissão de <i>fuligem</i> pelo nível de <i>Swirl</i>	76
Figura 4.1.6.2 – Emissão de <i>fuligem</i> para cargas de 100%.....	77
Figura 4.1.6.3 – Emissão de <i>fuligem</i> para cargas de 75%.....	78
Figura 4.1.6.4 – Emissão de <i>fuligem</i> para cargas de 50%.....	78
Figura 4.1.6.5 – Emissão de <i>fuligem</i> para cargas de 25%.....	79
Figura 4.2.1.1 – Fumaça em plena carga.....	80

Figura 4.2.1.2 – Emissão de fumaça com injeção original.....	81
Figura 4.2.1.3 – Emissão de fumaça com aumento de massa injetada.....	81
Figura 4.2.1.4 – Emissão de fumaça com redução de massa injetada.....	82
Figura 4.2.2.1– Rendimento em plena carga.....	83
Figura 4.2.2.2 – Rendimento com injeção original.....	84
Figura 4.2.2.3 – Rendimento com aumento de massa na injeção	84
Figura 4.2.2.4 – Rendimento com redução de massa na injeção.....	85
Figura 4.2.3.1 – Nível de opacidade em plena carga.....	86
Figura 4.2.3.2 – Nível de opacidade com injeção original.....	87
Figura 4.2.3.3 – Nível de opacidade com aumento da massa na injeção.....	88
Figura 4.2.3.4 – Nível de opacidade com redução da massa na injeção.....	89
Figura 4.2.4.1– Torque para os diferentes níveis <i>Swirl</i> e massa injetada.	90
Figura 4.2.4.2 – Torque com injeção original.....	91
Figura 4.2.4.3 – Torque com aumento de massa na injeção	91
Figura 4.2.4.4 – Torque com redução de massa na injeção.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Tempos para cada ciclo padronizado conforme ABNT NBR 15634.....	53
Tabela 2– Número de <i>Swirl</i> para cada cabeçote de motor.....	54
Tabela 3– Especificação do motor usado no teste.....	57
Tabela 4– Instantes originais de início e fim da injeção no ciclo ESC.....	58
Tabela 5– Instantes início e fim da injeção no ciclo plena carga para o motor testado, no nominal (original), prolongado e reduzido.	58
Tabela 6– Matriz de nível de emissão e desempenho em função dos níveis de <i>Swirl</i> para o ciclo ESC.....	93
Tabela 7– Matriz de nível de emissão e desempenho em função dos níveis de <i>Swirl</i> em plena carga.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CO	Monóxido de Carbono
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
FSN	<i>Filter Smoke Number</i>
HC	Hidrocarbonetos
MP	Material Particulado
NOx	Óxidos de Nitrogênio
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
EGR	<i>Exchange Gás Recirculation</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	CONCEITUAÇÃO DO SWIRL	21
2.2	INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PISTÃO E A RELAÇÃO DE <i>SWIRL</i>	25
2.3	EFEITO DO CONE DE <i>SPRAY</i> DA INJEÇÃO NAS EMISSÕES.....	30
2.4	ANÁLISE DA PRESSÃO DE INJEÇÃO NAS EMISSÕES.....	32
2.5	EFEITO DO <i>SWIRL</i> NA COMBUSTÃO E NAS EMISSÕES.....	36
2.6	EFEITO DA CAVITAÇÃO DE <i>SPRAY</i> DE INJEÇÃO NAS EMISSÕES.....	44
2.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA - DAS AMOSTRAS COLETADAS.	46
2.8	ANÁLISE DE TUKEY PARA ANOVA DAS AMOSTRAS	48
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	MEDIÇÃO DOS CABEÇOTES	54
3.2	CATEGORIAZAÇÃO DOS GRUPOS PELO NÍVEL DE SWIRL	55
3.3	ENSAIO DO MOTOR COM OS CABEÇOTES CATEGORIZADOS	56
3.4	CONSIDERAÇÕES PARA OS TESTES REALIZADOS	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS GLOBAIS DO CICLO ESC 13 PONTOS ...	60
4.1.1	RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE EMISSÃO DE NO _x	60
4.1.2	RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE EMISSÃO DE FSN	64
4.1.3	RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE EMISSÃO DE THC	67
4.1.4	RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE EMISSÃO DE CO	70
4.1.5	RESULTADOS PARA CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	73
4.1.6	RESULTADOS DA VARIAÇÃO DE EMISSÃO DE SOOT	76
4.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PLENA CARGA COM ALTERAÇÃO DA MASSA DE COMBUSTÍVEL INJETADA.....	80
4.2.1	NÍVEIS DE FSN PARA MOTOR EM PLENA CARGA	80
4.2.2	RENDIMENTO% PARA MOTOR EM PLENA CARGA.....	83
4.2.3	NÍVEIS DE OPC PARA MOTOR EM PLENA CARGA.....	86

4.2.4	TORQUE PARA MOTOR EM PLENA CARGA.....	90
5	CONCLUSÕES	93
6	DESDOBRAMENTO DO TRABALHO	95
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	APÊNDICE A – TABELAS E RESULTADOS DO CALCULO DE ANOVA .	100
	APÊNDICE B – TABELAS DE VALORES COLETADOS ESC	127
	APÊNDICE C – TABELAS DE VALORES COLETADOS EM PLENA CARGA PARA OPACIDADE, TORQUE, RENDIMENTO GLOBAL E FUMAÇA.....	129

1. INTRODUÇÃO

Em um mercado altamente competitivo e regulamentado como é o de caminhões, qualquer diferencial de preço, desempenho e consumo de combustível pode fazer toda a diferença na fidelização e atração de novos clientes. A regulamentação cada vez mais rigorosa das emissões tem implicado em compromissos com a eficiência e aumento de custo de equipamento. Portanto, o consumo de combustível e a emissão de poluentes se conectam de tal maneira a ser um diferencial fundamental quando da decisão de aquisição do veículo comercial.

Acredita-se que este estudo contribuirá para o entendimento da influência do *Swirl* no desempenho, consumo e emissão de NOx e material particulado em motor diesel.

A proposta do trabalho é realizar estudos e avaliações do efeito da alteração no tempo de injeção de combustível e da utilização de cabeçotes com mesmo valor *Swirl*.

Atualmente os motores são montados com cabeçotes com número de *Swirl* dentro dos limites de tolerância, que em última análise são definidos pelas tolerâncias viáveis na fundição dos cabeçotes. A proposta principal do trabalho é justamente mensurar os possíveis ganhos, caso os cabeçotes venham a ter seu número de *Swirl* controlado individualmente e classificados por faixas/intervalos de número de *Swirl* antes de serem montados no motor.

1.1 OBJETIVO

Como objetivo geral, pretende-se explorar a possibilidade de melhorar o desempenho do motor em termos de consumo e emissão de poluentes pela utilização de cabeçotes selecionados e categorizados pelo seu número de *Swirl*.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- seleção de 100 cabeçotes individuais de um motor de cinco cilindros e 9 litros utilizados com sistema de injeção *dual rail*
- instalação/montagem dos cabeçotes na máquina de medição de *Swirl* desenvolvida pela Poli- USP, medição do número de swirl e identificação de cada cabeçote
- Seleção e classificação dos cabeçotes conforme o número de swirl, de modo a separar três conjuntos de 5 cabeçotes
- Realização de ensaios de desempenho e emissões com cada conjunto desses cabeçotes montados em um mesmo motor básico instalado em dinamômetro

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITUAÇÃO DO *SWIRL*

De acordo com Merker *et al*, (2009) a formação da mistura combustível/ar é extremamente dependente da interação do jato de combustível com o fluxo de ar dentro do cilindro. De acordo com a figura 2.1.1, pode-se notar as principais estruturas de fluxo de ar formadas dentro da câmara de combustão que tem como objetivo a obtenção de uma adequada formação da mistura, conhecida como *Swirl*.

Figura 2.1.1 –Estrutura dos vórtices gerados dentro da câmara de combustão

Fonte: Adaptado de Diesel Engine Management Bosch, (2014)

O *swirl* é formado ao redor do eixo central do cilindro e é gerado pela geometria dos canais de admissão dos cabeçotes com contribuição substancial do formato dos assentos das válvulas de admissão.

O número de *swirl* é determinado de maneiras diferentes dependendo da bibliografia consultada. Neste trabalho foi adotado o método conforme OTTOSSON & HOLMBERG,(2011) considerando um equipamento de medição com sistema de colmeia.

A equação (1) define o cálculo da densidade do ar na saída dos dutos de admissão do cabeçote.

$$\rho_s = \frac{p_{in}}{R \times T_{in}} \times \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{1}{k_{ar}}} \quad (1)$$

Onde:

ρ_s – densidade do ar na saída dos dutos de admissão;

p_{in} – pressão de entrada do ar;

R – constante específica do ar;

T_{in} – temperatura de admissão do ar;

p_{out} – pressão de saída do ar;

k_{ar} – razão de calores específicos para o ar.

Em seguida a equação (2) define o cálculo da vazão em massa do ar na saída dos dutos de admissão do cabeçote.

$$Q_m = Q_v \times \rho_s \quad (2)$$

Onde:

Q_m – vazão em massa do ar em Kg/s;

Q_v – vazão em volume do ar em m³/s;

Através da equação (3) é definida a razão de *swirl*, para cada abertura das válvulas de admissão do cabeçote.

$$\frac{n_D}{n} = \frac{2 \times M \times S \times \rho_s}{Q_m^2} \quad (3)$$

Onde:

n_D/n – razão de *swirl*;

M – torque gerado pela passagem do ar na máquina de medição;

S – curso do pistão.

Existe uma relação entre a velocidade instantânea do pistão e sua velocidade média que pode ser expressa pela equação (4).

$$\frac{c(\alpha)}{c_m} = \frac{\pi}{2} \times \left(1 + \frac{\frac{S \times 0,5}{L} \times \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{S \times 0,5}{L} \right)^2 \times \sin^2(\alpha)}} \right) \times \sin(\alpha) \quad (4)$$

Onde:

$c(\alpha)/c_m$ – relação entre velocidade instantânea e média do pistão;

L – comprimento da biela;

α – ângulo do virabrequim.

Por fim a equação (5) define o número de *swirl*, ou razão média de *swirl*.

$$\left(\frac{n_D}{n} \right)_m = \frac{1}{\pi} \times \int_0^\pi \frac{n_D}{n} \times \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^2 \times d\alpha \quad (5)$$

Onde:

$(n_D/n)_m$ – número de *swirl*;

n_D/n – razão de *swirl* para cada abertura de válvula correspondente à posição α do virabrequim.

A integral definida da equação (5) corresponde ao intervalo em que o pistão do motor vai do PMS durante o ciclo de admissão até quando atinge o PMI ainda em seu ciclo de admissão.

Outro importante parâmetro de avaliação do desempenho de cabeçotes de motores é o denominado como $\mu\sigma$; trata-se de um coeficiente que mede a relação entre a vazão efetiva pelo cabeçote e a vazão teórica obtida com a velocidade máxima do escoamento decorrente da perda de carga. Em última análise é um coeficiente de descarga referido a área projetada das válvulas de admissão. A equação (6) define o cálculo deste coeficiente.

$$\mu\sigma = \frac{Q_m}{Q_{mt}} \quad (6)$$

Onde:

$\mu\sigma$ – coeficiente de descarga;

Q_{mt} – vazão em massa teórica do ar.

Para o cálculo da vazão em massa teórica do ar é utilizada a equação (7).

$$Q_{mt} = z \times A_v \times \rho \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

Onde:

z – número de válvulas de admissão do cabeçote;

A_v – Área projetada de cada válvula de admissão (m²);

ρ – densidade média do ar no escoamento;

Δp – queda de pressão imposta.

Em seguida é possível obter um coeficiente de descarga médio referente ao tempo de admissão do motor através da equação (8).

$$\mu\sigma_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \times \int_0^\pi \left(\frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^3 \times \frac{1}{\mu\sigma^2} \times d\alpha}} \quad (8)$$

Onde:

$\mu\sigma_m$ – coeficiente de descarga médio.

2.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO PISTÃO E A RELAÇÃO DE *SWIRL*

A formação de poluentes está intimamente conectada com o formato da cabeça do pistão, com o diâmetro e profundidade da concavidade do pistão, tempo de injeção e a turbulência gerada no início da admissão do ar.

De acordo com testes realizados por RAJESH e ABDUL,(2015) pode-se notar que quanto menor for a relação dos diâmetros e profundidade da cabeça do pistão, os níveis de particulados serão reduzidos e maior será a fração de massa de CO e NO.

GAFOOR *et al.*, (2015) avaliaram o impacto dos diferentes intervalos de relação diâmetro de cavidade/pistão em relação às diferentes faixas de relação de *swirl* inicial.

Observou-se que quanto menor for a relação do diâmetro da cavidade / pistão, maior será o *swirl* gerado dentro da câmara de combustão, possibilitando relações combustível/ar mais elevadas e misturas mais uniformes.

Em contrapartida, quanto maior a relação de diâmetro da cavidade pelo diâmetro do pistão, menor a temperatura gerada na combustão, ou seja, menor a emissão de NO com aumento da emissão de MP (Material particulado).

Como os autores LIWANG *et al.*, (2014) identificaram que o formato da cabeça do pistão é uma das principais variáveis que afeta a distribuição da mistura combustível/ar dentro da câmara de combustão, eles propuseram uma mudança no desenho da cabeça do pistão que contribuísse para a formação forçada de *swirl*, criando os formatos apresentados abaixo na figura 2.2.1 com o objetivo de compará-los ao formato tradicional da cabeça do pistão.

Figura 2.2.1 –Formato da cabeça do pistão propostos

Princípio de um sistema de Turbilhonamento forçado

Fonte: Adaptado de LIWANG *et al.*, (2014)

Figura 2.2.2 –Efeito do *Swirl* nas emissões de particulado

Fonte: Adaptado de LIWANG *et al.*, (2014)

Algumas regiões dentro da câmara de combustão não são atingidas pelo jato de combustível (região A da figura 2.2.2 acima), e como consequência, este oxigênio acaba não sendo utilizado na combustão por estar longe do jato e próximo às paredes do cilindro, apresentada pela região B da figura 2.2.2 acima.

Para tanto, se propôs alterar o formato da cabeça do pistão incluindo vincos ou relevos que fossem capazes de dividir o jato de combustível formando assim duas regiões de alto turbilhonamento, ou seja, forçar a formação de *swirl* localizado conforme mostrado na figura 2.2.1 acima.

A ideia de forçar a formação de *swirl* foi de distribuir o combustível uniformemente conseguindo-se uma mistura mais homogênea, consumindo assim aquele oxigênio mais distante, otimizando a queima dentro da câmara de combustão.

Para a validação da hipótese da divisão do jato e formação de mais regiões com turbilhonamento, LIWANG *et al.*, (2014) avaliaram o impacto na difusão da mistura, distribuição da temperatura e emissão comparando os resultados com aqueles obtidos com cabeça do pistão de formato padrão.

Figura 2.2.3 – Diferentes desenhos da cabeça do pistão

Fonte: LIWANG *et al.*, (2014)

Após as medições e comparações, LIWANG *et al.*, (2014) notaram que o formato alterado da cabeça do pistão gerou núcleos diversos de turbilhonamento, a redução de MP (material particulado) foi acentuada em comparação com formato da cabeça do pistão padrão. Em contrapartida, como a temperatura dentro da câmara aumentou devido a melhor mistura e queima (utilização do oxigênio), houve um acréscimo na emissão de NOx conforme mostrado na figura 2.2.4 abaixo, que de qualquer maneira, é insignificante em comparação com a redução obtida em MP (material particulado) quando se trabalha com sistemas com *swirl* forçado.

Figura 2.2.4 –Efeito do formato da cabeça do pistão nas emissões de particulado

Fonte: LIWANG *et al.*, (2014)

KIM *et al.*, (2008) observaram que o *swirl* reduz o atraso de ignição elevando a razão de combustão (razão de liberação de calor) dentro da câmara de combustão, conforme apresentado na figura 2.2.5 abaixo.

Altas pressões de injeção, reduzem a formação de fuligem por melhorarem a atomização do combustível e consequentemente a mistura com o oxigênio disponível.

Figura 2.2.5 –Efeito do *swirl* na razão de combustão

Fonte: Adaptado de KIM *et al.*, (2008)

2.3 EFEITO DO CONE DE SPRAY DA INJEÇÃO NAS EMISSÕES

De acordo com estudos realizados por BANDPY *et al.*, (2009) constatou-se que aumentando-se o ângulo do cone do jato de combustível, há uma melhora na mistura ar-combustível, e como consequência maior será o acesso ao oxigênio fazendo com que haja aumento de produção de NOx.

Foram avaliados 3 ângulos de cone por BANDPY *et al.*, (2009), de 10°, 14° e 18° graus. Notaram um aumento excessivo de NOx com o aumento do ângulo de cone da injeção conforme a figura 2.3.1 abaixo.

Figura 2.3.1 –Efeito do ângulo de cone nas emissões de NOx

Fonte: BANDPY *et al.*, (2009)

BANDPY *et al.*, (2009) realizaram testes com diferentes ângulos de *spray* de combustível, conforme mostrado na figura 2.3.2, e identificaram que quanto maior o ângulo, maior será a pressão e temperatura devido a melhor mistura combustível-ar.

Normalmente, o MP (material particulado) aumenta em zonas de queima por difusão. Quando aumenta-se o ângulo de injeção, o combustível se espalha de forma mais homogênea fazendo com que a zona de combustão por difusão seja reduzida, diminuindo a formação de MP (material particulado).

Figura 2.3.2 –Efeito do ângulo de spray nas emissões de NOx

Fonte: BANDPY *et al.*, (2009)

2.4 ANÁLISE DA PRESSÃO DE INJEÇÃO NAS EMISSÕES

O aumento na pressão de injeção causa redução no atraso de ignição por causa da melhor atomização e aumento do pico de razão de liberação de calor dando mais velocidade à fase de pré-mistura devido a melhor atomização, conforme mostrado na figura 2.4.1 abaixo.

Figura 2.4.1 –Efeito da pressão de injeção na razão de liberação de calor

(a) Injection timing: BTDC 6°, w/o swirl

Fonte: KIM *et al.*, (2008)

Conforme proposto por SANGWOOK *et al.*, (2014), quanto maior a pressão de injeção e os níveis de oxigênio, menor será o atraso de ignição, conforme mostrado na figura 2.4.2 abaixo, com diminuição do material particulado, CO e HC e um leve aumento do NOx. Isso significa que a pressão de injeção tem importante influência na liberação de energia e emissão dentro da câmara de combustão. Observa-se também como a redução do teor de oxigênio no ar de admissão afeta a combustão e as emissões, simulando o que acontece com um aumento da recirculação de gases de escapamento.

Figura 2.4.2 –Efeito da pressão de injeção no atraso de ignição pela concentração de O_2

Fonte: SANGWOOK *et al.*, (2014)

Com o aumento da concentração de O_2 fresco dentro da câmara, maior será a densidade do ar dificultando com que respingos do jato de combustível atinjam as paredes do cilindro diminuindo drasticamente as emissões de HC não queimado, conforme mostrado na figura 2.4.3 abaixo.

Figura 2.4.3 –Efeito da pressão de injeção

Fig. 5. Effects of injection pressure on exhaust emissions over various intake O_2 concentrations.

Fonte: SANGWOOK *et al.*, (2014)

Em seus estudos, KIPLIMO *et al.*, (2012) identificaram que a temperatura média na câmara de combustão é maior para altas pressões de injeção, contribuindo para redução de emissão de fumaça atribuída à quantidade de combustível injetado, pois tem-se maior tempo para mistura e atomização diminuindo as chances de mistura localmente rica.

Com o início da injeção próximo ao PMS, o NO_x é elevado com altas pressões de injeção, enquanto que a fumaça, HC e CO tendem a diminuir, conforme mostrado na figura 2.4.4 abaixo.

Figura 2.4.4 – Efeito da pressão de injeção em emissões, $P_{inj} = 80$ e 140 MPa

Fonte: KIPLIMO *et al.*, (2012)

WATANABE *et al.*, (1998) concluíram que o decréscimo da fuligem é consequência das altas pressões de injeção pois promove mistura de partículas mais refinadas e atomizadas.

Foi identificado por MOHAN *et al.*, (2013), que aumentando a pressão de injeção, esta contribui para a atomização do combustível, consequentemente

acelerando o processo de combustão produzindo menos HC, CO e material particulado e mais NOx.

Em motores com EGR, os gases de exaustão substituem ar fresco dentro da câmara de combustão e como consequência uma menor quantidade de oxigênio é disponibilizada para combustão. Com redução da disponibilidade de oxigênio, diminui-se a relação ar-combustível.

O calor específico aumenta com a adição dos gases da exaustão, o que resulta na redução da temperatura de chama. AGARWAL *et al.*, (2011) identificaram que esta combinação de baixa disponibilidade de oxigênio e redução da temperatura da chama reduz a emissão de NOx enquanto que aumenta a emissão de material particulado acompanhada pela redução de potência. Observa-se na figura 2.4.3, anteriormente apresentada, o grande efeito da redução do teor de oxigênio na redução das emissões de NOx.

Estudos realizados por ADLER,(1994) e CARTELLIERI *et al.*,(1991) concluíram que as estratégias abaixo contribuem para mistura combustível/ar e para o processo de difusão que ajudam na redução de NOx e material particulado.

- O controle do nível de pressão de injeção pode conduzir para uma maior penetração e assim uma melhor atomização do combustível;
- Combustível deve ser distribuído dentro da câmara de combustão com mínimo possível de combustível nas paredes do cilindro;
- Configuração do injetor tal como diâmetro dos orifícios, quantidade de furos afetam a atomização e distribuição da névoa dentro da câmara de combustão;
- As regiões ricas em combustível das chamas produzem fuligem e misturas pobres produzem NOx;

Segundo MOHAN *et al.*,(2013), notaram que usualmente a penetração do spray aumenta com o aumento da pressão de injeção.

EMAMI *et al.*, (2013), modelaram e identificaram que aumentando a pressão de Injeção próximo a PMS, a temperatura varia entre 980 a 1150 K, conforme podemos notar nas escalas da figura 2.4.5 abaixo.

Figura 2.4.5— Contornos de temperatura para diferentes pressões de injeção

Fonte: EMAMI et al., (2013)

2.5 EFEITO DO *SWIRL* NA COMBUSTÃO E NAS EMISSÕES

Segundo JOHNSON, (2001), o material particulado do motor Diesel é formado pela fuligem advinda do carbono do combustível e do lubrificante, sulfatos do óleo lubrificante e HC não queimados. Dependendo do tamanho das partículas, as mesmas podem ser absorvidas pelo nosso organismo com consequências a longo prazo catastróficas à nossa saúde, culminando em doenças respiratórias e até câncer.

Estudos realizados por BENAJES *et al.*, (2004), mostraram que a turbulência aumenta a área onde o spray de combustível é nebulizado, com consequente aumento de pressão e temperatura e aumento de NOx. Aumento adicional do *Swirl* provê mais oxigênio para o spray, reduzindo a produção de fuligem e aumentando a oxidação da mesma; em contrapartida, pode induzir a um arrefecimento da combustão aumentando assim a emissão de material particulado.

Swirl muito elevado também reduz a penetração dos sprays podendo forçar interação entre eles afetando diretamente a oxidação da fuligem aumentando assim sua emissão.

BENAJES *et al.*, (2004) notaram que a produção de NOx pode variar com o aumento de *Swirl*. Até um certo nível de *Swirl*, ela aumenta e a partir de *Swirl* elevado, o NOx diminui drasticamente com consequente aumento da emissão de fuligem,

provavelmente produto da colisão dos sprays de combustível e consequente arrefecimento da combustão na câmara, conforme mostrado na figura 2.5.1 na qual A100, B100 e C100 representam plena carga com 1200 rpm , 1500 rpm e 1800 rpm.

Figura 2.5.1– Efeito do *Swirl* na emissão de fuligem e NOx em alta carga

Fonte: BENAJS et al.,(2004)

A emissão de fuligem aumenta antes da redução da emissão de NOx porque depende da oxidação durante e após a fase de combustão controlada, por isso, apesar do *swirl* melhorar as condições de mistura ele pode danificar a fase de combustão controlada fazendo com que a emissão de fuligem aumente. Portanto, BENAJS *et al.*,(2004) identificaram os valores adequados para *swirl* para cada modo de operação do motor, mas enfatizando que não há um único valor de *swirl* para toda a faixa de operação do motor.

Os autores DEMBINSKI *et al.*,(2013) identificaram que aumentando a pressão de injeção, esta proporciona baixa emissão de fuligem e alta emissão de NOx para o mesmo ponto de carga.

Nos casos de alta carga no motor, com *swirl* elevado consegue-se reduzir a fuligem e em contrapartida, elevar a emissão de NOx.

Explorando o efeito de alteração da pressão de injeção, em um motor Diesel à uma rotação de 1000 rpm, com sistema de injeção *common rail*, pressão máxima de injeção de 2500 bar, relação de compressão de 17,3:1, DEMBINSKI *et al.*,(2013) observaram que com uma pressão em torno de 200 bar existe uma forte restrição com relação à penetração e distância que o spray pode atingir, enquanto que a 2000 bar, o jato pode ser facilmente observado na figura 2.5.2 abaixo.

Figura 2.5.2 – Efeito de diferentes pressões de injeção na velocidade angular do fluxo de ar

Fonte: DEMBINSKI *et al.*,(2013)

DEMBINSKI *et al.*,(2013) notaram que o espalhamento do combustível força uma combustão rica na parte externa em relação ao rebaixo central da cabeça do

pistão onde a oxidação da fuligem pode ser observada. Nos casos de pressão baixa, aproximadamente de 200 bar, DEMBINSKI *et al.*,(2013) identificaram que a oxidação da fuligem é percebida na parte central do pistão. Em alta pressão, o fluxo é redirecionado de volta para o centro do pistão. Isso não ocorre com casos de baixa pressão de injeção, onde o fluxo segue a turbulência causada pelo *Swirl* e nenhum fluxo é observado sendo redirecionado para o centro do pistão como podemos observar pela figura 2.5.2 acima.

Com o aumento da pressão de injeção, a velocidade angular aumenta nas regiões centrais do pistão / rebaixo do pistão.

A velocidade angular no raio externo do pistão não aparece ser afetada devido mudanças na pressão de injeção, ou seja, somente na região central, raios menores do pistão é que a velocidade angular é fortemente afetada como pode-se observar pela figura 2.5.3 abaixo.

Figura 2.5.3 – Efeito de diferentes pressões de injeção na velocidade angular do fluxo de ar na câmara de combustão

Fonte: DEMBINSKI *et al.*,(2013)

A turbulência criada influencia a oxidação da fuligem. Para oxidar fuligem, 3 componentes são necessários: oxigênio, tempo e temperatura. A velocidade angular observada em diferentes raios do pistão é o grande fornecedor de potencial para produção de turbulência.

O *Swirl* aumenta durante a compressão devido à redução do volume e do raio da cavidade do pistão, com o ar sendo forçado e direcionado para o centro da cavidade do pistão.

A razão pela qual o *Swirl* diminui rapidamente pode estar relacionada com o aumento de massa quando o combustível é injetado, aumentando assim o momento de inércia, sem aumentar a quantidade de movimento angular.

Figura 2.5.4 – Colisão entre chamas advindas do centro e da parede do cilindro.

Fonte: DEMBINSKI et al.,(2013)

DEMBINSKI *et al.*,(2013) identificaram que quando a chama atinge a extremidade do pistão, a chama é redirecionada para o centro do pistão forçando o fluxo de massa para o centro do pistão conforme mostrado na figura 2.5.4 acima.

REITZ *et al.*,(2007) mostraram que com *swirl* mais alto, mais ar penetra na chama da combustão quando comparado com casos aonde o *Swirl* não é utilizado. Se o *Swirl* é aumentado, a mistura de ar aumenta dentro das chamas.

Isso significa que baixo *Swirl* resulta em falta de ar como consequência aumentando a emissão de CO. Em altos níveis de *Swirl*, ocorre combustão incompleta quando o ar penetra e move produtos da combustão e combustível para locais com menos fluxo de ar, aonde a temperatura diminui abaixo da temperatura limite de reação. Quando isso acontece muito rapidamente, por exemplo em alto nível de *Swirl*, CO não é completamente oxidado durante a pós combustão.

O período de pós oxidação, depois do final da injeção principal é de suma importância e muito da fuligem é oxidada neste período antes da válvula de exaustão abrir.

DEMBINSKI,(2012) notou que as condições promotoras da oxidação da fuligem é o oxigênio remanescente, temperatura, tempo e turbulência. De acordo com a figura 2.5.5 abaixo, altos níveis de *Swirl* diminuem radicalmente a emissão de fumaça.

Figura 2.5.5 – Emissão de fumaça em função do *Swirl* e *Tumble*

Fonte: DEMBINSKI,(2012)

DEMBINSKI,(2012) concluiu que com alto número de *Swirl*, NOx e CO parecem estar fortemente associados um com o outro. Quando alta concentração de CO é observada, pela figura 2.5.6 abaixo o NOx no mesmo ponto é baixo.

Figura 2.5.6 – Emissão de NO_x e CO em função do *Swirl* e *Tumble*

Fonte: DEMBINSKI,(2012)

DEMBINSKI,(2012) mostra pela figura 2.5.7 abaixo, que quando o *Swirl* aumenta, a taxa de combustão da fração pré-misturada aumenta em amplitude e a taxa de pós oxidação diminui.

Figura 2.5.7 – Razão de liberação de calor em função do *Swirl* e da pressão de injeção

Fonte: DEMBINSKI,(2012)

As setas na figura 2.5.8 abaixo, mostram a direção do fluxo e a cor indica a velocidade do fluxo. Os pontos pretos indicam que não há informação de velocidade nesta área devido à falta de partículas. Os círculos pretos indicam onde as bordas da cavidade central da cabeça do pistão estão localizadas.

Figura 2.5.8 – Iteração das chamas e gradiente de velocidade.

Fonte: DEMBINSKI,(2012)

Pelos estudos realizados por DEMBINSKI,(2012), pode-se claramente ver onde as 8 chamas colidem e como em seguida são redirecionadas pelas bordas da cavidade do pistão. As maiores velocidades são observadas na parte inferior da cavidade para onde as chamas são redirecionadas. O vórtice gira em sentido horário e a velocidade dos vetores indica que a chama é afetada por este vórtice.

As flechas verdes mostram duas chamas interagindo uma com a outra e formando uma zona de recirculação.

Esta zona de recirculação é de grande importância para uma boa difusão da chama de combustão.

A velocidade angular no centro da cavidade do pistão é relativamente alta comparada com a velocidade na região externa da cabeça do pistão.

O ar dentro do cilindro é parcialmente redistribuído, com o fluxo de *Swirl* na parte externa do pistão se deslocando para o centro do cilindro e o ar no centro do cilindro se deslocando para a parte externa.

Isto proporciona, com a mesma quantidade de movimento angular, uma alta velocidade na região central e uma baixa velocidade na região externa.

2.6 EFEITO DA CAVITAÇÃO DO JATO DE INJEÇÃO NAS EMISSÕES

Em motores a diesel o jato de combustível ao sair do orifício é afetado por cavitação que ocorre exatamente no orifício, conforme mostrado na figura 2.6.1 abaixo.

Figura 2.6.1 – Spray formado na saída do injetor

Fonte: TABAR *et al.*, (2013)

A cavitação é um dos principais fenômenos que influenciam significativamente as características do spray de combustível.

De acordo com VILLIERS *et al.*,(2004), a característica do spray é fortemente afetada pelo comportamento do fluxo no injetor e pela proporção necessária para dar início ao processo de pré-mistura.

O fenômeno de cavitação ocorre no combustível quando a pressão estática é menor do que a pressão do vapor saturado do combustível.

Quando o fenômeno de cavitação ocorre dentro do furo do injetor, vapor de combustível ocupa uma parte da área no canal do injetor. De qualquer maneira, a área da seção transversal do furo no plano de saída continua com combustível líquido e fluxo estrangulado pela pequena área de passagem do canal do injetor com aumento significativo de velocidade do líquido, aumentando a penetração do spray e seu comprimento e sua evaporação e diminuindo o diâmetro das gotículas de combustível.

A penetração do jato de combustível aumenta significativamente até 30 MPa, mas continua aumentando até se atingir 120MPa. Depois desta pressão de injeção, o efeito de cavitação deteriora a penetração de spray diminuindo sua penetração conforme mostrado na figura 2.6.2 abaixo:

Figura 2.6.2 –Variação da penetração de spray em função das pressões de injeção

Fonte: TABAR *et al.*,(2013)

Em seus estudos TABAR *et al.*,(2012) afirmam que quando a cavitação é severa, mais bolhas são formadas. Algumas destas bolhas colidem com o orifício do injetor causando mais turbulência no fluxo de combustível passando pelo orifício. Esta

situação contribui para a quebra primária do spray e sua dissipação, propiciando desintegração do jato e consequente diminuição do diâmetro das gotas, com uma melhoria da qualidade do spray.

2.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA - ANOVA - DAS AMOSTRAS COLETADAS

Segundo TRIOLA, (1999) utiliza-se o método de ANOVA para testar a afirmação de que três ou mais populações têm a mesma média. Para tanto, faz-se necessário o cálculo dos seguintes fatores para conseguirmos calcular o F e compará-lo com o F tabelado (Crítico).

Agora, para este caso, temos as seguintes hipóteses:

$H_0: \mu_{Swirl\ misturado} = \mu_{Swirl\ normal} = \mu_{Swirl\ alto}$ (Hipótese nula = Não existe diferença entre as médias amostrais)

$H_1: \mu_{Swirl\ misturado} \neq \mu_{Swirl\ normal} \neq \mu_{Swirl\ alto}$ (Existe diferença entre as médias amostrais)

Para avaliar as hipóteses, é necessário o cálculo da soma total dos quadrados das diferenças que é uma medida de variação total (em torno de $\bar{x}$) para todos os dados amostrais combinados como apresentado pela equação (20) :

$$SQ_{total} = \sum (x - \bar{x})^2 \quad (20)$$

Segundo TRIOLA, (1999), o SQ (tratamento) é uma medida de variação entre as médias amostrais. E como é uma medida de variabilidade entre as médias amostrais, é também conhecida como SQ em grupo ou SQ em amostras e é calculado através da equação (21):

$$SQ_{tratamento} = n_1(\bar{x}_1 - \bar{\bar{x}})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{\bar{x}})^2 = \sum n_i(\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 \quad (21)$$

Onde:

SQ (tratamento) = Soma dos quadrados do tratamento;

Para o SQ (erro), este é uma soma de quadrados que representa a variabilidade que supomos seja comum a todas as amostras em consideração que é dada pela equação (22):

$$SQ_{erro} = (n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2 = \sum (n_i - 1)S_i^2 \quad (22)$$

Onde:

SQ_{erro} = Soma dos quadrados dos resíduos;

Então chegamos ao valor de $SQ_{total} = SQ_{tratamento} + SQ_{erro}$

Para o caso do tratamento dos valores da amostra, temos a equação (23) e (24):

$$QM_{tratamento} = \frac{SQ_{tratamento}}{k-1} \quad (23)$$

e

$$QM_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{N-k} \quad (24)$$

Portanto,

$$QM_{total} = \frac{SQ_{total}}{N-1} \quad (25)$$

Finalmente, F pode ser calculado pela equação (26):

$$\mathcal{F} = \frac{QM_{tratamento}}{QM_{erro}} \quad (26)$$

Se $\mathcal{F} > \mathcal{F}_{CRÍTICO}$, rejeitamos H_0 ao nível de significância adotado de 95% , podendo-se inferir que para o modelo proposto é adequado afirmar que as médias das amostras são diferentes e que neste caso, deve-se proceder com uma análise complementar conhecida por *Tukey* , que identifica quais são as médias diferentes.

2.8 TESTE DE TUKEY PARA ANOVA DAS AMOSTRAS

VIEIRA,(1980), afirma que o teste de Tukey permite estabelecer a menor diferença de média das amostras tomada como estatisticamente significativa em determinado nível. Para chegar a este valor, calculamos o valor de d.m.s , dada pela equação (27):

$$d.m.s = q \sqrt{\frac{QM\mathcal{R}}{r}} \quad (27)$$

Onde :

$QM\mathcal{R}$ = é o quadrado médio do resíduo;

r = é o número de repetições de cada tratamento;

q = é um valor tabelado definido pelo número de tratamento e a quantidade de graus de liberdade no resíduo (No nosso caso = 3,46);

De acordo com VIEIRA,(1980), para o teste de Tukey, duas médias são estatisticamente diferentes toda vez que o valor absoluto da diferença entre elas for igual ou superior ao valor da d.m.s.

3 METODOLOGIA

O projeto foi dividido em fases, cada qual com uma entrega a ser realizada. As fases estão descritas abaixo:

- Fase 1: Mensurado o nível de Swirl de uma população de **100 cabeçotes**;
- Fase 2: Categorização em 3 grupos pelo nível de *Swirl* como segue abaixo:
 - 1º Grupo de 5 cabeçotes com nível de *Swirl* alto próximo a **1,19***;
 - 2º Grupo de 5 cabeçotes com nível de *Swirl* reduzido próximo a **1,03***;
 - 3º Grupo de 5 cabeçotes com nível de *Swirl* misturado entre a faixa de **1,03 à 1,19***

Figura 3.1 –Equipamentos utilizados para medição do número de *Swirl* para cada cabeçote

Fonte:Autor

* Todos os dados amostrais coletados durante os testes de *swirl* foram subtraídos de uma fração do menor valor encontrado, de modo a manter o sigilo e confidencialidade dos dados da empresa.

➤ Fase 3: Os cabeçotes de cada grupo foram montados no motor para a análise dos gases e desempenho utilizando os seguintes equipamentos:

1. Analisador de gás para NO_x, CO, THC utilizando **HORIBA MEXA 7100 DEGR**;

Figura 3.2 –Analisador de gás Horiba

Fonte: Autor

2. Medidor de fumaça (FSN) utilizando o equipamento **SMOKE METER AVL 415SE** (desvio máximo de +/- 0,15 FSN).

Figura 3.3 –Medidor de fumaça

Fonte: Autor

3. Medidor de opacidade (OPC) utilizando o equipamento **OPACIMETER AVL 439** (incerteza da medida $\pm 0,17\%$)

Figura 3.4 –Medidor de opacidade

Fonte: Autor

4. Dinamômetro para avaliação do Torque utilizando **Dynamometer Schenck W700**.

Figura 3.5 –Medidor de Torque

Fonte: Autor

5. Consumo de combustível utilizando o equipamento – **AVL Mass Flow Meter 735** (incerteza de 0,12%)

Figura 3.6 –Medidor de vazão de combustível

Fonte: Autor

- Fase 4: Os métodos de medição utilizados foram o ciclo ESC de 13 pontos conforme mostrado na figura 3.7 abaixo, que é utilizado para a certificação de motores quanto às emissões de poluentes, e o método de plena carga do motor com alteração de massa de combustível injetada;

Figura 3.7- Ciclo ESC 13 pontos

Fonte: Adaptado de Diesel Engine Management – Systems and components

Tabela 1 – Tempos para cada ponto padronizados conforme norma NBR15634.

Modos do Ciclo	Rotação	Torque %	Peso ponderação	Tempo em minutos.
1	Marcha lenta	-	0,15	4
2	A	100	0,08	2
3	B	50	0,1	2
4	B	75	0,1	2
5	A	50	0,05	2
6	A	75	0,05	2
7	A	25	0,05	2
8	B	100	0,09	2
9	B	25	0,1	2
10	C	100	0,08	2
11	C	25	0,05	2
12	C	75	0,05	2
13	C	50	0,05	2

Fonte: Adaptado da Norma ABNT NBR 15634

O torque, apresentado como porcentagem na tabela 1 acima , utiliza como base os valores de torque a plena carga do motor nas condições originais de regulagem, nas rotações especificadas.

3.1 MEDIÇÃO DOS CABEÇOTES

O número de *Swirl* foi medido e tabelado para cada cabeçote conforme mostrado na tabela 2 abaixo. Após os testes, os cabeçotes foram identificados para posterior categorização e consequente montagem no motor.

Tabela 2 – Número de *Swirl* para cada cabeçote de motor¹.

Identificação dos Cabeçotes	Swirl medidos	Identificação dos Cabeçotes	Swirl medidos
1	1,1318	51	1,0972
2	1,1554	52	1,0675
3	1,1494	53	1,1152
4	1,1505	54	1,1001
5	1,1161	55	1,1399
6	1,1208	56	1,1710
7	1,1044	57	1,1505
8	1,1555	58	1,1016
9	1,1538	59	1,1348
10	1,1607	60	1,1449
11	1,1486	61	1,1622
12	1,1459	62	1,1472
13	1,1798	63	1,1877
14	1,1384	64	1,1441
15	1,1019	65	1,1488
16	1,1059	66	1,1532
17	1,0649	67	1,1582
18	1,1512	68	1,1580
19	1,1395	69	1,1227
20	1,0628	70	1,1446
21	1,2126	71	1,1462
22	1,1381	72	1,1345
23	1,1573	73	1,1596
24	1,1114	74	1,0993
25	1,1552	75	1,1500
26	1,0771	76	1,1241
27	1,1467	77	1,1859
28	1,1129	78	1,1077
29	1,1168	79	1,1602
30	1,0556	80	1,1109
31	1,1582	81	1,1522
32	1,1652	82	1,1024
33	1,0509	83	1,1992
34	1,1155	84	1,1275
35	1,0814	85	1,0402
36	1,1169	86	1,1814
37	1,1720	87	1,1156
38	1,0999	88	1,1588
39	1,1461	89	1,1463
40	1,1152	90	1,1207
41	1,1362	91	1,0912
42	1,1350	92	1,0956
43	1,1178	93	1,1690
44	1,0992	94	1,1311
45	1,1170	95	1,1367
46	1,1161	96	1,1285
47	1,1198	97	1,0928
48	1,1678	98	1,0000
49	1,1495	99	1,1386
50	1,1400	100	1,1117

Fonte: Autor

¹ Resultados em relação ao menor valor de número de *swirl* encontrado em todo conjunto dos ensaios, ao qual foi atribuído um valor constante.

3.2 CATEGORIZAÇÃO DOS GRUPOS PELO NÍVEL DE SWIRL

A figura 3.2.1 abaixo mostra a dispersão de todos os números de *Swirl* medidos para os 100 cabeçotes, bem como as linhas de limite superior e inferior admissível para o nível de *Swirl*. Conforme observado, foram categorizados 3 grupos de cabeçotes pelo nível de *Swirl*.

Figura 3.2.1 – Número de *Swirl* para 100 cabeçotes medidos²

Fonte: Autor

Legenda

- Cabeçotes Swirl Baixa turbulencia
- Cabeçotes Swirl Alta turbulencia
- Cabeçotes com Swirl Misturado

² Resultados em relação ao menor valor de número de *swirl* encontrado em todo conjunto dos ensaios, ao qual foi atribuído um valor constante.

3.3 ENSAIO DO MOTOR COM OS CABEÇOTES CATEGORIZADOS

Após as medições e categorização dos 3 grupos de cabeçotes, foi realizado o planejamento para montagem dos mesmos no motor para teste em dinamômetro, tendo sido programados 3 testes junto a fábrica de motores conforme mostrado na figura 3.3.1 abaixo.

Figura 3.3.1 – Montagem do motor antes dos testes no dinamômetro

Fonte: Autor

O motor, com a especificação apresentada na tabela 3 abaixo, sem EGR, com turbo compressor, foi instalado no dinamômetro, com todos os equipamentos e sensores auxiliares para tomada de medição dos parâmetros de injeção, emissão e refrigeração do motor.

Tabela 3 – Especificação do motor usado no teste.

Número de Cilindros	5
Potência máxima do motor	228Kw à 1900 rpm
Torque máximo	1550Nm entre 1100 à 1350 rpm
Tipo do sistema de injeção	UIS dual rail, com válvula solenóide
Número de furos por injetor	8x148°
Diâmetro dos furos	0,194 mm
Cilindrada do motor	9,3 dm ³
Pressão de injeção	1600 bar
Diâmetro do cilindro	130 mm
Altura do cilindro	140 mm
Duração da injeção ciclo ESC	Ver tabela 4

Fonte: Autor

Os dados referentes a injeção e emissões foram coletados para posterior análise e comparação, com a finalidade de se identificarem possíveis diferenças entre os grupos de cabeçotes com diferentes níveis de *Swirl*.

Figura 3.3.2 – Fotos durante os testes do motor no dinamômetro.

Fonte: Autor

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TESTES REALIZADOS

No decorrer dos testes, foram levantados dados levando-se em consideração 2 condições:

1º condição: Teste em ciclo ESC 13 pontos, com tempo de injeção original o qual está apresentado na tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Instantes originais de início e fim da injeção no ciclo ESC para o motor testado³

RPM	CARGA	SOI (BTDC)	EOI	Tempo em ms
600	IDLE	-4,29	-2,90	0,19
1250	A100%	-7,62	18,90	4,12
1600	B50%	-6,96	9,50	2,13
1600	B75%	-8,74	14,10	2,79
1250	A50%	-5,28	8,70	2,44
1250	A75%	-7,03	12,90	3,24
1250	A25%	-2,89	4,40	1,55
1600	B100%	-11,11	18,60	3,51
1600	B25%	-3,98	6,10	1,46
1950	C100%	-12,64	18,10	2,93
1950	C25%	-5,58	6,60	1,34
1950	C75%	-11,92	12,40	2,38
1950	C50%	-8,11	9,80	1,83

Fonte: Autor

Para esta condição, coleta-se e compara-se os valores amostrais obtidos de emissão e desempenho do motor para os 3 grupos de cabeçotes categorizados.

2º condição: Teste em plena carga, com alteração do tempo total de injeção.

Segue abaixo a tabela 5 com as condições de instante de injeção utilizadas no motor em dinamômetro.

Tabela 5 – Instantes de início e fim da injeção no ciclo a plena carga para o motor testado, nas condições nominal (original), prolongado e reduzido⁴.

Rpm	Ângulo (°)		Tempo de injeção (ms)					
	SOI (BTDC) Nominal	EOI (Tempo de injeção prolongado)	EOI (Nominal)	EOI (Tempo de injeção reduzido)	Prolongado	Nominal	Reduzido	
1950	-10,3	16,2	15,1	14,2	1,62	1,56	1,51	
1900	-8,8	18,6	17,4	16,2	1,77	1,71	1,63	
1720	-8,5	17,7	16,6	15,6	2,01	1,94	1,87	
1600	-8,8	16,6	15,6	14,7	2,21	2,14	2,06	
1540	-7,7	17,3	16,3	15,4	2,32	2,24	2,16	
1360	-5,6	18,6	17,6	16,8	2,74	2,65	2,56	
1250	-5,3	16,8	15,9	15,0	2,84	2,75	2,64	
1200	-5,2	16,1	15,1	14,3	2,91	2,80	2,70	
1180	-5,3	15,5	14,7	13,9	2,92	2,83	2,73	
1000	-9,3	6,2	5,9	5,6	2,85	2,82	2,77	

Fonte: Autor

³ Resultados em relação ao menor tempo de injeção encontrado, ao qual foi atribuído um valor arbitrário, subtraído de todos os dados amostrais coletados no ensaio. Para os ângulos de injeção foi adotado procedimento análogo para preservar o sigilo dos dados.

⁴ Resultados em relação ao menor tempo de injeção encontrado, ao qual foi atribuído um valor arbitrário, subtraído de todos os dados amostrais coletados no ensaio. Para os ângulos de injeção foi adotado procedimento análogo para preservar o sigilo dos dados.

Onde:

SOI (Nominal) = Início de injeção

EOI (Nominal) = Final da injeção

EOI (Prolongado) = Injeção com aumento de massa de combustível

EOI (Reduzido) = Injeção com redução de massa de combustível

Para estas condições, foram coletados e comparados os valores obtidos de emissão e desempenho do motor para os 3 diferentes grupos de cabeçotes, avaliando-se o impacto da alteração da massa injetada de combustível.

Uma vez que o início de injeção não foi alterado, um ângulo maior de final da injeção (EOI) implica em “tempo prolongado de injeção” e numa maior massa injetada de combustível. O inverso é válido para “tempo de injeção reduzido”.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS GLOBAIS DO CICLO ESC 13 PONTOS

4.1.1 Resultados da variação de emissão de NOx para os diferentes níveis de *swirl*

Figura 4.1.1.1 – Emissão de NOx para grupos de cabeçotes⁵

Fonte: Autor (Barras com mesma letra não diferem ,Tukey $p < 0,05$)

No geral, levando-se em consideração todas as cargas conforme apresentado na figura 4.1.1.1 acima, os cabeçotes com número de *Swirl* elevado tendem a aumentar a emissão de NOx, confirmando o que REITZ et al,(2007) e BENAJS et al.,(2004) afirmaram em seus estudos, ainda que, a rigor, o teste de Tukey só permita confirmar essa observação para algumas condições

Por outro lado, para as condições de 100% de carga, o aumento de *Swirl* parece promover alguma redução de NOx.

Reitz et al (2007) mostraram que com *Swirl* mais elevado, mais ar penetra na chama da combustão quando comparado com casos onde o *Swirl* não é utilizado. O aumento da penetração do ar na chama permite o aumento da temperatura que é o precursor da formação de NOX.

⁵ Resultados em relação ao menor valor de emissão de NOx encontrado, ao qual foi atribuído um valor constante, de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante.

Para analisar em maior detalhe os resultados individuais dos ensaios realizados, nas figuras que seguem são apresentadas as emissões de NOx para cada condição de carga do motor.

Figura 4.1.1.2 – Emissão de NOx para 100% de carga⁶

Fonte: Autor

Na figura 4.1.1.2 acima, nota-se que, para 100% de carga, o motor com os cabeçotes com *Swirl* reduzido mostrou maior emissão de NOx, enquanto que os cabeçotes com *Swirl* misturado aparentemente provocaram redução na emissão de NOx, principalmente na rotação mais elevada.

⁶ Resultados em relação ao menor valor de emissão de NOx encontrado, ao qual foi atribuído um valor constante, de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante.

Figura 4.1.1.3 – Emissão de NOx para 75% de carga⁷

Fonte: Autor

Figura 4.1.1.4 – Emissão de NOx para 50% de carga⁸

Fonte: Autor

⁷ Resultados em relação ao menor valor de emissão de NOx encontrado, ao qual foi atribuído um valor constante, de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante.

⁸ Resultados em relação ao menor valor de emissão de NOx encontrado, ao qual foi atribuído um valor constante, de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante.

Figura 4.1.1.5 – Emissão de NOx para 25% de carga⁹

Fonte: Autor

Observando as figuras 4.1.1.3, 4.1.1.4 e 4.1.1.5, os cabeçotes com *Swirl* alto respondem pelas maiores emissões de NOx, confirmando o que REITZ et al.,(2007) e BENAJS *et al.*,(2004) afirmaram em seus estudos. Tal efeito aparentemente é mais pronunciado nas cargas menores do motor.

Resumindo as observações sobre o efeito do *Swirl* nas emissões de NOx, os resultados indicam que o aumento do *Swirl* provoca um aumento das emissões em cargas reduzidas do motor, onde a possível interação entre os jatos de injeção é minimizada. Já em cargas elevadas (100%), o aumento do *Swirl* aparentemente chega a provocar redução do NOx, consequente à interação dos jatos de combustível que dificulta o acesso de ar às regiões das chamas, confirmando as observações de BENAJS *et al.*,(2004).

⁹ Resultados em relação ao menor valor de emissão de NOx encontrado, ao qual foi atribuído um valor constante, de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante

4.1.2 Resultados da variação de emissão de fumaça (FSN) para os diferentes níveis de *Swirl*

Figura 4.1.2.1 – Emissão de fumaça para grupos de cabeçotes¹⁰

Fonte: Autor (Barras com mesma letra ou sem letras não diferem, Tukey $p < 0,05$)

No geral, levando em consideração todas as cargas conforme apresentado na figura 4.1.2.1, os cabeçotes com número de *Swirl* elevado tendem a reduzir a emissão de fumaça, confirmando o que DEMBINSKI,(2012) havia constatado em seus estudos. Entretanto, para cargas elevadas o efeito aparentemente se inverte, o que é confirmado pelo teste de *Tukey* a 1250 rpm, 100% de carga.

Analogamente ao que foi feito para as medições de NOx, para se analisar em maior detalhe os resultados individuais dos ensaios realizados, as figuras que seguem apresentam os valores de FSN para cada condição de carga do motor.

¹⁰ Resultados em relação a menor valor de emissão de FSN encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.2.2 – Emissão de Fumaça para 100% de carga¹¹

Fonte: Autor

Na figura 4.1.2.2 acima, nota-se que, para 100% de carga, o motor com cabeçotes com *Swirl* reduzido apresentou menores emissões de fumaça a 1250 rpm, enquanto que os cabeçotes com *Swirl* misturado causaram considerável aumento nas emissões de fumaça a 1950 rpm. Para a rotação intermediária não parece haver efeito significativo do *Swirl*.

Figura 4.1.2.3 – Emissão de Fumaça para 75% de carga¹²

Fonte: Autor

¹¹ Resultados em relação a menor valor de emissão de FSN encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

¹² Resultados em relação a menor valor de emissão de FSN encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.2.4 – Emissão de Fumaça para 50% de carga¹³

Fonte: Autor

Figura 4.1.2.5 – Emissão de fumaça para 25% de carga¹⁴

Fonte: Autor

Observando as figuras 4.1.2.3, 4.1.2.4 e 4.1.2.5, em relação à emissão de fumaça, fica evidente que os cabeçotes com *Swirl* alto provocam diminuição das emissões, em acordo com o que foi visto por DEMBINSKI,(2012) .

Também se pode observar que os menores níveis de emissão de FSN são alcançados a 75% da carga do motor.

Resultados em relação a menor valor de emissão de FSN encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

¹⁴ Resultados em relação a menor valor de emissão de FSN encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.1.3 Resultados da variação de emissão de THC para os diferentes níveis de *Swirl*

Figura 4.1.3.1 – Emissão de THC para grupos de cabeçotes¹⁵

Fonte: Autor

No geral, levando-se em consideração o conjunto de cargas conforme apresentado na figura 4.1.3.1, os cabeçotes com número de *Swirl* elevado tendem a reduzir a emissão de THC, principalmente para as maiores cargas. Também observa-se que quanto maior as cargas no motor, menor o nível de emissão de THC.

Como os hidrocarbonetos não queimados normalmente decorrem de regiões de mistura rica com baixo nível de oxigênio para oxidá-los, ou regiões com baixa temperatura, fato que o gráfico acima parece confirmar, cabeçotes que mostraram baixo nível de turbulência foram os que mostraram maior nível de emissão de HC, ainda que, a rigor, as diferenças em cada modo não possam ser confirmadas para significância de 95%, conforme mostrado pelo teste de Tukey.

Nas figuras a seguir, a mesma abordagem, de se apresentar os valores individuais dos ensaios para cada condição de carga do motor, é utilizada para possibilitar uma análise mais detalhada dos resultados obtidos.

¹⁵ Resultados em relação ao menor valor de emissão de THC encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.3.2 – Emissão de THC para 100% de carga¹⁶

Fonte: Autor

Figura 4.1.3.3 – Emissão de THC para 75% de carga¹⁷

Fonte: Autor

¹⁶ Resultados em relação ao menor valor de emissão de THC encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

¹⁷ Resultados em relação ao menor valor de emissão de THC encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.3.4 – Emissão de THC para 50% de carga¹⁸

Fonte: Autor

Figura 4.1.3.5 – Emissão de THC para 25% de carga¹⁹

Fonte: Autor

¹⁸ Resultados em relação ao menor valor de emissão de THC encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

¹⁹ Resultados em relação ao menor valor de emissão de THC encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Nas figuras 4.1.3.2, 4.1.3.3, 4.1.3.4 e 4.1.3.5, fica evidente o aumento significativo das emissões de THC com o aumento da rotação do motor, possivelmente associado ao menor tempo disponível para completar a oxidação do combustível. Observa-se também que o motor com os cabeçotes com *Swirl* reduzido mostrou maior emissão de THC em cargas elevadas, enquanto que os cabeçotes com *Swirl* misturado causaram considerável redução nas emissões de THC em cargas reduzidas, que são as condições de operação com maiores emissões de THC.

4.1.4 Resultados da variação das emissões de CO para os diferentes níveis de *Swirl*

Figura 4.1.4.1 – Emissão de CO para grupos de cabeçotes²⁰

Fonte: Autor (Barras com mesma letra não diferem , tukey $p < 0,05$)

Com relação à emissão de CO, as condições com baixa carga do motor (25%) apresentam uma importância marcante no todo. Em baixas rotações, cabeçotes com *Swirl* reduzido aumentam a emissão de CO conforme identificado por (Reitz et al; 2007) em seus estudos. Cabeçotes com *Swirl* misturado provocaram os melhores

²⁰ Resultados em relação a menor valor de emissão de CO encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

resultados quanto à diminuição da emissão de CO, principalmente quando se observam as condições de emissões mais relevantes.

Analogamente aos demais poluentes as figuras a seguir apresentam os resultados dos valores individuais dos ensaios para cada condição de carga do motor.

Figura 4.1.4.2 – Emissão de CO para 100% de carga²¹

Fonte: Autor

Figura 4.1.4.3 – Emissão de CO para 75% de carga²²

Fonte: Autor

²¹ Resultados em relação a menor valor de emissão de CO encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

²² Resultados em relação a menor valor de emissão de CO encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.4.4 – Emissão de CO para 50% de carga²³

Fonte: Autor

Figura 4.1.4.5 – Emissão de CO para 25% de carga²⁴

Fonte: Autor

Nas figuras 4.1.4.2, 4.1.4.3, 4.1.4.4 e 4.1.4.5, nota-se que em todas as condições de carga as maiores emissões específicas acontecem na rotação mais elevada e que a condição de 25% de carga no motor é a dominante. O motor com os cabeçotes com *Swirl* misturado mostrou menor emissão de CO, nas condições mais críticas, ainda que o teste de Tukey não assegure isso para um nível de confiança de 95%.

²³ Resultados em relação a menor valor de emissão de CO encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

²⁴ Resultados em relação a menor valor de emissão de CO encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor constante de modo a preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.1.5 Resultados da variação de Consumo de combustível para os diferentes níveis de *Swirl*

Figura 4.1.5.1 – Consumo de combustível no ciclo ESC para grupos de cabeçotes²⁵

Fonte: Autor (Barras com mesma letra ou não identificadas não diferem, Tukey $p < 0,05$)

Com relação ao consumo, observa-se que para todas as faixas de rotações e cargas os cabeçotes com *Swirl* misturado permitiram menor consumo específico de combustível.

Observe-se que o consumo específico de combustível é reduzido com o aumento da carga e redução das rotações, ao menos na faixa ensaiada.

Da mesma maneira que para as outras grandezas analisadas, as figuras a seguir apresentam os valores de consumo específico obtidos nos ensaios individuais, organizados por condições de carga do motor.

²⁵ Resultados em relação ao menor valor de consumo específico de combustível encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.5.2 – Consumo de combustível à 100% de carga²⁶

Fonte: Autor

Figura 4.1.5.3 – Consumo de combustível à 75% de carga²⁷

Fonte: Autor

²⁶ Resultados em relação ao menor valor de consumo específico de combustível encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor

²⁷ Resultados em relação ao menor valor de consumo específico de combustível encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor

Figura 4.1.5.4 – Consumo de combustível à 50% de carga²⁸

Fonte: Autor

Figura 4.1.5.5 – Consumo de combustível à 25% de carga²⁹

Fonte: Autor

²⁸ Resultados em relação ao menor valor de consumo específico de combustível encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

²⁹ Resultados em relação ao menor valor de consumo específico de combustível encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Podemos observar nas figuras 4.1.5.2, 4.1.5.3, 4.1.5.4 e 4.1.5.5, que o consumo específico cresce significativamente com o aumento da rotação do motor, independentemente da fração de carga utilizada no ensaio. Além disso, o conjunto de cabeçotes com *Swirl* misturado (*Swirl* médio especificado para o motor) apresentam menor consumo de combustível, enquanto que o ensaio com os cabeçotes com *Swirl* reduzido mostrou considerável aumento de consumo específico.

4.1.6 Resultados da variação de emissão de fuligem para os diferentes níveis de swirl

Figura 4.1.6.1 – Variação da emissão de fuligem para grupos de cabeçotes de Swirl³⁰

Fonte: Autor (Barras com mesma letra ou não identificadas não diferem, Tukey $p < 0,05$)

Conforme apresentado na figura 4.1.6.1 , o motor com os cabeçotes de número de *Swirl* reduzido tende a apresentar maiores emissões de fuligem, principalmente nas rotações de 1250 e 1600 rpm, enquanto que na rotação mais elevada de 1950 rpm, os cabeçotes com *Swirl* misturado provocaram maior emissão de fuligem, confirmando o que DEMBINSKI,(2012) havia constatado em seus estudos. Observe-se também níveis bastante elevados de emissão específica de fuligem em condições

³⁰ Resultados em relação ao menor valor de Fuligem encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

de baixa carga do motor e a redução significativa que o aumento de *swirl* provoca na fuligem emitida nessas condições de operação.

A mesma abordagem já utilizada de apresentar os resultados das medições individuais organizadas por condição de carga do motor é apresentada nas figuras a seguir para a emissão de fuligem.

Figura 4.1.6.2 – Emissão de fuligem para cargas de 100%³¹

Fonte: Autor

Para a condição de 100% de carga, há que se notar a redução de fuligem provocada pelo aumento de *Swirl* em rotação elevada (1950 rpm), enquanto que a 1250 rpm o efeito é o oposto.

³¹ Resultados em relação ao menor valor de Fuligem encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.6.3 – Emissão de fuligem para cargas de 75%³²

Fonte: Autor

Figura 4.1.6.4 – Emissão de fuligem para cargas de 50%³³

Fonte: Autor

³² Resultados em relação ao menor valor de Fuligem encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

³³ Resultados em relação ao menor valor de Fuligem encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.1.6.5 – Emissão de fuligem para cargas de 25%³⁴

Fonte: Autor

Nas figuras 4.1.6.3, 4.1.6.4 e 4.1.6.5, nota-se que para as cargas de 75%, 50% e 25%, os cabeçotes com *Swirl* alto reduzem a emissão de *fuligem*, reforçando o que Dembinski (2012) identificou que aumentando o *Swirl* também proporciona diminuição na emissão de fumaça em altas pressões de injeção.

Também pode-se notar no gráfico 4.1.6.2 que para carga de 100% não fica evidente a redução de *fuligem* pelo nível de *Swirl* o que remete ao que Benaje et al; (2004) identificou que *swirl* muito elevado também, reduz a penetração do spray podendo forçar colisão entre os mesmos afetando diretamente a oxidação da fuligem aumentado assim sua emissão. Provavelmente foi o que aconteceu no caso do gráfico em plena carga mostrado acima, nas rotações de 1250 e 1600 rpm.

³⁴ Resultados em relação ao menor valor de Fuligem encontrado nos ensaios ESC, ao qual foi atribuído um valor arbitrário para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PLENA CARGA COM ALTERAÇÃO DA MASSA DE COMBUSTÍVEL INJETADA

4.2.1 NÍVEIS DE FUMAÇA (FSN) PARA MOTOR EM PLENA CARGA

Figura 4.2.1.1 – Fumaça para os diferentes níveis *Swirl* e massa de combustível injetada³⁵

Fonte: Autor

De acordo com a figura 4.2.1.1 acima, quando o motor é submetido ao carregamento pleno com débito original, em baixas rotações, os cabeçotes com *Swirl* reduzido aumentam a emissão de fumaça enquanto que para rotações acima de 1360 rpm, os cabeçotes com *Swirl* alto passam a aumentar a emissão de fumaça.

Quando injeta-se mais massa de combustível, este comportamento se altera, ou seja, os cabeçotes com *Swirl* reduzido em baixas rotações aumentam a emissão, enquanto para rotações maiores que 1540 rpm cabeçotes com *Swirl* misturado passam a aumentar a emissão de fumaça.

³⁵ Resultados em relação a menor valor de FSN encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.2.1.2 – Emissão de fumaça com injeção original³⁶

Fonte: Autor

A figura 4.2.1.2 acima mostra que cabeçotes com *Swirl* reduzido com o aumento de rotação, tendem a diminuir a emissão de fumaça, enquanto que em baixas rotações provocam um aumento da emissão de fumaça.

Figura 4.2.1.3 – Emissão de fumaça com aumento de massa injetada³⁷

Fonte: Autor

³⁶ Resultados em relação a menor valor de FSN encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

³⁷ Resultados em relação a menor valor de FSN encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Quando injeta-se mais massa de combustível, vemos pela figura 4.2.1.3 acima que o comportamento observado com injeção normal fica atenuado, mas ainda se mantém com a mesma tendência de aumento de FSN em baixas rotações e aumento em altas.

Figura 4.2.1.4 – Emissão de fumaça com redução de massa injetada³⁸

Fonte: Autor

Diminuindo a massa de combustível injetada, os cabeçotes com *Swirl* misturado se destacam na diminuição de emissão de fumaça, enquanto que a vantagem que os cabeçotes com *Swirl* reduzido pareciam ter em rotações elevadas desapareceu.

³⁸ Resultados em relação a menor valor de FSN encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.2.2 RENDIMENTO PARA O MOTOR EM PLENA CARGA

Figura 4.2.2.1 – Variação de rendimento para os diferentes níveis *Swirl* e massa de combustível injetada³⁹

Fonte: Autor

Observando a figura 4.2.2.1 acima, nota-se que os cabeçotes com nível de *Swirl* reduzido e injeção original possuem maior rendimento para todas as rotações da curva em plena carga.

³⁹ Resultados em relação a menor valor de Rendimento encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.2.2.2 – Rendimento com injeção original⁴⁰

Fonte: Autor

Mantendo a regulagem original do sistema de injeção, o rendimento para cabeçotes com *Swirl* reduzido é superior aos demais na grande maioria das rotações ensaiadas, conforme vemos na figura 4.2.2.2 acima.

Figura 4.2.2.3 – Rendimento com aumento de massa na injeção⁴¹

Fonte: Autor

⁴⁰ Resultados em relação a menor valor de Rendimento encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

⁴¹ Resultados em relação a menor valor de Rendimento encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Mesmo com o aumento de massa de combustível, ainda assim os cabeçotes com *Swirl* reduzido mostram vantagens em relação ao rendimento global como mostra a figura 4.2.2.3 acima.

Figura 4.2.2.4 –Rendimento com redução de massa na injeção⁴²

Fonte: Autor

Quando reduz-se a massa de combustível injetada, nota-se que os cabeçotes com *Swirl* misturado passam a ter melhor rendimento conforme mostrado na figura 4.2.2.4 acima.

Aparentemente, a redução do *Swirl* levou a menores perdas térmicas que se refletiram em aumento do rendimento térmico do motor. Note-se que em baixas rotações os cabeçotes com *Swirl* reduzido levam desvantagem em relação aos normais e com *Swirl* elevado.

⁴² Resultados em relação a menor valor de Rendimento encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor constante para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.2.3 NÍVEIS DE OPC PARA MOTOR EM PLENA CARGA

Figura 4.2.3.1 – Nível de opacidade para os diferentes níveis *Swirl* e massa de combustível injetada⁴³

Fonte: Autor

Com cabeçotes com *Swirl* misturado, a opacidade é mais intensa na injeção original conforme pode-se notar em todas as rotações apresentadas na figura 4.2.3.1 acima.

⁴³ Resultados em relação ao menor valor de Opacidade encontrado nos ensaios a plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.2.3.2 – Nível de opacidade com injeção original⁴⁴

Fonte: Autor

O nível de opacidade é elevado com cabeçotes com *Swirl* misturado conforme pode-se notar na figura 4.2.3.2 com injeção original, enquanto que os cabeçotes com *Swirl* reduzido apresentam opacidade reduzida em rotações mais elevadas.

Quando injeta-se mais massa de combustível, os cabeçotes com *Swirl* misturado mantém o elevado nível de opacidade conforme mostrado no gráfico 4.2.3.3 abaixo.

⁴⁴ Resultados em relação ao menor valor de Opacidade encontrado nos ensaios a plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.2.3.3 – Nível de opacidade com aumento da massa de combustível na injeção⁴⁵

Fonte: Autor

Para todos os modos de injeção, os cabeçotes com *Swirl* reduzido são os que apresentam menor índice de opacidade, conforme pode-se observar nas figuras 4.2.3.1, 4.2.3.2 e 4.2.3.3, a menos da rotação de 1000 rpm, onde ocorre algum aumento da opacidade.

⁴⁵ Resultados em relação ao menor valor de Opacidade encontrado nos ensaios a plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

Figura 4.2.3.4 – Nível de opacidade com redução da massa de combustível na injeção⁴⁶

Fonte: Autor

⁴⁶ Resultados em relação ao menor valor de Opacidade encontrado nos ensaios a plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados do fabricante do motor.

4.2.4 TORQUE DO MOTOR EM PLENA CARGA

Figura 4.2.4.1 – Torque para os diferentes níveis de *Swirl* e massa de combustível injetada⁴⁷

Fonte: Autor

Os valores de torque apresentados na Figura 4.2.4.1 para injeção original indicam ligeira vantagem para os cabeçotes com *Swirl* misturado em rotações menores que 1600 rpm, enquanto que a partir dessa rotação a vantagem fica com os cabeçotes com *Swirl* reduzido. Já para débito aumentado ou reduzido, observa-se pequeno ganho de torque com os cabeçotes com *Swirl* misturado. As figuras a seguir apresentam as curvas de torque para as diferentes condições de injeção.

⁴⁷ Resultados em relação a menor valor de Torque encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados pertencentes ao fabricante.

Figura 4.2.4.2 – Torque com injeção original⁴⁸

Fonte: Autor

Figura 4.2.4.3 – Torque com aumento de massa na injeção⁴⁹

Fonte: Autor

⁴⁸ Resultados em relação a menor valor de Torque encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados pertencentes ao fabricante.

⁴⁹ Resultados em relação a menor valor de Torque encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados pertencentes ao fabricante.

Figura 4.2.4.4 – Torque com redução de massa na injeção⁵⁰

Fonte: Autor

Observando-se detalhadamente as figuras 4.2.4.1, 4.2.4.2, 4.2.4.3 e 4.2.4.4 acima pode-se resumir os resultados no seguinte: nota-se que os cabeçotes com *Swirl* elevado não apresentaram qualquer benefício, enquanto que aqueles com *Swirl* reduzido apresentaram pequena vantagem em rotações mais elevadas e alguma desvantagem em rotações menores.

⁵⁰ Resultados em relação a menor valor de Torque encontrado nos ensaios de plena carga, ao qual foi atribuído um valor fixo para preservar o sigilo dos dados pertencentes ao fabricante.

5 CONCLUSÕES

Para o teste em ciclo ESC, foram observados os seguintes efeitos :

Tabela 6 - Matriz de nível de emissão e desempenho em função dos níveis de Swirl para ciclo ESC

CICLO ESC 13 PONTOS - NÍVEL DE EMISSÃO DE GASES E DESEMPENHO

	Carga	NOx	FSN	THC	CO	Consumo combustível	Soot
Swirl reduzido	25%	↓	↑	↕	↑	↕	↑
	50%	↓	↑	↑	↕	↑	↑
	75%	↕	↕	↑	↓	↑	↕
	100%	↑	↓	↑	↑	↕	↓
Swirl alto	25%	↑	↓	↑	↕	↕	↓
	50%	↑	↓	↕	↑	↕	↓
	75%	↑	↓	↕	↑	↕	↓
	100%	↕	↕	↕	↓	↓	↑
Swirl misturado	25%	↕	↕	↓	↓	↓	↕
	50%	↕	↕	↕	↓	↓	↕
	75%	↓	↑	↕	↕	↓	↑
	100%	↓	↑	↓	↕	↓	↕

Fonte: Autor

LEGENDA

↓	Retorno positivo
↕	Retorno neutro
↑	Retorno negativo

Pelo método do ciclo ESC 13 pontos, cujos resultados são apresentados resumidamente na tabela 6, pode-se verificar que o motor com cabeçotes com **Swirl reduzido** tende a apresentar maiores consumos específicos, e cabeçotes com **Swirl misturado** apresentam maiores benefícios em relação ao nível de emissão de poluentes.

Para o teste em plena carga, foram observados os seguintes efeitos :

Tabela 7 - Matriz de nível de emissão e desempenho em função dos níveis de Swirl em Plena Carga

PLENA CARGA - EMISSÃO / DESEMPENHO													
	Carga	Injeção + massa de combustível				Injeção original				Injeção - massa de combustível			
		FSN	Rendimento %	Torque	Opacidade	FSN	Rendimento %	Torque	Opacidade	FSN	Rendimento %	Torque	Opacidade
Swirl reduzido	100%	↓	↑	↕	↓	↓	↑	↕	↕	↑	↕	↕	↓
Swirl alto	100%	↕	↓	↓	↕	↑	↕	↓	↓	↕	↓	↓	↑
Swirl misturado	100%	↑	↕	↑	↑	↕	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↕

Fonte: Autor

LEGENDA

↓	Retorno positivo
↕	Retorno neutro
↑	Retorno negativo

Pelo método em plena carga, apresentado na tabela 7 acima, considerando a calibração original de injeção, pode-se observar que o motor com cabeçotes com **Swirl reduzido** tende a apresentar maiores benefícios tanto em emissões como em rendimento, enquanto que no que diz respeito ao torque, os cabeçotes com **Swirl misturado** se destacaram em baixas rotações e os com **Swirl reduzido** em rotações elevadas.

Entretanto, não foi possível confirmar que essa vantagem tenha sido proveniente do fato dos 5 cabeçotes com **Swirl reduzido** terem valores de *Swirl* muito próximos entre si, enquanto que na categoria dos **misturados** as diferenças entre cabeçotes eram muito maiores.

6 DESDOBRAMENTO DO TRABALHO

Como desdobramento deste trabalho, podem-se sugerir os seguintes pontos:

- Aumentar o número de repetições na coleta de dados em plena carga;
- Em vez de trabalhar com “*Swirl* misturado”, escolher um intervalo representativo da mediana da distribuição do número de *Swirl*;
- Trabalhar com tecnologia de sistema de injeção *common rail* explorando o ponto de início e a duração da injeção;

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, 1988.

Merker, G. P.; Schwarz, C.; Teichmann, R.. **Combustion engines development**. Springer, 2009.

Challen, B.; Baranescu, R. **Diesel engine reference book**. Butterworth Heinemann, 1984.

Gafoor C.P, Abdul.; Gupta, Rajesh. Numerical investigation of piston bowl geometry and swirl ratio on emission from diesel engines. **Journal of energy conversion and management**, India,v.101,p. 541-551, 2015.

Gafoor, Abdul and Gupta , Rashej. **Numerical investigation of pistow bowl geometry and swirl ratio on emission from diesel engines** – MANIT , Bhopal. 2015

Su, Liwang.; Li, XiangRong.; Zhang, Zheng.; Liu, FuShui. Numerical analysis on the combustion and emission characteristics of forced swirl combustion system for DI diesel engines. **Journal of energy conversion and management**, China,v.86,p. 20-27, 2014.

H. M. KIM.; W. J. CHO .; K. H. LEE. effect of injection condition and swirl on d.i. diesel combustion in a transparent engine system. **International Journal of Automotive Technology**, Korea , v.9, p. 535-541, 2008.

M.Gorji,Bandpy.; ,S,Soleimani.; D,D,Ganji. The Effect of Different Injection Strategies and Intake Conditions on the Emissions Characteristics in a Diesel Engine. **International Journal of Vehicular Technology**, Iran, 2009.

Wei, Shengli.; Ji, Kunpeng.; Leng, Xianyin.; Wang, Feihu.; Liu, Xin. Numerical simulation on effects of spray angle in a swirl chamber combustion system of DI (direct injection) diesel engines. **Journal of energy**, China,v.75,p. 289-294, 2014.

Han, Sangwook.; Kim, Jaeheun.; Bae, Choongsik. Effect of air–fuel mixing quality on characteristics of conventional and low temperature diesel combustion. **Journal of Applied Energy**, Korea,v.119,p. 454-466, 2014.

Kiplimo,Robert.;Tomita,Eiji.; Nobuyuki,Kawara.;Sumito,Yokobe. Effects of spray impingement, injection parameters and EGR on trhe combustion and emission characteristics of a PCCI diesel engine. **Journal of applied thermal engineering**, Japan,v.37,p. 165-175, 2012.

Watanabe,Hiroaki.;Tahara,Toshihiro.;Tamanouchi,Mitsuo.;Lida,jihei. Study of the effects on exhaust emissions in direct injection diesel engines: Effects of fuel injection system, distillation properties and cetane number. **Society of automotive engineers of Japan**, Japan,v.19,p. 21-26, 1998.

Mohan, Balaji.;Yang,Wenming.;Chou Kiang,Siaw.Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines. **Renewable and sustainable energy reviews**, Singapore,v.28,p. 664-676, 2013.

Agarwal D, SinghSK, Agarwal AK. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) on performance, emissions, deposits and durability of a constant speed compression ignition engine. **Applied Energy**,2011;88:2900–7.

Adler U.Diesel fuel injection.Germany:Robert Bosch GmBH;1994.

Cartellieri W, KrieglerW, Schweinzer F. Strategies to meet world wide heavy- duty diesel emissions standards. **Journal of Automobile Engineering** 1991;206: 161–71.

Emami,Sajjad.;Jafarmadar,Samad. Multidimensional modeling of the effect of fuel injection pressure on temperature distribution in cylinder of a turbocharged DI diesel engine. **Propulsion and Power research**, Iran,v.2,p. 162-175, 2013.

Johnson, T. V. Diesel emission control in review, **SAE Paper**, 2001, 2001-01-0184.

Benajes,J.; Molina,S.; Garcia,M,J; Riesco,M,J. The effect of swirl on combustion and exhaust emissions in heavy duty diesel engines. **Proc. Instn. Mech. Engrs, Part D: J. Automobile Engineering**, 2004, **218**, p. 1141-1148.

Miles,Paul C.;Hildingsson,Leif.;Hultqvist,Anders. The influence of fuel injection and heat release on bulk flow structures in a direct-injection, swirl-supported diesel engine . **Journal of exp Fluids**, USA,v.43,p.273-283,2007.

Miles,Paul C.; Choi D.; Pickett LM.; Singh IP.; Henein N.; RempelEwert BH.; Yun H.; Reitz RD. Rate-limiting processes in late injection, low-temperature diesel combustion regimes, In: Proceedings of the THIESEL 2004. **thermo and fluid dynamic processes in diesel engines**, Valencia, 2004.

Dembinski, Henrik.; Angstrom, Hans-Erik. Swirl and Injection Pressure Effect on Post-Oxidation Flow Pattern Evaluated with Combustion Image Velocimetry, CIV, and CFD Simulation. **SAE International**, Sweden, 2013.

Dembinski, Henrik. Flow measurements using combustion image velocimetry in diesel engines. **Licentiate thesis - Royal Institute of Technology** , Sweden, 2012.

Reitz, R. D. et al. Fuel Injection and Mean Swirl Effects on Combustion and fuligem Formation in Heavy Duty Diesel Engines. **SAE** 2007-01-0912.

Tabar Shervani Taghi,Mohammad.;Sheykhvazayefi,Meysan;Ghorbani,Moretza. Numerical study on the effect of the injection pressure on spray penetration length. **Applied Mathematical Modelling**, Iran,v.37,p. 7778-7788, 2013.

E. De Villiers, A. Gosman, H. Weller, Large Eddy simulation of primary diesel spray atomization, **SAE Paper**, 2004, 01-0100.

Triola, F. M. Introdução à estatística. **LTC**, 1999.

Vieira,S. Introdução à Bio estatística. Editora Campus, 1980.

OTTOSSON, S.; HOLMBERG, T. The Effect of Different Valve Strategies on In-Cylinder Flow, Emissions and Performance in a Heavy Duty Diesel Engine. **KTH Industrial Engineering and Management**. Stockholm, p. 89. 2011.

APÊNDICE A – Tabelas e resultados do cálculo de ANOVA⁵¹

- Análise de variância em relação ao *Swirl* para 100% de carga à 1250 rpm;

Com o F crítico de 5,14, a tabela A1 abaixo apresenta os valores de F calculado para a análise de variância para cada variável dependendo do nível de *Swirl*. Nota-se na tabela A1 abaixo as diferenças significativas em algumas variáveis que possuem o F calculado maior que o F crítico, confirmando que existe diferença entre os valores de amostra de *fuligem*, fumaça, CO e consumo de combustível, indicando diferença entre os níveis de *Swirl*.

Tabela A1–Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de *Swirl*

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.08679	2	0.04340	0.08408	6	0.01401	3.09668	0.119147
soot	0.00001	2	0.00001	0.00001	6	0.00000	7.00000	0.027000
FSN	0.00176	2	0.00088	0.00087	6	0.00014	6.07692	0.036103
THC	0.00017	2	0.00009	0.00039	6	0.00006	1.33048	0.332473
CO	0.00061	2	0.00031	0.00016	6	0.00003	11.50209	0.008853
FATOR U	0.54000	2	0.27000	0.22000	6	0.03667	7.36364	0.024256
POTENCIA	1.72667	2	0.86333	1.11333	6	0.18556	4.65269	0.060245
TORQUE	89.55556	2	44.77778	66.66667	6	11.11111	4.03000	0.077714

Fonte: Autor

A tabela A2 abaixo nos mostra diferença significativa entre os cabeçotes de ***Swirl reduzido e alto***, com relação as amostras coletadas da emissão de *fuligem*, onde R (Reduzido), M (Misturado) e H (Alto). Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A2 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=.00700	{2} M=.00800	{3} M=.01000
1250 R {1}		0.482874	0.024346
1250 M {2}	0.482874		0.109003
1250 H {3}	0.024346	0.109003	

Fonte: Autor

⁵¹ Resultados em relação ao menor valor encontrado para cada parâmetro em todo o conjunto de ensaio ESC, aos quais foram atribuídos valores fixos de modo a preservar o sigilo dos dados.

A tabela A3 abaixo nos indica diferença significativa entre os valores de amostras de fumaça para cabeçotes de **Swirl reduzido e alto**.

Para estas diferenças, pode-se rejeitar a hipótese nula de que nestes casos os níveis de *Swirl* são iguais, ou seja, existe significância elevada, indicando que temos diferença significativa da emissão de fumaça entre os cabeçotes apresentados na figura 4.1.2.1.

Tabela A3 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.08000	{2} M=.09000	{3} M=.11333	
1250 R {1}		0.592933	0.033699	
1250 M {2}	0.592933		0.119433	
1250 H {3}	0.033699	0.119433		

Fonte: Autor

Para CO, a tabela A4 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras de CO para cabeçotes de **Swirl misturado e alto**. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.4.1.

Tabela A4 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.23000	{2} M=.21767	{3} M=.23767	
1250 R {1}		0.059363	0.241196	
1250 M {2}	0.059363		0.007657	
1250 H {3}	0.241196	0.007657		

Fonte: Autor

Para consumo de combustível, a tabela A5 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras referentes ao consumo para cabeçotes de **Swirl misturado e alto**. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.5.1.

Tabela A5 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=195.40	{2} M=195.10	{3} M=195.70	
1250 R {1}		0.213806	0.213806	
1250 M {2}	0.213806		0.020208	
1250 H {3}	0.213806	0.020208		

Fonte: Autor

- Análise de variância em relação ao *Swirl* para 100% de carga à 1600 rpm;

Pela tabela A6 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença apenas no consumo de combustível conforme mostrado abaixo.

Tabela A6 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de *Swirl*

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at $p < .05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.0109	2	0.00543	0.0495	6	0.00825	0.65793	0.551641
soot	0.0000	2	0.00000	0.0000	6	0.00000	0.15556	0.859283
FSN	0.0001	2	0.00003	0.0017	6	0.00029	0.11538	0.892953
THC	0.0004	2	0.00018	0.0008	6	0.00013	1.39389	0.318286
CO	0.0001	2	0.00004	0.0001	6	0.00001	4.60714	0.061334
FATOR U	1.6022	2	0.80111	0.2067	6	0.03444	23.25806	0.001491
POTENCIA	4.6022	2	2.30111	3.2933	6	0.54889	4.19231	0.072570
TORQUE	160.8889	2	80.44444	111.3333	6	18.55556	4.33533	0.068408

Fonte: Autor

A tabela A7 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes de todos os níveis de *Swirl* conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A7 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Consumo de combustível

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at $p < .05000$		
	{1} M=197.60	{2} M=197.10	{3} M=198.13
1600 R {1}		0.037850	0.029141
1600 M {2}	0.037850		0.001370
1600 H {3}	0.029141	0.001370	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 100% de carga à 1950 rpm;

Pela tabela A8 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença no consumo de combustível.

Tabela A8 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.0217	2	0.0109	0.08295	6	0.01382	0.78663	0.497283
soot	0.0000	2	0.0000	0.00004	6	0.00001	2.40000	0.171468
FSN	0.0020	2	0.0010	0.00227	6	0.00038	2.67647	0.147614
THC	0.0011	2	0.0006	0.00137	6	0.00023	2.50073	0.162219
CO	0.0000	2	0.0000	0.00004	6	0.00001	2.94340	0.128606
FATOR U	2.8022	2	1.4011	0.70667	6	0.11778	11.89623	0.008168
POTENCIA	42.6867	2	21.3433	3.29333	6	0.54889	38.88462	0.000367
TORQUE	976.8889	2	488.4444	86.00000	6	14.33333	34.07752	0.000530

Fonte: Autor

A tabela A9 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes para os níveis de **Swirl misturado e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A9 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Consumo de combustível

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=209.70	{2} M=209.00	{3} M=210.37
1950 R {1}		0.102465	0.119224
1950 M {2}	0.102465		0.006782
1950 H {3}	0.119224	0.006782	

Fonte: Autor

A tabela A10 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto mais Swirl reduzido e alto**.

Tabela A10 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=218.23	{2} M=219.67	{3} M=214.50
1950 R {1}		0.120705	0.002191
1950 M {2}	0.120705		0.000532
1950 H {3}	0.002191	0.000532	

Fonte: Autor

A tabela A11 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes com os níveis de **Swirl** misturado e alto mais **Swirl** reduzido e alto.

Tabela A11 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=1068.7	{2} M=1075.3	{3} M=1050.7
1950 R {1}		0.158323	0.002890
1950 M {2}	0.158323		0.000687
1950 H {3}	0.002890	0.000687	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 75% de carga à 1250 rpm;

Pela tabela A12 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de fumaça, CO, consumo de combustível, potência e torque.

Tabela A12 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.01372	2	0.00686	0.061188	6	0.010198	0.6726	0.545076
soot	0.00000	2	0.00000	0.000011	6	0.000002	1.2353	0.355396
FSN	0.00082	2	0.00041	0.000467	6	0.000078	5.2857	0.047465
THC	0.00027	2	0.00013	0.000787	6	0.000131	1.0161	0.416825
CO	0.00040	2	0.00020	0.000067	6	0.000011	17.9200	0.002949
FATOR U	1.81556	2	0.90778	0.306667	6	0.051111	17.7609	0.003017
POTENCIA	1.55556	2	0.77778	0.033333	6	0.005556	140.0000	0.000009
TORQUE	99.55556	2	49.77778	2.000000	6	0.333333	149.3333	0.000008

Fonte: Autor

A tabela A13 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes com os níveis de **Swirl** misturado e alto conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A13 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.09000	{2} M=.10333	{3} M=.08000
1250 R {1}		0.232509	0.403822
1250 M {2}	0.232509		0.040657
1250 H {3}	0.403822	0.040657	

Fonte: Autor

A tabela A14 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para CO para cabeçotes com os níveis de **Swirl** reduzido e misturado e para **Swirl** alto e misturado conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1.

Tabela A14 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.26300	{2} M=.24700	{3} M=.25767
1250 R {1}		0.002761	0.203142
1250 M {2}	0.002761		0.018442
1250 H {3}	0.203142	0.018442	

Fonte: Autor

A tabela A15 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de **Swirl** reduzido e misturado e para **Swirl** alto e misturado conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A15 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=195.10	{2} M=194.03	{3} M=194.80
1250 R {1}		0.002998	0.306693
1250 M {2}	0.002998		0.014264
1250 H {3}	0.306693	0.014264	

Fonte: Autor

A tabela A16 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência para cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A16 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=148.90	{2} M=149.57	{3} M=148.57
1250 R {1}		0.000276	0.003886
1250 M {2}	0.000276		0.000228
1250 H {3}	0.003886	0.000228	

Fonte: Autor

A tabela A17 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A17 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=1137.3	{2} M=1142.7	{3} M=1134.7
1250 R {1}		0.000265	0.003321
1250 M {2}	0.000265		0.000227
1250 H {3}	0.003321	0.000227	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 75% de carga à 1600 rpm;

Pela tabela A18 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de fuligem, CO, consumo de combustível, potência e torque.

Tabela A18 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.0044	2	0.0022	0.045514	6	0.007586	0.2932	0.755979
soot	0.0000	2	0.0000	0.000005	6	0.000001	5.2857	0.047465
FSN	0.0005	2	0.0002	0.001133	6	0.000189	1.2353	0.355396
THC	0.0003	2	0.0002	0.001489	6	0.000248	0.6249	0.566865
CO	0.0003	2	0.0002	0.000057	6	0.000010	15.9535	0.003965
FATOR U	0.8600	2	0.4300	0.400000	6	0.066667	6.4500	0.031994
POTENCIA	6.2489	2	3.1244	0.086667	6	0.014444	216.3077	0.000003
TORQUE	219.5556	2	109.7778	2.000000	6	0.333333	329.3333	0.000001

Fonte: Autor

A tabela A19 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de CO para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1.

Tabela A19 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.24633	{2} M=.25100	{3} M=.26033	
1600 R {1}		0.233295	0.003651	
1600 M {2}	0.233295		0.023693	
1600 H {3}	0.003651	0.023693		

Fonte: Autor

A tabela A20 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e misturado** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A20 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=198.57	{2} M=197.87	{3} M=198.47	
1600 R {1}		0.036917	0.885691	
1600 M {2}	0.036917		0.066014	
1600 H {3}	0.885691	0.066014		

Fonte: Autor

A tabela A21 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência para cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A21 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=166.20	{2} M=165.80	{3} M=164.27	
1600 R {1}		0.015509	0.000227	
1600 M {2}	0.015509		0.000228	
1600 H {3}	0.000227	0.000228		

Fonte: Autor

A tabela A22 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A22 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=991.67	{2} M=989.67	{3} M=980.33
1600 R {1}		0.012961	0.000227
1600 M {2}	0.012961		0.000227
1600 H {3}	0.000227	0.000227	

Fonte: Autor

A tabela A23 abaixo nos mostra diferença significativa entre os cabeçotes de **Swirl misturado e alto**, com relação as amostras coletadas da emissão de fuligem. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A23 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=.01100	{2} M=.01233	{3} M=.01000
1600 R {1}		0.232509	0.403822
1600 M {2}	0.232509		0.040657
1600 H {3}	0.403822	0.040657	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 75% de carga à 1950 rpm;

Pela tabela A24 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de NOx, fuligem, fumaça, CO, Potência e torque.

Tabela A24 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.155	2	0.0773	0.051581	6	0.008597	8.986	0.015680
soot	0.000	2	0.0001	0.000017	6	0.000003	32.920	0.000583
FSN	0.007	2	0.0037	0.000733	6	0.000122	30.091	0.000745
THC	0.002	2	0.0010	0.001223	6	0.000204	4.767	0.057620
CO	0.001	2	0.0003	0.000118	6	0.000020	14.006	0.005490
FATOR U	1.887	2	0.9433	1.433333	6	0.238889	3.949	0.080469
POTENCIA	44.629	2	22.3144	0.020000	6	0.003333	6694.333	0.000000
TORQUE	1041.556	2	520.7778	0.666667	6	0.111111	4687.000	0.000000

Fonte: Autor

A tabela A25 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de NOx para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.1.1.

Tabela A25 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para NOx

Tukey HSD test; Variable: NOx (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=9.7603	{2} M=9.7100	{3} M=10.010	
1950 R {1}		0.791415	0.038127	
1950 M {2}	0.791415		0.017656	
1950 H {3}	0.038127	0.017656		

Fonte: Autor

A tabela A26 abaixo nos mostra diferença significativa entre todos os níveis de *Swirl* e seus cabeçotes com relação as amostras coletadas da emissão de fuligem. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A26 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.01967	{2} M=.02600	{3} M=.01500	
1950 R {1}		0.008465	0.032422	
1950 M {2}	0.008465		0.000654	
1950 H {3}	0.032422	0.000654		

Fonte: Autor

A tabela A27 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre todos os níveis de *Swirl*, conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A27 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.13000	{2} M=.16667	{3} M=.09667	
1950 R {1}		0.015751	0.023833	
1950 M {2}	0.015751		0.000769	
1950 H {3}	0.023833	0.000769		

Fonte: Autor

A tabela A28 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de CO para cabeçotes entre os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e misturado** conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1.

Tabela A28 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.30867	{2} M=.32267	{3} M=.30433
1950 R {1}		0.019564	0.497217
1950 M {2}	0.019564		0.005666
1950 H {3}	0.497217	0.005666	

Fonte: Autor

A tabela A29 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A29 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=164.63	{2} M=160.87	{3} M=159.33
1950 R {1}		0.000227	0.000227
1950 M {2}	0.000227		0.000227
1950 H {3}	0.000227	0.000227	

Fonte: Autor

A tabela A30 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes entre todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A30 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=806.00	{2} M=788.00	{3} M=780.33
1950 R {1}		0.000227	0.000227
1950 M {2}	0.000227		0.000227
1950 H {3}	0.000227	0.000227	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 50% de carga à 1250 rpm;

Pela tabela A31 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de fuligem, fumaça, CO, Potência, torque e consumo de combustível.

Tabela A31 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta)							
	Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.01501	2	0.00751	0.036423	6	0.006071	1.2366	0.355057
soot	0.00007	2	0.00003	0.000030	6	0.000005	6.6889	0.029685
FSN	0.00482	2	0.00241	0.001933	6	0.000322	7.4828	0.023439
THC	0.00031	2	0.00015	0.001054	6	0.000176	0.8735	0.464573
CO	0.00073	2	0.00036	0.000078	6	0.000013	28.0000	0.000906
FATOR U	3.84222	2	1.92111	0.813333	6	0.135556	14.1721	0.005332
POTENCIA	0.74667	2	0.37333	0.033333	6	0.005556	67.2000	0.000078
TORQUE	34.88889	2	17.44444	0.666667	6	0.111111	157.0000	0.000007

Fonte: Autor

A tabela A32 abaixo nos mostra diferença significativa entre os cabeçotes de **Swirl reduzido e alto** com relação as amostras coletadas da emissão de *fuligem*. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A32 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta)		
	Marked differences are significant at p < .05000		
	{1}	{2}	{3}
	M=.02533	M=.02233	M=.01867
1250 R {1}		0.300156	0.024992
1250 M {2}	0.300156		0.191054
1250 H {3}	0.024992	0.191054	

Fonte: A

A tabela A33 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre os cabeçotes com níveis de **Swirl reduzido e alto**, conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A33 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.22000	{2} M=.19333	{3} M=.16333	
1250 R {1}		0.241996	0.019566	
1250 M {2}	0.241996		0.181974	
1250 H {3}	0.019566	0.181974		

Fonte: Autor

A tabela A34 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de CO para cabeçotes entre os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e misturado** conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1.

Tabela A34 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=.33400	{2} M=.31400	{3} M=.31600	
1250 R {1}		0.001394	0.002289	
1250 M {2}	0.001394		0.783620	
1250 H {3}	0.002289	0.783620		

Fonte: Autor

A tabela A35 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e misturado** e entre os cabeçotes com **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A35 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000				
RPM SWIRL	{1} M=201.60	{2} M=200.03	{3} M=200.53	
1250 R {1}		0.004935	0.028178	
1250 M {2}	0.004935		0.292985	
1250 H {3}	0.028178	0.292985		

Fonte: Autor

A tabela A36 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e misturado** e para os cabeçotes com **Swirl misturado e alto**.

Tabela A36 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=99.767	{2} M=100.30	{3} M=99.633
1250 R {1}		0.000489	0.151569
1250 M {2}	0.000489		0.000276
1250 H {3}	0.151569	0.000276	

Fonte: Autor

A tabela A37 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto** e para os cabeçotes com **Swirl reduzido e misturado**.

Tabela A37 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=762.00	{2} M=766.00	{3} M=761.67
1250 R {1}		0.000230	0.482874
1250 M {2}	0.000230		0.000228
1250 H {3}	0.482874	0.000228	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 50% de carga à 1600 rpm;

Pela tabela A38 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de fumaça, CO, Potência, torque e consumo de combustível.

Tabela A38 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.09324	2	0.04662	0.092581	6	0.015430	3.0214	0.123675
soot	0.00003	2	0.00001	0.000017	6	0.000003	5.1154	0.050517
FSN	0.00140	2	0.00070	0.000600	6	0.000100	7.0000	0.027000
THC	0.00058	2	0.00029	0.001531	6	0.000255	1.1376	0.381178
CO	0.00182	2	0.00091	0.000073	6	0.000012	74.6273	0.000058
FATOR U	4.86000	2	2.43000	0.640000	6	0.106667	22.7812	0.001576
POTENCIA	2.24667	2	1.12333	0.033333	6	0.005556	202.2000	0.000003
TORQUE	77.55556	2	38.77778	0.666667	6	0.111111	349.0000	0.000001

Fonte: Autor

A tabela A39 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre os cabeçotes com níveis de **Swirl reduzido e alto**, conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A39 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.11000	{2} M=.09000	{3} M=.08000
1600 R {1}		0.109003	0.024346
1600 M {2}	0.109003		0.482874
1600 H {3}	0.024346	0.482874	

Fonte: Autor

A tabela A40 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de CO para cabeçotes entre os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1.

Tabela A40 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.32200	{2} M=.32033	{3} M=.35133
1600 R {1}		0.833575	0.000323
1600 M {2}	0.833575		0.000279
1600 H {3}	0.000323	0.000279	

Fonte: Autor

A tabela A41 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível entre todos os níveis **Swirl**, conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A41 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=206.27	{2} M=204.47	{3} M=205.37
1600 R {1}		0.001435	0.034585
1600 M {2}	0.001435		0.034585
1600 H {3}	0.034585	0.034585	

Fonte: Autor

A tabela A42 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e alto** e para os cabeçotes com **Swirl misturado e alto**.

Tabela A42 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=111.23	{2} M=111.07	{3} M=110.10
1600 R {1}		0.075552	0.000227
1600 M {2}	0.075552		0.000228
1600 H {3}	0.000227	0.000228	

Fonte: Autor

A tabela A43 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes entre todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A43 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=664.00	{2} M=663.00	{3} M=657.33
1600 R {1}		0.024346	0.000227
1600 M {2}	0.024346		0.000227
1600 H {3}	0.000227	0.000227	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 50% de carga à 1950 rpm;

Pela tabela A44 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de NOx, *fuligem*, fumaça, CO, Potência e torque.

Tabela A44 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.2270	2	0.1135	0.075521	6	0.012587	9.017	0.015561
soot	0.0001	2	0.0001	0.000032	6	0.000005	12.771	0.006883
FSN	0.0036	2	0.0018	0.000800	6	0.000133	13.583	0.005920
THC	0.0008	2	0.0004	0.003151	6	0.000525	0.745	0.513868
CO	0.0013	2	0.0007	0.000126	6	0.000021	31.048	0.000684
FATOR U	5.8200	2	2.9100	3.660000	6	0.610000	4.770	0.057546
POTENCIA	20.1156	2	10.0578	0.066667	6	0.011111	905.200	0.000000
TORQUE	508.6667	2	254.3333	1.333333	6	0.222222	1144.500	0.000000

Fonte: Autor

A tabela A45 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de NOx para cabeçotes com os níveis **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.1.1.

Tabela A45 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para NOx

Tukey HSD test; Variable: NOx (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=8.3640	{2} M=8.5300	{3} M=8.7517
1950 R {1}		0.244234	0.013109
1950 M {2}	0.244234		0.113200
1950 H {3}	0.013109	0.113200	

Fonte: Autor

A tabela A46 abaixo nos mostra diferença significativa entre os cabeçotes de **Swirl reduzido e alto** e os cabeçotes de **Swirl misturado e alto** com relação as amostras coletadas da emissão de fuligem. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A46 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.02767	{2} M=.03067	{3} M=.02133
1950 R {1}		0.319473	0.035265
1950 M {2}	0.319473		0.006325
1950 H {3}	0.035265	0.006325	

Fonte: Autor

A tabela A47 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre os cabeçotes com níveis de **Swirl reduzido e alto**, e também para os cabeçotes com **Swirl misturado e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A47 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.14333	{2} M=.15333	{3} M=.10667
1950 R {1}		0.569906	0.019073
1950 M {2}	0.569906		0.006325
1950 H {3}	0.019073	0.006325	

Fonte: Autor

A tabela A48 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de CO para cabeçotes entre os níveis de **Swirl misturado e alto** e para **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.4.1 .

Tabela A48 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para CO

Tukey HSD test; Variable: CO (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.43600	{2} M=.43000	{3} M=.45800
1950 R {1}		0.314726	0.002759
1950 M {2}	0.314726		0.000899
1950 H {3}	0.002759	0.000899	

Fonte: Autor

A tabela A49 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A49 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=111.40	{2} M=108.80	{3} M=107.87
1950 R {1}		0.000227	0.000227
1950 M {2}	0.000227		0.000280
1950 H {3}	0.000227	0.000280	

Fonte: Autor

A tabela A50 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes entre todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A50 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=546.00	{2} M=532.67	{3} M=528.33
1950 R {1}		0.000227	0.000227
1950 M {2}	0.000227		0.000266
1950 H {3}	0.000227	0.000266	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 25% de carga à 1250 rpm;

Pela tabela A51 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de NOx, *fuligem*, fumaça, CO, Potência, torque e consumo de combustível.

Tabela A51 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at $p < .05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.15537	2	0.077683	0.060241	6	0.010040	7.73719	0.021812
soot	0.00037	2	0.000184	0.000043	6	0.000007	25.89062	0.001120
FSN	0.01042	2	0.005211	0.001067	6	0.000178	29.31250	0.000800
THC	0.00080	2	0.000400	0.002811	6	0.000468	0.85413	0.471613
CO	0.00509	2	0.002547	0.000796	6	0.000133	19.19849	0.002468
FATOR U	17.52000	2	8.760000	2.560000	6	0.426667	20.53125	0.002072
POTENCIA	0.17556	2	0.087778	0.046667	6	0.007778	11.28571	0.009261
TORQUE	14.00000	2	7.000000	2.000000	6	0.333333	21.00000	0.001953

Fonte: Autor

A tabela A52 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de NOx para cabeçotes com os níveis **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.1.1.

Tabela A52 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para NOx

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: NOx (PEDRO.sta) Marked differences are significant at $p < .05000$		
	{1} M=8.3883	{2} M=8.4430	{3} M=8.6903
1250 R {1}		0.789635	0.023873
1250 M {2}	0.789635		0.052986
1250 H {3}	0.023873	0.052986	

Fonte: Autor

A tabela A53 abaixo nos mostra diferença significativa entre todos os cabeçotes em relação ao nível de Swirl. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A53 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at $p < .05000$		
	{1} M=.04900	{2} M=.04100	{3} M=.03333
1250 R {1}		0.024346	0.001069
1250 M {2}	0.024346		0.029086
1250 H {3}	0.001069	0.029086	

Fonte: Autor

A tabela A54 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre todos os níveis de *Swirl*, conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A54 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=.27000	{2} M=.23000	{3} M=.18667
1250 R {1}		0.024346	0.000811
1250 M {2}	0.024346		0.017230
1250 H {3}	0.000811	0.017230	

Fonte: Autor

A tabela A55 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de *Swirl* **reduzido e misturado** e entre os cabeçotes com *Swirl* **misturado e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A55 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=223.93	{2} M=220.53	{3} M=222.53
1250 R {1}		0.001882	0.087199
1250 M {2}	0.001882		0.022323
1250 H {3}	0.087199	0.022323	

Fonte: Autor

A tabela A56 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes com os níveis de *Swirl* **reduzido e misturado** e para os cabeçotes com *Swirl* **misturado e alto**.

Tabela A56 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=50.300	{2} M=50.533	{3} M=50.200
1250 R {1}		0.040657	0.403822
1250 M {2}	0.040657		0.008679
1250 H {3}	0.403822	0.008679	

Fonte: Autor

A tabela A57 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto** e para os cabeçotes **com Swirl reduzido e misturado**.

Tabela A57 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=384.33	{2} M=386.33	{3} M=383.33
1250 R {1}		0.012961	0.165591
1250 M {2}	0.012961		0.001897
1250 H {3}	0.165591	0.001897	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 25% de carga à 1600 rpm;

Pela tabela A58 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão *de fuligem*, fumaça, Potência, torque e consumo de combustível.

Tabela A58 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Variable	Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.07540	2	0.03770	0.105358	6	0.017560	2.14705	0.198011
soot	0.00045	2	0.00023	0.000025	6	0.000004	53.36842	0.000151
FSN	0.00736	2	0.00368	0.000400	6	0.000067	55.16667	0.000137
THC	0.00258	2	0.00129	0.009102	6	0.001517	0.84934	0.473376
CO	0.00123	2	0.00062	0.001507	6	0.000251	2.45487	0.166346
FATOR U	20.08222	2	10.04111	6.020000	6	1.003333	10.00775	0.012268
POTENCIA	0.60667	2	0.30333	0.093333	6	0.015556	19.50000	0.002370
TORQUE	22.88889	2	11.44444	3.333333	6	0.555556	20.60000	0.002054

Fonte: Autor

A tabela A59 abaixo nos mostra diferença significativa entre todos os cabeçotes em relação ao nível de *Swirl*. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A59 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.05367	{2} M=.04500	{3} M=.03633
1600 R {1}		0.005148	0.000320
1600 M {2}	0.005148		0.005148
1600 H {3}	0.000320	0.005148	

Fonte: Autor

A tabela A60 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para fumaça para cabeçotes entre todos os níveis de *Swirl*, conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A60 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=.22667	{2} M=.19333	{3} M=.15667
1600 R {1}		0.006016	0.000311
1600 M {2}	0.006016		0.003803
1600 H {3}	0.000311	0.003803	

Fonte: Autor

A tabela A61 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de ***Swirl*** **reduzido e misturado** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1

Tabela A61 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=242.97	{2} M=239.37	{3} M=241.73
1600 R {1}		0.010962	0.352256
1600 M {2}	0.010962		0.062195
1600 H {3}	0.352256	0.062195	

Fonte: Autor

A tabela A62 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e alto** e para os cabeçotes com **Swirl misturado e alto**.

Tabela A62 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=56.600	{2} M=56.567	{3} M=56.033
1600 R {1}		0.943302	0.003595
1600 M {2}	0.943302		0.004819
1600 H {3}	0.003595	0.004819	

Fonte: Autor

A tabela A63 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para torque para cabeçotes com os níveis de **Swirl misturado e alto** e para os cabeçotes com **Swirl reduzido e alto**.

Tabela A63 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Torque

Tukey HSD test; Variable: TORQUE (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=338.00	{2} M=337.33	{3} M=334.33
1600 R {1}		0.550910	0.002455
1600 M {2}	0.550910		0.006449
1600 H {3}	0.002455	0.006449	

Fonte: Autor

- Análise de variância com 25% de carga à 1950 rpm;

Pela tabela A64 abaixo, nota-se que para a carga e rotação citada acima, houve diferença significativa para emissão de NOx, *fuligem*, fumaça, Potência e consumo de combustível.

Tabela A64 – Tabela ANOVA de diferenças para os gases de emissão em função do nível de Swirl.

Analysis of Variance (PEDRO.sta) Marked effects are significant at p < .05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
NOx	0.18374	2	0.09187	0.080297	6	0.013383	6.8647	0.028126
soot	0.00021	2	0.00010	0.000096	6	0.000016	6.4653	0.031839
FSN	0.00222	2	0.00111	0.000800	6	0.000133	8.3333	0.018548
THC	0.00380	2	0.00190	0.013334	6	0.002222	0.8552	0.471235
CO	0.00087	2	0.00043	0.001059	6	0.000176	2.4584	0.166019
FATOR U	21.34222	2	10.67111	9.493333	6	1.582222	6.7444	0.029181
POTENCIA	2.60222	2	1.30111	0.020000	6	0.003333	390.3333	0.000000
TORQUE	56.00000	2	28.00000	0.000000	6	0.000000		

Fonte: Autor

A tabela A65 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para emissão de NOx para cabeçotes com os níveis **Swirl reduzido e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.1.1.

Tabela A65 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para NOx

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: NOx (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=7.9370	{2} M=8.0687	{3} M=8.2837
1950 R {1}		0.401460	0.024460
1950 M {2}	0.401460		0.135949
1950 H {3}	0.024460	0.135949	

Fonte: Autor

A tabela A66 abaixo nos mostra diferença significativa entre os cabeçotes de **Swirl misturado e alto** com relação as amostras coletadas da emissão de fuligem. Esta diferença foi evidenciada também na figura 4.1.6.1.

Tabela A66 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fuligem

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: soot (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=.05933	{2} M=.05967	{3} M=.04933
1950 R {1}		0.994365	0.050521
1950 M {2}	0.994365		0.044599
1950 H {3}	0.050521	0.044599	

Fonte: Autor

A tabela A67 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras ara fumaça para cabeçotes entre os cabeçotes com níveis de **Swirl reduzido e alto**, e também para os cabeçotes com **Swirl misturado e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.2.1.

Tabela A67 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para fumaça

RPM SWIRL	Tukey HSD test; Variable: FSN (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000		
	{1} M=.18667	{2} M=.18667	{3} M=.15333
1950 R {1}		1.000000	0.028600
1950 M {2}	1.000000		0.028600
1950 H {3}	0.028600	0.028600	

Fonte: Autor

A tabela A68 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para consumo de combustível para cabeçotes com os níveis de **Swirl reduzido e misturado** e entre os cabeçotes com **Swirl misturado e alto** conforme evidenciado também na figura 4.1.5.1.

Tabela A68 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para consumo de combustível

Tukey HSD test; Variable: FATOR U (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=282.17	{2} M=278.90	{3} M=282.17
1950 R {1}		0.043702	1.000000
1950 M {2}	0.043702		0.043702
1950 H {3}	1.000000	0.043702	

Fonte: Autor

A tabela A69 abaixo nos mostra diferença significativa entre os valores de amostras para potência entre cabeçotes em todos os níveis de **Swirl**.

Tabela A69 – Tabela Tukey de diferenças das amostras para Potencia

Tukey HSD test; Variable: POTENCIA (PEDRO.sta) Marked differences are significant at p < .05000			
RPM SWIRL	{1} M=56.767	{2} M=55.933	{3} M=55.467
1950 R {1}		0.000227	0.000227
1950 M {2}	0.000227		0.000356
1950 H {3}	0.000227	0.000356	

Fonte: Autor

Tabela A70 – Média dos valores de emissão e consumo⁵²

Médias Soot g/Kw.h													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75% 1250; 100% 1600; 25% 1600; 50% 1600; 75% 1600; 100% 1950; 25% 1950; 50% 1950; 75% 1950; 100%													
	1	7	5	6	2	9	3	4	8	11	13	12	10
S.R	0,733	0,033	0,020	0,007	0,004	0,038	0,011	0,007	0,009	0,043	0,023	0,015	0,023
S.M	0,431	0,025	0,017	0,006	0,005	0,029	0,008	0,008	0,008	0,044	0,026	0,022	0,027
S.A	0,609	0,017	0,014	0,006	0,007	0,020	0,007	0,006	0,009	0,033	0,016	0,011	0,023
Desvio padrão Soot g/Kw.h													
S.R	0,165	0,002	0,003	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001	0,002	0,004	0,002	0,002	0,000
S.M	0,047	0,003	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,004
S.A	0,014	0,002	0,003	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,003	0,005	0,003	0,002	0,003
Nível de confiança Soot g/Kw.h													
S.R	0,279	0,003	0,004	0,003	0,002	0,005	0,003	0,002	0,004	0,007	0,004	0,003	#NUM!
S.M	0,080	0,006	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,001	0,003	0,004	0,002	0,003	0,006
S.A	0,024	0,004	0,005	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,005	0,009	0,005	0,003	0,004
Médias Nox g/Kw.h													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75% 1250; 100% 1600; 25% 1600; 50% 1600; 75% 1600; 100% 1950; 25% 1950; 50% 1950; 75% 1950; 100%													
	1	7	5	6	2	9	3	4	8	11	13	12	10
S.R	142,67	4,80	4,81	4,73	4,50	3,76	4,96	4,32	4,09	4,35	4,25	5,53	4,02
S.M	76,63	4,85	4,79	4,66	4,30	3,70	5,00	4,29	4,10	4,48	4,42	5,48	3,90
S.A	116,83	5,10	4,88	4,75	4,28	3,92	5,19	4,34	4,02	4,69	4,64	5,78	3,97
Desvio padrão NOx g/Kw.h													
S.R	24,068	0,020	0,064	0,131	0,147	0,141	0,177	0,120	0,072	0,155	0,144	0,072	0,138
S.M	10,956	0,133	0,082	0,115	0,129	0,048	0,068	0,073	0,112	0,060	0,098	0,081	0,149
S.A	10,492	0,109	0,086	0,017	0,064	0,174	0,103	0,055	0,084	0,112	0,086	0,119	0,019
Nível de confiança Nox, g/Kw.h													
S.R	40,574	0,033	0,108	0,220	0,247	0,239	0,298	0,202	0,121	0,261	0,243	0,122	0,233
S.M	18,469	0,225	0,138	0,194	0,217	0,081	0,114	0,123	0,189	0,102	0,166	0,136	0,250
S.A	17,688	0,184	0,145	0,028	0,107	0,294	0,173	0,093	0,141	0,189	0,145	0,200	0,032
Médias Consumo g/Kw.h													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75% 1250; 100% 1600; 25% 1600; 50% 1600; 75% 1600; 100% 1950; 25% 1950; 50% 1950; 75% 1950; 100%													
	1	7	5	6	2	9	3	4	8	11	13	12	10
S.R	2685,00	113,93	101,70	98,15	98,00	132,97	106,37	101,62	100,20	172,17	128,73	114,92	112,30
S.M	1411,73	110,53	100,13	97,08	97,70	129,37	104,57	100,92	99,70	168,90	127,33	114,08	111,60
S.A	2157,40	112,53	100,63	97,85	98,30	131,73	105,47	101,52	100,73	172,17	129,23	115,15	112,97
Desvio padrão Consumo g/Kw.h													
S.R	454,89	0,503	0,265	0,173	0,100	0,814	0,208	0,115	0,100	1,007	0,850	0,289	0,346
S.M	177,86	0,611	0,404	0,231	0,300	0,802	0,473	0,289	0,265	0,917	0,503	0,379	0,100
S.A	183,36	0,808	0,416	0,265	0,100	1,305	0,231	0,321	0,153	1,701	0,924	0,700	0,473
Nível de confiança Consumo g/Kw.h													
S.R	766,88	0,85	0,45	0,29	0,17	1,37	0,35	0,19	0,17	1,70	1,43	0,49	0,58
S.M	299,85	1,03	0,68	0,39	0,51	1,35	0,80	0,49	0,45	1,55	0,85	0,64	0,17
S.A	309,12	1,36	0,70	0,45	0,17	2,20	0,39	0,54	0,26	2,87	1,56	1,18	0,80

⁵² Resultados em relação ao menor valor encontrado para cada parâmetro em todo o conjunto de ensaio ESC, aos quais foram atribuídos valores fixos de modo a preservar o sigilo dos dados.

Médias FSN													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75%1250; 100%1600; 25% 1600; 50% 1600; 75%1600; 100%1950; 25% 1950; 50% 1950; 75%1950; 100%													
S.R	0,103	0,200	0,185	0,092	0,045	0,157	0,075	0,055	0,082	0,117	0,108	0,095	0,165
S.M	0,117	0,160	0,158	0,075	0,055	0,123	0,055	0,068	0,075	0,117	0,118	0,132	0,195
S.A	0,107	0,117	0,128	0,078	0,078	0,087	0,045	0,045	0,078	0,083	0,072	0,062	0,162
Desvio padrão FSN													
S.R	0,012	0,010	0,020	0,015	0,010	0,012	0,010	0,010	0,015	0,012	0,012	0,010	0,000
S.M	0,025	0,017	0,006	0,010	0,010	0,006	0,010	0,006	0,010	0,006	0,006	0,012	0,026
S.A	0,012	0,012	0,023	0,015	0,015	0,006	0,010	0,010	0,023	0,015	0,015	0,012	0,021
Nível de confiança FSN													
S.R	0,019	0,017	0,034	0,026	0,017	0,019	0,017	0,017	0,026	0,019	0,019	0,017	0,000
S.M	0,042	0,029	0,010	0,017	0,017	0,010	0,017	0,010	0,017	0,010	0,010	0,019	0,045
S.A	0,019	0,019	0,039	0,026	0,026	0,010	0,017	0,017	0,039	0,026	0,026	0,019	0,035
Médias THC g/Kw.h													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75%1250; 100%1600; 25% 1600; 50% 1600; 75%1600; 100%1950; 25% 1950; 50% 1950; 75%1950; 100%													
	1	7	5	6	2	9	3	4	8	11	13	12	10
S.R	18,50	0,20	0,13	0,10	0,09	0,30	0,19	0,14	0,10	0,50	0,31	0,23	0,18
S.M	9,95	0,19	0,12	0,08	0,08	0,28	0,18	0,13	0,09	0,47	0,29	0,21	0,16
S.A	16,00	0,22	0,12	0,09	0,09	0,32	0,18	0,14	0,09	0,52	0,31	0,19	0,16
Desvio padrão THC g/Kw.h													
S.R	2,70	0,03	0,01	0,01	0,00	0,04	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02	0,02
S.M	0,76	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
S.A	2,10	0,02	0,02	0,01	0,01	0,06	0,02	0,02	0,02	0,06	0,03	0,02	0,02
Nível de confiança THC g/Kw.h													
S.R	4,56	0,04	0,02	0,02	0,01	0,06	0,03	0,03	0,01	0,08	0,04	0,03	0,03
S.M	1,277	0,017	0,013	0,012	0,009	0,014	0,016	0,007	0,012	0,036	0,025	0,010	0,011
S.A	3,540	0,042	0,030	0,025	0,021	0,095	0,035	0,037	0,027	0,104	0,046	0,029	0,033
Médias CO g/Kw.h													
1250; 25% 1250; 50% 1250; 75%1250; 100%1600; 25% 1600; 50% 1600; 75%1600; 100%1950; 25% 1950; 50% 1950; 75%1950; 100%													
	1	7	5	6	2	9	3	4	8	11	13	12	10
S.R	27,22	0,42	0,18	0,14	0,12	0,65	0,17	0,12	0,14	1,01	0,28	0,19	0,22
S.M	14,55	0,38	0,16	0,13	0,11	0,62	0,17	0,13	0,13	1,00	0,28	0,20	0,22
S.A	22,63	0,36	0,16	0,14	0,13	0,63	0,20	0,14	0,13	1,03	0,30	0,18	0,21
Desvio padrão CO g/Kw.h													
S.R	4,170	0,017	0,002	0,005	0,003	0,024	0,004	0,003	0,003	0,012	0,003	0,003	0,004
S.M	1,919	0,008	0,006	0,002	0,004	0,009	0,004	0,004	0,004	0,015	0,005	0,006	0,001
S.A	2,809	0,008	0,002	0,002	0,008	0,011	0,003	0,002	0,002	0,012	0,005	0,005	0,002
Nível de confiança CO g/Kw.h													
S.R	7,030	0,028	0,003	0,009	0,004	0,040	0,007	0,005	0,005	0,020	0,004	0,004	0,006
S.M	3,235	0,013	0,009	0,003	0,006	0,015	0,006	0,007	0,006	0,025	0,009	0,009	0,001
S.A	4,736	0,014	0,003	0,003	0,013	0,018	0,004	0,004	0,004	0,021	0,009	0,008	0,004

APÊNDICE B – Tabelas de valores coletados no teste ESC 13 pontos⁵³

Soot g/Kw.h	Swirl misturado	Nominal 1	0,384	0,006	0,009	0,009	0,019	0,006	0,034	0,010	0,041	0,023	0,058	0,022	0,027
		Nominal 2	0,423	0,004	0,012	0,009	0,020	0,008	0,040	0,007	0,041	0,028	0,058	0,022	0,029
		Nominal 3	0,478	0,005	0,010	0,010	0,019	0,007	0,040	0,008	0,044	0,030	0,054	0,025	0,027
	Média analítica		0,428	0,005	0,010	0,009	0,019	0,007	0,038	0,008	0,042	0,027	0,056	0,023	0,027
	Desvio Padrão		0,047	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,004	0,002	0,002	0,001
	Swirl reduzido	Nominal 1	0,918	0,005	0,012	0,009	0,022	0,007	0,048	0,010	0,049	0,023	0,054	0,017	0,026
		Nominal 2	0,664	0,004	0,015	0,008	0,025	0,010	0,046	0,011	0,054	0,023	0,061	0,018	0,026
		Nominal 3	0,608	0,003	0,013	0,007	0,020	0,009	0,044	0,007	0,049	0,023	0,054	0,015	0,022
	Média analítica		0,730	0,004	0,013	0,008	0,022	0,009	0,046	0,009	0,051	0,023	0,056	0,017	0,025
	Desvio Padrão		0,165	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,002	0,003	0,000	0,004	0,002	0,002
	Swirl alto	Nominal 1	0,589	0,007	0,006	0,007	0,013	0,005	0,032	0,006	0,031	0,025	0,051	0,013	0,020
		Nominal 2	0,615	0,005	0,010	0,006	0,018	0,008	0,028	0,011	0,033	0,021	0,041	0,010	0,018
		Nominal 3	0,611	0,006	0,008	0,005	0,013	0,006	0,028	0,006	0,033	0,020	0,044	0,010	0,014
	Média analítica		0,605	0,006	0,008	0,006	0,014	0,006	0,029	0,007	0,032	0,022	0,045	0,011	0,017
	Desvio Padrão		0,014	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,001	0,003	0,005	0,002	0,003
SMOKE (FSN)	Swirl misturado	Nominal 1	0,05	0,06	0,04	0,06	0,15	0,06	0,17	0,08	0,15	0,16	0,15	0,12	0,11
		Nominal 2	0,08	0,04	0,06	0,06	0,16	0,08	0,20	0,06	0,15	0,20	0,15	0,12	0,12
		Nominal 3	0,10	0,05	0,05	0,07	0,15	0,07	0,20	0,07	0,16	0,21	0,14	0,14	0,11
	Média analítica		0,08	0,05	0,05	0,06	0,15	0,07	0,19	0,07	0,15	0,19	0,15	0,13	0,11
	Desvio Padrão		0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
	Swirl reduzido	Nominal 1	0,08	0,06	0,07	0,07	0,19	0,08	0,25	0,09	0,19	0,17	0,15	0,10	0,12
		Nominal 2	0,08	0,05	0,09	0,06	0,21	0,11	0,24	0,10	0,21	0,17	0,17	0,11	0,12
		Nominal 3	0,06	0,04	0,08	0,05	0,17	0,10	0,23	0,07	0,19	0,17	0,15	0,09	0,10
	Média analítica		0,07	0,05	0,08	0,06	0,19	0,09	0,24	0,08	0,19	0,17	0,15	0,10	0,11
	Desvio Padrão		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
	Swirl alto	Nominal 1	0,07	0,10	0,04	0,06	0,12	0,07	0,17	0,07	0,12	0,19	0,14	0,08	0,09
		Nominal 2	0,09	0,07	0,06	0,05	0,16	0,10	0,15	0,11	0,13	0,16	0,11	0,06	0,08
		Nominal 3	0,07	0,08	0,05	0,04	0,12	0,08	0,15	0,07	0,13	0,15	0,12	0,06	0,06
	Média analítica		0,07	0,08	0,05	0,05	0,13	0,08	0,15	0,08	0,12	0,16	0,12	0,06	0,07
	Desvio Padrão		0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Nox g/Kw.h	Swirl misturado	Nominal 1	85,644	4,576	5,557	4,971	5,364	5,383	4,943	4,302	3,720	4,212	4,508	6,136	5,014
		Nominal 2	66,964	4,443	5,459	4,833	5,215	5,258	4,828	4,314	3,628	3,990	4,427	5,990	4,868
		Nominal 3	66,386	4,319	5,427	4,861	5,232	5,153	4,677	4,114	3,649	3,930	4,390	6,123	4,827
	Média analítica		72,998	4,446	5,481	4,888	5,270	5,264	4,816	4,243	3,665	4,044	4,441	6,083	4,903
	Desvio Padrão		10,956	0,129	0,068	0,073	0,082	0,115	0,133	0,112	0,048	0,149	0,060	0,081	0,098
	Swirl reduzido	Nominal 1	164,839	4,810	5,620	5,091	5,397	5,497	4,817	4,261	3,843	4,309	4,374	6,241	4,903
		Nominal 2	117,168	4,519	5,278	4,857	5,269	5,375	4,784	4,204	3,595	4,043	4,175	6,097	4,617
		Nominal 3	135,228	4,695	5,525	4,928	5,322	5,236	4,782	4,347	3,837	4,240	4,480	6,161	4,790
	Média analítica		139,078	4,674	5,474	4,958	5,329	5,369	4,794	4,270	3,758	4,197	4,343	6,166	4,770
	Desvio Padrão		24,068	0,147	0,177	0,120	0,064	0,131	0,020	0,072	0,141	0,138	0,155	0,072	0,144
	Swirl alto	Nominal 1	111,398	4,347	5,509	4,829	5,254	5,281	4,895	4,017	3,779	4,059	4,499	6,207	4,971
		Nominal 2	103,643	4,439	5,712	4,939	5,271	5,311	5,017	4,145	3,683	4,032	4,585	6,444	5,126
		Nominal 3	124,407	4,317	5,637	4,891	5,411	5,309	5,113	4,174	4,021	4,068	4,721	6,332	5,112
	Média analítica		113,149	4,367	5,619	4,886	5,312	5,300	5,008	4,112	3,827	4,053	4,601	6,327	5,069
	Desvio Padrão		10,492	0,064	0,103	0,055	0,086	0,017	0,109	0,084	0,174	0,019	0,112	0,119	0,086
THC g/Kw.h	Swirl misturado	Nominal 1	10,73	0,08	0,19	0,13	0,14	0,08	0,29	0,08	0,38	0,16	0,55	0,21	0,30
		Nominal 2	9,28	0,07	0,21	0,13	0,15	0,09	0,31	0,08	0,39	0,16	0,59	0,22	0,33
		Nominal 3	9,62	0,08	0,21	0,14	0,15	0,09	0,30	0,09	0,39	0,17	0,59	0,22	0,32
	Média analítica		9,87	0,08	0,20	0,13	0,14	0,09	0,30	0,09	0,39	0,16	0,58	0,22	0,32
	Desvio Padrão		0,76	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
	Swirl reduzido	Nominal 1	20,90	0,08	0,20	0,13	0,14	0,08	0,28	0,09	0,38	0,16	0,57	0,21	0,31
		Nominal 2	15,54	0,09	0,22	0,14	0,15	0,09	0,30	0,10	0,39	0,17	0,58	0,22	0,32
		Nominal 3	18,82	0,08	0,23	0,16	0,16	0,11	0,33	0,10	0,44	0,20	0,66	0,24	0,36
	Média analítica		18,42	0,08	0,21	0,14	0,15	0,09	0,30	0,10	0,40	0,18	0,61	0,22	0,33
	Desvio Padrão		2,70	0,00	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,02	0,05	0,02	0,02
	Swirl alto	Nominal 1	14,75	0,07	0,18	0,13	0,13	0,08	0,30	0,08	0,39	0,14	0,58	0,18	0,31
		Nominal 2	14,69	0,09	0,20	0,15	0,14	0,09	0,32	0,09	0,41	0,15	0,60	0,19	0,33
		Nominal 3	18,36	0,09	0,23	0,17	0,16	0,11	0,35	0,11	0,49	0,18	0,70	0,22	0,36
	Média analítica		15,93	0,09	0,20	0,15	0,15	0,10	0,32	0,09	0,43	0,16	0,63	0,20	0,33
	Desvio Padrão		2,10	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02	0,03

⁵³ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada parâmetro em todo o conjunto de ensaio ESC, aos quais são atribuídos valores fixos para preservar o sigilo dos dados.

CO g/Kw.h	Swirl misturado	Nominal 1	16,60	0,11	0,22	0,15	0,21	0,14	0,63	0,13	0,88	0,22	1,25	0,22	0,32
		Nominal 2	13,79	0,11	0,22	0,14	0,20	0,14	0,61	0,13	0,86	0,22	1,26	0,22	0,33
		Nominal 3	12,93	0,11	0,21	0,14	0,21	0,14	0,62	0,13	0,86	0,22	1,23	0,21	0,32
	Média analítica		14,44	0,11	0,21	0,14	0,21	0,14	0,62	0,13	0,87	0,22	1,25	0,22	0,32
	Desvio Padrão		1,92	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01
	Swirl reduzido	Nominal 1	31,67	0,12	0,20	0,13	0,22	0,14	0,64	0,13	0,87	0,20	1,25	0,19	0,32
		Nominal 2	23,50	0,11	0,21	0,13	0,22	0,15	0,67	0,13	0,91	0,21	1,26	0,20	0,32
		Nominal 3	26,15	0,12	0,21	0,13	0,22	0,15	0,65	0,13	0,88	0,21	1,24	0,20	0,32
	Média analítica		27,10	0,12	0,21	0,13	0,22	0,15	0,65	0,13	0,89	0,21	1,25	0,19	0,32
	Desvio Padrão		4,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00
	Swirl alto	Nominal 1	24,55	0,11	0,24	0,15	0,20	0,14	0,59	0,12	0,88	0,20	1,27	0,19	0,35
		Nominal 2	19,31	0,13	0,23	0,14	0,20	0,14	0,60	0,12	0,86	0,20	1,25	0,18	0,34
		Nominal 3	23,69	0,13	0,24	0,15	0,20	0,14	0,58	0,12	0,87	0,21	1,27	0,19	0,35
	Média analítica		22,52	0,12	0,24	0,15	0,20	0,14	0,59	0,12	0,87	0,20	1,26	0,19	0,34
	Desvio Padrão		2,81	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01

Combustível g/Kw.h (QB06)	Swirl misturado	Nominal 1	1519,65	98,45	108,05	101,25	103,55	97,35	124,25	100,45	143,25	112,15	182,95	114,35	130,75
		Nominal 2	1224,85	98,15	107,35	100,75	102,85	96,95	123,45	100,05	142,35	111,95	181,75	114,25	130,35
		Nominal 3	1199,85	97,85	107,15	100,75	102,85	96,95	123,05	99,95	141,65	112,05	181,15	113,65	129,75
	Média analítica		1314,78	98,15	107,52	100,92	103,08	97,08	123,58	100,15	142,42	112,05	181,95	114,08	130,28
	Desvio Padrão		177,86	0,30	0,47	0,29	0,40	0,23	0,61	0,26	0,80	0,10	0,92	0,38	0,50
	Swirl reduzido	Nominal 1	3082,90	97,90	109,00	101,20	104,30	97,50	126,50	100,00	145,10	112,00	184,80	114,20	130,80
		Nominal 2	2188,60	97,80	108,70	101,00	103,80	97,50	125,90	100,10	144,90	112,00	183,60	114,20	130,50
		Nominal 3	2491,00	98,00	108,60	101,00	104,20	97,80	126,90	100,20	146,40	112,60	185,60	114,70	132,10
	Média analítica		2587,50	97,90	108,77	101,07	104,10	97,60	126,43	100,10	145,47	112,20	184,67	114,37	131,13
	Desvio Padrão		454,89	0,10	0,21	0,12	0,26	0,17	0,50	0,10	0,81	0,35	1,01	0,29	0,85
	Swirl alto	Nominal 1	2134,10	98,30	108,20	101,30	103,10	97,40	125,10	100,70	144,00	112,90	184,20	114,50	131,30
		Nominal 2	1851,30	98,40	107,80	100,80	102,90	97,30	124,50	100,80	143,40	112,70	183,60	114,30	131,30
		Nominal 3	2194,90	98,50	108,20	101,40	103,70	97,80	126,10	101,00	145,90	113,60	186,80	115,60	132,90
	Média analítica		2060,10	98,40	108,07	101,17	103,23	97,50	125,23	100,83	144,43	113,07	184,87	114,80	131,83
	Desvio Padrão		183,36	0,10	0,23	0,32	0,42	0,26	0,81	0,15	1,31	0,47	1,70	0,70	0,92

APÊNDICE C – Tabelas de valores coletados em plena carga para Opacidade, Torque, rendimento global e Fumaça⁵⁴

Opacimetro									
	MIST. 10	MIST.	MIST. -10	RED. 10	RED.	RED. -10	ALT. 10	ALT.	ALT. -10
Rpm	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro	Opacimetro
1950	0,020	0,027	0,017	0,019	0,016	0,014	0,021	0,020	0,017
1900	0,028	0,035	0,021	0,023	0,021	0,020	0,028	0,024	0,020
1720	0,016	0,025	0,012	0,013	0,012	0,011	0,018	0,015	0,014
1600	0,014	0,024	0,010	0,011	0,010	0,009	0,012	0,011	0,010
1540	0,015	0,025	0,010	0,012	0,011	0,008	0,014	0,010	0,011
1360	0,012	0,023	0,009	0,009	0,009	0,007	0,011	0,008	0,009
1250	0,013	0,024	0,009	0,009	0,009	0,007	0,009	0,009	0,010
1200	0,011	0,025	0,010	0,008	0,009	0,009	0,010	0,009	0,011
1180	0,013	0,026	0,010	0,011	0,012	0,009	0,010	0,012	0,012
1000	0,024	0,040	0,019	0,023	0,029	0,023	0,021	0,020	0,020

TORQUE									
	MIST. 10	MD31	MIST. -10	RED. 10	RED.	RED. -10	ALT 10	ALT.	ALT -10
Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
631,50	568,50	525,50	626,50	589,50	520,50	609,50	553,50	495,50	
699,50	647,50	593,50	699,50	654,50	587,50	669,50	627,50	567,50	
804,50	751,50	688,50	801,50	752,50	683,50	782,50	742,50	676,50	
886,50	834,50	775,50	885,50	836,50	766,50	876,50	821,50	760,50	
926,50	873,50	818,50	925,50	869,50	809,50	915,50	860,50	799,50	
1085,50	1031,50	971,50	1080,50	1030,50	957,50	1073,50	1021,50	953,50	
1105,50	1043,50	973,50	1100,50	1035,50	964,50	1090,50	1031,50	957,50	
1115,50	1048,50	977,50	1116,50	1043,50	968,50	1097,50	1032,50	961,50	
1118,50	1052,50	986,50	1116,50	1043,50	970,50	1098,50	1033,50	966,50	
927,50	895,50	856,50	924,50	882,50	841,50	908,50	878,50	837,50	

Smoke									
MIST 10	RG22	MIST -10	RED 10	RED.	RED -10	ALT 10	ALT.	ALT -10	
FSN	FSN	FSN	FSN	FSN	FSN	FSN	FSN	FSN	
0,21	0,16	0,16	0,19	0,14	0,12	0,21	0,18	0,17	
0,26	0,24	0,18	0,23	0,18	0,21	0,24	0,22	0,17	
0,13	0,12	0,08	0,12	0,09	0,11	0,13	0,14	0,11	
0,11	0,08	0,05	0,07	0,09	0,06	0,11	0,09	0,07	
0,10	0,08	0,05	0,10	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	
0,10	0,07	0,07	0,09	0,04	0,05	0,09	0,07	0,04	
0,06	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07	
0,04	0,07	0,05	0,06	0,04	0,07	0,04	0,03	0,06	
0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06	0,05	0,08	0,07	
0,18	0,20	0,13	0,20	0,24	0,22	0,14	0,16	0,14	

⁵⁴ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada parâmetro em todo o conjunto de ensaio em plena carga, aos quais são atribuídos valores fixos para preservar o sigilo dos dados.

Rendimento

MIST. 10	MIST. ORIGINAL	MIST. -10	RED. 10	RED. ORIGINAL	RED. -10	ALT. 10	ALT. ORIGINAL	ALT. -10
Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %	Rend. Global %
20,3	20,2	20,6	20,2	20,6	20,6	20,2	20,3	20,4
20,0	20,1	20,5	20,1	20,3	20,4	19,9	20,1	20,3
21,6	21,7	22,1	21,6	21,9	22,0	21,5	21,7	21,9
22,5	22,7	23,0	22,6	22,8	23,0	22,4	22,7	22,9
22,5	22,7	23,1	22,5	22,9	23,0	22,4	22,7	22,9
22,5	22,9	23,3	22,7	23,0	23,2	22,5	22,9	23,1
23,2	23,4	23,7	23,3	23,4	23,5	23,2	23,4	23,5
23,4	23,4	23,6	23,4	23,4	23,5	23,3	23,6	23,5
23,4	23,5	23,7	23,4	23,5	23,6	23,3	23,5	23,5
22,9	22,9	23,1	23,0	22,8	22,7	22,8	22,9	22,8