ROBERO ANTONIO DE SOUZA

Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de “*swirl*” e no desempenho de motor diesel

São Paulo
2016

ROBERO ANTONIO DE SOUZA

Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de “*swirl*” e no desempenho de motor diesel

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

São Paulo

2016

ROBERO ANTONIO DE SOUZA

Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de “swirl” e no desempenho 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

2016

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

São Paulo, 16 de Dezembro de 2016

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Souza, Robero Antonio de

Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de "swirl" e no desempenho de motor diesel / R. A. Souza -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
104 p.

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

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

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelo dom da vida, aos meus pais pelo amor sempre presente em nossa família e por transformarem minha vida através dos estudos, definitivamente minha maior riqueza. Ao meu irmão e melhor amigo Renato que me ajudou a entender o significado de partilha, a minha namorada Jamille que com seu jeito único me incentivou nos momentos mais difíceis desse trabalho e também aos demais amigos de toda a minha vida.

Em especial agradeço ao Prof. Dr. Francisco Emilio Baccaro Nigro que além de contribuir de forma capital para a construção deste trabalho como meu orientador, também teve a paciência de me guiar e muitas vezes me recolocar nos trilhos como um sábio educador.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.

(Isaac Newton)

RESUMO

O presente trabalho buscou estudar experimentalmente os efeitos do deslocamento da posição final dos dutos de admissão de um cabeçote no número de *swirl* e as possíveis consequências nos parâmetros de desempenho do motor diesel (torque, emissão de poluentes e consumo de combustível). Foram construídos protótipos de cabeçotes divididos em quatro grupos de deslocamentos com diferentes direções e sentidos. O valor nominal desses deslocamentos foi de 1 mm. Em seguida os cabeçotes passaram por medição de geometria para verificação da posição real dos dutos de admissão; posteriormente os cabeçotes foram ensaiados em uma máquina de medição do número de *swirl*. A partir dos dados de posição dos dutos de admissão e do número de *swirl* de cada cabeçote, foi feita uma regressão linear múltipla para se obter uma equação que correlaciona o número de *swirl* com os deslocamentos em X e Y dos dois dutos de admissão. Na última parte do trabalho, os cabeçotes de cada grupo de deslocamento foram montados sucessivamente em um motor diesel instalado em dinamômetro para medição dos seus parâmetros de desempenho, a saber: curva de torque; consumo específico e emissão de poluentes.

Palavras-Chave: *Swirl*. Motor diesel. Deslocamento dos dutos de admissão.

ABSTRACT

This work aimed to study experimentally the effects of intake ports displacement of a cylinder head in its swirl number and the possible consequences in the diesel engine performance parameters (torque, emissions and fuel consumption). Cylinder head prototypes were divided into four groups with different displacement directions. The nominal value of these displacements was 1 mm. The cylinder heads were measured to check the real position of their intake ports; then the cylinder heads were tested in a machine to measure the swirl number. From the intake ports position data and swirl number of each cylinder head, a multiple linear regression was performed to obtain an equation that correlates the swirl number with intake ports displacement in X and Y directions. As last step of this work, the cylinder heads of each displacement group were mounted in a diesel engine installed on a dynamometer to measure its performance parameters: torque curve; specific fuel consumption and emissions.

Keywords: Swirl. Diesel engine. Intake ports displacement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tempos de funcionamento do motor diesel	16
Figura 2 – Acionamento das válvulas do cabeçote	18
Figura 3 – Distribuição de temperatura nas válvulas.....	19
Figura 4 – Movimento e formas de geração do <i>swirl</i>	20
Figura 5 – Esquema básico para medição do <i>swirl</i>	22
Figura 6 – Esquema dos diferentes protótipos	26
Figura 7 – Esquema do desalinhamento dos protótipos	27
Figura 8 – Cotas x e y para modificação dos protótipos.....	28
Figura 9 – Parâmetros geométricos dos dutos de admissão	29
Figura 10 – Esquema básico do sistema SCR	41
Figura 11 – Imagens da combustão no motor transparente	43
Figura 12 – Taxa de liberação de calor em função do <i>swirl</i>	44
Figura 13 – Dutos de admissão do cabeçote	47
Figura 14 – Cabeçote modelo A.....	48
Figura 15 – Cabeçote modelo B.....	48
Figura 16 – Cabeçote modelo C.....	49
Figura 17 – Cabeçote modelo D.....	49
Figura 18 – Cabeçote modelo N.....	50
Figura 19 – Machos dos dutos de admissão	50
Figura 20 – Desbaste dos alojamentos dos machos de fundição	51
Figura 21 – Mesa de medição ZEISS ACCURA.....	51
Figura 22 – Orientação dos eixos X e Y adotados pela mesa de medição	52
Figura 23 – Cabeçote completo	53
Figura 24 – Equipamento de medição do <i>swirl</i>	53
Figura 25 – Dispositivo de abertura e fechamento das válvulas	54
Figura 26 – Motor diesel semelhante ao utilizado nos testes	56
Figura 27 – Posição real dos dutos de admissão em alguns cabeçotes	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número de <i>swirl</i> dos cabeçotes	61
Gráfico 2 – Valores de $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes	63
Gráfico 3 – Principais direções de efeito no <i>swirl</i>	69
Gráfico 4 – Curvas de torque em plena carga.....	72
Gráfico 5 – Curvas de consumo específico em plena carga	73
Gráfico 6 – Curvas de FSN em plena carga.....	74
Gráfico 7 – Consumo específico @ 1250 rpm 25% de carga.....	79
Gráfico 8 – Consumo específico @ 1600 rpm 25% de carga.....	79
Gráfico 9 – Consumo específico @ 1950 rpm 25% de carga.....	80
Gráfico 10 – Emissões de NOx @ 1250 rpm 25% de carga	80
Gráfico 11 – Emissões de NOx @ 1600 rpm 25% de carga	81
Gráfico 12 – Emissões de NOx @ 1950 rpm 25% de carga	81
Gráfico 13 – Emissões de NOx @ 1250 rpm 100% de carga	82
Gráfico 14 – Emissões de NOx @ 1600 rpm 100% de carga	82
Gráfico 15 – Emissões de NOx @ 1950 rpm 100% de carga	83
Gráfico 16 – FSN @ 1250 rpm 25% de carga.....	84
Gráfico 17 – FSN @ 1600 rpm 25% de carga.....	84
Gráfico 18 – FSN @ 1950 rpm 25% de carga.....	85
Gráfico 19 – FSN @ 1250 rpm 100% de carga.....	85
Gráfico 20 – FSN @ 1600 rpm 100% de carga.....	86
Gráfico 21 – FSN @ 1950 rpm 100% de carga.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de emissão para veículos pesados	40
Tabela 2 – Esquema do ensaio ESC	45
Tabela 3 – Designação dos protótipos de cabeçote.....	54
Tabela 4 – Especificação do motor diesel utilizado nos ensaios.....	55
Tabela 5 – Disposição de montagem dos cabeçotes	57
Tabela 6 – Deslocamento dos dutos de admissão.....	58
Tabela 7 – Número de <i>swirl</i> dos cabeçotes	60
Tabela 8 – Valores de $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes	62
Tabela 9 – Cálculos preliminares do desvio padrão das medições.....	65
Tabela 10 – Estatística de regressão para 60 observações.....	66
Tabela 11 – Análise ANOVA para 30 observações.....	66
Tabela 12 – Estatística de regressão para 30 observações.....	67
Tabela 13 – Análise dos coeficientes da regressão para 30 observações	67
Tabela 14 – Comparação entre <i>swirl</i> medido e calculado	68
Tabela 15 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes N	70
Tabela 16 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes A.....	70
Tabela 17 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes B.....	71
Tabela 18 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes C	71
Tabela 19 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes D	72
Tabela 20 – Resultados globais do 1º ensaio ESC	75
Tabela 21 – Resultados globais do 2º ensaio ESC	75
Tabela 22 – Resultados globais do 3º ensaio ESC	76
Tabela 23 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote N.....	76
Tabela 24 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote A.....	77
Tabela 25 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote B.....	77
Tabela 26 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote C.....	78
Tabela 27 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote D.....	78
Tabela 28 – Análise ANOVA do modelo	93
Tabela 29 – Coeficientes de determinação	96
Tabela 30 – Avaliação dos coeficientes individuais da regressão.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
ARLA	Agente Redutor Líquido Automotivo
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
OHC	<i>Overhead Camshaft</i>
OHV	<i>Overhead Valves</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	MOTOR DIESEL.....	15
2.2	CABEÇOTE DO MOTOR DIESEL.....	17
2.3	CONCEITUAÇÃO DE <i>SWIRL</i>	19
2.4	MEDIÇÃO DO <i>SWIRL</i>	21
2.5	DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE <i>SWIRL</i> E $\mu\sigma_m$	22
2.6	INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DOS DUTOS NO <i>SWIRL</i>	26
2.7	REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....	29
2.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA DA REGRESSÃO	32
2.9	ANÁLISE DOS COEFICIENTES INDIVIDUAIS DA REGRESSÃO	37
2.10	EMIÇÃO DE POLUENTES EM MOTORES DIESEL.....	39
2.11	EFEITO DO <i>SWIRL</i> NO COMPORTAMENTO DO MOTOR DIESEL	42
2.12	ENSAIO DE MOTORES DIESEL	44
3	DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO	46
3.1	VISITA À FUNDIÇÃO	46
3.2	FABRICAÇÃO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS	47
3.3	MEDIÇÃO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS.....	51
3.4	USINAGEM DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS	52
3.5	MEDIÇÃO DO <i>SWIRL</i> DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS	53
3.6	ENSAIO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS NO MOTOR DIESEL.....	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	DESLOCAMENTO DOS DUTOS DE ADMISSÃO.....	58
4.2	NÚMERO DE <i>SWIRL</i> DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS	60
4.3	VALORES DE $\mu\sigma_m$ DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS	61
4.4	REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DO <i>SWIRL</i>	63
4.5	NÚMERO DE <i>SWIRL</i> MEDIDO E CALCULADO	68
4.6	PRINCIPAIS DIREÇÕES DE EFEITO NO NÚMERO DE <i>SWIRL</i>	69
4.7	ENSAIOS DE PLENA CARGA	70

4.8	RESULTADOS GLOBAIS DO ENSAIO ESC.....	75
4.9	RESULTADOS PONTO A PONTO DO ENSAIO ESC	76
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – Cálculos da regressão linear múltipla	91
	APÊNDICE B – Cálculos da análise estatística da regressão	93
	APÊNDICE C – Cálculos da análise dos coeficientes individuais	98
	APÊNDICE D – Matriz de deslocamento dos dutos de admissão	102
	APÊNDICE E – Matriz de <i>swirl</i> dos dutos de admissão.....	103
	APÊNDICE F – Cálculos preliminares da estatística de regressão	104

1 INTRODUÇÃO

A motivação deste estudo é entender mais profundamente as implicações causadas pela entrada do ar no motor diesel através do movimento conhecido como *swirl*, e de que modo as tolerâncias geométricas de fabricação afetam o *swirl*.

Dentre as inúmeras características geométricas dos cabeçotes e suas respectivas tolerâncias de fabricação, o possível deslocamento dos machos na fundição dos cabeçotes foi identificado como um dos possíveis aspectos críticos no processo produtivo.

Essa pesquisa baseia-se na necessidade de conhecer a influência do deslocamento dos dutos de admissão no número de *swirl* de um cabeçote, além de possíveis consequências ao torque gerado pelo motor; emissão de poluentes e consumo de combustível.

Segundo (SREENIVASULU, REDDY e REDDY, 2012) observa-se que a combustão e a emissão de poluentes em motores diesel são influenciadas pelo *swirl*. Sendo assim é fácil compreender a importância de se conhecer com maior profundidade tanto os efeitos da geometria do cabeçote na geração do *swirl*, bem como o efeito do *swirl* no desempenho geral do motor.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral: Estudar o efeito do deslocamento geométrico da posição final dos dutos de admissão no número de *swirl* e deste nos parâmetros de desempenho (torque, consumo de combustível e emissão de poluentes) de motores diesel.

Utilizando um determinado modelo de motor diesel como representativo dos motores atualmente fabricados no país, os objetivos específicos deste trabalho compreendem: a fabricação de cabeçotes especiais com alterações geométricas; o levantamento metrológico desses cabeçotes para determinação efetiva das alterações provocadas; o ensaio desses cabeçotes em máquina de medição de *swirl*; e o ensaio de um motor preparado com os cabeçotes modificados em banco de provas para determinação do efeito das modificações no desempenho, consumo específico e emissão de poluentes do motor.

Pretende-se que, pela compreensão dos efeitos das modificações provocadas em relação às do projeto atual, os conhecimentos adquiridos possam ser usados no

desenvolvimento de novos cabeçotes, ou na alteração das tolerâncias de fabricação dos cabeçotes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo pretende detalhar os diversos conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho por meio de uma breve revisão bibliográfica.

Iniciando com o ciclo básico de funcionamento do motor diesel e um breve estudo sobre o cabeçote desse tipo de motor. O capítulo trata de estudar o movimento de rotação do ar em torno do eixo do cilindro do motor conhecido como *swirl*; além do coeficiente de descarga referido a área projetada das válvulas de admissão denominado como $\mu\sigma$.

Especial atenção é dada à conceituação de *swirl*, método de cálculo e procedimento para medição, além da possível influência da posição dos dutos de admissão do cabeçote no número de *swirl*.

Como o trabalho utiliza também algumas ferramentas estatísticas para análise dos resultados dos ensaios, é feita uma revisão bibliográfica sobre regressão linear múltipla e análise de sua relevância para explicar um modelo em estudo.

A última parte do capítulo refere-se à possível influência do *swirl* no desempenho do motor diesel com foco nas emissões de poluentes e consumo de combustível, além de potência e torque.

2.1 MOTOR DIESEL

O motor diesel funciona por meio da ignição por compressão, conforme (MARTINS, 2013) esse tipo de motor não possui um sistema exterior que prepare a mistura; ele aspira o ar que no final do tempo de compressão atinge, na câmara de combustão, pressão e temperatura elevadas o suficiente para garantir a queima do combustível injetado.

O tempo de admissão é o período em que o pistão move-se do PMS (Ponto Morto Superior) ao PMI (Ponto Morto Inferior), com a válvula de admissão do motor mantida aberta enquanto que a válvula de escapamento encontra-se fechada; dessa forma entra somente ar limpo no cilindro.

No caso do motor diesel utilizado nos ensaios deste trabalho, existem duas válvulas de admissão e duas válvulas de escapamento. Cada um dos tipos de válvula opera de forma simultânea.

Em seguida vem o tempo de compressão onde o pistão do motor move-se do PMI novamente em direção ao PMS; nesse período as válvulas de admissão e escapamento encontram-se fechadas. Isso faz com que o ar seja submetido a uma forte compressão; segundo (MARTINS, 2013) a taxa de compressão desses motores pode estar entre 15 e 22, praticamente o dobro da encontrada em motores movidos à gasolina.

Logo após tem-se o tempo de expansão ou combustão, onde normalmente pouco antes do PMS e com as válvulas de admissão e escapamento fechadas ocorre a injeção do combustível. A alta temperatura do ar combinada com sua elevada pressão provoca a combustão espontânea do diesel; a combustão ainda prolonga-se em parte da descida do pistão em direção ao PMI.

Por último tem-se o tempo de escapamento onde o pistão move-se do PMI novamente em direção ao PMS, mas dessa vez com a válvula de escapamento aberta. Dessa forma os gases provenientes do tempo de combustão são liberados no coletor de escapamento.

Na figura 1 é possível visualizar os quatro tempos de funcionamento do motor diesel.

Figura 1 – Tempos de funcionamento do motor diesel

Fonte: (MARTINS, 2013)

Com relação ao tipo da câmara de combustão aplicada em motores diesel, (BRUNETTI, 2012a) afirma que podem ser de injeção indireta quando o motor possui uma pré-câmara ou podem ser de injeção direta. O motor diesel utilizado nos ensaios do trabalho possui injeção direta de combustível na câmara de combustão.

Quanto ao sistema de injeção do combustível, será detalhado o módulo com bombas individuais do tipo bomba-bico, pois é justamente esse modelo de injeção que o motor diesel utilizado nos ensaios do trabalho possui.

Segundo (BRUNETTI, 2012b) esse sistema de injeção pode atingir pressões superiores a 2000 bar e oferece uma construção bem compacta e robusta. Como o circuito de alta pressão é bem reduzido, tem-se uma melhor dinâmica de injeção do combustível e menos risco de contaminação.

Esse tipo de injeção possui uma unidade injetora com bomba de alta pressão para cada cilindro do motor. O seu acionamento é feito pela árvore do comando de válvulas, onde essa árvore pode estar localizada diretamente no cabeçote (OHC - *Overhead Camshaft*) ou no bloco do motor (OHV - *Overhead Valves*), o motor diesel utilizado nos ensaios do trabalho possui comando do tipo OHV.

2.2 CABEÇOTE DO MOTOR DIESEL

Esse componente tem como objetivo alimentar o motor diesel com o ar proveniente do sistema de admissão e também direcionar os gases oriundos da combustão para o sistema de escapamento por meio da abertura e fechamento das válvulas de admissão e escapamento.

O acionamento das válvulas de admissão e escapamento do cabeçote utilizado nos ensaios funciona de forma semelhante ao acionamento da unidade injetora, por meio da árvore do comando de válvulas localizada no bloco do motor e dos balancins. A figura 2 ilustra esse mecanismo.

Figura 2 – Acionamento das válvulas do cabeçote

Fonte: Adaptado de (DEMPSEY, 2008)

As válvulas de admissão possuem uma folga nominal em relação ao balancim de acionamento e, segundo (LEWIS e DWYER-JOYCE, 2002) essa folga visa garantir que as válvulas possam ficar completamente assentadas durante todas as condições de operação do motor.

Como as válvulas de escapamento são submetidas a temperaturas mais severas devido à passagem dos gases de combustão, possuem uma maior folga nominal em relação ao balancim de acionamento se comparada à folga das válvulas de admissão.

Na figura 3 é possível visualizar uma distribuição típica de temperatura nas válvulas de admissão e escapamento.

Figura 3 – Distribuição de temperatura nas válvulas

Fonte: Adaptado de (LEWIS e DWYER-JOYCE, 2002)

No cálculo do número de *swirl* do cabeçote, a partir de medições estacionárias para diferentes aberturas de válvulas, é utilizada uma curva de levantamento das válvulas que relaciona os graus de giro do virabrequim, portanto da velocidade do pistão, com a abertura das válvulas de admissão.

Portanto, para compensar a folga nominal das válvulas de admissão existente no motor em funcionamento é necessário descontar tal folga para todas as aberturas durante o cálculo do número de *swirl*.

2.3 CONCEITUAÇÃO DE SWIRL

Segundo (PULKRABEK, 2003) *swirl* é o movimento de rotação da massa principal de fluido presente no interior do cilindro. Afirma também que é a própria construção do sistema de admissão que proporciona a componente tangencial necessária para sua formação.

Através da figura 4 é possível observar o movimento conhecido como *swirl* e também algumas maneiras para causar a sua formação. Por exemplo, o formato do duto de entrada do cilindro ou do coletor de admissão.

Figura 4 – Movimento e formas de geração do *swirl*

(a) Movimento do *swirl* no interior do motor. Métodos para gerar o *swirl* (b) entrada de ar no cilindro na direção tangencial, (c) contorno do coletor de admissão.

Fonte: Adaptado de (PULKRABEK, 2003)

Conforme (HEYWOOD, 1988) existem duas formas principais para geração do *swirl*, uma delas é a construção do duto em espiral e outra em que o duto descarrega tangencialmente a massa principal de fluido para dentro do cilindro, forçando seu movimento tangencial pela parede do cilindro, dessa forma gerando o movimento de rotação típico do *swirl*.

O motor diesel utilizado nesta pesquisa possui formação de *swirl* pela entrada de ar na direção tangencial à parede do cilindro devido ao formato dos dois dutos admissão do cabeçote; importante ressaltar que esses dutos não possuem formato em espiral.

De acordo com (HEYWOOD, 1988) pistões que possuem câmara de combustão no seu topo, também conhecidos como *bowl-in-piston*, alteram substancialmente o movimento de rotação da massa principal de fluido durante o tempo de compressão.

Os pistões do motor diesel utilizado nos ensaios deste trabalho são do tipo *mexican hat* que embora possam produzir alguma perturbação da massa de ar durante a compressão, seu impacto não é tão grande quanto o dos pistões do tipo *bowl-in-piston*.

Segundo (PULKRABEK, 2003) a intensidade do *swirl* é constantemente alterada durante o funcionamento do motor. No tempo de admissão é alta, mas diminui no tempo de compressão devido ao atrito do ar com a parede do cilindro, onde 1/4 a 1/3 do momento angular pode ser perdido.

Mas de qualquer forma a intensidade do *swirl* no tempo de admissão possui influência na intensidade do *swirl* no fim do tempo de compressão conforme afirma (FERGUSON, 1986).

À medida que aumenta a velocidade de rotação do motor, aumenta proporcionalmente a velocidade do fluxo de ar admitido, tanto de sua componente na direção axial do cilindro como na direção tangencial. Sendo assim, conceitua-se número de *swirl* como sendo o número de voltas dado pelo movimento do ar em torno do eixo do cilindro por rotação do motor.

2.4 MEDIÇÃO DO SWIRL

De acordo com (HEYWOOD, 1988) é extremamente difícil obter o número de *swirl* durante o funcionamento do motor. Portanto sua medição é feita normalmente através de um ensaio com fluxo de ar em regime permanente em bancada.

Um sistema típico é composto por um cilindro de mesmas dimensões do utilizado no motor, no seu centro uma colmeia que mede o torque da massa principal de fluido ao retificar o fluxo de ar que passa por ela. Na figura 5 é possível observar um esquema básico desse equipamento.

Figura 5 – Esquema básico para medição do *swirl*

Fonte: Adaptado de UZKAN et al., 1983 apud (FERGUSON, 1986)

Ainda conforme (HEYWOOD, 1988) pode ser utilizado nesse ensaio um equipamento formado por um cilindro de mesmas dimensões do cilindro do motor, no seu centro uma roda de pás bem leve, com baixo atrito no seu mancal e diâmetro bem próximo ao do cilindro. Mas por ser muito suscetível ao seu formato e também aos detalhes do fluxo do ar, ele tem sido substituído pelo sistema de colmeia.

O ensaio com fluxo de ar constante em bancada é, segundo (HEYWOOD, 1988) utilizado amplamente devido a sua simplicidade, mas o comportamento do *swirl* em condição real não foi completamente compreendido. Esse ensaio descreve bem o fenômeno em relação à interação duto e válvula, mas todo esse cenário do tempo de admissão pode ser substancialmente modificado na compressão.

2.5 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE *SWIRL* E $\mu\sigma_m$

O número de *swirl*, conforme anteriormente conceituado, é determinado de maneiras diferentes dependendo da bibliografia consultada. Neste trabalho foi adotado o método conforme (OTTOSSON e 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.

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

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 – temperatura;

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;

Q_v – vazão em volume do ar.

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 se encontra no PMS durante o ciclo de admissão e termina quando o pistão atinge o PMI ainda em seu ciclo de admissão.

Outro importante parâmetro de avaliação do desempenho de cabeçotes de motores, denominado como $\mu\sigma$, trata-se de um coeficiente de descarga referido a área projetada das válvulas de admissão, utilizando a velocidade máxima do

escoamento decorrente da perda de carga. 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).

$$Q_{mt} = z \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \rho \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

Onde:

z – número de válvulas de admissão do cabeçote;

d – diâmetro interno dos assentos das válvulas de admissão;

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.

2.6 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DOS DUTOS NO SWIRL

Para o estudo de (KIM, HAN e LEE, 2013) foram construídos alguns protótipos de cabeçote com o objetivo de avaliar a influência das diferentes configurações na vazão em massa de ar como também na razão de *swirl*. A figura 6 mostra as diferentes configurações propostas.

Figura 6 – Esquema dos diferentes protótipos

Fonte: Adaptado de (KIM, HAN e LEE, 2013)

Os modelos III e IV da figura 6 possuem basicamente as mesmas características exceto por possuírem diferentes distâncias entre suas entradas. O modelo III possui uma distância de 37 mm entre seus dutos enquanto que o modelo IV possui 47 mm.

Em suas conclusões (KIM, HAN e LEE, 2013) afirmam que o modelo IV que possui maior distância entre seus dutos proporcionou um leve aumento da vazão em massa de ar na ordem de 2,6% e uma leve diminuição da razão de *swirl* na ordem de 3,5% em comparação aos resultados encontrados no modelo III.

No estudo de (KANG e REITZ, 1999) foram observados os impactos causados pelo desalinhamento das válvulas de admissão em relação à geração de *swirl*, da mesma forma que no estudo de (KIM, HAN e LEE, 2013) o cabeçote analisado possui duas válvulas de admissão.

Através da figura 7 é possível observar a mudança de alinhamento mencionada.

Figura 7 – Esquema do desalinhamento dos protótipos

(a) Pórtico da válvula de admissão alinhado

(b) Pórtico da válvula de admissão desalinhado

Fonte: Adaptado de (KANG e REITZ, 1999)

Nas conclusões desse estudo, (KANG e REITZ, 1999) afirmam que o protótipo com válvulas alinhadas obteve melhores resultados do que o protótipo com válvulas desalinhadas. Na abertura de 11 mm da válvula de admissão foi encontrada uma razão de *swirl* de 1,19 para válvulas alinhadas e 0,52 para as desalinhadas.

Uma das razões apontadas por (KANG e REITZ, 1999) para esse resultado foi o choque dos jatos de ar proveniente das duas válvulas ocasionando perda de velocidade da massa de ar no protótipo com válvulas desalinhadas.

Outro motivo levantado por (KANG e REITZ, 1999) foi uma distribuição de velocidades menos desigual devido a menor excentricidade do duto em relação ao centro do cilindro do motor no protótipo com válvulas desalinhadas.

Em sua dissertação de mestrado (SOARES, 2010) estudou a influência de diferentes posicionamentos dos dutos de admissão nos ensaios de desempenho e emissão de um motor diesel.

A figura 8 ilustra as cotas que foram alteradas nos cabeçotes desse trabalho.

Figura 8 – Cotas x e y para modificação dos protótipos

Fonte: Adaptado de (SOARES, 2010)

O valor nominal da cota x é 27 mm enquanto que o valor nominal da cota y é 75 mm. A partir desse modelo padrão foram construídos outros dois protótipos, o primeiro com valor de x e y 1,5 mm maior e o segundo com valor de x e y 1,5 mm menor.

Importante ressaltar que o modelo construído com 1,5 mm menor da dissertação de (SOARES, 2010) possui deslocamento semelhante ao modelo C desenvolvido para os ensaios deste trabalho.

Para o cabeçote padrão (SOARES, 2010) encontrou um valor médio de 2,57 no número de *swirl*; no cabeçote com deslocamento de 1,5 mm maior, o valor foi de 2,69 (aumento de 4,7%) e no cabeçote com 1,5 mm menor, o valor foi de 2,47 (redução de 3,9%).

Sobre os ensaios em plena carga (SOARES, 2010) encontrou para a rotação de 2200 rpm um aumento de 1,3% na potência do motor utilizando o cabeçote com deslocamento de 1,5 mm maior e um aumento de 1,2% na potência utilizando o cabeçote com 1,5 mm menor na comparação com o cabeçote padrão. Nos testes de emissão (SOARES, 2010) não encontrou tendência em seus resultados.

Em outro trabalho, (GRANQUIST, 2010) realizou um estudo com o objetivo de compreender quais relações existem entre as variáveis geométricas dos dutos de

admissão de um cabeçote com o seu respectivo número de *swirl*. O cabeçote desta pesquisa é utilizado em motores que possuem sistema de injeção *common rail*.

Foram definidos 33 parâmetros geométricos, dentre eles posição em X, Y e Z de cada duto como também as rotações em torno desses mesmos eixos. A figura 9 apresenta alguns desses parâmetros.

Figura 9 – Parâmetros geométricos dos dutos de admissão

Fonte: (GRANQUIST, 2010)

A partir dos dados de posição e número de *swirl* para 120 cabeçotes, foram realizadas diversas regressões lineares múltiplas e como resultado, foram obtidos seis modelos de regressão. Alguns desses modelos de regressão possuem variáveis comuns e outras variáveis são exclusivas de cada modelo.

No geral (GRANQUIST, 2010) encontrou para os modelos de regressão uma taxa de interpretação de 54% a 60% do fenômeno. O duto curvo possui maior influência no número de *swirl* do que o duto reto e com maior impacto no sentido Y.

Através dos trabalhos pesquisados pode-se observar uma relação direta entre a posição dos dutos de admissão e o comportamento do fluxo de ar no interior do cilindro do motor.

2.7 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Segundo (COSTA NETO, 2002) a regressão linear múltipla é utilizada para estudar o comportamento linear de uma variável dependente em função de duas ou mais variáveis independentes.

A equação (9) descreve o modelo de uma regressão linear múltipla para o caso geral de k variáveis independentes.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \beta_3 \times x_3 + \cdots + \beta_k \times x_k \quad (9)$$

Onde:

y – variável dependente da equação de regressão;

x – variáveis independentes da equação de regressão;

β – coeficientes da equação de regressão.

Para determinar os coeficientes que melhor se ajustam aos dados observados, equaciona-se o desvio quadrático total como sendo a somatória dos desvios quadráticos da regressão, toma-se sua derivada parcial em relação a cada coeficiente a ser determinado e iguala-se a zero cada uma dessas derivadas, obtendo-se k+1 equações lineares nas incógnitas β .

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014), o sistema de equações pode ser expresso na forma matricial conforme a equação (10).

$$(X' \times Y) = (X' \times X) \times \beta \quad (10)$$

Onde Y é o vetor coluna dos n pontos da variável dependente, X é a matriz de n linhas e k+1 colunas, sendo a primeira formada de números 1 e as demais correspondentes a cada um dos valores de cada variável explicativa e X' é a transposta da matriz X. A solução do sistema fica conforme a equação (11).

$$\beta = (X' \times X)^{-1} \times (X' \times Y) \quad (11)$$

Explicitando cada componente, a matriz Y refere-se aos valores da variável dependente na equação de regressão.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix}$$

Já no caso da matriz X , os valores são referentes às variáveis independentes na equação de regressão. Importante observar que a primeira coluna dessa matriz X é composta exclusivamente pelo número 1.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix}$$

A transposta da matriz X é indicada como matriz X' onde os elementos de uma mesma linha da matriz X são movidos para uma mesma coluna na matriz X' e da mesma forma para os elementos de uma mesma coluna da matriz X que são movidos para uma mesma linha na matriz X' .

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ X_{11} & X_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1k} & X_{2k} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix}$$

Por fim é possível visualizar todas as operações necessárias ao cálculo dos coeficientes da equação de regressão linear múltipla em sua forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ X_{11} & X_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1k} & X_{2k} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \\ \times \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\ X_{11} & X_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1k} & X_{2k} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix} \right\}$$

2.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA REGRESSÃO

Após encontrar os coeficientes β da regressão linear múltipla é necessário realizar uma verificação para saber o quanto a equação é representativa para descrever o fenômeno. Essa verificação é conhecida como análise de variância.

Segundo (COSTA NETO, 2002) esta análise de variância pode ser feita estudando-se as seguintes características do modelo de regressão.

- Graus de liberdade;
- Soma dos quadrados dos desvios;
- Desvio quadrático médio;
- Variável de teste F;
- F de significação.

Para essas características, o estudo é feito separando-se as fontes de variação do modelo de regressão conforme seguem.

- Variação devido à regressão;
- Variação residual;
- Variação total.

O número de graus de liberdade da regressão é igual ao número de variáveis independentes da equação de regressão (no equacionamento o número k). Outro conceito importante refere-se ao número de amostras, neste caso, o número de ensaios realizados para obtenção da equação de regressão linear múltipla (no equacionamento o número n_a).

De acordo com (COSTA NETO, 2002) o número de graus de liberdade do resíduo é dado conforme a equação (12).

$$gl_{res} = n_a - k - 1 \quad (12)$$

Onde:

gl_{res} – graus de liberdade do resíduo;
 n_a – número de amostras/testes;
 k – graus de liberdade da regressão.

Ainda conforme (COSTA NETO, 2002) o número de graus de liberdade total pode ser obtido através da equação (13).

$$gl_{tot} = n_a - 1 \quad (13)$$

Onde:

gl_{tot} – graus de liberdade total.

Para quantificar a aderência do modelo linear escolhido às amostras do fenômeno, é necessário calcular alguns coeficientes para que seja possível obter a soma dos quadrados das variações representadas pelo modelo. Segundo (COSTA NETO, 2002) esses coeficientes podem ser obtidos pela equação (14).

$$S_{iy} = \sum x_{ij} \times y_j - \frac{\sum x_{ij} \times \sum y_j}{n_a} \quad (14)$$

Onde:

S_{iy} – coeficientes de regressão;
 x_{ij} – valores de ensaio das variáveis independentes;
 y_j – valores de ensaio da variável dependente.

Segundo (COSTA NETO, 2002) a soma de quadrados devido à regressão pode ser encontrada a partir da equação (15).

$$SQ_{reg} = \sum_{i=1}^k \beta_i \times S_{iy} \quad (15)$$

Onde:

SQ_{reg} – soma de quadrados das variações devidas à regressão;
 β_i – coeficiente da equação de regressão.

O cálculo da soma dos quadrados da variação total da variável dependente, que nada mais é que a soma dos quadrados das variações dessa variável em torno de seu valor médio pode ser feita, segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) conforme a equação (16).

$$SQ_{tot} = \sum_{j=1}^{n_a} y_j^2 - \frac{(\sum y_j)^2}{n_a} \quad (16)$$

Onde:

SQ_{tot} – soma de quadrados total.

A soma dos quadrados dos resíduos pode ser obtida, conforme (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) através da equação (17).

$$SQ_{res} = SQ_{tot} - SQ_{reg} \quad (17)$$

Onde:

SQ_{res} – soma de quadrados do resíduo.

Para o cálculo do valor quadrático médio da variação decorrente da regressão, segue a equação (18), de acordo com (COSTA NETO, 2002).

$$MQ_{reg} = \frac{SQ_{reg}}{k} \quad (18)$$

Onde:

MQ_{reg} – média quadrática devida à regressão.

No caso do cálculo do valor quadrático médio dos resíduos, pode ser utilizada a equação (19), segundo (COSTA NETO, 2002).

$$MQ_{res} = \frac{SQ_{res}}{gl_{res}} \quad (19)$$

Onde:

MQ_{res} – valor quadrático médio do resíduo.

Em seu livro (COSTA NETO, 2002) demonstra que a variável de teste F pode ser obtida através da equação (20).

$$F = \frac{MQ_{reg}}{MQ_{res}} \quad (20)$$

Onde:

F – variável de teste F.

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) é necessário testar a significância da regressão partindo de duas hipóteses distintas como seguem.

- Hipótese nula (H_0): $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$;
- Hipótese alternativa (H_1): $\beta_i \neq 0$ no mínimo para um coeficiente β .

A confirmação da hipótese nula exclui a existência de regressão. Para que essa hipótese nula seja rejeitada é necessário que ela respeite o seguinte critério.

$$F > F_{\alpha s; k; gl_{res}}$$

Onde:

$F_{\alpha s; k; gl_{res}}$ – F de significação.

O valor calculado da variável de teste F deve ser maior do que o valor do F de significação, esse F de significação pode ser consultado na correspondente tabela de distribuições *F de Snedecor* disponível em (COSTA NETO, 2002).

Uma forma alternativa de obter o F de significação é através do comando INVF no Excel. Neste caso é necessário indicar o nível de significação pretendido, seguido dos graus de liberdade da regressão e dos graus de liberdade do resíduo.

De acordo com (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) o coeficiente de determinação múltipla expressa uma fração da variabilidade dos resultados, ele pode ser calculado a partir da equação (21).

$$R_m^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{tot}} \quad (21)$$

Onde:

R_m^2 – coeficiente de determinação múltipla.

Conforme (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) o coeficiente de correlação múltipla representa a medida da associação linear entre y e $x_1, x_2, \dots, x_k$ e pode ser obtido através da equação (22).

$$R_m = \sqrt{R_m^2} \quad (22)$$

Onde:

R_m – coeficiente de correlação múltipla.

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) o coeficiente ajustado de determinação múltipla também é frequentemente utilizado, por ajudar a explicar melhor a regressão. Seu cálculo é feito a partir da equação (23).

$$R_a^2 = 1 - \left[\frac{\left(\frac{SQ_{res}}{gl_{res}} \right)}{\left(\frac{SQ_{tot}}{gl_{tot}} \right)} \right] \quad (23)$$

Onde:

R_a^2 – coeficiente ajustado de determinação múltipla.

A razão para ele explicar melhor a variabilidade de resultados é que, de acordo com (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) o coeficiente ajustado de determinação múltipla aumenta somente quando é acrescentada uma variável que ocasione redução do desvio quadrático médio do resíduo, diferentemente do coeficiente de determinação múltipla, que sempre aumenta quando se adicionam novas variáveis.

O erro padrão ou desvio padrão da regressão linear múltipla é obtido através da raiz quadrada da soma de quadrados do resíduo dividida pelos graus de liberdade do resíduo, conforme a equação (24).

$$ep = \sqrt{\frac{SQ_{res}}{gl_{res}}} \quad (24)$$

Onde:

ep – erro padrão ou desvio padrão da regressão linear múltipla.

2.9 ANÁLISE DOS COEFICIENTES INDIVIDUAIS DA REGRESSÃO

Para a análise dos coeficientes da equação de regressão é necessário encontrar primeiro as variâncias desses coeficientes. Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) essas variâncias correspondem aos elementos da diagonal principal da matriz simétrica de covariância.

Essa matriz simétrica de covariância corresponde à parcela da matriz inversa na equação (11).

$$(X' \times X)^{-1}$$

Com o objetivo de exemplificar tais elementos, segue a matriz C representando a matriz simétrica de covariância.

$$C = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$$

Tratando-se de uma matriz simétrica ($C_{01} = C_{10}$, $C_{02} = C_{20}$ e $C_{12} = C_{21}$), com os respectivos elementos da diagonal principal (C_{00} , C_{11} e C_{22}).

O erro padrão ou desvio padrão de um coeficiente da equação de regressão pode ser obtido por meio da equação (25), de acordo com (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014).

$$ep_{\beta_i} = \sqrt{MQ_{res} \times C_{ii}} \quad (25)$$

Onde:

ep_{β_i} – erro padrão ou desvio padrão de um coeficiente da regressão;

C_{ii} – elementos da diagonal principal da matriz de covariância.

A variável de teste ts pode ser calculada a partir da equação (26), segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014).

$$ts_{\beta_i} = \frac{\beta_i}{ep_{\beta_i}} \quad (26)$$

Onde:

ts_{β_i} – variável de teste ts do coeficiente da equação de regressão.

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) é necessário realizar um teste parcial ou marginal com o objetivo de testar a significância de cada coeficiente da regressão, esse teste possui duas hipóteses distintas.

- Hipótese nula (H_0): $\beta_i = 0$;
- Hipótese alternativa (H_1): $\beta_i \neq 0$.

Para a estatística de teste, (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) compara o valor calculado da variável de teste ts com o valor tabelado para t de Student. A rejeição da hipótese nula deve cumprir o seguinte critério.

$$|ts_{\beta_i}| > ts_{\alpha/2; gl_{res}}$$

Onde:

$ts_{\alpha/2; gl_{res}}$ – t de Student.

Como última etapa dessa análise, pode ser criado um intervalo de confiança para cada coeficiente, conforme (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) através da equação (27).

$$\beta_i - (ts_{\alpha/2; gl_{res}} \times ep_{\beta_i}) \leq \beta_i \leq \beta_i + (ts_{\alpha/2; gl_{res}} \times ep_{\beta_i}) \quad (27)$$

2.10 EMISSÃO DE POLUENTES EM MOTORES DIESEL

A regulamentação PROCONVE P7 (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) que trata dos limites de emissão para veículos pesados no Brasil está em vigor desde Janeiro de 2012. Ela é baseada na Diretiva 1999/96/EC do Parlamento Europeu e do Conselho, conhecida como EURO 5.

Na tabela 1 é possível observar a evolução do controle sobre a emissão de poluentes em veículos pesados na Europa.

Tabela 1 – Limites de emissão para veículos pesados

g/kWh	Data	CO	HC	Ciclo ESC		
				NOx	MP	Fumaça (m ⁻¹)
	1982	14,00	3,50	18,40		
Euro 0	1990	11,20	2,40	14,40		
Euro 1	1993	4,50	1,10	8,00	0,36	
Euro 2	1998	4,00	1,10	7,00	0,15	
Euro 3	2000	2,10	0,66	5,00	0,10	0,80
Euro 4	2005	1,50	0,46	3,50	0,02	0,50
Euro 5	2009	1,50	0,46	2,00	0,02	0,50
Euro 6	2014	1,50	0,13	0,40	0,01	

Fonte: Adaptado de (MARTINS, 2013)

Fica bem evidente pelos números apresentados na tabela 1 que o controle de emissões tem sido cada vez mais rígido. Para alcançar tais limites as montadoras são obrigadas a investir constantemente em novas tecnologias.

Segundo (MARTINS, 2013) uma das maiores dificuldades nos motores diesel são as grandes quantidades de NOx (Óxidos de Nitrogênio) produzidas em sua combustão. Ele é formado devido à alta temperatura dos gases de combustão. Quanto maior a temperatura e a quantidade de oxigênio disponível maior será a quantidade de NOx formada.

O sistema de pós-tratamento conhecido como SCR (*Selective Catalytic Reduction*) é um dos utilizados para reduzir as emissões de NOx. De acordo com (MARTINS, 2013) a redução de NOx pode superar os 80% ao utilizar um catalisador para a reação química.

Por razões de segurança e toxicidade a substância preferencialmente utilizada no sistema SCR é a ureia (GUAN et al., 2014), comercializada com o nome *AdBlue* na Europa e como ARLA 32 (Agente Redutor Líquido Automotivo) no Brasil. Através da figura 10 é possível visualizar um esquema básico de funcionamento do SCR.

Figura 10 – Esquema básico do sistema SCR

Fonte: Adaptado de (SCANIA, 2016a)

Segundo (BRUNETTI, 2012b) o NO_x e o MP (Material Particulado) são as principais emissões dos motores diesel. As partículas de MP são oriundas da combustão incompleta, trazem risco à saúde porque são bem pequenas e podem ser respiráveis.

Também (BRUNETTI, 2012b) relata que em condições de carga em que a mistura é rica, por exemplo, próximo às gotículas injetadas de combustível há a formação de HC (Hidrocarbonetos) não queimados que dão origem aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos que iniciam as pequenas partículas de fuligem.

Conforme (BRUNETTI, 2012b) o CO (Monóxido de Carbono) é formado pela combustão incompleta de hidrocarbonetos, gerando perda de eficiência do motor. Trata-se de um gás inodoro que, ao reagir com a hemoglobina, diminui a capacidade do sangue para transportar oxigênio.

Ainda de acordo com (BRUNETTI, 2012b) motor do ciclo Otto precisa de muita atenção em relação à emissão de CO, pois funciona próximo da mistura estequiométrica em cargas parciais e com mistura rica (excesso de combustível) em plena carga. Já no caso do motor diesel, eles operam com excesso de ar na admissão e por isso acabam emitindo pouco CO.

O HC detectado nos gases de escape é, segundo (MARTINS, 2013) formado pela parte não queimada do combustível, proveniente do óleo do motor ou também pela fuga de pressão na válvula de escape durante os tempos de compressão e combustão.

Além disso, (MARTINS, 2013) afirma que a maior causa para formação de HC em motores diesel é o combustível retido no bico injetor após a injeção.

Por fim, (BRUNETTI, 2012b) destaca também que a emissão de HC em motores diesel é significativamente menor do que a encontrada em motores do ciclo Otto pelo fato de funcionarem com excesso de ar.

2.11 EFEITO DO *SWIRL* NO COMPORTAMENTO DO MOTOR DIESEL

De acordo com (BRUNETTI, 2012a) quando o *swirl* proporciona turbulência excessiva do ar na admissão acaba aumentando a perda de calor pelo aumento do fluxo térmico junto às paredes do cilindro.

Em seu livro, (HEYWOOD, 1988) destaca que mudanças na razão de *swirl* afetam tanto o processo de evaporação do combustível quanto a temperatura no instante de injeção do combustível, devido à troca de calor com as paredes do cilindro no tempo de compressão, podendo resultar em atraso de ignição.

Na pesquisa de (KIM, CHO e LEE, 2008) foi construído um sistema para estudar a combustão em um motor diesel monocilíndrico com injeção direta do tipo *common rail*. Foram desenvolvidos dois tipos de cabeçotes, um deles com número de *swirl* de 2,1 e outro com número de *swirl* de 0,1.

Outro dispositivo do sistema construído por (KIM, CHO e LEE, 2008) foi responsável por variar a pressão de injeção do combustível entre 500 e 1000 bar, com possibilidade de controlar a quantidade e o momento da injeção.

Para visualizar a combustão, (KIM, CHO e LEE, 2008) utilizaram uma câmera de alta velocidade com intensificador de imagem e luz xênon para iluminar o jato de injeção. Na figura 11 é possível observar imagens da combustão para diferentes pressões de injeção, momentos de injeção e número de *swirl*.

Figura 11 – Imagens da combustão no motor transparente

Fonte: Adaptado de (KIM, CHO e LEE, 2008)

A partir dessas imagens, (KIM, CHO e LEE, 2008) relatam que sob mesmas condições de pressão, é possível notar uma combustão com brilho mais intenso no cabeçote com número de *swirl* de 2,1 do que no cabeçote com número de *swirl* de 0,1. Isto significa que a combustão no cabeçote com número de *swirl* de 2,1 ocorreu de forma mais eficiente.

Com relação à taxa de liberação de calor na combustão, (KIM, CHO e LEE, 2008) constataram que quando o tempo de mistura é insuficiente (injeção no PMS), o *swirl* é fator dominante na combustão; mas quando esse tempo de mistura é suficiente (injeção 6° antes do PMS), a pressão de injeção é o fator dominante.

Em sua conclusão, (KIM, CHO e LEE, 2008) afirmam que para uma baixa pressão de injeção combinada com atraso do momento de injeção, existe uma significativa influência do *swirl* na combustão. A figura 12 ilustra essa influência.

Figura 12 – Taxa de liberação de calor em função do *swirl*

(a) Momento da injeção: PMS, pressão: 500 bar

Fonte: Adaptado de (KIM, CHO e LEE, 2008)

2.12 ENSAIO DE MOTORES DIESEL

A maneira mais prática de medir o desempenho, eficiência e emissões de motores; é instalando-o em uma bancada na qual ele é submetido a uma carga que possa demandar diferentes valores de torque e rotação deste motor.

A Diretiva 1999/96/CE, prescreve que o ensaio seja feito conforme o ciclo ESC (*European Stationary Cycle*). Segundo (DIESELNET, 2016) no ciclo ESC o motor deve operar em 13 modos distintos dentro de um tempo pré-estabelecido para cada modo, as mudanças de carga e rotação devem ser completadas dentro dos 20 segundos iniciais de cada modo.

Ainda de acordo com (DIESELNET, 2016) a rotação do motor em cada um dos modos deve se manter dentro do limite de ± 50 rpm e o torque deve se manter no limite de $\pm 2\%$ do máximo torque para aquela rotação. A tabela 2 apresenta as condições de operação do motor para cada um dos 13 modos.

Tabela 2 – Esquema do ensaio ESC

Modo	Rotação do Motor	Carga (%)	Peso (%)	Duração
1	marcha-lenta	0	15	4 minutos
2	A	100	8	2 minutos
3	B	50	10	2 minutos
4	B	75	10	2 minutos
5	A	50	5	2 minutos
6	A	75	5	2 minutos
7	A	25	5	2 minutos
8	B	100	9	2 minutos
9	B	25	10	2 minutos
10	C	100	8	2 minutos
11	C	25	5	2 minutos
12	C	75	5	2 minutos
13	C	50	5	2 minutos

Fonte: Adaptado de (DIESELNET, 2016)

Conforme (DIESELNET, 2016) as emissões são medidas durante cada um dos modos e um valor global é obtido a partir de uma série de pesos. A emissão de material particulado é obtida através da coleta de uma única amostra para o ciclo inteiro. O resultado final das emissões é expresso em g/kWh.

3 DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO

Os itens a seguir detalham as etapas do experimento:

- Primeiramente com a visita a uma fundição, onde a ideia de deslocar os dutos de admissão diretamente nos machos de fundição mostrou-se viável;
- Depois com o controle dimensional da posição dos dutos de admissão, tarefa essencial para assegurar que os deslocamentos idealizados no conceito foram realmente respeitados;
- A seguir o acabamento dos cabeçotes por meio da usinagem e montagem dos componentes, para posterior medição do *swirl* dos cabeçotes utilizando a máquina de medição;
- Por último os cabeçotes foram ensaiados diretamente em um motor diesel para testes de desempenho em dinamômetro.

3.1 VISITA À FUNDIÇÃO

A visita teve como objetivo conhecer o processo de fundição do cabeçote para que fossem identificadas possíveis oportunidades de estudo em relação à precisão dimensional ou geométrica deste cabeçote.

Foi possível concluir nesta visita técnica que seria viável construir protótipos variando a posição dos dutos de admissão nas direções X e Y. A localização dos dutos de admissão no cabeçote e suas respectivas denominações podem ser vistas na figura 13.

Figura 13 – Dutos de admissão do cabeçote

- — Duto de admissão curto
- — Duto de admissão longo

Fonte: Autor

3.2 FABRICAÇÃO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

Para não comprometer o processo de usinagem do cabeçote determinou-se o deslocamento de 1 mm em relação ao centro dos dutos de admissão nas direções X e Y porque uma variação excessiva poderia ocasionar a quebra de ferramenta.

A padronização de 1 mm em ambas as direções foi definida também porque no processo de desbaste dos machos de fundição é bem complicado atingir uma precisão na casa dos décimos de milímetro.

Nas figuras 14, 15, 16 e 17 é possível observar as diferentes posições dos dutos de admissão consideradas para os protótipos de cabeçote deste estudo. Já a figura 18 apresenta o modelo que respeita o projeto atual do cabeçote que servirá como principal referência de comparação.

Figura 14 – Cabeçote modelo A

Fonte: Autor

Figura 15 – Cabeçote modelo B

Fonte: Autor

Figura 16 – Cabeçote modelo C

Fonte: Autor

Figura 17 – Cabeçote modelo D

Fonte: Autor

Figura 18 – Cabeçote modelo N

Fonte: Autor

Na figura 19 é possível observar a caixa inferior de fundição que contém os machos dos dutos de admissão e na figura 20 o esquema utilizado para desbastar os alojamentos dos machos dos dutos de admissão na caixa inferior de fundição para construir os diferentes protótipos deste estudo.

Figura 19 – Machos dos dutos de admissão

Fonte: Autor

Figura 20 – Desbaste dos alojamentos dos machos de fundição

Fonte: Autor

Foram disponibilizados trinta protótipos de cabeçote para esse estudo, sendo seis cabeçotes do modelo A, seis cabeçotes do modelo B, seis cabeçotes do modelo C, seis cabeçotes do modelo D e finalmente seis cabeçotes do modelo N.

3.3 MEDIÇÃO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

Para medição dos deslocamentos dos dutos de admissão dos cabeçotes foi utilizada uma mesa de medição tridimensional ZEISS ACCURA conforme pode ser visualizada na figura 21.

Figura 21 – Mesa de medição ZEISS ACCURA

Fonte: (ZEISS, 2016)

Os cabeçotes foram medidos pela mesa de medição antes de passarem pelo processo de usinagem, ou seja, nas mesmas condições em que foram entregues pela fundição.

Através desta mesa de medição foi possível obter os valores de deslocamento dos dutos de admissão dos cabeçotes a partir do centro de cada duto. A figura 22 apresenta a orientação dos eixos X e Y adotados pela mesa de medição.

Figura 22 – Orientação dos eixos X e Y adotados pela mesa de medição

Fonte: Autor

3.4 USINAGEM DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

Em seguida esses cabeçotes brutos foram usinados e complementados com a montagem das sedes de válvulas, válvulas, molas e demais itens para que os cabeçotes estivessem prontos para serem testados na máquina de medição do *swirl*.

Na figura 23 é possível verificar o cabeçote completo, com os processos de usinagem e montagem finalizados.

Figura 23 – Cabeçote completo

Fonte: Autor

3.5 MEDIÇÃO DO *SWIRL* DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

A figura 24 apresenta uma vista do equipamento, destacando os principais componentes da máquina de medição.

Figura 24 – Equipamento de medição do *swirl*

Fonte: Autor

Os trinta protótipos de cabeçote foram devidamente identificados em suas laterais conforme as designações da tabela 3.

Tabela 3 – Designação dos protótipos de cabeçote

Cabeçote A	Cabeçote B	Cabeçote C	Cabeçote D	Cabeçote N
A1	B1	C1	D1	N1
A2	B2	C2	D2	N2
A3	B3	C3	D3	N3
A4	B4	C4	D4	N4
A5	B5	C5	D5	N5
A6	B6	C6	D6	N6

Fonte: Autor

Para que não houvesse entrada de ar pelo orifício do bico injetor, foi montado no cabeçote o próprio bico injetor utilizado neste modelo de motor diesel. Dessa forma, a vedação do circuito ficou garantida e não foi necessário outro tipo de intervenção que pudesse danificar os cabeçotes, lembrando que essas peças ainda seriam utilizadas durante ensaios no dinamômetro.

Depois da fixação do cabeçote no cilindro de passagem foi utilizada uma base magnética com um relógio comparador acoplado para que pudesse ser feito o controle de abertura e fechamento das válvulas de admissão durante o ensaio. Por meio de um parafuso de ajuste foi feito o fechamento e abertura das válvulas de admissão.

Através da figura 25 é possível observar o dispositivo de controle do fechamento e abertura das válvulas de admissão.

Figura 25 – Dispositivo de abertura e fechamento das válvulas

Fonte: Autor

Para cada ponto de leitura foram extraídos os seguintes dados: temperatura da sala, rotação da bomba de vácuo *roots*, queda de pressão no cilindro, queda de pressão no tanque e torque aplicado na colmeia do equipamento.

O equipamento utilizado nos experimentos deste trabalho utiliza a rotação da bomba de vácuo *roots*, associada à diferença de pressão, para medir a vazão em massa de ar.

Uma vez obtida a vazão em massa do ar na saída dos dutos de admissão, foi possível determinar a razão de *swirl* para cada ponto e por fim o número de *swirl* de cada cabeçote ensaiado.

3.6 ENSAIO DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS NO MOTOR DIESEL

Para os ensaios no dinamômetro foi utilizado um motor diesel conforme especificação descrita na tabela 4.

Tabela 4 – Especificação do motor diesel utilizado nos ensaios

Modelo	DC09 110
Número de cilindros	5
Cilindrada	9,3 dm ³
Potência máxima	228 kW @ 1900 rpm
Torque máximo	1550 Nm @ 1100-1350 rpm

Fonte: Adaptado de (SCANIA, 2016b)

O esquema proposto para os testes no dinamômetro foi o de realizar um ensaio de plena carga seguido do ensaio ESC do motor com três repetições, considerando que ele estivesse montado com os cabeçotes de mesmo modelo.

Para exemplificar, foi realizado um ensaio de plena carga seguido de três repetições do ensaio ESC com o motor utilizando os cabeçotes do modelo N. Em seguida os cabeçotes do modelo N foram removidos e substituídos pelos cabeçotes do modelo A e foi feito novamente o ensaio de plena carga e o ESC deste motor com três repetições para posterior análise dos dados.

Como a fundição produziu seis cabeçotes de cada modelo, para esse trabalho foi necessário eliminar um cabeçote de cada grupo.

Antes de entender o critério para escolha do cabeçote eliminado de cada modelo, é importante detalhar a forma com que se denomina cada um dos cilindros.

O cilindro número 1 é aquele na extremidade em que está localizada a polia da correia do alternador, os cilindros seguintes são aqueles imediatamente posteriores a ele.

Na figura 26 é possível observar um modelo de motor diesel semelhante ao utilizado nos testes do dinamômetro e a respectiva numeração dos cilindros.

Figura 26 – Motor diesel semelhante ao utilizado nos testes

Fonte: Adaptado de (SCANIA, 2016c)

Em relação aos cabeçotes eliminados de cada modelo, foi necessário fazer uma análise comparando o número de *swirl* obtido pela máquina de medição com o número de *swirl* obtido através da equação de regressão linear múltipla. Os cabeçotes que apresentaram maior desvio percentual entre *swirl* medido e calculado foram descartados para os testes do motor no dinamômetro.

Para padronizar a montagem dos cabeçotes no motor foi adotado o critério de utilizar o cabeçote com maior número de *swirl* medido no cilindro com maior temperatura média e assim consecutivamente.

O cilindro com maior temperatura média nas rotações de ensaio do dinamômetro é o número 5, seguido dos cilindros 1, 2, 4 e, finalmente, o cilindro 3.

Sendo assim, os ensaios no dinamômetro foram divididos em cinco testes, cada um utilizando os diferentes tipos de cabeçotes. A disposição de montagem no motor para cada cabeçote pode ser observada na tabela 5 e foi definida com base nos valores medidos de *swirl*.

Tabela 5 – Disposição de montagem dos cabeçotes

Cilindro		Cabeçotes			
1	N5	A3	B2	C5	D1
2	N1	A2	B6	C4	D3
3	N6	A5	B4	C2	D4
4	N4	A1	B5	C3	D6
5	N3	A4	B1	C6	D5

Fonte: Autor

Para garantir a segurança dos ensaios do motor no dinamômetro, algumas peças foram substituídas entre as montagens, para evitar quebra ou perda de função dessas peças causadas pelas seguidas operações de montagem e desmontagem dos componentes.

- Juntas dos cabeçotes;
- Parafusos dos cabeçotes;
- Parafusos do balancim;
- Parafusos do bico injetor;
- Juntas do coletor de escapamento;
- Parafusos do coletor de escapamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados encontrados nas medições dos deslocamentos dos dutos de admissão, medições de *swirl* dos cabeçotes, medições de $\mu\sigma_m$, regressão linear múltipla do número de *swirl*, ensaios de plena carga e ensaios de emissões do motor.

4.1 DESLOCAMENTO DOS DUTOS DE ADMISSÃO

Na tabela 6 são apresentados os respectivos deslocamentos de cada um dos dutos de admissão dos cabeçotes deste trabalho.

Tabela 6 – Deslocamento dos dutos de admissão

Cabeçote	Duto curto		Duto longo	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
A1	-0,1671	1,4774	-0,3522	1,2733
A2	0,1390	1,2678	-0,1562	1,2351
A3	0,3123	1,1368	0,0280	1,0593
A4	-0,4295	1,2784	-0,1179	1,3826
A5	-0,1242	1,7067	-0,2584	1,3174
A6	-0,1946	1,2742	-0,5978	1,4534
B1	-0,0908	1,2082	0,1633	-1,0264
B2	-0,1898	1,0448	-0,4018	-1,1652
B3	-0,2651	1,3526	-0,2670	-0,8264
B4	0,1134	1,5625	-0,5452	-1,1214
B5	0,0373	1,4777	0,1606	-0,8279
B6	0,0606	1,1645	-0,1977	-1,1155
C1	-1,4127	0,2311	-1,6247	0,1965
C2	-0,8348	0,3345	-1,2324	0,4066
C3	-1,0467	0,4599	-1,1552	0,5185
C4	-1,1695	0,4120	-1,4228	0,3163
C5	-1,0423	0,5111	-0,8725	0,0575
C6	-1,3648	0,4209	-1,1557	0,2621
D1	0,6832	0,4825	-0,8777	0,1688
D2	0,3845	0,1006	-1,2711	0,0664
D3	0,9089	0,4175	-1,0254	-0,1420
D4	1,2493	0,4761	-1,0846	0,1363
D5	1,1220	0,1900	-0,7330	0,0446
D6	0,8579	0,1779	-1,3399	0,1942
N1	-0,4997	0,3882	-0,3695	0,1517
N2	-0,3994	0,4295	-0,3066	0,3259
N3	-0,4632	0,2081	-0,4580	0,0160
N4	-0,2341	0,2983	-0,2274	0,3022
N5	-0,1732	0,2006	-0,0541	0,1576
N6	0,1025	0,2816	0,0612	0,1994

Fonte: Autor

Pelos resultados das medições é possível observar que para a grande maioria dos cabeçotes os deslocamentos dos dutos de admissão respeitaram o que fora proposto. Os cabeçotes D1 e D2 foram os únicos que apresentaram deslocamentos significativamente inferiores do que fora previsto.

A figura 27 ilustra a posição real dos dutos de admissão de alguns dos cabeçotes deste trabalho.

Figura 27 – Posição real dos dutos de admissão em alguns cabeçotes

- Duto de admissão curto
- Duto de admissão longo

Fonte: Autor

Nota-se uma descentralização entre as saídas dos dutos de admissão e os alojamentos dos assentos de válvula, gerada pelo deslocamento dos machos de fundição.

4.2 NÚMERO DE *SWIRL* DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

A tabela 7 apresenta as variações dos valores de número de *swirl* que foram obtidas nos ensaios de cada cabeçote protótipo.

Tabela 7 – Número de *swirl* dos cabeçotes¹

Cabeçote	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
	Diâmetro maior	Diâmetro menor	Diâmetro menor
N1	0,97	0,75	0,66
N2	0,95	0,74	0,68
N3	1,03	0,77	0,72
N4	0,83	0,61	0,59
N5	0,88	0,69	0,63
N6	0,82	0,63	0,59
A1	0,28	0,22	0,18
A2	0,22	0,16	0,14
A3	0,34	0,28	0,25
A4	0,31	0,23	0,19
A5	0,18	0,09	0,08
A6	0,08	0,02	0,00
B1	0,76	0,64	0,62
B2	0,78	0,62	0,59
B3	0,77	0,64	0,64
B4	0,60	0,45	0,43
B5	0,67	0,56	0,55
B6	0,69	0,53	0,53
C1	0,90	0,62	0,63
C2	0,90	0,63	0,65
C3	0,92	0,66	0,67
C4	0,94	0,69	0,70
C5	0,93	0,70	0,70
C6	0,96	0,70	0,70
D1	0,50	0,29	0,30
D2	0,54	0,26	0,28
D3	0,42	0,16	0,15
D4	0,38	0,11	0,13
D5	0,57	0,34	0,35
D6	0,40	0,14	0,14

Fonte: Autor

¹ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

Para facilitar a interpretação dos resultados encontrados na tabela 7, o gráfico 1 compara as variações dos valores de número de *swirl* dos cabeçotes obtidas com cilindros de diferentes diâmetros de passagem.

Gráfico 1 – Número de *swirl* dos cabeçotes²

Fonte: Autor

Através deste gráfico é possível notar um sensível aumento do número de *swirl* ao utilizar um cilindro de passagem com diâmetro maior, além de uma considerável redução do número de *swirl* nos cabeçotes dos modelos A e D em relação aos demais.

4.3 VALORES DE $\mu\sigma_m$ DOS CABEÇOTES PROTÓTIPOS

Na tabela 8 são apresentadas as variações dos valores de $\mu\sigma_m$ que foram obtidas nos ensaios de cada cabeçote protótipo.

² Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

Tabela 8 – Valores de $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes³

Cabeçote	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
	Diâmetro maior	Diâmetro menor	Diâmetro menor
N1	0,005	0,002	0,002
N2	0,006	0,004	0,003
N3	0,003	0,000	0,000
N4	0,007	0,006	0,005
N5	0,007	0,004	0,005
N6	0,007	0,005	0,005
A1	0,021	0,016	0,016
A2	0,021	0,015	0,016
A3	0,018	0,015	0,015
A4	0,021	0,029	0,017
A5	0,021	0,015	0,016
A6	0,021	0,015	0,016
B1	0,009	0,006	0,006
B2	0,011	0,006	0,006
B3	0,012	0,008	0,008
B4	0,016	0,010	0,010
B5	0,013	0,009	0,008
B6	0,011	0,007	0,007
C1	0,007	0,005	0,004
C2	0,010	0,006	0,006
C3	0,008	0,006	0,005
C4	0,008	0,005	0,005
C5	0,009	0,006	0,006
C6	0,010	0,007	0,007
D1	0,008	0,006	0,007
D2	0,007	0,006	0,006
D3	0,012	0,010	0,009
D4	0,013	0,012	0,010
D5	0,006	0,005	0,004
D6	0,009	0,007	0,006

Fonte: Autor

Para facilitar a interpretação dos resultados encontrados na tabela 8, o gráfico 2 compara as variações dos valores de $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes obtidas com cilindros de diferentes diâmetros de passagem.

³ Resultados em relação ao menor valor de $\mu\sigma_m$ encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

Gráfico 2 – Valores de $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes⁴

Fonte: Autor

Nota-se um aumento do $\mu\sigma_m$ dos cabeçotes do modelo A em relação aos cabeçotes do modelo N, isto demonstra que houve um aumento significativo da vazão em massa do ar nos cabeçotes do modelo A. Na comparação entre os diferentes diâmetros é possível notar um aumento do $\mu\sigma_m$ ao utilizar um cilindro de passagem com diâmetro maior.

Os cabeçotes B, C e D também apresentaram aumento do $\mu\sigma_m$ em relação ao modelo N, mas esse aumento não foi tão expressivo quanto o do modelo A.

4.4 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DO *SWIRL*

O objetivo de fazer esta regressão linear múltipla foi o de encontrar uma equação capaz de descrever o número de *swirl* a partir do valor de deslocamento dos dutos de admissão do cabeçote.

A equação (28) é composta pelos deslocamentos dos dutos de admissão e também dos seus coeficientes.

⁴ Resultados em relação ao menor valor de $\mu\sigma_m$ encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

$$\left(\frac{n_D}{n}\right)_m = \beta_0 + \beta_1 \times S_x + \beta_2 \times S_y + \beta_3 \times L_x + \beta_4 \times L_y \quad (28)$$

Onde:

S_x – deslocamento em X do duto curto;

S_y – deslocamento em Y do duto curto;

L_x – deslocamento em X do duto longo;

L_y – deslocamento em Y do duto longo.

Para a determinação dos coeficientes, foram adotadas duas abordagens, a saber: uma considerando que cada medição era um elemento da amostra e outra utilizando a média das duas medições de cada cabeçote como uma amostra. O objetivo deste procedimento foi o de avaliar a importância relativa da diferença entre as duas medições de cada cabeçote nos resultados finais da incerteza de cada coeficiente.

O primeiro passo foi encontrar o desvio padrão das duas medições de cada cabeçote. Os cálculos preliminares desta análise encontram-se na tabela 9.

Tabela 9 – Cálculos preliminares do desvio padrão das medições⁵

Cabeçote	Ensaio 2	Ensaio 3	Desvio (Ensaio 2 - Ensaio 3)	Desvio^2
N1	0,749	0,665	0,084	0,00705
N2	0,743	0,676	0,067	0,00444
N3	0,774	0,720	0,054	0,00291
N4	0,612	0,587	0,025	0,00064
N5	0,687	0,632	0,056	0,00312
N6	0,631	0,588	0,043	0,00186
A1	0,225	0,175	0,050	0,00245
A2	0,162	0,139	0,022	0,00050
A3	0,279	0,247	0,032	0,00103
A4	0,226	0,195	0,032	0,00100
A5	0,092	0,075	0,017	0,00028
A6	0,015	0,000	0,015	0,00024
B1	0,638	0,623	0,015	0,00022
B2	0,622	0,591	0,031	0,00093
B3	0,643	0,637	0,006	0,00004
B4	0,448	0,429	0,019	0,00037
B5	0,563	0,554	0,009	0,00008
B6	0,534	0,533	0,001	0,00000
C1	0,617	0,626	-0,009	0,00008
C2	0,626	0,646	-0,020	0,00041
C3	0,664	0,665	-0,002	0,00000
C4	0,688	0,701	-0,014	0,00019
C5	0,699	0,701	-0,002	0,00001
C6	0,695	0,697	-0,002	0,00000
D1	0,295	0,296	-0,001	0,00000
D2	0,264	0,284	-0,021	0,00042
D3	0,165	0,145	0,019	0,00038
D4	0,114	0,134	-0,019	0,00037
D5	0,345	0,345	0,000	0,00000
D6	0,138	0,144	-0,005	0,00003
			Média	0,00097

Fonte: Autor

Dessa forma é possível calcular o desvio padrão através da raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre as duas medições.

$$\text{desvio padrão} = \sqrt{0,00097} = 0,03$$

⁵ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

Em seguida foi necessário encontrar o desvio padrão da regressão linear múltipla utilizando a abordagem em que cada medição era um elemento da amostra para compará-lo com o desvio padrão das duas medições de cada cabeçote.

Neste capítulo os resultados da regressão linear múltipla foram extraídos diretamente do Excel. As linhas de cálculo para obtenção dos coeficientes da equação de regressão, linhas de cálculo da estatística de regressão e linhas de cálculo da análise dos coeficientes são apresentadas nos apêndices A, B e C considerando que cada medição era um elemento da amostra.

A tabela 10 apresenta a estatística de regressão da análise ANOVA (*Analysis of Variance*) para a abordagem em que cada medição era um elemento da amostra.

Tabela 10 – Estatística de regressão para 60 observações

R múltiplo	0,966
R-Quadrado	0,934
R-quadrado ajustado	0,929
Erro padrão	0,063
Observações	60

Fonte: Autor

É possível observar que o desvio padrão ou erro padrão desta regressão é de aproximadamente 0,06. Como o desvio padrão das medições é menor do que este valor (0,03) é possível considerar a segunda abordagem utilizando a média das duas medições de cada cabeçote como uma amostra da regressão.

Na tabela 11 é apresentada a análise ANOVA considerando a média das duas medições de cada cabeçote (30 observações).

Tabela 11 – Análise ANOVA para 30 observações

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	1,544	0,386	94,785	9,938E-15
Resíduo	25	0,102	0,004		
Total	29	1,646			

Fonte: Autor

Desta tabela é importante observar o valor do F de significação que representa o nível de significância da regressão linear múltipla. Um valor F de significação de 0,01 representaria 1% de significância e este já seria um valor bem razoável, como o valor encontrado é bem inferior a 0,01 pode-se concluir que esta regressão possui um ótimo nível de significância.

A tabela 12 apresenta os resultados da estatística de regressão da análise ANOVA para 30 observações.

Tabela 12 – Estatística de regressão para 30 observações

R múltiplo	0,969
R-Quadrado	0,938
R-quadrado ajustado	0,928
Erro padrão	0,064
Observações	30

Fonte: Autor

Os altos valores dos coeficientes de determinação (R múltiplo, R-quadrado e R-quadrado ajustado) todos acima de 0,9 demonstram que esta regressão linear múltipla descreve o fenômeno em mais de 90%, sendo este um ótimo resultado. O pequeno valor do erro padrão ou desvio padrão da regressão (aproximadamente 0,06) evidencia também uma alta representatividade, esse valor é bem próximo do encontrado para 60 observações o que ajuda a reforçar a utilização da média das duas medições de cada cabeçote.

Na tabela 13 encontra-se a análise dos coeficientes da equação de regressão linear para 30 observações.

Tabela 13 – Análise dos coeficientes da regressão para 30 observações⁶

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	0,745	0,034	21,815	8,640E-18	0,675	0,816
Variável Sx	-0,258	0,018	-14,693	8,364E-14	-0,294	-0,222
Variável Sy	-0,248	0,028	-8,982	2,673E-09	-0,305	-0,191
Variável Lx	0,194	0,028	6,951	2,758E-07	0,137	0,252
Variável Ly	-0,168	0,016	-10,588	9,999E-11	-0,200	-0,135

Fonte: Autor

Desta tabela é importante observar o valor-P da distribuição *t de Student* para cada coeficiente da equação de regressão. Normalmente essa distribuição é apresentada com um valor-P mínimo de 0,001 e como os valores-P encontrados são bem menores do que este é possível concluir que todos os coeficientes da equação de regressão são relevantes e com ótimo nível de significância.

Enfim é possível definir a equação de regressão linear múltipla substituindo os coeficientes encontrados na equação (28).

⁶ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

$$\left(\frac{n_D}{n}\right)_m = 0,745 - 0,258 \times S_x - 0,248 \times S_y + 0,194 \times L_x - 0,168 \times L_y$$

4.5 NÚMERO DE *SWIRL* MEDIDO E CALCULADO

Através da tabela 14 é possível observar o desvio entre *swirl* medido (média das duas medições de cada cabeçote) e *swirl* calculado (com 30 observações).

Tabela 14 – Comparação entre *swirl* medido e calculado⁷

Cabeçote	<i>Swirl</i> medido	<i>Swirl</i> calculado	Desvio (medido - calculado)
N1	0,707	0,681	0,026
N2	0,709	0,628	0,082
N3	0,747	0,722	0,025
N4	0,600	0,637	-0,037
N5	0,659	0,703	-0,044
N6	0,609	0,628	-0,018
A1	0,200	0,140	0,059
A2	0,150	0,158	-0,007
A3	0,263	0,211	0,052
A4	0,211	0,285	-0,074
A5	0,084	0,083	0,001
A6	0,008	0,120	-0,112
B1	0,631	0,673	-0,043
B2	0,606	0,653	-0,046
B3	0,640	0,565	0,074
B4	0,438	0,411	0,027
B5	0,559	0,540	0,019
B6	0,534	0,590	-0,056
C1	0,622	0,704	-0,083
C2	0,636	0,570	0,066
C3	0,665	0,590	0,075
C4	0,694	0,616	0,079
C5	0,700	0,709	-0,009
C6	0,696	0,725	-0,029
D1	0,296	0,250	0,045
D2	0,274	0,363	-0,089
D3	0,155	0,232	-0,077
D4	0,124	0,071	0,053
D5	0,345	0,259	0,086
D6	0,141	0,187	-0,046

Fonte: Autor

⁷ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

Como os cabeçotes N2, A6, B3, C1 e D2 apresentaram maior desvio entre *swirl* medido e calculado, eles foram os protótipos descartados para os testes do motor no dinamômetro.

4.6 PRINCIPAIS DIREÇÕES DE EFEITO NO NÚMERO DE *SWIRL*

Utilizando-se os coeficientes da equação de regressão linear múltipla é possível traçar as direções principais de efeito no *swirl* para cada um dos dutos de admissão, tais direções podem ser visualizadas no gráfico 3.

Gráfico 3 – Principais direções de efeito no *swirl*

Fonte: Autor

A direção principal do duto curto está localizada a 136° enquanto a do duto longo está a 41° . As direções perpendiculares a estas são justamente as de menor importância para o *swirl*. Importante ressaltar que essas direções são aproximadamente as direções com as quais os dutos chegam às sedes das válvulas, o que permite visualizar o principal efeito do deslocamento dos dutos na direção final dos fluxos de ar penetrando na câmara.

4.7 ENSAIOS DE PLENA CARGA

Foi realizado um ensaio de plena carga para cada configuração de montagem do motor. As tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 apresentam as variações dos valores de torque, consumo específico de combustível e FSN (*Filter Smoke Number*).

Tabela 15 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes N⁸

Rotação	Torque	Consumo específico	FSN
rpm	Nm	g/kWh	-
1950	0	16,9	0,19
1900	70	17,8	0,24
1720	176	9,8	0,13
1600	249	4,9	0,08
1540	290	5,1	0,08
1360	436	4,3	0,06
1250	438	2,5	0,05
1200	436	2,0	0,06
1180	440	1,5	0,06
1000	279	4,8	0,30

Fonte: Autor

Tabela 16 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes A⁹

Rotação	Torque	Consumo específico	FSN
rpm	Nm	g/kWh	-
1950	17	15,8	0,11
1900	87	16,5	0,16
1720	196	8,3	0,05
1600	272	3,4	0,02
1540	319	2,8	0,01
1360	473	1,8	0,00
1250	471	0,3	0,01
1200	465	0,0	0,03
1180	467	0,1	0,03
1000	290	5,1	0,34

Fonte: Autor

⁸ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

⁹ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

Tabela 17 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes B¹⁰

Rotação	Torque	Consumo específico	FSN
rpm	Nm	g/kWh	-
1950	8	16,7	0,16
1900	79	17,3	0,23
1720	184	9,2	0,11
1600	262	3,9	0,04
1540	307	3,9	0,05
1360	456	2,8	0,03
1250	459	1,3	0,01
1200	453	1,0	0,02
1180	455	1,0	0,03
1000	281	5,2	0,27

Fonte: Autor

Tabela 18 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes C¹¹

Rotação	Torque	Consumo específico	FSN
rpm	Nm	g/kWh	-
1950	3	17,5	0,20
1900	73	18,1	0,22
1720	181	10,3	0,13
1600	256	5,0	0,08
1540	300	5,1	0,08
1360	447	4,2	0,06
1250	448	2,5	0,05
1200	444	2,0	0,06
1180	446	1,9	0,06
1000	286	5,0	0,26

Fonte: Autor

¹⁰ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

¹¹ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

Tabela 19 – Ensaio de plena carga com os cabeçotes D¹²

Rotação	Torque	Consumo específico	FSN
rpm	Nm	g/kWh	-
1950	1	15,9	0,13
1900	73	16,8	0,17
1720	182	9,1	0,08
1600	259	4,2	0,03
1540	303	3,9	0,04
1360	451	3,0	0,02
1250	452	1,6	0,04
1200	446	1,3	0,02
1180	449	1,5	0,05
1000	275	6,3	0,50

Fonte: Autor

O gráfico 4 apresenta as variações das curvas de torque do motor em plena carga com cada grupo de cabeçotes.

Gráfico 4 – Curvas de torque em plena carga¹³

Fonte: Autor

É possível notar que o motor apresentou maior torque em plena carga ao utilizar os cabeçotes do modelo A. Possivelmente o menor número de *swirl* e o

¹² Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

¹³ Resultados em relação ao menor torque encontrado em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

correspondente aumento de $\mu\sigma_m$ desses cabeçotes permite um acréscimo da massa de ar admitida, reduz a perda de calor e, conseqüentemente, aumenta o trabalho realizado.

Da mesma forma, ao utilizar os cabeçotes do modelo N, neste caso o conjunto com maior número de *swirl* e menor valor de $\mu\sigma_m$, nota-se que o motor apresentou menor torque em plena carga.

Os cabeçotes do modelo B possuem maior número de *swirl* do que os cabeçotes A e D, mas mesmo assim apresentou uma curva de torque ligeiramente mais elevada do que nos cabeçotes D. Ao observar o $\mu\sigma_m$, nota-se que os cabeçotes B possuem um valor ligeiramente maior do que os cabeçotes D, possivelmente contribuindo para esse resultado.

No gráfico 5 são apresentadas as variações das curvas de consumo específico em plena carga com cada grupo de cabeçotes.

Gráfico 5 – Curvas de consumo específico em plena carga¹⁴

Fonte: Autor

Coerentemente com as curvas de torque apresentadas, o motor com o grupo A de cabeçotes mostrou menor consumo de combustível para produzir o mesmo trabalho.

¹⁴ Resultados em relação ao menor consumo específico encontrado em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

Como já era esperado, o consumo específico de combustível do motor foi maior com os cabeçotes N e C que apresentaram maior número de *swirl* e valores mais reduzidos de $\mu\sigma_m$.

Os cabeçotes B e D apresentaram resultados semelhantes de consumo específico para a maior parte das rotações. Mesmo com diferentes números de *swirl*, os valores próximos de $\mu\sigma_m$ desses cabeçotes possivelmente contribuíram para tal resultado.

Através do gráfico 6 é possível observar as variações dos valores de FSN em plena carga com cada grupo de cabeçotes.

Gráfico 6 – Curvas de FSN em plena carga¹⁵

Fonte: Autor

Nota-se, em baixas rotações, um elevado FSN dos cabeçotes A e D que possuem menor número de *swirl*, enquanto em médias e altas rotações o FSN desses cabeçotes é inferior. Tal fato indica a importância de valores de *swirl* mais elevados para redução da emissão de fumaça em condições de baixas rotações.

¹⁵ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios de plena carga.

4.8 RESULTADOS GLOBAIS DO ENSAIO ESC

Importante ressaltar que os ensaios de emissão foram feitos sem o sistema de pós-tratamento SCR para que somente os gases produzidos pela combustão fossem analisados.

Através das tabelas 20, 21 e 22 é possível observar as variações dos resultados globais de emissão nos três ensaios ESC para cada configuração de montagem.

Tabela 20 – Resultados globais do 1º ensaio ESC¹⁶

Cabeçotes	NOx g/kWh	MP g/kWh	CO g/kWh	HC g/kWh
N	0,140	0,001	0,020	0,004
A	0,315	0,003	0,004	0,006
B	0,193	0,002	0,007	0,019
C	0,155	0,001	0,008	0,000
D	0,170	0,001	0,014	0,006

Fonte: Autor

Tabela 21 – Resultados globais do 2º ensaio ESC¹⁷

Cabeçotes	NOx g/kWh	MP g/kWh	CO g/kWh	HC g/kWh
N	0,242	0,001	0,017	0,014
A	0,451	0,003	0,000	0,010
B	0,000	0,005	0,014	0,026
C	0,702	0,003	0,032	0,003
D	0,042	0,003	0,016	0,013

Fonte: Autor

¹⁶ Resultados em relação aos menores valores globais encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

¹⁷ Resultados em relação aos menores valores globais encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Tabela 22 – Resultados globais do 3º ensaio ESC¹⁸

Cabeçotes	NOx g/kWh	MP g/kWh	CO g/kWh	HC g/kWh
N	0,104	0,000	0,018	0,010
A	0,260	0,004	0,003	0,011
B	0,101	0,004	0,007	0,009
C	0,553	0,003	0,035	0,004
D	0,101	0,001	0,017	0,011

Fonte: Autor

Para complementar o estudo da contribuição do *swirl* na combustão foi necessário avaliar as emissões para cada ponto do ensaio ESC, com exceção do MP, onde não foi possível coletar uma amostra para cada ponto.

4.9 RESULTADOS PONTO A PONTO DO ENSAIO ESC

As variações dos valores médios ponto a ponto dos três ensaios ESC com cada grupo de cabeçotes encontram-se nas tabelas 23, 24, 25, 26 e 27.

Tabela 23 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote N¹⁹

Rotação	Carga	Consumo específico	NOx	FSN
rpm	%	g/kWh	g/kWh	-
1250	100	2,4	1,318	0,06
1600	50	13,9	2,085	0,06
1600	75	4,5	1,414	0,07
1250	50	8,9	1,851	0,21
1250	75	2,4	2,147	0,09
1250	25	32,6	1,697	0,21
1600	100	5,3	0,885	0,10
1600	25	52,3	0,596	0,19
1950	100	17,9	0,763	0,21
1950	25	91,4	1,319	0,17
1950	75	19,7	2,876	0,07
1950	50	37,0	1,661	0,11

Fonte: Autor

¹⁸ Resultados em relação aos menores valores globais encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

¹⁹ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Tabela 24 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote A²⁰

Rotação	Carga	Consumo específico	NOx	FSN
rpm	%	g/kWh	g/kWh	-
1250	100	0,0	1,797	0,00
1600	50	12,9	1,888	0,11
1600	75	4,7	1,776	0,02
1250	50	8,2	1,730	0,33
1250	75	0,9	2,227	0,07
1250	25	31,6	1,057	0,37
1600	100	3,0	1,404	0,02
1600	25	50,4	0,000	0,31
1950	100	15,0	1,077	0,11
1950	25	86,5	0,855	0,24
1950	75	17,0	3,087	0,05
1950	50	34,4	1,521	0,11

Fonte: Autor

Tabela 25 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote B²¹

Rotação	Carga	Consumo específico	NOx	FSN
rpm	%	g/kWh	g/kWh	-
1250	100	1,2	1,431	0,02
1600	50	12,8	1,931	0,06
1600	75	5,4	1,347	0,05
1250	50	7,8	1,459	0,23
1250	75	1,3	2,037	0,07
1250	25	30,7	1,291	0,27
1600	100	4,7	0,829	0,08
1600	25	49,8	0,313	0,21
1950	100	16,8	0,837	0,20
1950	25	88,3	1,104	0,20
1950	75	18,7	2,928	0,07
1950	50	35,5	1,537	0,12

Fonte: Autor

²⁰ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

²¹ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Tabela 26 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote C²²

Rotação	Carga	Consumo específico	NOx	FSN
rpm	%	g/kWh	g/kWh	-
1250	100	3,3	1,872	0,07
1600	50	14,1	2,600	0,07
1600	75	7,1	1,845	0,07
1250	50	9,3	2,492	0,23
1250	75	3,1	2,977	0,11
1250	25	32,7	1,646	0,24
1600	100	6,3	1,168	0,11
1600	25	52,2	0,585	0,20
1950	100	18,5	0,744	0,23
1950	25	91,2	1,259	0,18
1950	75	19,9	2,932	0,08
1950	50	36,6	1,633	0,11

Fonte: Autor

Tabela 27 – Valores médios dos ensaios ESC com o cabeçote D²³

Rotação	Carga	Consumo específico	NOx	FSN
rpm	%	g/kWh	g/kWh	-
1250	100	1,3	1,383	0,03
1600	50	13,5	1,674	0,12
1600	75	5,2	1,412	0,04
1250	50	8,8	1,474	0,37
1250	75	1,8	1,852	0,10
1250	25	31,6	0,994	0,37
1600	100	3,9	1,124	0,05
1600	25	50,6	0,097	0,30
1950	100	15,7	0,942	0,13
1950	25	88,5	0,827	0,22
1950	75	18,2	2,950	0,05
1950	50	35,2	1,517	0,11

Fonte: Autor

A partir desses dados foram criados gráficos ponto a ponto para o consumo específico, NOx e FSN. Nos gráficos 7, 8 e 9 é possível observar as variações do consumo específico do motor com cada grupo de cabeçotes para diferentes rotações e 25% de carga.

²² Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

²³ Resultados em relação aos menores valores encontrados para cada grandeza em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 7 – Consumo específico @ 1250 rpm 25% de carga²⁴

Fonte: Autor

Gráfico 8 – Consumo específico @ 1600 rpm 25% de carga²⁵

Fonte: Autor

²⁴ Resultados em relação ao menor consumo específico encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

²⁵ Resultados em relação ao menor consumo específico encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 9 – Consumo específico @ 1950 rpm 25% de carga²⁶

Fonte: Autor

O consumo específico do motor com 25% de carga utilizando os cabeçotes A, B e D diminuiu em comparação aos cabeçotes N, seguindo a tendência dos resultados nos ensaios de plena carga. O cabeçote C também confirmou essa tendência; seus resultados são muito semelhantes aos dos cabeçotes N.

Esse comportamento do consumo específico se manteve para os demais pontos do ensaio ESC (50%, 75% e 100% de carga).

Nos gráficos 10, 11 e 12 é possível observar as variações das emissões de NOx do motor com cada grupo de cabeçotes para diferentes rotações e 25% de carga.

Gráfico 10 – Emissões de NOx @ 1250 rpm 25% de carga²⁷

Fonte: Autor

²⁶ Resultados em relação ao menor consumo específico encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

²⁷ Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 11 – Emissões de NOx @ 1600 rpm 25% de carga²⁸

Fonte: Autor

Gráfico 12 – Emissões de NOx @ 1950 rpm 25% de carga²⁹

Fonte: Autor

Para 25% de carga é possível notar uma considerável redução nas emissões de NOx principalmente nos cabeçotes A e D, confirmando o efeito esperado na literatura do menor número de *swirl* desses cabeçotes. Novamente os cabeçotes N e C apresentaram resultados semelhantes.

As emissões de NOx com 50% de carga apresentaram o mesmo comportamento dos pontos com 25% de carga.

Nos gráficos 13, 14 e 15 é possível observar as variações das emissões de NOx do motor com cada grupo de cabeçotes para diferentes rotações e 100% de carga.

²⁸ Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

²⁹ Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 13 – Emissões de NOx @ 1250 rpm 100% de carga³⁰

Fonte: Autor

Gráfico 14 – Emissões de NOx @ 1600 rpm 100% de carga³¹

Fonte: Autor

³⁰ Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

³¹ Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 15 – Emissões de NOx @ 1950 rpm 100% de carga³²

Fonte: Autor

Já para 100% de carga é possível notar uma tendência de aumento nas emissões de NOx principalmente nos cabeçotes A e D, contrariando o esperado na literatura face ao menor *swirl* desses cabeçotes. Não foi encontrada uma explicação simples para o observado.

O cabeçote C na rotação de 1250 rpm apresentou uma emissão de NOx bem superior a do cabeçote N, uma possível explicação é que a interação entre o fluxo de ar dos dois dutos de admissão no interior do cilindro também é importante, mas a confirmação desse fato demandaria novas avaliações.

As emissões de NOx com 75% de carga apresentaram o mesmo comportamento dos pontos com 100% de carga.

Nos gráficos 16, 17 e 18 é possível observar as variações dos valores de FSN do motor com cada grupo de cabeçotes para diferentes rotações e 25% de carga.

³² Resultados em relação a menor emissão de NOx encontrada em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 16 – FSN @ 1250 rpm 25% de carga³³

Fonte: Autor

Gráfico 17 – FSN @ 1600 rpm 25% de carga³⁴

Fonte: Autor

³³ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

³⁴ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 18 – FSN @ 1950 rpm 25% de carga³⁵

Fonte: Autor

Para 25% de carga nota-se um aumento significativo do FSN com os cabeçotes A e D, fato coerente com a literatura face aos menores valores de *swirl* desses cabeçotes. Os cabeçotes N e C apresentaram resultados semelhantes enquanto que o cabeçote B provocou um ligeiro aumento do FSN.

Os valores de FSN com 50% de carga apresentaram o mesmo comportamento dos pontos com 25% de carga.

Nos gráficos 19, 20 e 21 é possível observar as variações dos valores de FSN do motor com cada grupo de cabeçotes para diferentes rotações e 100% de carga.

Gráfico 19 – FSN @ 1250 rpm 100% de carga³⁶

Fonte: Autor

³⁵ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

³⁶ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

Gráfico 20 – FSN @ 1600 rpm 100% de carga³⁷

Fonte: Autor

Gráfico 21 – FSN @ 1950 rpm 100% de carga³⁸

Fonte: Autor

Com os cabeçotes A e D houve uma grande redução do FSN em 100% de carga, os cabeçotes B também provocaram uma redução significativa do FSN. Já os cabeçotes C resultaram em valores ligeiramente maiores de FSN na comparação com os cabeçotes N. Tais fatos, que não parecem coerentes com a literatura existente face aos valores de *swirl* medidos, podem ser explicados pelo aumento do $\mu\sigma_m$ observado para os cabeçotes com menores valores de *swirl*.

Os valores de FSN com 75% de carga apresentaram o mesmo comportamento dos pontos com 100% de carga.

³⁷ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

³⁸ Resultados em relação ao menor FSN encontrado em todo o conjunto dos ensaios ESC.

5 CONCLUSÕES

Os resultados de número de *swirl* medidos com cilindro de maior diâmetro comparados aos obtidos com cilindro de menor diâmetro mostraram um acréscimo médio do número de *swirl* em cerca de 10%.

A regressão linear múltipla proposta apresentou ótimos resultados, com todos os coeficientes de determinação superiores a 90% e com um desvio padrão dos resíduos de aproximadamente 0,06. Tais valores revelam que esta regressão é muito relevante para prever o número de *swirl* a partir do deslocamento dos dutos de admissão.

Para o duto de admissão curto a principal direção que afeta o número de *swirl* está localizada a aproximadamente 136°, enquanto que para o duto longo está localizada a aproximadamente 41°. As direções perpendiculares a estas são as de menor importância para o número de *swirl*.

Nos ensaios de plena carga foi observado um aumento de torque do motor com os cabeçotes que possuem menor número de *swirl* e maior $\mu\sigma_m$, além de uma redução de consumo específico de combustível com esses cabeçotes. Foi observado um aumento da fumaça medida pelo FSN em baixas rotações e uma redução em médias e altas rotações.

Os resultados globais dos ensaios ESC não permitiram tirar conclusões claras sobre os efeitos do número de *swirl* nas emissões, sendo necessário fazer uma comparação ponto a ponto dos resultados.

Na comparação ponto a ponto foi observado que em baixas cargas existe uma tendência de redução nas emissões de NOx e aumento do FSN para cabeçotes com menor número de *swirl*; já em cargas mais altas a tendência é de aumento nas emissões de NOx e redução do FSN para cabeçotes com menor número de *swirl*. A tendência de menor consumo específico para os cabeçotes com menor número de *swirl* e maior $\mu\sigma_m$ se manteve em todas as condições de carga.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Definidas as direções principais para cada duto de admissão do cabeçote, construir protótipos com maior número de *swirl* e avaliar seus efeitos através dos ensaios de plena carga e ESC;
- Fazer a medição do material particulado ponto a ponto no ensaio ESC;
- Realizar no mínimo cinco repetições dos ensaios de plena carga e ESC.

REFERÊNCIAS

- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 3ª. ed. São Paulo: Blucher, v. 1, 2012a. 553 p.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 3ª. ed. São Paulo: Blucher, v. 2, 2012b. 485 p.
- COSTA NETO, P. L. D. O. **Estatística**. 2ª. ed. São Paulo: Blücher, 2002. 266 p.
- DEMPSEY, P. **Troubleshooting and repairing diesel engines**. 4ª. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 390 p.
- DIESELNET. European Stationary Cycle (ESC). **Dieselnet**, 2016. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>>. Acesso em: 03 Abril 2016.
- FERGUSON, C. R. **Internal combustion engines**. 1ª. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 546 p.
- GRANQUIST, D. **Genom statistisk analys utvärdera geometriska parametrars påverkan på ett XPI - cylinderhuvuds snurrta**. KTH Industriell teknik och management. Stockholm, p. 77. 2010.
- GUAN, B. et al. Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NOx from diesel engine exhaust. **Applied Thermal Engineering**, Shanghai, 18 February 2014. 395-414.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 1ª. ed. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.
- KANG, K. Y.; REITZ, R. D. The effect of intake valve alignment on swirl generation in a DI diesel engine. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Taejon, 9 August 1999. 94-103.
- KIM, H. M.; CHO, W. J.; LEE, K. H. Effect of injection condition and swirl on D.I. diesel combustion in a transparent engine system. **International Journal of Automotive Technology**, Gyeonggi, 24 April 2008. 535-541.
- KIM, Y.; HAN, Y.; LEE, K. A Study on the Effects of the Intake Port Configurations on the Swirl Flow Generated in a Small D.I. Diesel Engine. **Journal of Thermal Science**, Ansan, December 2013. 297-306.
- LEWIS, R.; DWYER-JOYCE, R. S. **Automotive engine valve recession**. London: Professional Engineering Publishing, 2002. 138 p.
- MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 4ª. ed. Porto: Publindústria, 2013. 480 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 335 p.

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.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. 2ª. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2003. 478 p.

SCANIA. SCR system. **SCANIA**, 2016a. Disponível em: <<https://www.scania.com/group/en/wp-content/uploads/sites/2/2016/02/SCR-TIER4f.pdf>>. Acesso em: 03 Abril 2016.

SCANIA. Especificações. **SCANIA**, 2016b. Disponível em: <https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/br/pdfs/especifica%C3%A7%C3%B5es/p/P310_DB4X2.pdf>. Acesso em: 05 Dezembro 2016.

SCANIA. Configuration. **SCANIA**, 2016c. Disponível em: <<https://www.scania.com/global/en/global/products-and-services/trucks/our-range/p-series/performance.html>>. Acesso em: 05 Dezembro 2016.

SOARES, S. L. **Influência dos dutos de admissão do cabeçote no desempenho de motor diesel**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 120. 2010.

SREENIVASULU, M.; REDDY, C. N.; REDDY, K. H. Influence of swirl on spray characteristics and combustion, a numerical investigation of a Caterpillar diesel engine. **International Journal of Engineering Science and Technology**, Andhra Pradesh, October 2012. 4352-4358.

ZEISS, 2016. Disponível em: <http://www.zeiss.com.br/industrial-metrology/pt_br/produtos/sistemas/mmcs-tipo-portal/accura.html>. Acesso em: 20 Maio 2016.

APÊNDICE A – Cálculos da regressão linear múltipla

Para o cálculo dos coeficientes foi necessário montar primeiro a matriz correspondente aos deslocamentos dos dutos de admissão de todos os cabeçotes conforme pode ser visualizada no apêndice D. Trata-se de uma matriz 60x5 em que todos os elementos da primeira coluna possuem o número 1.

Logo após foi necessário multiplicar a transposta da matriz do apêndice D pela própria matriz do apêndice D. Como a transposta é uma matriz do tipo 5x60, a matriz multiplicação A' é do tipo 5x5.

$$A' = \begin{bmatrix} 60,00000 & -8,26120 & 43,94400 & -35,38340 & 10,03380 \\ -8,26120 & 28,67082 & -5,18735 & 8,46804 & -4,56466 \\ 43,94400 & -5,18735 & 47,79717 & -17,22266 & 7,75198 \\ -35,38340 & 8,46804 & -17,22266 & 36,53629 & -7,48453 \\ 10,03380 & -4,56466 & 7,75198 & -7,48453 & 34,70275 \end{bmatrix}$$

No apêndice E pode ser visualizada a matriz correspondente ao número de *swirl* encontrado nos 60 ensaios realizados, trata-se de uma matriz 60x1. Lembrando que cada cabeçote foi ensaiado duas vezes.

Depois foi necessário multiplicar a transposta da matriz do apêndice D pela matriz do apêndice E. Como a transposta é uma matriz do tipo 5x60, a matriz multiplicação B' é do tipo 5x1.

$$B' = \begin{bmatrix} 27,40270 \\ -9,86314 \\ 17,60051 \\ -15,93357 \\ -0,53960 \end{bmatrix}$$

O próximo passo foi calcular a inversa da matriz A' denominada de matriz A'' que também é uma matriz do tipo 5x5.

$$A'' = \begin{bmatrix} 0,14334 & -0,00407 & -0,09863 & 0,09330 & 0,00018 \\ -0,00407 & 0,03792 & 0,00361 & -0,01039 & 0,00312 \\ -0,09863 & 0,00361 & 0,09344 & -0,05299 & -0,00331 \\ 0,09330 & -0,01039 & -0,05299 & 0,09602 & 0,00420 \\ 0,00018 & 0,00312 & -0,00331 & 0,00420 & 0,03082 \end{bmatrix}$$

Por fim os coeficientes da equação foram encontrados a partir da multiplicação da matriz A'' pela matriz B' denominada de matriz K, essa matriz K é do tipo 5x1.

$$K = \begin{bmatrix} 0,74529 \\ -0,25820 \\ -0,24776 \\ 0,19436 \\ -0,16774 \end{bmatrix}$$

Esses elementos da matriz K são justamente os coeficientes da equação de regressão linear múltipla.

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 0,74529 \\ \beta_1 &= -0,25820 \\ \beta_2 &= -0,24776 \\ \beta_3 &= 0,19436 \\ \beta_4 &= -0,16774 \end{aligned}$$

A equação de regressão para cálculo do número de *swirl* através dos deslocamentos dos dutos de admissão é definida ao substituir tais coeficientes na equação (28).

$$\left(\frac{n_D}{n}\right)_m = 0,74529 - 0,25820 \times S_x - 0,24776 \times S_y + 0,19436 \times L_x - 0,16774 \times L_y$$

APÊNDICE B – Cálculos da análise estatística da regressão

Com a equação de regressão definida é necessário verificar o quanto ela é representativa para explicar o fenômeno, para isso existe uma ferramenta no Excel que faz a estatística de regressão conhecida como ANOVA.

Para os parâmetros de entrada foram utilizados os 60 resultados do número de *swirl* encontrados nos dois ensaios realizados e combinados aos deslocamentos dos dutos de admissão obtidos na mesa de medição ZEISS ACCURA.

Através da tabela 28 é possível observar os valores encontrados para a análise ANOVA do modelo em estudo que foi extraída diretamente do Excel.

Tabela 28 – Análise ANOVA do modelo

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	3,087	0,772	194,637	9,134E-32
Resíduo	55	0,218	0,004		
Total	59	3,306			

Fonte: Autor

Nos próximos parágrafos seguem as linhas de cálculo dos itens da tabela 28 além de algumas considerações sobre cada um deles.

O número de graus de liberdade da regressão é sempre igual ao número de variáveis de entrada da equação. Para o modelo em estudo as variáveis de entrada são.

- Deslocamento em X do duto de admissão curto;
- Deslocamento em Y do duto de admissão curto;
- Deslocamento em X do duto de admissão longo;
- Deslocamento em Y do duto de admissão longo.

Dessa forma conclui-se que são 4 graus de liberdade da regressão para o modelo em estudo.

$$gl_{reg} = 4$$

Para encontrar o número de graus de liberdade do resíduo foi necessário obter primeiro o número de amostras. O número de amostras é igual à quantidade de ensaios realizados para o número de *swirl* dos cabeçotes, portanto 60 amostras.

$$n_a = 60$$

Com essa informação pode-se obter os graus de liberdade do resíduo a partir da equação (12).

$$gl_{res} = 60 - 4 - 1 = 55$$

Em seguida foi necessário calcular os graus de liberdade total para esse modelo conforme a equação (13).

$$gl_{tot} = 60 - 1 = 59$$

No apêndice F encontram-se uma série de cálculos preliminares da estatística de regressão. Para a soma de quadrados devido à regressão foi necessário obter 4 coeficientes conforme a equação (14) que utilizam alguns dos valores da tabela do apêndice F.

$$S_{1y} = -9,86314 - \left[\frac{27,40270 \times (-8,26120)}{60} \right] = -6,09016$$

$$S_{2y} = 17,60051 - \left[\frac{27,40270 \times (43,94400)}{60} \right] = -2,46922$$

$$S_{3y} = -15,93357 - \left[\frac{27,40270 \times (-35,38340)}{60} \right] = 0,22643$$

$$S_{4y} = -0,53960 - \left[\frac{27,40270 \times (10,03380)}{60} \right] = -5,12215$$

A partir da equação (15) é possível encontrar a soma de quadrados da regressão utilizando os coeficientes da equação de regressão linear múltipla combinado aos coeficientes de regressão S_{iy} calculados anteriormente.

$$SQ_{reg} = [(-6,09016) \times (-0,25820)] + [(-2,46922) \times (-0,24776)] \\ + [(0,22643) \times (0,19436)] + [(-5,12215) \times (-0,16774)]$$

$$SQ_{reg} = 3,08746$$

Para o cálculo da soma de quadrados total foi necessário utilizar alguns dos valores da tabela do apêndice F conforme a equação (16).

$$SQ_{tot} = 15,82070 - \left[\frac{27,40270^2}{60} \right] = 3,30557$$

Com os cálculos da soma de quadrados da regressão e da soma de quadrados total é possível obter a soma de quadrados do resíduo do modelo através da equação (17).

$$SQ_{res} = 3,30557 - 3,08746 = 0,21811$$

O próximo passo da estatística foi calcular o quadrado médio das parcelas correspondentes à regressão e ao resíduo. Utilizando a equação (18) para o cálculo do quadrado médio da regressão.

$$MQ_{reg} = \frac{3,08746}{4} = 0,77186$$

Em seguida para o cálculo do quadrado médio do resíduo é necessário utilizar a equação (19).

$$MQ_{res} = \frac{0,21811}{55} = 0,00397$$

A variável de teste F do modelo é encontrada através do cálculo conforme a equação (20).

$$F = \frac{0,77186}{0,00397} = 194,63705$$

No caso do F de significação, o cálculo foi feito utilizando um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$) da correspondente tabela de distribuições *F de Snedecor* conforme (COSTA NETO, 2002).

Onde os dados de entrada da tabela são os 4 graus de liberdade da regressão e os 55 graus de liberdade do resíduo. Através de uma interpolação é possível encontrar o valor aproximado do F de significação.

$$F_{5\%} = 2,55$$

Como o valor da variável de teste F (194,63705) é muito maior que $F_{5\%}$ (2,55) rejeita-se folgadoamente a hipótese nula, portanto existe regressão no modelo proposto.

O Excel retorna um valor que representa o próprio nível de significância do modelo, como este valor é bem inferior a 0,05 que seria correspondente aos 5% de significância pode-se concluir também em uma rejeição da hipótese nula e a consequente existência da regressão.

Através da tabela 29 é possível verificar os valores dos coeficientes de determinação da regressão extraídos diretamente do Excel.

Tabela 29 – Coeficientes de determinação

R múltiplo	0,966
R-Quadrado	0,934
R-quadrado ajustado	0,929
Erro padrão	0,063
Observações	60

Fonte: Autor

Para o cálculo de R-Quadrado foi necessário utilizar os valores da soma de quadrados total e da regressão conforme a equação (21).

$$R_m^2 = \frac{3,08746}{3,30557} = 0,93402$$

Esse valor de 0,93402 para o R-Quadrado significa que essa regressão linear múltipla consegue explicar 93,4% do fenômeno, sendo este um resultado bem aceitável para prever o número de *swirl* do cabeçote em função do deslocamento dos dutos de admissão.

Logo após foi calculado o R múltiplo utilizando o valor de R-Quadrado conforme a equação (22).

$$R_m = \sqrt{0,93402} = 0,96645$$

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) como o valor de R-Quadrado sempre aumenta quando são incluídas novas variáveis na regressão, ele pode não ser a melhor referência para todos os casos. Por isso é indicado verificar o valor de R-quadrado ajustado, pois ele já considera o número de variáveis da regressão.

O cálculo de R-quadrado ajustado utiliza a soma de quadrados e os graus de liberdade totais e dos resíduos conforme a equação (23).

$$R_a^2 = 1 - \left[\frac{\left(\frac{0,21811}{55} \right)}{\left(\frac{3,30557}{59} \right)} \right] = 0,92922$$

Com um valor de 0,92922 (92,9%) para o R-quadrado ajustado é possível concluir que o modelo de regressão proposto é aceitável.

A partir da soma de quadrados do resíduo e dos graus de liberdade do resíduo é possível calcular o erro padrão da regressão utilizando a equação (24).

$$ep = \sqrt{\frac{0,21811}{55}} = 0,06297$$

Esse pequeno valor do erro padrão reforça o fato de que a equação de regressão linear múltipla encontrada possui grande relevância.

APÊNDICE C – Cálculos da análise dos coeficientes individuais

Outra análise da regressão linear múltipla inclui a avaliação dos coeficientes individuais da equação proposta. Através da tabela 30 é possível observar a avaliação dos coeficientes individuais da equação extraída diretamente do Excel.

Tabela 30 – Avaliação dos coeficientes individuais da regressão³⁹

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores
Interseção	0,745	0,024	31,260	1,054E-36	0,698	0,793
Variável Sx	-0,258	0,012	-21,054	5,413E-28	-0,283	-0,234
Variável Sy	-0,248	0,019	-12,871	3,142E-18	-0,286	-0,209
Variável Lx	0,194	0,020	9,961	6,429E-14	0,155	0,233
Variável Ly	-0,168	0,011	-15,172	2,617E-21	-0,190	-0,146

Fonte: Autor

No cálculo do erro padrão é necessário considerar os elementos da diagonal principal da matriz A'' destacados em negrito.

$$A'' = \begin{bmatrix} \mathbf{0,14334} & -0,00407 & -0,09863 & 0,09330 & 0,00018 \\ -0,00407 & \mathbf{0,03792} & 0,00361 & -0,01039 & 0,00312 \\ -0,09863 & 0,00361 & \mathbf{0,09344} & -0,05299 & -0,00331 \\ 0,09330 & -0,01039 & -0,05299 & \mathbf{0,09602} & 0,00420 \\ 0,00018 & 0,00312 & -0,00331 & 0,00420 & \mathbf{0,03082} \end{bmatrix}$$

Além desses elementos da diagonal principal da matriz A'' foi utilizado também o quadrado médio do resíduo conforme a equação (25).

$$ep_{\beta_0} = \sqrt{0,00397 \times 0,14334} = 0,02384$$

$$ep_{\beta_1} = \sqrt{0,00397 \times 0,03792} = 0,01226$$

$$ep_{\beta_2} = \sqrt{0,00397 \times 0,09344} = 0,01925$$

$$ep_{\beta_3} = \sqrt{0,00397 \times 0,09602} = 0,01951$$

³⁹ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

$$ep_{\beta_4} = \sqrt{0,00397 \times 0,03082} = 0,01106$$

A coluna *Stat t* do resultado extraído no Excel é correspondente ao valor da variável de teste ts . O cálculo é feito a partir dos valores dos coeficientes e de cada erro padrão conforme a equação (26).

$$ts_{\beta_0} = \frac{0,74529}{0,02384} = 31,26001$$

$$ts_{\beta_1} = \frac{-0,25820}{0,01226} = -21,05447$$

$$ts_{\beta_2} = \frac{-0,24776}{0,01925} = -12,87085$$

$$ts_{\beta_3} = \frac{0,19436}{0,01951} = 9,96052$$

$$ts_{\beta_4} = \frac{-0,16774}{0,01106} = -15,17235$$

Segundo (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2014) é praticamente impossível obter o exato valor P utilizando a tabela de distribuições *t de Student*, pois essa tabela possui quantidades limitadas de configurações. Por isso eles adotam o seguinte critério de rejeição para a hipótese nula.

$$|ts_{\beta}| > ts_{\alpha/2; gl_{res}}$$

Onde a hipótese nula seria aquela em que um determinado coeficiente da equação de regressão linear múltipla fosse igual à zero.

$$\text{Hipótese nula} \rightarrow \beta = 0$$

Para esse cálculo do *t de Student* foi necessário realizar uma interpolação, pois não havia na tabela de distribuições o exato valor de 55 graus de liberdade do resíduo para ser consultado. Trata-se, portanto de um valor aproximado.

$$ts_{0,025; 55} = 2,00525$$

Comparando este valor com os que foram calculados para cada coeficiente, pode-se confirmar a rejeição da hipótese nula.

$$|ts_{\beta_0}| = |31,26001| > 2,00525$$

$$|ts_{\beta_1}| = |-21,05447| > 2,00525$$

$$|ts_{\beta_2}| = |-12,87085| > 2,00525$$

$$|ts_{\beta_3}| = |9,96052| > 2,00525$$

$$|ts_{\beta_4}| = |-15,17235| > 2,00525$$

Já o Excel consegue retornar diretamente o valor-P e como esses resultados foram bem inferiores a 0,05 que representa 5% de significância, pode-se rejeitar folgadoamente a hipótese nula.

Em seguida foram criados os intervalos para 95% de confiança dos coeficientes da equação de regressão linear múltipla. O cálculo é feito a partir do *t de Student* para $\alpha=0,05$, dos valores dos coeficientes e de cada erro padrão conforme a equação (27).

$$0,74529 - (2,00525 \times 0,02384) \leq \beta_0 \leq 0,74529 + (2,00525 \times 0,02384)$$

$$0,69748 \leq \beta_0 \leq 0,79310$$

$$-0,25820 - (2,00525 \times 0,01226) \leq \beta_1 \leq -0,25820 + (2,00525 \times 0,01226)$$

$$-0,28279 \leq \beta_1 \leq -0,23361$$

$$-0,24776 - (2,00525 \times 0,01925) \leq \beta_2 \leq -0,24776 + (2,00525 \times 0,01925)$$

$$-0,28636 \leq \beta_2 \leq -0,20916$$

$$0,19436 - (2,00525 \times 0,01951) \leq \beta_3 \leq 0,19436 + (2,00525 \times 0,01951)$$

$$0,15523 \leq \beta_3 \leq 0,23349$$

$$-0,16774 - (2,00525 \times 0,01106) \leq \beta_4 \leq -0,16774 + (2,00525 \times 0,01106)$$

$$-0,18991 \leq \beta_4 \leq -0,14557$$

Como *t de Student* foi aproximado por meio de uma interpolação na tabela de distribuições, pode-se observar uma pequena diferença de arredondamento entre os valores calculados e os obtidos através do Excel.

APÊNDICE D – Matriz de deslocamento dos dutos de admissão

	Sx	Sy	Lx	Ly	Cabeçote
1	-0,49970	0,38820	-0,36950	0,15170	N1
1	-0,39940	0,42950	-0,30660	0,32590	N2
1	-0,46320	0,20810	-0,45800	0,01600	N3
1	-0,23410	0,29830	-0,22740	0,30220	N4
1	-0,17320	0,20060	-0,05410	0,15760	N5
1	0,10250	0,28160	0,06120	0,19940	N6
1	-0,16710	1,47740	-0,35220	1,27330	A1
1	0,13900	1,26780	-0,15620	1,23510	A2
1	0,31230	1,13680	0,02800	1,05930	A3
1	-0,42950	1,27840	-0,11790	1,38260	A4
1	-0,12420	1,70670	-0,25840	1,31740	A5
1	-0,19460	1,27420	-0,59780	1,45340	A6
1	-0,09080	1,20820	0,16330	-1,02640	B1
1	-0,18980	1,04480	-0,40180	-1,16520	B2
1	-0,26510	1,35260	-0,26700	-0,82640	B3
1	0,11340	1,56250	-0,54520	-1,12140	B4
1	0,03730	1,47770	0,16060	-0,82790	B5
1	0,06060	1,16450	-0,19770	-1,11550	B6
1	-1,41270	0,23110	-1,62470	0,19650	C1
1	-0,83480	0,33450	-1,23240	0,40660	C2
1	-1,04670	0,45990	-1,15520	0,51850	C3
1	-1,16950	0,41200	-1,42280	0,31630	C4
1	-1,04230	0,51110	-0,87250	0,05750	C5
1	-1,36480	0,42090	-1,15570	0,26210	C6
1	0,68320	0,48250	-0,87770	0,16880	D1
1	0,38450	0,10060	-1,27110	0,06640	D2
1	0,90890	0,41750	-1,02540	-0,14200	D3
1	1,24930	0,47610	-1,08460	0,13630	D4
1	1,12200	0,19000	-0,73300	0,04460	D5
1	0,85790	0,17790	-1,33990	0,19420	D6
1	-0,49970	0,38820	-0,36950	0,15170	N1
1	-0,39940	0,42950	-0,30660	0,32590	N2
1	-0,46320	0,20810	-0,45800	0,01600	N3
1	-0,23410	0,29830	-0,22740	0,30220	N4
1	-0,17320	0,20060	-0,05410	0,15760	N5
1	0,10250	0,28160	0,06120	0,19940	N6
1	-0,16710	1,47740	-0,35220	1,27330	A1
1	0,13900	1,26780	-0,15620	1,23510	A2
1	0,31230	1,13680	0,02800	1,05930	A3
1	-0,42950	1,27840	-0,11790	1,38260	A4
1	-0,12420	1,70670	-0,25840	1,31740	A5
1	-0,19460	1,27420	-0,59780	1,45340	A6
1	-0,09080	1,20820	0,16330	-1,02640	B1
1	-0,18980	1,04480	-0,40180	-1,16520	B2
1	-0,26510	1,35260	-0,26700	-0,82640	B3
1	0,11340	1,56250	-0,54520	-1,12140	B4
1	0,03730	1,47770	0,16060	-0,82790	B5
1	0,06060	1,16450	-0,19770	-1,11550	B6
1	-1,41270	0,23110	-1,62470	0,19650	C1
1	-0,83480	0,33450	-1,23240	0,40660	C2
1	-1,04670	0,45990	-1,15520	0,51850	C3
1	-1,16950	0,41200	-1,42280	0,31630	C4
1	-1,04230	0,51110	-0,87250	0,05750	C5
1	-1,36480	0,42090	-1,15570	0,26210	C6
1	0,68320	0,48250	-0,87770	0,16880	D1
1	0,38450	0,10060	-1,27110	0,06640	D2
1	0,90890	0,41750	-1,02540	-0,14200	D3
1	1,24930	0,47610	-1,08460	0,13630	D4
1	1,12200	0,19000	-0,73300	0,04460	D5
1	0,85790	0,17790	-1,33990	0,19420	D6

APÊNDICE E – Matriz de *swirl* dos dutos de admissão⁴⁰

<i>Swirl</i>	Cabeçote
0,74894	N1
0,74274	N2
0,77365	N3
0,61249	N4
0,68733	N5
0,63077	N6
0,22453	A1
0,16154	A2
0,27909	A3
0,22641	A4
0,09227	A5
0,01542	A6
0,63801	B1
0,62158	B2
0,64278	B3
0,44789	B4
0,56332	B5
0,53398	B6
0,61710	C1
0,62595	C2
0,66380	C3
0,68759	C4
0,69854	C5
0,69512	C6
0,29484	D1
0,26386	D2
0,16479	D3
0,11419	D4
0,34495	D5
0,13837	D6
0,66497	N1
0,67612	N2
0,71967	N3
0,58723	N4
0,63151	N5
0,58767	N6
0,17501	A1
0,13915	A2
0,24701	A3
0,19473	A4
0,07541	A5
0,00000	A6
0,62305	B1
0,59107	B2
0,63686	B3
0,42876	B4
0,55448	B5
0,53306	B6
0,62595	C1
0,64628	C2
0,66542	C3
0,70140	C4
0,70078	C5
0,69705	C6
0,29629	D1
0,28444	D2
0,14531	D3
0,13350	D4
0,34510	D5
0,14355	D6

⁴⁰ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.

APÊNDICE F – Cálculos preliminares da estatística de regressão⁴¹

Cabeçote	Swirl	Sx	Sy	Lx	Ly	Swirl^2	Swirl x Sx	Swirl x Sy	Swirl x Lx	Swirl x Ly
N1	0,74894	-0,49970	0,38820	-0,36950	0,15170	0,56091	-0,37425	0,29074	-0,27673	0,11361
N2	0,74274	-0,39940	0,42950	-0,30660	0,32590	0,55167	-0,29665	0,31901	-0,22772	0,24206
N3	0,77365	-0,46320	0,20810	-0,45800	0,01600	0,59853	-0,35835	0,16100	-0,35433	0,01238
N4	0,61249	-0,23410	0,29830	-0,22740	0,30220	0,37515	-0,14339	0,18271	-0,13928	0,18510
N5	0,68733	-0,17320	0,20060	-0,05410	0,15760	0,47242	-0,11905	0,13788	-0,03718	0,10832
N6	0,63077	0,10250	0,28160	0,06120	0,19940	0,39788	0,06465	0,17763	0,03860	0,12578
A1	0,22453	-0,16710	1,47740	-0,35220	1,27330	0,05041	-0,03752	0,33172	-0,07908	0,28589
A2	0,16154	0,13900	1,26780	-0,15620	1,23510	0,02609	0,02245	0,20480	-0,02523	0,19951
A3	0,27909	0,31230	1,13680	0,02800	1,05930	0,07789	0,08716	0,31727	0,00781	0,29564
A4	0,22641	-0,42950	1,27840	-0,11790	1,38260	0,05126	-0,09725	0,28945	-0,02669	0,31304
A5	0,09227	-0,12420	1,70670	-0,25840	1,31740	0,00851	-0,01146	0,15747	-0,02384	0,12155
A6	0,01542	-0,19460	1,27420	-0,59780	1,45340	0,00024	-0,00300	0,01965	-0,00922	0,02241
B1	0,63801	-0,09080	1,20820	0,16330	-1,02640	0,40706	-0,05793	0,77084	0,10419	-0,65485
B2	0,62158	-0,18980	1,04480	-0,40180	-1,16520	0,38636	-0,11798	0,64943	-0,24975	-0,72426
B3	0,64278	-0,26510	1,35260	-0,26700	-0,82640	0,41317	-0,17040	0,86943	-0,17162	-0,53119
B4	0,44789	0,11340	1,56250	-0,54520	-1,12140	0,20061	0,05079	0,69984	-0,24419	-0,50227
B5	0,56332	0,03730	1,47770	0,16060	-0,82790	0,31733	0,02101	0,83242	0,09047	-0,46637
B6	0,53398	0,06060	1,16450	-0,19770	-1,11550	0,28514	0,03236	0,62183	-0,10557	-0,59566
C1	0,61710	-1,41270	0,23110	-1,62470	0,19650	0,38082	-0,87178	0,14261	-1,00261	0,12126
C2	0,62595	-0,83480	0,33450	-1,23240	0,40660	0,39181	-0,52254	0,20938	-0,77142	0,25451
C3	0,66380	-1,04670	0,45990	-1,15520	0,51850	0,44063	-0,69480	0,30528	-0,76682	0,34418
C4	0,68759	-1,16950	0,41200	-1,42280	0,31630	0,47279	-0,80414	0,28329	-0,97831	0,21749
C5	0,69854	-1,04230	0,51110	-0,87250	0,05750	0,48796	-0,72809	0,35703	-0,60948	0,04017
C6	0,69512	-1,36480	0,42090	-1,15570	0,26210	0,48319	-0,94869	0,29257	-0,80335	0,18219
D1	0,29484	0,68320	0,48250	-0,87770	0,16880	0,08693	0,20143	0,14226	-0,25878	0,04977
D2	0,26386	0,38450	0,10060	-1,27110	0,06640	0,06962	0,10146	0,02654	-0,33540	0,01752
D3	0,16479	0,90890	0,41750	-1,02540	-0,14200	0,02716	0,14978	0,06880	-0,16897	-0,02340
D4	0,11419	1,24930	0,47610	-1,08460	0,13630	0,01304	0,14265	0,05436	-0,12385	0,01556
D5	0,34495	1,12200	0,19000	-0,73300	0,04460	0,11899	0,38704	0,06554	-0,25285	0,01538
D6	0,13837	0,85790	0,17790	-1,33990	0,19420	0,01915	0,11871	0,02462	-0,18540	0,02687
N1	0,66497	-0,49970	0,38820	-0,36950	0,15170	0,44218	-0,33228	0,25814	-0,24570	0,10088
N2	0,67612	-0,39940	0,42950	-0,30660	0,32590	0,45713	-0,27004	0,29039	-0,20730	0,22035
N3	0,71967	-0,46320	0,20810	-0,45800	0,01600	0,51792	-0,33335	0,14976	-0,32961	0,01151
N4	0,58723	-0,23410	0,29830	-0,22740	0,30220	0,34484	-0,13747	0,17517	-0,13354	0,17746
N5	0,63151	-0,17320	0,20060	-0,05410	0,15760	0,39881	-0,10938	0,12668	-0,03416	0,09953
N6	0,58767	0,10250	0,28160	0,06120	0,19940	0,34535	0,06024	0,16549	0,03597	0,11718
A1	0,17501	-0,16710	1,47740	-0,35220	1,27330	0,03063	-0,02924	0,25856	-0,06164	0,22284
A2	0,13915	0,13900	1,26780	-0,15620	1,23510	0,01936	0,01934	0,17641	-0,02173	0,17186
A3	0,24701	0,31230	1,13680	0,02800	1,05930	0,06101	0,07714	0,28080	0,00692	0,26165
A4	0,19473	-0,42950	1,27840	-0,11790	1,38260	0,03792	-0,08364	0,24894	-0,02296	0,26923
A5	0,07541	-0,12420	1,70670	-0,25840	1,31740	0,00569	-0,00937	0,12871	-0,01949	0,09935
A6	0,00000	-0,19460	1,27420	-0,59780	1,45340	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
B1	0,62305	-0,09080	1,20820	0,16330	-1,02640	0,38819	-0,05657	0,75277	0,10174	-0,63950
B2	0,59107	-0,18980	1,04480	-0,40180	-1,16520	0,34936	-0,11218	0,61755	-0,23749	-0,68871
B3	0,63686	-0,26510	1,35260	-0,26700	-0,82640	0,40559	-0,16883	0,86141	-0,17004	-0,52630
B4	0,42876	0,11340	1,56250	-0,54520	-1,12140	0,18384	0,04862	0,66994	-0,23376	-0,48081
B5	0,55448	0,03730	1,47770	0,16060	-0,82790	0,30745	0,02068	0,81935	0,08905	-0,45905
B6	0,53306	0,06060	1,16450	-0,19770	-1,11550	0,28416	0,03230	0,62075	-0,10539	-0,59463
C1	0,62595	-1,41270	0,23110	-1,62470	0,19650	0,39181	-0,88427	0,14466	-1,01697	0,12300
C2	0,64628	-0,83480	0,33450	-1,23240	0,40660	0,41768	-0,53951	0,21618	-0,79647	0,26278
C3	0,66542	-1,04670	0,45990	-1,15520	0,51850	0,44279	-0,69650	0,30603	-0,76870	0,34502
C4	0,70140	-1,16950	0,41200	-1,42280	0,31630	0,49196	-0,82029	0,28898	-0,99795	0,22185
C5	0,70078	-1,04230	0,51110	-0,87250	0,05750	0,49110	-0,73043	0,35817	-0,61143	0,04030
C6	0,69705	-1,36480	0,42090	-1,15570	0,26210	0,48589	-0,95134	0,29339	-0,80559	0,18270
D1	0,29629	0,68320	0,48250	-0,87770	0,16880	0,08779	0,20242	0,14296	-0,26005	0,05001
D2	0,28444	0,38450	0,10060	-1,27110	0,06640	0,08091	0,10937	0,02861	-0,36155	0,01889
D3	0,14531	0,90890	0,41750	-1,02540	-0,14200	0,02111	0,13207	0,06067	-0,14900	-0,02063
D4	0,13350	1,24930	0,47610	-1,08460	0,13630	0,01782	0,16679	0,06356	-0,14480	0,01820
D5	0,34510	1,12200	0,19000	-0,73300	0,04460	0,11909	0,38720	0,06557	-0,25296	0,01539
D6	0,14355	0,85790	0,17790	-1,33990	0,19420	0,02061	0,12315	0,02554	-0,19234	0,02788
Σ	27,40270	-8,26120	43,94400	-35,38340	10,03380	15,82070	-9,86314	17,60051	-15,93357	-0,53960

⁴¹ Resultados em relação ao menor número de *swirl* encontrado em todo o conjunto dos ensaios.