MARINA SALTORATTO DOS SANTOS

**Estudo sobre a influência do *Swirl* nas emissões de poluentes e no consumo
de combustível em um motor de injeção *COMMON RAIL***

São Paulo

2017

MARINA SALTORATTO DOS SANTOS

**Estudo sobre a influência do “*Swirl*” nas emissões de poluentes e no consumo
de combustível em um motor de injeção “*COMMON RAIL*”**

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

**São Paulo
2017**

MARINA SALTORATTO DOS SANTOS

**Estudo sobre a influência do “Swirl” nas emissões de poluentes e no consumo
de combustível em um motor de injeção “COMMON RAIL”**

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 Emílio
Baccaro Nigro

São Paulo

2017

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Santos, Marina Saltoratto dos

Estudo sobre a influência do “swirl” nas emissões de poluentes e no consumo de combustível em um motor de injeção “COMMON RAIL” / M. S. Santos – versão corr. -- São Paulo, 2017.

167 p.

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

1. Swirl 2. Emissões 3. Consumo 4. Avaliação Experimental 5. Motor de Combustão I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II. t.

Dedico esta dissertação ao meu marido Rodrigo e à minha filha Carolina, meus amores, razão da minha alegria e fonte constante da motivação que me fez caminhar até aqui...

Gostaria de homenagear duas pessoas amadas... minha mãe, mulher forte de espírito teimoso e impetuoso que mesmo sem o apoio desejado, não se deixou abater, sendo hoje motivo de orgulho para quem a conhece...
E meu querido pai, que mesmo longe de ser um exemplo, muitas saudades e lembranças me traz diariamente... principalmente quando eu em meio às adversidades o procurava, sabendo que sempre encontraria palavras de conforto para o que eu não poderia solucionar por próprio punho...

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio e incentivo recebidos de minhas lideranças na empresa, aos colegas de trabalho e amigos que contribuíram com informações, horas de estudo e mesmo àqueles que sem contribuir com algo de fato foram extremamente compreensíveis nos momentos em que eu não pude ajudá-los e supriram a minha falta de forma condolente.... Foram muitos momentos difíceis e sem este apoio eu certamente não teria conseguido atingir meu objetivo, não seria quem sou.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Doutor Francisco Nigro, aproveitando para dizer que me sinto lisonjeada pela oportunidade de obter pequena parcela de seu vasto conhecimento adquirido durante a convivência e discussões sobre a tese.

Gratidão à dedicação de todos os professores que ministraram aulas durante o curso de mestrado e contribuíram para a realização desta tese.

Um especial agradecimento à minha tia Magali e minha avó Marieta que tão bem cuidaram de minha filha nos momentos em que eu me dedicava aos estudos e a todos os meus familiares que de alguma forma torciam pelo meu sucesso, seja por meio de orações e vibrações positivas ou mesmo proferindo palavras de incentivo.

Meu coração se enche de alegria em pensar que tenho pessoas tão boas ao meu redor. Obrigada!

*Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram conquistadas
do que parecia impossível.*

Charles Chaplin

RESUMO

Diante do nível de emissões extremamente rigoroso exigido pela legislação ambiental, todos os aspectos que afetam a combustão no motor devem ser controlados e explorados. Sendo o “*Swirl*” (turbilhonamento do ar na câmara de combustão) um fenômeno que afeta a combustão, este trabalho tem por objetivo estudar experimentalmente o seu efeito nas emissões de poluentes e consumo de combustível em um motor com sistema de injeção *COMMON RAIL*. Para tanto, foram fundidos cabeçotes com diferentes valores de *Swirl*, para analisar o desempenho do motor. Os quatro conjuntos de amostras confeccionadas apresentam valores de *Swirl* maximizados, minimizados e próximos ao padrão. Os testes em bancada contemplaram curvas de plena carga, ciclos ESC e um ciclo ESC diferenciado onde filtros foram usados para coletar o material particulado em cada ponto do ciclo. Além disso, testes foram feitos alterando-se o início da injeção, antecipando e atrasando-o. As emissões analisadas foram monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (MP), sendo adicionados comentários sobre os resultados obtidos. Os procedimentos adotados para a seleção de peças, medições e realização dos testes, bem como os resultados apresentados estão descritos no decorrer deste trabalho.

Palavras-Chave: *Swirl*. Emissões. Consumo. Avaliação experimental. Motor de Combustão. Combustão.

ABSTRACT

Owing to the extremely stringent level of emissions required by environmental legislation, all aspects affecting combustion in the engine must be controlled and explored. Since the *Swirl* is a phenomenon that affects combustion, this work aims to study experimentally its effect in the pollutant emissions and fuel consumption in an engine with *COMMON RAIL* injection system. For this purpose, cylinder heads with different *Swirl* values were casted to analyze the performance of the engine. The four sets of samples have maximized, minimized and near-standard *Swirl* values. The bench tests comprised full load curves, ESC cycles and a differentiated ESC cycle where filters were used to collect the particulate matter at each point in the cycle. Besides that, tests were done by altering the start of injection, anticipating and delaying it. The emissions analyzed were carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC) and particulate matter (PM), adding comments on the obtained results. The adopted procedures for the selection of parts, measurements and conducting tests, as well as the presented results are described in the course of this work.

Keywords: *Swirl*. Emissions. Consumption. Experimental evaluation. Engine combustion. Combustion.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 - Sistema de injeção <i>COMMON RAIL</i> eletrônico Bosh.....	22
Figura 2 - Sistema de injeção <i>COMMON RAIL</i>	23
Figura 3 - Injeção Modulada	24
Figura 4 - Constituintes do material particulado da exaustão de motor a diesel...	44
Figura 5 - Modos de teste do ciclo ESC	50
Figura 6 - Fluxo do ar de admissão	51
Figura 7 - Métodos para geração do <i>Swirl</i>	53
Figura 8 - Parâmetros de dimensionamento do <i>Swirl</i>	54
Figura 9 - Método de medição do <i>Swirl</i>	56
Figura 10 - Relação <i>Swirl</i> , duração de injeção e bico injetor	57
Figura 11 - Cabeçote para motor com injeção <i>COMMON RAIL</i>	59
Figura 12 - Dutos “S” e “L”	74
Figura 13 - Variações controladas dutos “S” e “L”	75
Figura 14 - Máquina de medição tridimensional ZEISS ACCURA	77
Figura 15 - Cabeçote para motor com injeção <i>COMMON RAIL</i>	88

LISTA DE TABELAS

		pág.
Tabela 1	- Normas de emissão da União Europeia para os motores diesel, HD g / kWh (fumaça em m-1)	28
Tabela 2	- Padrões de emissão para motores pesados a diesel e a gás 2.2	28
Tabela 3	- Regressão contendo de dados sem alteração	63
Tabela 4	- ANOVA contendo dados sem alteração	64
Tabela 5	Resumo contendo dados sem alteração.....	64
Tabela 6	- Regressão contendo de dados dos lotes F042/037 e F142	65
Tabela 7	ANOVA contendo dados dos lotes F042/037 e F142.....	66
Tabela 8	- Resumo contendo dados dos lotes F042/037 e F142.....	67
Tabela 9	Resumo contendo dados do lote 365.....	67
Tabela 10	- ANOVA contendo dados do lote 365.....	68
Tabela 11	Resumo contendo dados do lote 365.....	68
Tabela 12	- Regressão contendo de dados alterados (média)	70
Tabela 13	ANOVA contendo dados alterados (média).....	70
Tabela 14	- Resumo contendo dados alterados - média (a).....	71
Tabela 15	Resumo contendo dados alterados - média (b).....	73
Tabela 16	- Módulo e argumento da alteração do <i>Swirl</i> em função dos deslocamentos de S e L.....	73
Tabela 17	Dimensões e <i>Swirl</i> – peças padrão.....	78
Tabela 18	- Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 1 (primeira etapa)	78
Tabela 19	Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 2 (primeira etapa)	79
Tabela 20	- Regressão do <i>Swirl</i> contendo peças padrão, amostras 1 e 2.....	79
Tabela 21	Anova <i>Swirl</i> contendo peças padrão, amostras 1 e 2.....	80
Tabela 22	- Resumo contendo peças padrão, amostras 1 e 2	80
Tabela 23	Módulo e argumento da alteração do <i>Swirl</i> em função dos deslocamentos de S e L para amostras padrão, 1 e 2	81
Tabela 24	- <i>Swirl</i> calculado para amostras padrão, 1 e 2	81
Tabela 25	Regressão do mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2.....	82
Tabela 26	- A nova mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2	82
Tabela 27	Resumo mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2.....	83
Tabela 28	- Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 1.....	84
Tabela 29	Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 2.....	85
Tabela 30	- Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 3.....	86
Tabela 31	Dimensões e <i>Swirl</i> – Amostra 4.....	87
Tabela 32	- Regressão <i>Swirl</i> conjunto completo.....	89
Tabela 33	ANOVA <i>Swirl</i> conjunto completo.....	89
Tabela 34	- Resumo <i>Swirl</i> conjunto completo	90

pág.

Tabela 35	Regressão <i>Swirl</i> conjunto sem amostra 4.....	91
Tabela 36	- ANOVA conjunto sem amostra 4	91
Tabela 37	Resumo conjunto sem amostra 4	91
Tabela 38	- Regressão <i>mysigma</i> conjunto completo	92
Tabela 39	ANOVA <i>mysigma</i> conjunto completo	93
Tabela 40	- Resumo <i>mysigma</i> conjunto completo.....	93
Tabela 41	Regressão <i>mysigma</i> conjunto sem amostra 4	94
Tabela 42	- ANOVA <i>mysigma</i> conjunto sem amostra 4	94
Tabela 43	Resumo <i>mysigma</i> conjunto sem amostra 4.....	94
Tabela 44	- Variação do <i>Swirl</i> por milímetro e ângulo em função dos deslocamentos de “S” e “L”	95
Tabela 45	<i>Swirl</i> calculado	95
Tabela 46	Resumo <i>Swirl</i> e <i>Mysigma</i>	96

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1 - Padrão europeu de emissões de NOx and MP para veículos pesados a diesel.....	29
Gráfico 2 - Efeito do tempo de injeção no NOx e outros parâmetros.....	33
Gráfico 3 - Razão da concentração de NO média do cilíndrico e concentração de NO do escape em relação ao ângulo de manivela.....	34
Gráfico 4 - Efeito do atraso do tempo de injeção (dinâmico) nas emissões de NOx.....	35
Gráfico 5 - Efeito do atraso do tempo de injeção (estático) nas emissões de NOx.....	36
Gráfico 6 - Efeito da pressão do cilindro nas emissões de NOx.....	36
Gráfico 7 - Dispersão do canal S (x,y)	61
Gráfico 8 - Dispersão do canal L (x,y)	61
Gráfico 9 - Dispersão dos canais S (x,y) e L (x,y)	62
Gráfico 10 - Dispersão do canal S (x,y) com dados alterados	71
Gráfico 11 - Dispersão do canal L (x,y) com dados alterados.....	72
Gráfico 12 - Dispersão dos canais S (x,y) e L (x,y) com dados alterados.....	72
Gráfico 13 - Variação do μ - σ – Amostra 1 e 2.....	83
Gráfico 14 - Torque na curva de plena carga.....	99
Gráfico 15 - Consumo na curva de plena carga	100
Gráfico 16 - Emissões de CO na curva de plena carga.....	101
Gráfico 17 - Emissões de NOx na curva de plena carga.....	102
Gráfico 18 - Emissões de HC na curva de plena carga	103
Gráfico 19 - Pressão do coletor na curva de plena carga.....	104
Gráfico 20 - Temperatura de entrada na curva de plena carga	105
Gráfico 21 - Temperatura de escape na curva de plena carga.....	105
Gráfico 22 - Torque no ciclo ESC	106
Gráfico 23 - Consumo no ciclo ESC.....	107
Gráfico 24 - Emissões de CO no ciclo ESC.....	108
Gráfico 25 - Emissões de NOx no ciclo ESC	108
Gráfico 26 - Emissões de HC no ciclo ESC	109
Gráfico 27 - Pressão do coletor no ciclo ESC	110
Gráfico 28 - Temperatura de entrada no ciclo ESC.....	110
Gráfico 29 - Temperatura de escape no ciclo ESC.....	111
Gráfico 30 - Torque considerando alteração de injeção	112
Gráfico 31 - Consumo considerando alteração de injeção.....	113
Gráfico 32 - Emissões de CO considerando alteração de injeção	114
Gráfico 33 - Emissões de NOx considerando alteração de injeção	114
Gráfico 34 - Emissões de HC considerando alteração de injeção.....	115

		pág.
Gráfico 35	- Pressão do coletor considerando alteração de injeção.....	116
Gráfico 36	- Temperatura de entrada considerando alteração de injeção.....	117
Gráfico 37	- Temperatura de escape considerando alteração de injeção	117
Gráfico 38	- Emissões de MP no ciclo ESC x ESC ponto a ponto	118
Gráfico 39	- Emissões de MP considerando alteração de injeção em (g/kWh)	119
Gráfico 40	- Emissões de MP no ciclo ESC ponto a ponto em gramas.....	120

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COP	<i>Conformity of Production</i>
EGR	<i>Exhaust gas recirculation</i>
ELR	<i>European Load Response</i>
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
ETC	<i>European Transient Cycle</i>
HC	Hidrocarbonetos
NO_x	Óxido de nitrogênio
MP	Material particulado
NO	Óxido nítrico
NO₂	Dióxido de nitrogênio
P	Partículas
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PN	Número de partículas
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SOF	Fração orgânica solúvel
WHSC	<i>World Harmonized Stationary Cycle</i>

SUMÁRIO

	pág.
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Objeto de Estudo	18
1.4 Metodologia do trabalho	18
1.5 Estrutura do trabalho	19
2 O ESTADO DA ARTE	20
2.1 Motor Diesel	20
2.1.1 Injeção	20
2.1.2 Emissões do motor diesel	26
2.1.2.1 <i>Monóxido de carbono (CO)</i>	29
2.1.2.2 <i>Óxidos de nitrogênio (NOx)</i>	30
<u>2.1.2.2.1 Redução dos óxidos de nitrogênio</u>	<u>35</u>
2.1.2.2.3 <i>Hidrocarbonetos (HC)</i>	37
2.1.2.2.4 <i>Partículas</i>	38
<u>2.1.2.2.4.1 Fumaça.....</u>	<u>41</u>
<u>2.1.2.2.4.2 Redução do material particulado</u>	<u>44</u>
2.1.3 Ensaio em bancada com motor de injeção “Common Rail”	47
2.2 Conceito e Importância do SWIRL	51
2.3 Medição do SWIRL	53
2.4 Relação SWIRL x Nível de Emissões	56
3 CABEÇOTE DO MOTOR COMMON RAIL: SWIRL MODIFICADO	59
3.1 Definição das modificações através da análise estatística ...	59
3.2 Produção de Cabeçotes	76
3.3 Medição e Correção dos Cabeçotes	76
3.3.1 Seleção de peças	88
4 ENSAIOS NO MOTOR COMMON RAIL.....	96
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
	pág

5.1	Ensaio em Plena Carga	99
5.1.1	Torque e consumo de combustível.....	99
5.1.2	Emissões de poluentes.....	101
5.1.3	Pressão e temperatura	104
5.2	Ciclo ESC Padrão e Ponto a Ponto	106
5.2.1	Torque e consumo de combustível.....	106
5.2.2	Emissões de poluentes.....	107
5.2.3	Pressão e temperatura	109
5.3	Alteração de Injeção.....	111
5.3.1	Torque e consumo de combustível.....	111
5.3.2	Emissões de Poluentes	113
5.3.3	Pressão e temperatura	116
5.4	Alteração de Injeção.....	118
6	CONCLUSÃO	121
REFERÊNCIAS		123

APÊNDICES

APÊNDICE “A” – Regressão Linear Multivariada	125
APÊNDICE “B” – Histórico de Medições de <i>Swirl</i>	139
APÊNDICE “C” – <i>Swirl</i> Calculado.....	143
APÊNDICE “D” – Cálculo de <i>Swirl</i> para as Amostras Padrão, 1 e 2	148
APÊNDICE “E” – Análise das Amostras	149
APÊNDICE “F” – Amostras Seleccionadas	153
APÊNDICE “G” – Resultado de testes em motor <i>Common Rail</i>	154
ANEXO “A” – Motor “ <i>Common Rail</i> ”	165

1 INTRODUÇÃO

O nível de emissões exigido pelos governos vem sendo reduzido a cada ano em vista das demandas ambientais que têm por princípio a diminuição das emissões de poluentes que contribuem para a contínua deterioração da qualidade ambiental.

Considerando que qualquer alteração das características originais desejadas dos veículos automotores contribui significativamente para o aumento das emissões de poluentes, têm-se a necessidade de conhecer todos os fatores que afetam tais características, visando criar métodos de controle e/ou propor melhorias para as variáveis envolvidas.

Sabe-se que um dos fatores que afetam o nível de emissões dos motores é o *Swirl* (turbilhonamento de ar), dentro da câmara de combustão, o qual é possível ser quantificado. Porém, o conhecimento sobre os fatores que influenciam sua variação é limitado, podendo comprometer por muitas vezes a aprovação do motor, que pode não atender os níveis de emissões exigidos, sendo destinados ao descarte.

A dinâmica dos mercados e o ambiente de competição globalizada tem imposto às empresas condições de sobrevivência mais complicadas, tornando-se vital a busca pelo conhecimento sobre todas as variáveis do produto e processo no intuito de criar produtos que atendam às necessidades dos clientes. Contudo, o sucesso de futuros projetos pode ser comprometido pela falta de conhecimento detalhado sobre o *Swirl*.

Assim, é importante entender como o *Swirl* influencia as emissões de poluentes e o consumo de combustível, facilitando o controle dos processos e futuros projetos neste ambiente altamente competitivo. Assim como, identificar todas as variações dos componentes envolvidos, de modo a conhecer quais delas realmente impactam o *Swirl* mensurado.

Logo, a proposta deste projeto é estudar, através de ensaios com cabeçotes protótipos em um motor de injeção *COMMON RAIL*, os impactos das variações da peça fundida no *Swirl*, considerando-se peças com variações controladas das posições dos dutos de entrada por onde o ar passa antes de ser levado ao cilindro do motor.

O estudo será orientado pelo seguinte problema de pesquisa: **Quais os fatores influenciáveis e que de fato contribuem para a alteração do *Swirl* (turbilhonamento de ar) em um motor com injeção *COMMON RAIL*, e quais os efeitos desses fatores no desempenho geral do motor?**

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo estudar, através de ensaios em motor de injeção *COMMON RAIL*, os impactos das variações no fundido do cabeçote no valor de *Swirl*, com o intuito de analisar a variação do desempenho do motor quanto às emissões e ao consumo de combustível diante das alterações do *Swirl*.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral dessa pesquisa as seguintes etapas serão perseguidas:

- a) Realizar análise estatística das medições de *Swirl* obtidas com peças fabricadas em série, definindo os desvios a serem estudados;
- b) Confeccionar peças com desvios controlados em relação à posição original dos dutos de entrada por onde o ar passa antes de ser levado à câmara de combustão;
- c) Medir o *Swirl* das peças a serem utilizadas nos ensaios no motor;
- d) Realizar ensaios em motor de injeção *COMMON RAIL* com as peças em questão;
- e) Avaliar os resultados obtidos nos ensaios com o motor, verificando possíveis impactos no desempenho do mesmo quanto às emissões e ao consumo de combustível.

1.2 Justificativa

Considerando-se o ambiente cada vez mais competitivo entre as empresas, onde a qualidade do produto é fator considerado no momento da decisão de compra, bem como diante da necessidade de as empresas serem cada vez mais eficientes e eficazes, as mesmas buscam sempre um diferencial que certamente afetará positivamente no momento da decisão do cliente.

Este trabalho busca entender como o *Swirl* influencia as emissões de poluentes e o consumo de combustível com o intuito de facilitar o controle dos processos e futuros projetos, identificando como as variações dos componentes e geometrias envolvidos realmente impactam no *Swirl* medido.

Acredita-se que este estudo possa oferecer uma contribuição não apenas em relação ao motor específico ensaiado, mas agregue também conhecimentos específicos sobre os objetos estudados, que possam ser úteis ao mestrando e a todos que se dedicam à área para serem utilizados em estudos e desenvolvimentos futuros, fomentando o enriquecimento do conhecimento.

1.3 Objeto de Estudo

O estudo será orientado para geometrias da peça fundida do cabeçote de um motor Euro 6 com sistema de injeção *COMMON RAIL* da “empresa W”, que por motivos de sigilo assim será denominada no decorrer deste trabalho. As geometrias a serem analisadas são as das posições finais de saída de ar dos dutos de admissão.

1.4 Metodologia do trabalho

Trata-se de um estudo de natureza quantitativa, com intuito de obtenção de conhecimento a partir de análise estatística de dados, ensaios em motor, bem como correlações e análises dos resultados obtidos.

A pesquisa bibliográfica teve como base conceitos sobre o *Swirl*, com um breve relato sobre significado, importância e como esse fenômeno ocorre, gerando conhecimentos específicos para o autor. Tal pesquisa fundamenta a justificativa do

trabalho em entender como o *Swirl* influencia as emissões de poluentes e o consumo de combustível.

Em seguida, com base em resultados de medição da variação de número de *Swirl* e das posições dos dutos de admissão de cabeçotes de série, foram fundidos conjuntos de cabeçotes especiais cujas posições dos dutos de admissão ora aumentavam ora anulavam essas variações de número de *Swirl*.

Após essa etapa, esses conjuntos de cabeçotes especiais foram ensaiados em motor instalado em banco de provas para verificar o efeito das alterações de número de *Swirl* nos parâmetros de desempenho e emissões brutas do motor.

1.5 Estrutura do trabalho

O relato do estudo está distribuído em 6 capítulos. O primeiro capítulo retrata a Introdução à monografia apresentando o Objetivo e os Objetivos Específicos, Justificativa e objeto de estudo do trabalho.

Assim sendo, no segundo capítulo aborda-se o Estado da Arte abrangendo conceitos, definições, dentre outras informações que serão utilizadas no decorrer do estudo.

No terceiro capítulo são citados os procedimentos adotados para definição dos posicionamentos dos dutos a serem alterados. Cita também a confecção e seleção das amostras que seriam utilizadas nos testes em motor, bem como resultados obtidos.

Os ensaios em motor são descritos no capítulo quarto deste estudo.

O capítulo quinto traz os resultados obtidos durante os ensaios em motor, correlacionando o nível de emissões e o consumo de combustível obtidos nos testes em bancada com o *Swirl* medido.

O sexto capítulo aponta as conclusões obtidas neste estudo, propondo melhorias dos processos e projetos relacionados com o *Swirl*, de modo que evitem a eventual reprovação de motores no teste final de linha, devido aos níveis de emissão estarem fora dos padrões exigidos. Além disso, indica recomendações para estudos futuros.

2 O ESTADO DA ARTE

2.1 Motor Diesel

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos sobre motor diesel, os quais foram utilizados e abordados nos experimentos deste estudo, visando fornecer ao leitor informações que tornem o conteúdo inteligível.

2.1.1 Injeção

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 51), o principal objetivo da injeção de combustível é entregar combustível para os cilindros de um motor. Embora esta possa ser a finalidade geral do sistema, algumas das especificidades podem ser descritas pelas seguintes funções: (1) introdução oportuna do combustível no cilindro, isto é, temporização da injeção e seu controle; e (2) entrega de uma quantidade precisa de combustível para atender às necessidades de energia, ou seja, medição de injeção e seu controle.

Nos motores de maior porte, com velocidades de rotação menores e onde requisitos de velocidade de mistura são menos rigorosos, câmaras quiescentes com *Swirl* praticamente nulo são utilizadas com sistemas de injeção direta. O impulso e a energia dos jatos de combustível injetado são suficientes para alcançar distribuição e taxas de mistura de combustível com o ar adequadas. Movimento adicional do ar não é necessário. A forma da câmara de combustão é geralmente uma tigela rasa na coroa do pistão, e um injetor de multiorifício central é usado (HEYWOOD, 1988, p. 493).

Conforme o tamanho do motor diminui, e com ele o tempo disponível para cada ciclo, quantidades crescentes de turbilhonamento do ar são usadas para alcançar taxas de mistura ar-combustível mais rápidas (HEYWOOD, 1988, p. 493).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 52), os sistemas de injeção a diesel podem ser categorizados da seguinte maneira:

- a) Bomba em linha;
- b) Unidade injetora; e

c) Sistema de injeção *COMMON RAIL*.

As restrições rígidas sobre as emissões e as demandas dos clientes quanto ao desempenho, bem como a economia de combustível, requerem tanta flexibilidade de controle quanto possível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 70).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 70-71), durante o desenvolvimento do motor diesel moderno, os engenheiros descobriram as necessidades e benefícios das seguintes características do equipamento de injeção de combustível, sendo esta uma longa lista de características desejadas, cada qual com seus correspondentes desafios de engenharia:

- a) Alta pressão de injeção que pode ser controlada sem dependência da velocidade do motor;
- b) Alta pressão de injeção independentemente da quantidade de combustível;
- c) Precisão na medição de combustível ou quantidade injetada;
- d) Flexibilidade no tempo de injeção que poderia ser variado de acordo com os parâmetros escolhidos pelos projetistas;
- e) Capacidade de executar múltiplas injeções em um ciclo de combustão;
- f) Capacidade de medir quantidades de combustível extremamente pequenas;
- g) Capacidade de minimizar a variação da quantidade injetada de um cilindro para outro em motores multicilíndricos;
- h) Capacidade de minimizar as variações de quantidade de injeção de ciclo para ciclo;
- i) Capacidade de minimizar as variações de tempo de injeção de cilindro a cilindro;
- j) Capacidade de minimizar as variações de tempo de injeção de ciclo para ciclo;
- k) Capacidade de manter a precisão da medição do combustível e do tempo de injeção durante a vida útil esperada do motor; e
- l) Possibilidade de interagir com outros subsistemas para maximizar o rendimento e economia de combustível e minimizar as emissões de gases

de escape.

A última destas funções envolve a preparação de mistura de combustível. Por exemplo, o desenho do injetor deve atomizar o combustível para aumentar a sua evaporação e interação com o ar disponível na câmara de combustão. Ele também deve produzir a menor das partículas de combustível com a capacidade de penetrar profundamente no volume da câmara de combustão e procurar mais ar / oxigênio para melhorar a combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 71).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 71), o sistema de injeção *COMMON RAIL*, exemplificado na Figura 1, parece atender a muitas das características listadas e desejadas pelos engenheiros de projeto.

Figura 1 – Sistema de injeção *COMMON RAIL* eletrônico Bosh

Fonte: Majewski e Khair (2006, p. 54).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 71), o conceito do sistema de injeção *COMMON RAIL* é simples no que envolve uma bomba de alta pressão que pode ser acionada à velocidade do virabrequim (duas vezes a velocidade do eixo de cames).

Esta bomba de alta pressão entrega combustível a uma galeria comum. Linhas de injeção de alta pressão conectam a galeria comum aos injetores do motor que são acionados mecanicamente através de cames suspensos ou mecanismos de balancim, conforme Figura 2.

Figura 2 – Sistema de injeção *COMMON RAIL*

Fonte: Majewski e Khair (2006, p. 71).

Tal Figura mostra um sistema de galeria comum controlado mecanicamente que não tem a sofisticação ou as capacidades oferecidas pelos sistemas eletronicamente controlados de hoje. Um sistema completo de galeria comum inclui uma bomba de alimentação de baixa pressão que extrai combustível do tanque e o alimenta para a bomba de alta pressão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 71).

O controle da medição do combustível e do tempo de injeção é semelhante aos sistemas de bomba em linha e unidade injetora. Nota-se que tais sistemas não poderiam atingir seu potencial sem a ajuda de controles eletrônicos. De fato, a eletrônica foi introduzida em todos os tipos de sistemas de injeção de combustível para expandir suas capacidades e melhorar seu desempenho (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 71).

Segundo Brunetti (2012, p. 35) a principal vantagem do sistema de injeção

COMMON RAIL é aliar alta pressão de injeção, de mais de 2.000 bar, com a possibilidade de realizar injeções múltiplas (pré-injeção, injeção principal e pós-injeção) e com flexibilidade para ajustar o início de injeção, de modo a adaptá-los a cada regime de funcionamento do motor, realizando essas funções com pequenas tolerâncias e alta precisão durante toda a vida útil.

O processo de injeção é comandado pela programação e mapas armazenados na unidade eletrônica de comando que aciona eletricamente cada um dos injetores (BRUNETTI, 2012, p. 35).

O instante do início e o volume de injeção são ajustados por intermédio do injetor de comando elétrico (BRUNETTI, 2012, p. 37).

Segundo Brunetti (2012, p. 39) no sistema de injeção modulada *COMMON RAIL* existe a possibilidade de realização de pré e pós-injeção em significativo número de injeções parciais, conforme Figura 3.

Figura 3 – Injeção Modulada

Fonte: Brunetti (2012, p. 39).

A pré-injeção pode melhorar o grau de eficiência da queima, produzindo os seguintes efeitos: compressão ligeiramente elevada por uma pré-reação ou queima parcial, reduzindo o atraso da ignição da injeção principal e reduzindo a pressão de combustão, tornando-a mais suave (menos ruidosa). Esses efeitos reduzem os ruídos da combustão, o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de poluentes (BRUNETTI, 2012, p. 39-40).

A injeção principal está diretamente ligada com a capacidade do motor de absorver a carga desejada. Mas, a sua modulação para acontecer o mais tarde

possível traz vantagens na redução da temperatura de pico de combustão e na possibilidade de acontecerem reações químicas que formam gases tóxicos como os óxidos de nitrogênio (BRUNETTI, 2012, p. 40).

Segundo Brunetti (2012, p. 39) a modulação da injeção principal significa a capacidade do sistema *common rail* de gerar uma taxa de elevação de pressão de forma trapezoidal, com valor menor no início e maior em seu final, retardando a injeção como um todo.

A pós-injeção normalmente está ligada à necessidade de se aumentar a temperatura dos gases de escapamento a fim de permitir a queima de contaminantes e conseqüentemente a regeneração de filtros de pós-tratamento instalados no escapamento ou promover condições ideais de operação eficiente de redutores catalíticos (BRUNETTI, 2012, p. 40).

Uma vez que o tempo de injeção é utilizado para controlar o tempo de combustão, o período de atraso entre o início da injeção e início da combustão deve ser mantido curto (HEYWOOD, 1988, p. 492).

Um pequeno atraso também é necessário para manter a pressão máxima de cilindro abaixo do máximo que o motor pode tolerar. Assim, as características de ignição espontânea da mistura ar-combustível devem ser mantidas dentro de um intervalo especificado. Isto é feito, exigindo que o combustível diesel tenha um índice de cetano acima de um determinado valor (HEYWOOD, 1988, p. 492).

Segundo Heywood (1988, p. 492) o problema principal no desenho da câmara de combustão diesel é alcançar mistura suficientemente rápida entre o combustível injetado e o ar no cilindro para completar a combustão no intervalo de ângulo de manivela apropriado, perto do ponto morto superior.

O atraso de ignição num motor diesel é definido como o intervalo de tempo (ou ângulo de manivelas) entre o início da injeção e o início da combustão (HEYWOOD, 1988, p. 539).

O começo da injeção é normalmente tomado como o tempo em que a agulha do injetor se levanta do seu assento (determinada por um indicador de elevação de agulha) (HEYWOOD, 1988, p. 540).

Segundo Heywood (1988, p. 546) nas condições normais do motor (baixa a média velocidade, motor totalmente aquecido), o atraso mínimo ocorre com o início

da injeção a cerca de 10° a 15° do ponto morto superior. O aumento do atraso com o tempo de injeção antecipado ou atrasado ocorre porque a temperatura do ar e a pressão mudam significativamente próximo ao ponto superior. Se a injeção começar mais cedo, a temperatura e a pressão iniciais do ar serão menores, de modo que o atraso aumentará. Se a injeção começar mais tarde (mais perto do ponto superior) a temperatura e a pressão são inicialmente ligeiramente mais elevadas, mas depois diminuem à medida que o atraso prossegue. As condições mais favoráveis para a ignição ficam entre elas.

Segundo Heywood (1988, p. 549) mudanças na taxa de *Swirl* alteram os processos de evaporação de combustível e de mistura de ar e combustível. Eles também afetam a transferência de calor na parede durante a compressão e, portanto, a temperatura de carga na injeção.

2.1.2 Emissões no motor Diesel

Aumentar a consciência pública sobre o esgotamento dos recursos naturais tornou-se o foco do debate político nos Estados Unidos em meados da década de 1970, questão que ganhou importância quando o petróleo do Oriente Médio foi usado como uma arma política contra os Estados Unidos e outras nações industrializadas (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Fontes alternativas de energia tornaram-se um dos temas mais falados, além de conservação de energia, redução do número de carros, *pooling* de carros, e assim por diante (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 269).

A pressão pública levou os órgãos legislativos do mundo industrializado a exigirem limites de emissão cada vez mais rigorosos em muitas áreas, incluindo o setor de transporte, especialmente para veículos rodoviários (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 269).

Em geral, os ganhos mais impressionantes foram alcançados através de mudanças no projeto da câmara de combustão, características melhoradas do sistema de combustível, implementação de arrefecimento do ar de admissão com temperaturas mais baixas e atenção especial ao consumo de óleo lubrificante (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 269).

Alguns fabricantes de motores diesel principais usaram eletrônicos para otimizar o desempenho enquanto mantinham boa economia de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 269).

Dentre as tecnologias adotadas e implementadas pela indústria de motores diesel durante as décadas de transição de 1980 e 1990, pode-se citar as medidas destinadas à redução do NO, melhora na preparação da mistura, melhoria da eficiência da combustão e recuperação da economia de combustível que havia sofrido com as medidas de redução de NOx que levavam ao aumento do consumo de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

No motor diesel, o combustível é injetado em um cilindro cheio de ar comprimido a alta temperatura. As emissões formadas como resultado da queima desta mistura desigual de ar / combustível dependem das condições prevalecentes não só durante a combustão, mas também durante a expansão e especialmente antes da abertura da válvula de escape (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

A preparação da mistura durante o atraso de ignição, a qualidade da ignição do combustível, o tempo de residência a diferentes temperaturas de combustão, a duração da expansão e as características gerais de concepção do motor desempenham um papel muito importante na formação das emissões (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 104).

Neste estudo, a seleção dos poluentes a serem analisados foi baseada na regulamentação vigente Euro 6, resumida na Tabela 1.

Os motores a diesel têm padrões de CO mais rigorosos, mas são permitidas as emissões de NO_x mais elevadas. A norma para o número de partículas foi introduzida em 2011 com Euro 5b para motores a diesel e em 2014 com Euro 6 para motores a gasolina (DIESELNET, 1997b).

No Brasil, há uma tendência a seguir as legislações europeias em relação aos veículos pesados, o que pode ser notado através da comparação dos poluentes envolvidos e respectivos valores de referência contidos nas regulamentações brasileiras, conforme tabela 2.

Tabela 1 - Normas de emissão da União Europeia para os motores diesel, HD g / kWh (fumaça em m-1)

Tier	Date	Test cycle	CO	HC	NO _x	PM	Smoke
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	
Euro II	October 1996		4.0	1.1	7.0	0.25	
	October 1998		4.0	1.1	7.0	0.15	
Euro III	October 1999 EEVs only	ESC & ELR	1.0	0.25	2.0	0.02	0.15
	October 2000	ESC & ELR	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13*	0.8
Euro IV	October 2005		1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	October 2008		1.5	0.46	2.0	0.02	0.5
Euro VI	31 December 2013 ^[17]		1.5	0.13	0.4	0.01	

* for engines of less than 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed of more than 3,000 per minute. EEV is "Enhanced environmentally friendly vehicle".

Fonte: Dieselnets (1997b).

Tabela 2 – Padrões de emissão para motores pesados a diesel e a gás 2.2

Tier	Date	Test	CO	THC	NMHC	NOx	PM†	Smoke
			g/kWh					m ⁻¹
P-5	1.1.2006 ^{1,2,3}	ESC/ELR	2.1	0.66	-	5.0	0.10 or 0.13 ⁵	0.8
		ETC ⁴	5.45	-	0.78	5.0	0.16 or 0.21 ⁵	-
P-6	1.1.2009 ⁶	ESC/ELR	1.5	0.46	-	3.5	0.02	0.5
		ETC	4.0	-	0.55	3.5	0.03	-
P-7	1.1.2012	ESC/ELR	1.5	0.46	-	2.0	0.02	0.5
		ETC	4.0	-	0.55	2.0	0.03	-

† Applicable to diesel engines only
 (1) 1.1.2004 for urban buses or 60% of annual production of urban buses (100% by 01/01/2005); in that case, manufacturers must produce at least 60% observing PROCONVE P-5 for the non-urban bus HD annual production
 (2) 1.1.2005 for micro-buses
 (3) 1.1.2005 40% of production/year of HD (except urban bus and micro-bus) per manufacturer
 (4) diesel vehicles without catalysts or particulate filters can be tested over ESC cycle only
 (5) For engines of less than 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed of more than 3000 rpm
 (6) PROCONVE P-6 standards were never enforced (because low sulfur fuel was not available), P-5 standards remained in effect through the end of 2011

Fonte: Dieselnets (2012).

O Gráfico 1 representa a evolução das legislações europeias, relacionada a veículos pesados a diesel, fundamentando a justificativa deste trabalho em estudar os impactos do *Swirl* nas emissões, visto que as legislações tornam-se cada vez mais exigentes.

Gráfico 1 – Padrão europeu de emissões de NOx e MP para veículos pesados adiesel

Fonte: Volvo (2015).

A seguir, são descritos alguns poluentes resultantes da combustão a diesel, os quais serão abordados durante os ensaios em motor no decorrer deste trabalho.

2.1.2.1 Monóxido de carbono (CO)

Em motores, o monóxido de carbono (CO) resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos, representando assim uma relativa redução de eficiência (BRUNETTI, 2012, p.138).

Basicamente, na combustão de um hidrocarboneto ocorre primeiramente a quebra do combustível formando CO, seguida pela oxidação do CO em CO₂. Como se trata de um produto de combustão incompleta, é principalmente função da relação ar-combustível e do nível de homogeneização da mistura. Parte do CO pode ser totalmente oxidada para CO₂ no sistema de escapamento. Certa quantidade pode ser formada pela interrupção da reação junto às paredes da câmara ou pelo resultado da dissociação do CO₂ em altas temperaturas (BRUNETTI, 2012, p.138).

A combustão de misturas ricas em combustível geralmente produz altas emissões de CO, mas porque a combustão do diesel é com mistura pobre, pois tem uma quantidade abundante de ar, o CO da combustão do diesel é extremamente baixo (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 109-110).

Os motores do ciclo Diesel, que funcionam com excesso de ar emitem relativamente pouco CO (em geral, menos de 300 ppm a plena carga) (BRUNETTI, 2012, p.138).

Na verdade, é tão baixo que Heywood (1988, p. 592) conclui que "as emissões de CO do diesel são baixas o suficiente para não serem importantes, portanto, elas não serão mais discutidas".

Durante as várias fases de combustão por pulverização em motores diesel DI, as condições que promovem alta temperatura de combustão, alto teor de oxigênio e altas taxas de mistura são responsáveis pela oxidação do CO em CO₂. No entanto, o principal parâmetro que afeta sua formação permanece uma baixa relação entre ar e combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 110).

2.1.2.2 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 110), o termo óxidos de nitrogênio (NO_x) refere-se ao óxido nítrico (NO) e ao dióxido de nitrogênio (NO₂) no escape de motores de combustão interna.

Em motores diesel de injeção direta, NO constitui 70% a 90% do NO_x total. O óxido nítrico é um subproduto da combustão em vez de um composto em transição como o CO (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

Segundo Brunetti (2012, p. 139) existem basicamente duas fontes de geração do NO_x:

- a) NO_x do combustível, formado pela reação entre o nitrogênio presente no combustível e o oxigênio do ar; e
- b) NO_x do ar, formado pela oxidação do nitrogênio presente no ar, por meio de dois mecanismos de formação: o NO_x térmico, descrito inicialmente por Zeldovich (1947), e o NO_x imediato ou *prompt*, formado na região da frente de chama.

O nitrogênio representa mais de 79% da carga de ar de admissão em volume, com o restante do volume de ar induzido sendo oxigênio. Com a ajuda do calor resultante da queima de HC do combustível e do aumento de temperatura

resultante, NO_x é formado e permanece até que seja descarregado através da válvula de escape (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

A quantidade de nitrogênio contido no combustível é insignificamente pequena no caso de óleo diesel comercial, por isso não é considerado um contribuinte importante para o processo de reação química (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Segundo Brunetti (2012, p. 139), basicamente a grandeza determinante para a formação do NO_x é a temperatura.

O mecanismo de Zeldovich é descrito de forma simplificada por três equações, sendo estas as Equações 2.1, 2.2 e 2.3 a seguir:

Dessa forma, as tecnologias empregadas na câmara de combustão para redução de NO_x, sem considerar sistemas de pós-tratamento dos gases de escape, envolvem formas de reduzir a temperatura da chama e controlar a razão de equivalência em determinados pontos da chama, como a recirculação dos gases de escape – *Exhaust Gas Recirculation (EGR)*, o adequado projeto da geometria da câmara de combustão e o controle do instante de início da combustão (BRUNETTI, 2012, p.139-140).

Infelizmente, a maioria destas técnicas recorre à redução das temperaturas de combustão. Ao fazê-lo, levam a penalidades nas emissões de hidrocarbonetos, no material particulado (PM) e no consumo de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 110).

Muitos esquemas de controle tentam reduzir a quantidade de combustível queimado na fase de combustão pré-misturada. Estes esquemas incluem a alteração da taxa de injeção, utilizando uma taxa mais baixa no início do período de injeção seguida por um aumento considerável da taxa de injeção após o início da combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Inclui-se também a injeção piloto, que tem uma pequena injeção separada para iniciar a combustão com um mínimo de combustível seguido de uma injeção principal após o início da combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 110).

O avanço do tempo de injeção parece prolongar o atraso da ignição. A razão para esta observação é que o combustível é injetado num meio de pressão inferior com uma temperatura mais baixa. Quanto maior o atraso de ignição, maior a quantidade de combustível injetado durante esse período, e maior a chance de se misturar com o ar (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

Em outras palavras, quanto mais cedo o combustível for injetado, maior será o atraso de ignição e maior será a parte pré-misturada do combustível antes da ignição, conforme gráfico1 (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

A formação de NO mais elevada está normalmente relacionada com a porção pré-misturada do combustível. Quando o tempo de início de injeção é retardado, o efeito oposto é experimentado (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

O atraso de ignição tende a ser mais curto e, em última instância, a parte pré-misturada do combustível é reduzida. A redução da porção de combustível pré-misturada conduz à formação de NO mais baixa, conforme gráfico 2 (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

Uma vez que retardar o tempo de injeção tem um efeito desejável na formação de NO, tornou-se um meio eficaz para controlar as emissões de NOx. Um efeito colateral importante para esta ação é o aumento no consumo de combustível, como mostrado no gráfico 2, a menos que outras medidas sejam tomadas para evitar esta perda de economia de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

O movimento do ar no cilindro afeta as taxas de mistura de combustível e ar. Embora o *swirl* alto, ou um alto grau de movimento do ar, seja geralmente desejável, um *swirl* excessivo pode ser prejudicial (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Gráfico 2 – Efeito do tempo de injeção no NOx e outros parâmetros

Fonte: Majewski e Khair (2006, p. 111).

Embora um *swirl* mais elevado combinado com uma injeção adequada leve a um maior aproveitamento do ar disponível na câmara, ele também implica em um aumento da perda de calor para as paredes, em geral implicando em queda de eficiência térmica.

Uma boa indicação de *swirl* excessivo é uma deterioração da economia de combustível e um aumento nas emissões de HC, CO e partículas. Geralmente, um aumento no *swirl* melhora a mistura e promove uma combustão eficiente e mais formação de NO (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 111).

O mecanismo responsável pela formação aumentada de NO é a maior taxa inicial de liberação de calor (NEWHALL; STARKMAN, 1967).

O gráfico 3 mostra como a proporção da concentração média de NO do cilindro dividida pela concentração de escape varia durante o processo de combustão, sendo a razão de equivalência = 0,6, o tempo de injeção em 27° do

ponto morto superior.

Gráfico 3 – Razão da concentração de NO média do cilíndrico e concentração de NO do escape em relação ao ângulo de manivela

Fonte: Heywood (1988, p. 588).

As concentrações de NO atingem um máximo logo após o período de pico de pressão. Há uma modesta quantidade de decomposição de NO. As variações na velocidade do motor têm pouco efeito sobre a forma desta curva. Os 20 graus da manivela após o início da combustão é o período de tempo crítico (HEYWOOD, 1988).

Segundo Heywood (1988), os resultados de experimentos semelhantes onde o tempo de injeção e a carga foram variados também mostraram que quase todo o NO se forma dentro dos 20° após o início da combustão.

Como o tempo de injeção é retardado, o processo de combustão é retardado. A formação de NO ocorre mais tarde e as concentrações são mais baixas, uma vez que as temperaturas máximas são mais baixas (HEYWOOD, 1988, p. 588).

Segundo Heywood (1988, p. 589), as emissões de NO devem ser aproximadamente proporcionais à massa de combustível injetada (desde que as pressões de gás queimado e as temperaturas não mudem muito).

2.1.2.2.1 Redução dos óxidos de nitrogênio

Para entender melhor o NO_x e sua relação com o tempo de injeção, foram realizados testes em vários motores para investigar o efeito dos parâmetros de controle do motor sobre o desempenho e as emissões (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 269).

Os gráficos 4 e 5 mostram o efeito do tempo de injeção nas emissões de NO_x , observando-se que no primeiro gráfico o tempo de injeção foi determinado dinamicamente, e no segundo gráfico foi ajustado estaticamente.

Gráfico 4 – Efeito do atraso do tempo de injeção (dinâmico) nas emissões de NO_x

Fonte: Majewski e Khair (2006, p. 270).

Tanto o gráfico 4 quanto o gráfico 5 referiam-se a motores que estavam sendo desenvolvidos para cumprir os padrões de emissões de pesados de 1991 e descrever o que era então a tecnologia de ponta (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 270).

Gráfico 5 – Efeito do atraso do tempo de injeção (estático) nas emissões de NOx

Fonte: Majewski e Khair(2006, p. 270).

A razão para diminuir as emissões de NOx são mostradas no gráfico 6, onde uma diminuição constante na pressão do cilindro é experimentada ao retardar o tempo de injeção.

Gráfico 6 – Efeito da pressão do cilindro nas emissões de NOx

Fonte: Majewski e Khair(2006, p. 270).

2.1.2.3 Hidrocarbonetos (HC)

Os hidrocarbonetos não queimados englobam todos os hidrocarbonetos que deixam a câmara de combustão sem serem oxidados, formados pela decomposição térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular, como metano, etano, acetileno, aldeídos (principalmente formaldeído), tolueno, propileno, etc (BRUNETTI, 2012, p.140).

Formam-se junto às paredes da câmara onde a temperatura não é suficiente para completar a reação, ou em regiões da câmara onde a mistura é excessivamente rica ou pobre (BRUNETTI, 2012, p.140).

A presença de hidrocarbonetos nos gases de escape do motor Diesel é uma das responsáveis pelo aparecimento de fumaça branca ou azul e é cerca de dez vezes menor que nos motores Otto pelo fato de os motores Diesel funcionarem com excesso de ar (BRUNETTI, 2012, p.140).

Em geral, os hidrocarbonetos não queimados estão relacionados com a região de ignição de má qualidade (em inglês chamada de *lean flame-out*), gotículas de combustível, porção de combustível injetada nas paredes, cauda de pulverização e pós-injeção. Obviamente, o projeto do motor e as variáveis operacionais desempenham um papel importante na formação e oxidação das moléculas de hidrocarbonetos (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 105-106).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 108), alguns estudos e testes mostraram que o avanço do tempo de injeção parece aumentar as emissões de hidrocarbonetos não queimados, encontrando-se resultados semelhantes relatados por Khan e Crigg (1971).

O mecanismo que poderia explicar esse fenômeno parece ser o maior atraso de ignição, o que permite que mais vapor de combustível e pequenas gotas sejam transportados com o ar turbulento, produzindo uma ignição de má qualidade em uma região maior. Outro fator sugerido por Khan e Crigg (1971) é o aumento no impacto do combustível nas paredes da câmara de combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 108).

Pode-se considerar que o aumento do *swirl* nos motores de injeção direta geralmente melhora a mistura e os processos de oxidação de hidrocarbonetos. Um

swirl excessivo pode, contudo, produzir uma ignição de má qualidade mais ampla, ou uma sobreposição dos sprays e um aumento nas emissões de hidrocarbonetos não queimados (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 109).

Segundo Watts e Scott (1969) a variação na taxa do *swirl* tem pouco efeito sobre a economia de combustível. Pode, contudo, afetar a formação de poluentes (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 109).

Segundo Heywood (1988, p. 620) as emissões de hidrocarbonetos gasosos dos diesel são medidas usando um filtro de partículas aquecido (a 190° C) e um detector de ionização de chama aquecido.

Assim, os constituintes do HC variam desde metano até os hidrocarbonetos mais pesados que permanecem na fase de vapor na linha de amostragem aquecida (que também é mantida a cerca de 190°C) (HEYWOOD, 1988, p. 620).

Quaisquer hidrocarbonetos mais pesados do que estes são, portanto, condensados e, com a fuligem de fase sólida, são filtrados a partir da corrente de gases de escape a montante do detector (HEYWOOD, 1988, p. 620).

O procedimento de medição de emissões de material particulado também mede uma parte das emissões totais de hidrocarbonetos do motor. As partículas são recolhidas por filtração a partir de uma corrente de gás de escape diluído a uma temperatura de 52° C ou menos. Aqueles hidrocarbonetos que condensam nesta ou abaixo desta temperatura são absorvidos na fuligem (HEYWOOD, 1988, p. 620).

2.1.2.4 Partículas

As partículas emitidas por motor diesel consistem principalmente em material carbonoso gerado por combustão (fuligem), no qual alguns compostos orgânicos foram absorvidos (HEYWOOD, 1988, p. 626).

A composição do material particulado depende das condições no escape do motor e no sistema de coleta de partículas (HEYWOOD, 1988, p. 626).

Nos motores do ciclo Diesel uma das emissões mais significativas é a de material particulado, que compõe a fumaça visível na saída do sistema de escapamento (BRUNETTI, 2012, p.146).

Grande parte do material particulado é resultado da combustão incompleta, tendo em vista que a combustão completa de hidrocarbonetos combustíveis puros, resulta em gases como o CO_2 e também vapor de água, mas não partículas (BRUNETTI, 2012, p.141).

É geralmente aceito que a temperatura do gás e a disponibilidade de combustível não queimado e oxigênio são os principais fatores que controlam esse processo (BRUNETTI, 2012, p.141).

A maior parte do material particulado resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos do combustível, com alguma contribuição do óleo lubrificante (HEYWOOD, 1988, p. 626).

Formam-se principalmente no processo de combustão por propagação, nas frações de óleo diesel de alto ponto de ebulição, notadamente a plena carga, quando o excesso de oxigênio é menor (BRUNETTI, 2012, p.141).

Inicialmente ocorre uma situação de combustão rica, que deixa hidrocarbonetos não queimados e escassez de oxigênio entre os produtos de combustão. A partir desses hidrocarbonetos não queimados, são formados os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, que agem como elementos de iniciação ou precursores das pequenas partículas de fuligem (BRUNETTI, 2012, p.141).

Um dos principais constituintes do material particulado é a matéria carbonosa resultante do processo de combustão heterogênea em motores a diesel. Pequenas partículas ou núcleos de combustão formam-se como resultado de difusão e de chamas pré-misturadas, e no caso de chamas pré-misturadas por condições ricas e pobres (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

A poeira (do ar) ou material inorgânico (nos aditivos de combustível ou no combustível) pode aparecer como partículas no escape (cinzas, óxidos, etc.) (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

O metal proveniente do desgaste de componentes do motor pode ser transportado pelo óleo lubrificante e, eventualmente, migrar para o escape, onde podem ser capturados no filtro de amostragem de partículas (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

A presença de enxofre no combustível e no óleo lubrificante contribui para a

formação de partículas de sulfato. Um problema adicional associado com os sulfatos é a sua retenção de umidade, que pode mais do que duplicar a sua massa (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

Finalmente, hidrocarbonetos de elevado ponto de ebulição e seus derivados também estão incluídos no MP. Este material, designado por fração orgânica solúvel, é composto principalmente por hidrocarbonetos derivados de óleo lubrificante (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

Outros componentes orgânicos solúveis incluem combustível não queimado, apesar da alta eficiência de combustão exibida pelos motores diesel (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

O material particulado, ao lado dos óxidos de nitrogênio são as principais emissões dos motores do ciclo Diesel (BRUNETTI, 2012, p.141).

As partículas das emissões de motores Diesel são muito pequenas (90% em massa são menores que 1 μm), fazendo com que sejam inaláveis. Essas partículas têm centenas de substâncias químicas adsorvidas em sua superfície, muitas delas cancerígenas (BRUNETTI, 2012).

A temperaturas acima de 500° C, as partículas individuais são principalmente aglomerados de muitas esferas pequenas ou esférulas de carbono (com uma pequena quantidade de hidrogênio) com diâmetros de esférula individuais de cerca de 15 a 30 nm (HEYWOOD, 1988, p. 627).

À medida que as temperaturas descem abaixo de 500° C, as partículas tornam-se revestidas com compostos orgânicos adsorvidos e condensados de elevado peso molecular que incluem: hidrocarbonetos não queimados, hidrocarbonetos oxigenados (cetonas, ésteres, éteres, ácidos orgânicos) e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (HEYWOOD, 1988, p. 627).

O material condensado também inclui espécies inorgânicas tais como dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e ácido sulfúrico (sulfatos) (HEYWOOD, 1988, p. 627).

Segundo Heywood (1988, p. 627), o objetivo da maioria das técnicas de medição de partículas é determinar a quantidade de partículas a emitir para a atmosfera. As técnicas de medição e caracterização de partículas variam de leituras

simples de opacidade de medidores de fumaça a análises utilizando túneis de diluição.

A maioria das técnicas exige longos períodos de tomada de amostras, uma vez que a taxa de emissão de cada espécie é geralmente baixa. As condições físicas sob as quais as medições de particulado são feitas são críticas porque as espécies emitidas são instáveis e podem ser alteradas por redução de superfícies, alteração na distribuição de tamanhos (através de colisões) e interações químicas com outras espécies no escape a qualquer momento durante o processo de medição (incluindo amostragem, armazenamento ou exame) (HEYWOOD, 1988, p. 627).

A informação mais básica é normalmente obtida em massa: por exemplo, gramas por quilômetro para um veículo, gramas por quilowatt-hora para um motor, gramas por quilograma de combustível ou miligramas por metro cúbico de escape (em condições normais) (HEYWOOD, 1988, p. 627).

2.1.2.4.1 Fumaça

Embora haja uma literatura extensa sobre o processo de formação de fuligem em chamas simples, pré-misturadas ou de difusão, o processo altamente transiente em motores diesel, é mal e incompletamente entendido (HEYWOOD, 1988).

As pressões sociais e ambientais estão levando os fabricantes de motores a diesel a projetar e produzir motores quase livres de fumaça (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 114).

A maioria dos países industrializados, por conseguinte, introduziu regulamentos de diferentes graus de complexidade para controlar as emissões de fumaça dos veículos rodoviários (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 112).

A formação de fuligem ocorre no ambiente de combustão do diesel a temperaturas entre cerca de 1000 e 2800K, a pressões de 50 a 100atm, e com ar suficiente para queimar totalmente todo o combustível. (HEYWOOD, 1988, p. 635)

O tempo disponível para a formação de partículas de fuligem sólidas a partir de uma fração do combustível é da ordem dos milissegundos (HEYWOOD, 1988, p. 635).

A fumaça pode estar na forma de partículas, sólidas ou líquidas (aerossóis), suspensas nos gases de escape. Obstrui, reflete ou refrata a luz. Provoca sujeira em estruturas. E limita a visibilidade (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 114).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 114-115), a fumaça de escape do motor diesel pode ser classificada conforme segue:

a) Branca na aparência sob iluminação direta, e consistindo de uma mistura de combustível e partículas de óleo lubrificante em um estado não queimado ou parcialmente queimado. Esta forma de fumaça é por vezes referida como fumaça branca;

b) Preta na aparência e consistindo de partículas sólidas de carbono proveniente de combustão que, por outros indicadores seria de forma completa do combustível. Esta forma de fumaça é muitas vezes referida como fumaça preta.

Nos casos em que o consumo excessivo de óleo é percebido, a fumaça emitida assume uma tonalidade de azul ou cinza (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

A fumaça azul ou cinzenta é, por conseguinte, uma indicação de que um motor atingiu o ponto em que é necessária uma manutenção importante. No entanto, combustível não queimado também pode aparecer como fumaça azul se o tamanho da gota é de cerca de $0,5\mu\text{m}$ (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

O componente branco, por outro lado, é principalmente o resultado de uma temperatura muito baixa na câmara de combustão durante o período de injeção de combustível. Tem um tamanho de gota de cerca de $1,3\mu\text{m}$ (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

Este fenômeno é principalmente experimentado durante a partida a frio, em baixas temperaturas ambiente, ou em altitude elevada. A fumaça branca desaparece quando o motor aquece (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

A fumaça branca também pode resultar de combustível injetado muito tarde no ciclo de combustão ou pode até ser uma indicação de um defeito de projeto, no sentido de que a taxa de compressão é muito baixa ou foi otimizada para uma combinação inadequada de condições de operação (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p.

115).

Não existem regulamentações que limitem a fumaça branca, embora seja bastante visível e difundida em paradas de caminhões, especialmente em climas mais frios (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

As principais causas da emissão excessiva de fumaça negra são a má manutenção dos filtros de ar e / ou injetores de combustível, ou o ajuste incorreto da bomba / sistema de injeção de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

Essa fumaça consiste principalmente em partículas de carbono ou coagulados de uma ampla gama de tamanhos, de 0,02 a mais de 0,12 μ m de diâmetro médio (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

Esta distribuição de tamanho depende, em certa medida, do tipo de sistema de combustão, o que também afeta o início da emissão de fumaça à medida que a quantidade de entrada de combustível é aumentada (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 115).

Medidores de fumaça medem a quantidade relativa de luz que passa através do escape ou a refletância relativa de partículas coletadas em papel de filtro (HEYWOOD, 1988, p. 627).

Eles não medem a massa diretamente, mas são usados para determinar as emissões de fumaça visíveis e fornecer uma indicação aproximada dos níveis de emissão em massa (HEYWOOD, 1988, p. 627).

A fumaça visível de motores diesel pesados em carga elevada é regulamentada. No procedimento padrão de medição de emissões em massa, os túneis de diluição são utilizados para simular os processos físicos e químicos que as emissões de partículas sofrem na atmosfera (HEYWOOD, 1988, p. 627).

No túnel de diluição, os gases de escape brutos são diluídos com ar ambiente até uma temperatura de 52°C ou menos, e uma corrente de amostra dos gases de escape diluídos é filtrada para remover o material particulado (HEYWOOD, 1988, p. 627).

2.1.2.4.2 Redução do material particulado

A matéria particulada do diesel é dividida na fração orgânica solúvel (SOF) e na fração insolúvel (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 272).

No exemplo da Figura 4, a separação em solúveis e insolúveis é de cerca de 39 e 61%, respectivamente. No entanto, como indicador do sistema de combustão, esta primeira desagregação em duas frações não é inteiramente satisfatória porque cada fração contém subfrações associadas com o combustível e o óleo lubrificante (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 272).

A Figura 4 mostra uma desagregação das frações de particulado para um motor diesel de produção pesada típico da Califórnia em 1988 (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 272).

Figura 4 – Constituintes do material particulado da exaustão de motor a diesel

Fonte: Majewski e Khair(2006, p. 272).

Os métodos de determinação da composição das partículas são mencionados e melhor detalhados por Majewski e Khair (2006, p. 272-273), porém, estes não serão detalhados neste estudo.

A redução de partículas de carbono é uma tarefa que envolve mais de um dos subsistemas de motores. Por exemplo, sem uma mistura adequada de combustível e ar, espera-se que a eficiência da combustão sofra e haja emissões de partículas de carbono. No entanto, a mistura de combustível e ar envolve tanto o sistema de combustível como o sistema de admissão de ar (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 273).

Por conseguinte, deve ser dada atenção, pelo menos, a estes dois sistemas, se quisermos reduzir o carbono nas emissões de particulado (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 273).

Adicionalmente, o óleo lubrificante não queimado pode ter muitas fontes tais como riscos na superfície interna dos cilindros, especificações inadequadas do pacote de pistão, selos da haste da válvula, selos do turbo compressor, e outros componentes avariados do motor (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 273).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 273) o acompanhamento do ar do motor começa no filtro de ar de admissão e termina com a entrada de ar no cilindro. A maneira pela qual a carga de ar é gerenciada através de todo o sistema terá um impacto significativo sobre os produtos de combustão.

O fluxo de ar, sua temperatura e pressão, assim como sua energia cinética, são parâmetros importantes para o controle do processo de mistura (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 273).

Embora seja difícil relacionar os projetos do coletor de admissão com emissão de material particulado, eles contribuem para uma boa preparação da mistura, sem a qual a combustão pode ser incompleta, levando a consideráveis emissões de partículas (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 277).

De fato, em um motor de vários cilindros, o enchimento imperfeito de ar em apenas um cilindro pode criar uma mistura ruim nesse cilindro e produzir emissões pesadas de fumaça e partículas que refletem em todo o motor (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 277).

Embora coletores de admissão pareçam ser componentes simples, eles desempenham um papel importante no desempenho do motor e merecem atenção cuidadosa de designers de motores. É importante que o coletor de admissão

distribua uniformemente o ar aos cilindros (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 277).

A mistura de combustível e ar em um motor diesel tem uma influência muito forte em suas características de desempenho e emissão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 277).

Os engenheiros de controle de emissões de dióxido de carbono são sempre desafiados pelo gerenciamento do combustível e do ar para alcançar o melhor desempenho (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 278).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 278), são comuns dois tipos de desenhos de portas de admissão. A primeira é conhecida como a porta tangencial e a segunda como a porta helicoidal, conforme será apresentado no item 2.2.

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 278), alguns fabricantes de motores adotaram um sistema de combustão quiescente usando uma porta tangencial em oposição ao design helicoidal associado às portas de *swirl*.

O sistema de combustão quiescente é majoritariamente combinado com pressões de injeção de combustível mais altas para otimizar a eficiência da combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 278).

Outros fabricantes escolheram projetos baseados no *swirl* que fornecem movimento de ar, especialmente em baixas velocidades do motor onde é mais necessário (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 278).

Em altas velocidades do motor, uma variedade de métodos são utilizados para evitar *swirl* excessivo, o que pode levar a aumento de fuligem e emissões de particulado, bem como do consumo de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 278).

Enquanto a pesquisa e desenvolvimento de escoamento e de *swirl* é trabalhosa e bastante envolvente, o resultado deve ser um projeto de porta de entrada que melhora a combustão completa, disponibilizando o ar adequado e a mistura de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 278).

Em geral, um aumento no *swirl* melhora o processo de mistura, reduz as emissões de hidrocarbonetos, partículas e fumaça, além de melhorar a economia de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Contudo, o *swirl* excessivo pode produzir sobreposição de pulverização, que se contrapõe a boa mistura, levando a bolsões de zonas ricas onde o ar é incapaz de penetrar e o combustível tem dificuldade de evaporação, resultando em emissões mais elevadas e uma provável economia de combustível ruim (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 280).

É importante notar, por conseguinte, que no desenvolvimento de portas de *swirl*, o objetivo não é necessariamente conceber uma elevada razão de *swirl*, mas uma porta cujos detalhes de concepção respondem aos requisitos do sistema de injeção de combustível para maximizar a eficiência de mistura e combustão (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 280).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 280), “como esse objetivo é difícil de alcançar para motores com ampla faixa de velocidade, algumas empresas adotaram sistemas de admissão com duas portas de admissão”, como o caso do motor utilizado neste estudo.

O objetivo destes projetos e sistemas de portas de admissão é principalmente proporcionar altas razões de *swirl* a baixas velocidades do motor e reduzir o *swirl* a altas velocidades do motor para evitar a sobreposição de pulverização (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 280).

Em sistemas de porta dupla, o fluxo de ar de admissão com momento angular é favorecido pela porta helicoidal, o que melhora a mistura a baixas rotações do motor (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 280).

Em altas velocidades do motor, o ar de entrada que flui através do coletor de admissão favorece a entrada tangencial, que reduz o *swirl* enquanto mantém boas características de mistura de pulverização / ar (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 280).

2.1.3 Ensaios em bancada com motor de injeção *Common Rail*

Países ou comunidades adotam separadamente seus limites de emissão e procedimentos para medição em função daquilo que seja mais representativo para sua realidade (BRUNETTI, 2012, p. 151).

As normas de emissões brasileiras para motores pesados foram adotadas

como uma série de níveis cada vez mais exigentes, denominados PROCONVE P-1, P-2, P-3, etc., sendo que as normas PROCONVE P7, Resolução Conama 403/2008, foram adotadas em 2008 com aplicação a partir de 2012, sendo baseadas nos regulamentos Euro V.

As normas de emissão Euro VI introduziram novos limites de emissão, comparáveis em rigor às normas dos EUA de 2010, e entraram em vigor a partir de 2013/2014 (DIESELNET, 2017b).

As normas Euro VI também introduziram limites de emissão de partículas (PN), requisitos de diagnóstico de bordo, *On Board Diagnostics (OBD)* mais rigorosos e uma série de novos requisitos de ensaio, incluindo ensaios com sistema portátil de medição de emissões fora de ciclo e em utilização (DIESELNET, 2017b).

No Brasil a norma ABNT NBR 15634 aplica-se à determinação quantitativa dos gases poluentes, do material particulado e da fumaça, emitidos por motores do ciclo Diesel nos ensaios estabelecidos para cada tipo de combustível, através dos ciclos ETC, ESC e ELR, destinados aos veículos rodoviários automotores.

A medição das emissões de motores é um instrumento utilizado não só para certificar que estes estejam trabalhando dentro dos limites exigidos pela legislação aplicável, mas também como ferramenta na validação de modelos de combustão durante a etapa de desenvolvimento e verificação de conformidade da produção (BRUNETTI, 2012, p. 150).

Segundo Dieselnet (2017b), o ciclo de teste para caminhões pesados a diesel destinado à norma Euro VI é denominado *World Harmonized Stationary Cycle (WHSC)*.

Devido à intensa demanda por testes na empresa onde seriam realizados os testes, utilizou-se um banco de testes limitado a testes de conformidade de produção (em inglês *conformity of production*) e por tal motivo chamado de COP. O ideal seria um banco destinado ao desenvolvimento de produtos, porém, o COP atenderia os propósitos deste estudo.

Para Euro VI, a legislação impõe a medição através de certos métodos, necessitando-se para tal de um equipamento chamado *micro soot sensor*, não disponível no COP por não ser necessário para medições com motores Euro V. Assim, testes em ciclo WHSC também não são possíveis de serem realizados.

Sabendo-se que este estudo baseia-se em análise comparativa de dados (resultados obtidos com os cabeçotes padrão versus os 4 conjuntos de cabeçotes referentes às amostras), não necessariamente os resultados obtidos precisariam acompanhar a norma, mas deveriam ser comparáveis entre si.

Há muitos ciclos de teste diferentes emitidos por diferentes órgãos e grupos de trabalho, descritos por Dieselnets (2015).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 177), tais ciclos podem ser divididos em ciclos de estado estacionário e ciclos transitórios.

Os ciclos de estado estacionário são sequências de modos de velocidade do motor e de carga constantes, onde as emissões são analisadas para cada modo de ensaio. Em seguida, o resultado global de emissão é calculado como uma média (ponderada) de todos os modos de teste. No ciclo transiente o veículo (motor) segue um padrão de condução estabelecido que inclui acelerações, desacelerações, mudanças de velocidade e de carga, etc. (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

O ciclo ESC foi introduzido para certificação de motores pesados a diesel, onde o motor é operado em dinamômetro em 13 diferentes condições, sendo que em cada uma delas são determinadas velocidades e cargas estáveis, sendo possível obter resultados como consumo de combustível e emissão de poluentes (MAJEWSKI; KHAIR, 2006).

Portanto, decidiu-se realizar os testes contemplando o ciclo *European Stationary Cycle* (ESC), que poderia ser realizado no COP, sendo explanado nos parágrafos a seguir.

O motor é testado em um dinamômetro de motor ao longo de uma sequência de modos em estado estacionário (Figura 5). O motor deve funcionar durante o tempo prescrito em cada modo, completando a rotação do motor e mudanças de carga nos primeiros 20 segundos. A velocidade especificada deve ser mantida a ± 50 rpm e o binário especificado deve ser mantido a $\pm 2\%$ do binário máximo naquela velocidade de ensaio. As emissões são medidas durante cada modo e em média ao longo do ciclo utilizando um conjunto de fatores de ponderação. Emissões de partículas são amostrados em um filtro ao longo dos 13 modos. Os resultados finais das emissões são expressos em g / kWh (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 211-212).

O ensaio ESC é caracterizado por altas taxas de ocupação médias e temperaturas muito elevadas de gás de escape (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 213).

Segundo Majewski e Khair (2006, p. 212-213), as rotações do motor são definidas da seguinte forma:

Figura 5 – Modos de teste do ciclo ESC

Fonte: Dieselnet (1997a).

A alta velocidade “nhi” é determinada pelo cálculo de 70% da potência útil máxima declarada. A velocidade mais elevada do motor em que este valor de potência ocorre (ou seja, acima da velocidade nominal) na curva da potência é definido como “nhi”.

A baixa velocidade “nlo” é determinada pelo cálculo de 50% da potência útil máxima declarada. A velocidade mais baixa do motor em que este valor de potência ocorre (ou seja, abaixo da velocidade nominal) na curva da potência é definida como “nlo”.

As velocidades do motor A, B, e C a serem usadas durante o teste são então

calculadas a partir das fórmulas seguintes:

- a) $A = n_{lo} + 0,25 (n_{hi} - n_{lo})$;
- b) $B = n_{lo} + 0,50 (n_{hi} - n_{lo})$; e
- c) $C = n_{lo} + 0,75 (n_{hi} - n_{lo})$.

2.2 Conceito e Importância do **SWIRL**

Devido às altas velocidades envolvidas, tudo o que flui para dentro, para fora, e dentro dos cilindros do motor são fluxos turbulentos, sendo o movimento fluido dentro da câmara de combustão de um motor importante para melhorar a mistura de ar-combustível e para aumentar a velocidade e a eficiência de combustão do motor (PULKRABEK, 2004).

A Figura 6 mostra o percurso do fluxo de do ar de admissão em um motor de ignição por centelha.

Figura 6 – Fluxo do ar de admissão

Fonte: Pulkrabek (2004, p. 253).

Além da turbulência normal desejável para acelerar o processo de combustão, um movimento de rotação chamado *Swirl* é gerado por meio da construção do sistema de admissão, de modo a se obter um componente tangencial para o fluxo de entrada no cilindro. Isso é feito por meio da conformação do contorno do duto de admissão, das portas de válvulas, e às vezes até mesmo da face do pistão (PULKRABEK, 2004).

Segundo Heywood (1988, p. 342), “*Swirl* é geralmente definido como rotação organizada da carga em torno do eixo do cilindro. É criado colocando o fluxo de entrada no cilindro com uma quantidade de movimento angular inicial”.

Para Majewski e Khair (2006, p. 108), “o *Swirl* ou número de *Swirl*, é a razão entre a velocidade de rotação do ar que entra no cilindro e a velocidade do motor”.

“*Swirl* aumenta grandemente a mistura de ar e de combustível produzindo uma mistura homogênea no tempo disponível para isto, que no caso de motores modernos de alta velocidade é muito curto” (PULKRABEK, 2004, p. 251).

Segundo Ferguson (1986, p. 287), o *Swirl* é utilizado em alguns motores à gasolina para promover uma combustão rápida além de garantir a rápida mistura de combustível e ar nos motores de injeção direta a diesel ou motores de carga estratificada.

“Motores diesel sem *Swirl* seriam quiescentes e a intensidade da injeção de combustível teria que ser utilizada como alternativa para misturar o ar e o combustível” (FERGUSON, 1986, p. 287).

Segundo Pulkrabek (2004), existem muitas escalas de turbulência dentro de um motor. Turbulência em macro escala ocorre com turbilhões proporcionais ao tamanho da passagem do fluxo como, por exemplo, a abertura da válvula, o diâmetro do duto de entrada, etc. Esta grandeza pode variar, mas tem uma direção controlada pela passagem do fluxo. Por outro lado, a turbulência de menor escala é aleatória e homogênea, sem direção definida, e é controlada por dissipação viscosa.

Conforme a premissa anterior, pode-se afirmar que a geometria do duto de admissão afeta a turbulência na macro escala, assim como a direção do fluxo de ar ao adentrar o cilindro e consequentemente o *Swirl*, o que justifica um dos objetivos

deste estudo que é, mensurar e analisar os impactos causados ao *Swirl* através da alteração geométrica do posicionamento dos dutos de admissão.

A Figura 7 mostra o movimento do *Swirl* dentro do cilindro do motor (a), e os métodos para gerá-lo como a entrada de ar do cilindro em direção tangencial (b), duto de admissão com contornos (c) e contornos nas portas das válvulas (d).

Figura 7 – Métodos para geração do *Swirl*

Fonte: Pulkrabek (2004, p. 252).

2.3 Medição do *Swirl* e $\mu\sigma_m$

Segundo Ferguson (1986, p. 287), o *Swirl* refere-se ao fluxo de ar em rotação dentro do cilindro em torno do seu eixo.

O nível de *Swirl* no final do processo de compressão é dependente do *Swirl*

gerado durante o processo de admissão e de quanto este é amplificado durante o processo de compressão. O *Swirl* admitido é gerado dirigindo o fluxo tangencialmente para dentro do cilindro ou criando um pré-*Swirl* com o fluxo de ar que será admitido através da utilização de uma porta helicoidal (FERGUSON, 1986).

A Figura 8 mostra dois dos parâmetros utilizados no projeto de dimensionamento do *Swirl*. Estes são o raio do Rv deslocamento da válvula e o ângulo de orientação α .

As portas helicoidais são geralmente mais compactas do que portas diretas. Estas são capazes de produzir um *Swirl* mais intenso do que portas diretas a baixas elevações, mas são inferiores em elevações mais altas, porém, ambas as concepções criam *Swirl* à custa da eficiência volumétrica. Na tentativa de não comprometer o design da porta tanto para o bem do *Swirl* quanto da eficiência volumétrica, portas de alto *Swirl* atuais são uma mistura de portas diretas e helicoidais (FERGUSON, 1986).

Figura 8 – Parâmetros de dimensionamento do *Swirl*

Fonte: Ferguson (1986, p. 287).

Segundo Ferguson (1986, p. 288), o processo de desenvolvimento focando o *Swirl* é normalmente feito em um banco de fluxo constante.

“A natureza do fluxo turbilhonar em um motor em funcionamento real é extremamente difícil de determinar. Assim, testes de fluxo constante são muitas vezes utilizados para caracterizar o *Swirl*” (HEYWOOD, 1988, p. 343).

Assim sendo, o método utilizado para medir o *Swirl* provocado pelos cabeçotes que serão utilizados neste estudo contempla um fluxo constante criado por uma bomba de vácuo, sugando o ar de forma constante através dos dutos de admissão no cabeçote do cilindro, passando pelas aberturas de válvulas até o cilindro do motor onde é medido o turbilhonamento de ar, denominado *Swirl*.

Um ‘retificador’ de fluxo em formato de matriz alveolar, colocado perpendicularmente ao eixo do cilindro, mede o torque total exercido pelo *Swirl*, ou seja, mede a reação necessária para anular o fluxo turbilhonado.

Em outras palavras, a estrutura alveolar, ou também chamada de colmeia, que é de baixa massa e suportada por um sistema de baixo atrito, endireita o fluxo. O momento angular do fluxo aplica um torque à colmeia, que é medido através do registro da força necessária para restringi-lo. O *Swirl* é proporcional a este torque. Vale mencionar que, em motores com pistões e cabeçotes com certa simetria radial em torno do eixo do cilindro, a quantidade de movimento angular da massa de ar contida no cilindro no final do processo de admissão praticamente se mantém durante a compressão, uma vez que só pode ser reduzida pelas tensões de cisalhamento junto às superfícies lisas do cilindro, da cabeça do pistão e da face de fogo do cabeçote. Desse modo, o que é medido durante a simulação do processo de admissão em bancada de fluxo em regime permanente é bastante representativo do que ocorre no motor em funcionamento normal.

O método acima explanado foi utilizado como referência pelos profissionais e acadêmicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo num projeto cujo objeto de estudo é o *Swirl* e do qual este estudo faz parte, representado pela Figura 9. Os cálculos deste método são descritos com detalhes por Souza, R. A. (2016).

Segundo Souza, R. A. (2016), outro importante parâmetro de avaliação do desempenho de motores é denominado $\mu\sigma$ (MySigma), tratando-se de um coeficiente de descarga referido à área projetada das válvulas de admissão,

utilizando a velocidade máxima do escoamento decorrente da perda de carga. Os cálculos deste coeficiente são descritos com detalhes por Souza, R. A. (2016), sendo que neste estudo se utilizará o mesmo conceito.

Figura 9 – Método de medição do *Swirl*

Fonte: Heywood (1988, p. 343).

2.4 Relação *SWIRL* x Nível de Emissões

“A mistura de combustível e de ar num motor diesel tem uma forte influência sobre as suas características de desempenho e de emissão. Engenheiros de controle de emissões de diesel são sempre desafiados pela gestão de combustível e ar visando obter um desempenho ideal” (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 277-278).

Para velocidades elevadas do motor, uma variedade de métodos é usada para evitar *Swirl* excessivo, o que pode levar a um aumento da fuligem e emissões de partículas, bem como o consumo de combustível (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 281).

Segundo Pulkrabek (2004, p. 255-256), para os motores de combustão por compressão e motores de ignição comandada com injeção direta, o período de uma

rotação do *Swirl* e o número de furos no bico injetor devem estar relacionados com o tempo de injeção, sendo que o projeto adequado garante boa distribuição de combustíveis em toda a câmara de combustão, conforme equação a seguir:

Equação 1 ➡ Duração de injeção [$^{\circ}$ injeção/360 $^{\circ}$] = (Rs) / (número de orifícios)

Segundo Pulkrabek (2004, p. 256), as relações entre *Swirl*, duração de injeção e o número de orifícios no bico injetor de combustível de um motor de ignição por compressão podem ser observadas através do esquema representado na Figura 10.

Figura 10 – Relação *Swirl*, duração de injeção e bico injetor

Fonte: Pulkrabek (2004, p. 256).

Majewski e Khair (2006) salientam que os projetos de um motor não necessariamente devem contemplar uma alta taxa de *Swirl*, mas um formato de orifício/porta de admissão que crie um *Swirl* que corresponda às necessidades do sistema de injeção de combustível, maximizando a mistura e eficiência de combustão.

“O objetivo destes projetos e sistemas de porta de admissão é principalmente

fornecer altas taxas de *Swirl* em baixas rotações do motor e redução do *Swirl* em altas rotações do motor para evitar a sobreposição de pulverização” (MAJEWSKI; KHAIR, 2006, p. 281).

A partir das premissas acima mencionadas, pretende-se analisar como a alteração do *Swirl* impacta no nível de emissões e no consumo de combustível. Para tal, é necessário um equipamento e método de medição que gere informações plausíveis de análise.

Neste estudo foi utilizado o mesmo método de medição e cálculos para obtenção do número ou taxa de swirl explicado por Souza, R. A. (2016).

3 CABEÇOTE DO MOTOR *COMMON RAIL*: SWIRL MODIFICADO

Neste capítulo serão descritos os procedimentos adotados e análises realizadas durante a definição dos desvios controlados nos dutos de entrada do ar na câmara de combustão, confecção de peças e testes realizados em motor com injeção *COMMON RAIL*.

A Figura 11 mostra a imagem de um cabeçote, similar aos que serão analisados neste estudo. As sedes azuis são os dutos de admissão, cujo posicionamento será alterado, sendo os efeitos decorrentes desta modificação estudados no decorrer deste trabalho.

Por motivos de sigilo em relação à empresa e produto envolvidos, as medidas e tolerâncias envolvidas não serão citadas.

Figura 11 – Cabeçote para motor com injeção *COMMON RAIL*

Fonte: Autor (2016).

3.1 Definição das modificações através da análise estatística

Visando definir de maneira não aleatória os desvios a serem provocados e testados, foram utilizados os resultados das medições realizadas durante os anos de

2014 e 2015 em peças de produção. Havia sido registradas as variações do posicionamento das portas de entradas do ar no cilindro do motor bem como a medição do *Swirl* para cada cabeçote.

Os dados gerados são dispostos em grupos de 10 peças, sugerindo 10 amostras de cada lote produzido, conforme pode ser visto na coluna *Core manu date* contida no “Apêndice B”. Por razões de sigilo, apenas a variação do *Swirl* em relação a uma referência é apresentada.

Segundo Mingoti (2007, p. 22), “muitas vezes, coletam-se diversas variáveis que descrevem um fenômeno, com o intuito de construir algum índice específico relativo e sua quantificação”. Neste estudo, o índice a ser analisado é o número de *Swirl*.

A função básica do índice é sintetizar em uma única variável a informação de todas as variáveis que foram medidas sobre este fenômeno, sendo que seus valores podem ser analisados por métodos de estatística univariada (MINGOTI, 2007, p. 22).

As equações de regressão podem ser úteis para prever o valor de uma variável, dado algum particular da outra variável (TRIOLA, 2005, p. 399).

Segundo Mingoti (2007, p. 23), através de métodos de regressão linear multivariada, é possível avaliar a existência de relações entre a variável resposta com as variáveis explicativas.

Em linhas gerais, os métodos de estatística multivariada são utilizados com o propósito de simplificar ou facilitar a interpretação do fenômeno que está sendo estudado através da construção de índices ou variáveis alternativas que sintetizem a informação original dos dados; construir grupos de elementos amostrais que apresentem similaridade entre si, possibilitando a segmentação do conjunto de dados original; investigar as relações de dependência entre as variáveis respostas associadas ao fenômeno e outros fatores (variáveis explicativas), muitas vezes, com objetivos de predição; comparar populações ou validar suposições através de testes de hipóteses (MINGOTI, 2007, p. 22).

Para melhor entendimento dos dados a seguir, sugere-se a leitura do texto contido no “Apêndice A”, sobre regressão linear multivariada.

Nos gráficos 7, 8 e 9, observa-se que os dados utilizados neste estudo apresentam distribuição normal.

Gráfico 7 – Dispersão do canal S (x,y)

Fonte: Autor

Gráfico 8 – Dispersão do canal L (x,y)

Fonte: Autor

Gráfico 9 – Dispersão dos canais S (x,y) e L (x,y)

Fonte: Autor

Nos gráficos 7, 8 e 9, pode-se também confirmar a correlação linear, já que a substituição do x contido nas equações apresentadas nos gráficos a seguir pelos valores das variáveis explicativas levam a resultados muito próximos dos valores reais medidos, dados estes contidos na coluna “Medido” contida no Apêndice “C” deste estudo.

No trabalho com duas variáveis relacionadas por uma equação de regressão, a mudança marginal em uma variável é a quantidade que ela varia quando a outra variável varia de exatamente uma unidade. A inclinação b_1 na equação de regressão representa a mudança marginal em y quando x varia de 1 unidade (TRIOLA, 2005, p. 401).

A partir da premissa acima, pode-se prever quanto o *Swirl* varia quando da variação unitária de cada uma das variáveis explicativas através das equações contidas nos gráficos 7 e 8.

Analisando-se os gráficos 7, 8 e 9, nota-se que há *outliers* presentes dentre

as amostras estudadas, porém, antes de excluí-los do estudo, outras avaliações serão realizadas, conforme conteúdo a seguir.

Diante das premissas acima apresentadas, decidiu-se realizar uma regressão linear multivariada utilizando o módulo ANOVA no Excel, onde o *Swirl* é a variável resposta e as posições dos dutos (S_x , S_y , L_x e L_y) são as variáveis explicativas, com o intuito de avaliar a significância dos dados das amostras.

O Excel foi selecionado como ferramenta devido à sua facilidade de acesso e instalação nos computadores disponíveis neste estudo.

Visando fornecer ao leitor um entendimento acerca das informações contidas nas análises geradas pelo Excel, se faz necessária a explanação de conceitos e definições utilizados em Estatística, conforme conteúdo do “Apêndice A”.

Neste estudo, a correlação linear é expressa através do R múltiplo.

R-Quadrado representa o coeficiente de determinação múltipla.

O coeficiente de determinação ajustado é o coeficiente de determinação múltipla R^2 modificado para levar em conta o número de variáveis e o tamanho amostral (TRIOLA, 2005, p. 417).

Inicialmente, realizou-se o ANOVA para todos os dados contidos no “Apêndice B” deste trabalho, segundo Tabela 3, onde o R múltiplo apresenta um valor aproximado de 0,42, indicando não relacionamento linear entre as variáveis já que o valor está mais próximo de 0 do que de 1. Além disso, nota-se que o R^2 é de aproximadamente 0,18, ou seja, a equação de regressão múltipla não se ajusta aos dados amostrais de maneira significativa já que apresenta valor próximo de zero.

Tabela 3 – Regressão contendo dados sem alteração

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,427826712
R-Quadrado	0,183035695
R-quadrado ajustado	0,160183547
Erro padrão	0,162507108
Observações	148

Fonte: Autor

O desvio padrão da estimativa contido na tabela 3 é aproximadamente 0,16, ou seja, para a variável swirl que varia entre extremos digamos 0,6 e que está sendo explicada linearmente pelas independentes Sx, Sy, Lx e Ly, o desvio padrão da parcela que restou sem explicação é 0,16, mostrando que o ajuste é pobre.

Neste estudo, as quatro variáveis independentes são Sx, Sy, Lx e Ly conforme citado anteriormente.

Tabela 4 – ANOVA contendo dados sem alteração

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,846083986	0,211520997	8,009561832	0,0000074
Resíduo	143	3,776424122	0,02640856		
Total	147	4,622508108			

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, neste caso é 0,0000074, ou 0,00074%, conforme tabela 4. Como tal valor é menor do que o nível de significância de 0,05 (valor equivalente ao intervalo de confiança 95% definido), a hipótese nula deve ser rejeitada e, conseqüentemente, a regressão deve ser aceita, indicando que a equação de regressão múltipla tem boa significância geral e é útil para predições.

Tabela 5 – Resumo contendo dados sem alteração

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,0780309	0,0201402	88,2825138	0,0000000	0,0382198	0,1178419	0,0382198	0,1178419
Sx [mm]	0,0628766	0,1074673	0,5850763	0,5594185	-0,1495532	0,2753063	-0,1495532	0,2753063
Sy [mm]	-0,1989491	0,0929615	-2,1401245	0,0340415	-0,3827053	-0,0151929	-0,3827053	-0,0151929
Lx[mm]	-0,1551967	0,0811842	-1,9116619	0,0579199	-0,3156728	0,0052794	-0,3156728	0,0052794
Ly [mm]	-0,2271906	0,0947504	-2,3977802	0,0177853	-0,4144829	-0,0398982	-0,4144829	-0,0398982

Fonte: Autor

Avaliando os valores contidos da tabela 5, nota-se que a diferença entre os valores superiores e inferiores dos coeficientes obtidos para S_x , S_y , L_x e L_y é quase o dobro do valor do próprio coeficiente, logo, a utilização de tais dados torna-se inconclusiva. Isso acontece devido à grande variação dos valores de *Swirl* entre lotes, decorrentes da mudança nos machos de fundição de um lote para outro (“Apêndice B”).

Diante das análises acima, concluiu-se que os dados não contêm a significância necessária para sua utilização estatística. Porém, não se excluindo a possibilidade de utilização dos mesmos, decidiu-se então avaliar tal significância entre dois lotes cujas variações aparentavam as mesmas características, ou seja, menor variação dos valores de *Swirl*. Logo, para as análises a seguir foram utilizados os dados dos lotes F042/037 a F142, conforme tabelas 6, 7 e 8.

Na tabela 6, o R múltiplo melhorou consideravelmente em relação à análise anterior que apresentou um valor aproximado de 0,42. O valor de 0,74 indica que há relacionamento linear. Nota-se que o R^2 também melhorou, apresentando valor de aproximadamente 0,56, ou seja, a equação de regressão múltipla se ajusta aos dados amostrais de maneira significativa.

Tabela 6 – Regressão contendo de dados dos lotes F042/037 e F142

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,74799747
R-Quadrado	0,559500215
R-quadrado ajustado	0,442033605
Erro padrão	0,038431703
Observações	20

Fonte: Autor.

Ainda na tabela 6, observa-se também que o valor de R^2 é aproximadamente 0,44, valor este um pouco menor em relação ao R^2 que apresenta valor de 0,56.

O desvio padrão da estimativa contido na tabela 6 é aproximadamente 0,04,

ou seja, um desvio relativamente pequeno.

Na coluna gl contida na tabela 7, são registrados os graus de liberdade, que não foram alterados em relação à análise anterior, visto que as mesmas variáveis independentes são S_x , S_y , L_x e L_y foram e serão mantidas no decorrer deste estudo.

Na segunda e terceira linhas (intituladas Resíduo e Total respectivamente), houve redução do valor em relação à análise anterior, visto que a quantidade de amostras diminuiu.

Tabela 7 – ANOVA contendo dados dos lotes F042/037 e F142

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,028140063	0,007035016	4,763057499	0,011098976
Resíduo	15	0,022154937	0,001476996		
Total	19	0,050295			

Fonte: Autor

A coluna SQ da tabela 7, nota-se redução dos resultados da soma dos quadrados, sendo este um bom sinal visto que, significando que a variação do lote é menor em relação à análise anterior.

O F de significação, ou valor P, neste caso é aproximadamente 0,011, ou 1,1%, conforme tabela 7. Como tal valor é menor do que o nível de significância de 0,05, a hipótese nula deve ser rejeitada, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral.

Observando-se a tabela 8, pode-se notar que os erros padrão dos coeficientes b_0 e b_1 aumentaram em relação ao lote anterior. Este aumento da variabilidade se dá em função da redução da quantidade de amostras que compõe o lote.

Tabela 8 – Resumo contendo dados dos lotes F042/037 e F142

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,0422001	0,0160104	103,5450851	0,0000000	-0,0763255	-0,0080747	-0,0763255	-0,0080747
Sx [mm]	-0,2195860	0,0999313	-2,1973697	0,0441164	-0,4325845	-0,0065875	-0,4325845	-0,0065875
Sy [mm]	-0,1689549	0,0737143	-2,2920246	0,0367867	-0,3260732	-0,0118367	-0,3260732	-0,0118367
Lx[mm]	0,1428251	0,0668145	2,1376362	0,0494184	0,0004134	0,2852368	0,0004134	0,2852368
Ly [mm]	-0,0454159	0,0621629	-0,7305950	0,4762840	-0,1779131	0,0870812	-0,1779131	0,0870812

Fonte: Autor

Avaliando os valores dos limites inferiores e superiores contidos da tabela 8, nota-se que a diferença entre estes e os coeficientes obtidos para Sx, Sy, Lx e Ly é significativa, prejudicando o uso dos coeficientes.

De maneira geral, houve considerável melhora na qualidade dos dados do lote F042/037 e F142, quando comparados ao lote inicial, porém, há índices que excluem a possibilidade de utilização dos dados, como por exemplo a significação geral da equação, conforme citado anteriormente.

Comparando-se os valores contidos na tabela 5 e na tabela 8, nota-se que a diferença entre os coeficientes obtidos para Sx, Sy, Lx e Ly e os valores superiores e inferiores apresentados diminuiu, porém, ainda não torna viável a utilização dos dados.

Avaliando-se um único lote (365), nota-se que a correlação linear melhorou, representando 88% de correlação, o R-Quadrado obtido é 0,79, ou seja, quase 80% do fenômeno pode ser explicado com tais dados, e o desvio padrão foi mantido em relação ao lote F042/037 e F142, conforme dados contidos na tabela 9.

Tabela 9 – Resumo contendo dados do lote 365

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,889424561
R-Quadrado	0,791076049
R-quadrado ajustado	0,623936889
Erro padrão	0,0312759
Observações	10

Fonte: Autor

Através dos dados contidos na coluna SQ da tabela 10, nota-se redução na variação das amostras do lote em relação à análise anterior.

Como tal valor F de significação de 0,06, segundo Tabela 10, é maior do que o nível de significância de 0,05, a hipótese nula não deve ser rejeitada, indicando que a equação de regressão múltipla não possui boa significância geral.

Tabela 10 – ANOVA contendo dados do lote 365

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,01851909	0,004629773	4,733038311	0,059408703
Resíduo	5	0,00489091	0,000978182		
Total	9	0,02341			

Fonte: Autor

Tabela 11 – Resumo contendo dados do lote 365

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,29093882	0,02611917	76,2251851	7,3623E-09	0,22379735	0,35808029	0,22379735	0,35808029
Sx [mm]	-0,4065571	0,17217601	-2,3612875	0,06464764	-0,8491496	0,03603546	-0,8491496	0,03603546
Sy [mm]	-0,1020317	0,14247043	-0,7161603	0,50593795	-0,4682636	0,26420025	-0,4682636	0,26420025
Lx[mm]	0,22691505	0,09105439	2,49208245	0,05502062	-0,0071477	0,46097781	-0,0071477	0,46097781
Ly [mm]	-0,076036	0,16198741	-0,4693947	0,65854423	-0,4924379	0,34036587	-0,4924379	0,34036587

Fonte: Autor

Observando-se a tabela 11, pode-se notar que os erros padrão dos coeficientes b_0 e b_1 diminuíram em relação aos lotes F042/037 e F142, mesmo reduzindo-se a quantidade de amostras contidas no lote.

Comparando-se os valores contidos na tabela 5 e na tabela 8, nota-se que a diferença entre os coeficientes obtidos para Sx, Sy, Lx e Ly e os valores superiores e inferiores apresentados diminuiu, porém, ainda não torna viável a utilização dos dados.

A comparação entre os valores dos coeficientes obtidos para S_x , S_y , L_x e L_y e aqueles correspondentes a 95% dos dados superiores e inferiores apresentados, cuja diferença ainda é o dobro do próprio coeficiente, limitam a confiança nos resultados.

Observando-se que todas as variações de *Swirl* e das coordenadas S_x , S_y , L_x e L_y dentro de cada lote não eram afetadas pela mudança de machos de fundição, e que a análise das variações em um mesmo lote eram significativas, se atribuiu o efeito da mudança de machos ao valor médio do *Swirl*, enquanto a variação de *Swirl* foi associada às variações de S_x , S_y , L_x e L_y dentro de cada lote, conforme consta no “Apêndice C” deste trabalho.

Hairet al (1998), cita que transformações de dados fornecem um meio de modificar variáveis para corrigir violações das suposições estatísticas subjacentes às técnicas de análise multivariada, e/ou para melhorar a relação (correlação) entre as variáveis.

Levando-se em consideração as premissas acima, na tentativa de encontrar a melhor forma de utilização dos dados amostrais, decidiu-se subtrair dos valores originais os valores médios correspondentes, tanto do *Swirl* quanto das variáveis explicativas.

Tais dados modificados estão contidos no “Apêndice C” deste trabalho, na coluna “calculado”.

Avaliando os valores obtidos com tal fonte de dados, nota-se que a correlação linear é de 73%, considerando-se um bom índice, além do R-quadrado melhorar em relação à primeira análise, aumentando substancialmente a percentagem de explicação do fenômeno em questão, conforme tabela 12.

Nota-se também que o R-quadrado ajustado é muito próximo do R-quadrado, significando que a inclusão ou exclusão de variáveis não interfere no percentual de explicação do fenômeno, conforme dados da tabela 12.

Em relação à primeira análise, o erro padrão que era de 0,16 reduziu substancialmente, sendo agora apenas 0,04, sendo que o número de observações foi mantido.

Tabela 12 – Regressão contendo de dados alterados (média)

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,735133971
R-Quadrado	0,540421955
R-quadrado ajustado	0,527566625
Erro padrão	0,040461318
Observações	148

Fonte: Autor

Através da tabela 13 verifica-se que a soma dos quadrados das variações foi reduzida em relação à primeira análise, fato devido à redução dos valores dos resíduos, quando da divisão dos valores pelos valores médios correspondentes.

Tabela 13 – ANOVA contendo dados alterados (média)

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,275289593	0,068822398	42,03874635	2,86301E-23
Resíduo	143	0,234107907	0,001637118		
Total	147	0,5093975			

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 13, é muito próximo de zero, sendo menor do que o nível de significância de 0,05. Logo, a hipótese nula deve ser rejeitada, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

O erro padrão dos coeficientes é pequeno, conforme se pode observar através da tabela 14.

Observa-se através da coluna valor-P contido na tabela 14, que a probabilidade do coeficiente b_0 ser $\geq$ ao coeficiente observado é 100%, porém, essa probabilidade se reduz em relação ao coeficiente b_1 . Ainda assim, pode-se concluir que o valor do *Swirl* será mantido mesmo com a variação do coeficiente b_1 (variáveis explicativas), considerando-se que apresentam um mesmo comportamento dentro

da variação apresentada.

Tabela 14 – Resumo contendo dados alterados - média (a)

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,261E-17	0,003326	3,791E-15	1,000000	-0,006574	0,006574	-0,006574	0,006574
Sx [mm]	-0,210749	0,034197	-6,162779	6,885E-09	-0,278346	-0,143152	-0,278346	-0,143152
Sy [mm]	-0,122080	0,024844	-4,913869	0,000002	-0,171189	-0,072971	-0,171189	-0,072971
Lx[mm]	0,120970	0,025813	4,686397	0,000006	0,069946	0,171995	0,069946	0,171995
Ly [mm]	-0,102943	0,027289	-3,772263	0,000236	-0,156885	-0,049000	-0,156885	-0,049000

Fonte: Autor

Nota-se também que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes estão coerentes, conforme dados contidos na tabela 14.

Repetindo novamente os gráficos de dispersão, agora dos dados modificados, nota-se a melhoria obtida a qual fora constatada através da análise estatística apresentada, conforme gráficos 10, 11 e 12.

O gráfico 10 refere-se ao canal S.

Gráfico 10 – Dispersão do canal S (x,y) com dados alterados

Fonte: Autor

O gráfico 11 refere-se ao canal L e o gráfico 12 refere-se a ambos os dutos “S” e “L” juntos.

Gráfico 11 – Dispersão do canal L (x,y) com dados alterados

Fonte: Autor

Gráfico 12 – Dispersão dos canais S (x,y) e L (x,y) com dados alterados

Fonte: Autor

Considerou-se assim, os valores contidos no “Apêndice C” como significativos para determinação do efeito das variações nas coordenadas das portas.

Sabendo-se que o valor médio de *Swirl* de todas as 148 amostras foi 0,11 maior que a referência, verifica-se, a partir da tabela 15, que a cada milímetro alterado positivamente em S_x , o *Swirl* reduz 12%, e assim por diante. Desta maneira, um resumo dos efeitos de cada uma das variáveis no aumento ou redução do *Swirl* pode ser calculado, conforme tabela 15, que também inclui os intervalos para 90% de confiança.

Tabela 15 – Resumo contendo dados alterados - média (b)

	$\Delta Sw\#/mm$		90% C.I
S_x	-0,21	$\pm$	0,07
S_y	-0,12	$\pm$	0,05
L_x	0,12	$\pm$	0,05
L_y	-0,10	$\pm$	0,05

Fonte: Autor

A partir da raiz da soma dos quadrados de S_x e S_y , obtém-se o módulo da alteração do *Swirl* a cada mm de deslocamento do duto curto, denominado como S (sinônimo do adjetivo em inglês “short”). Da mesma forma obtém-se o módulo do duto longo denominado L - “long” -, conforme tabela 16. As direções de máximo acréscimo de *Swirl* correspondentes aos módulos para S e L constam na coluna Argumento, obtidas através do arco tangente dos deslocamentos em x e y de cada duto.

Tabela 16 – Módulo e argumento da alteração do *Swirl* em função dos deslocamentos de S e L

	Módulo	Argumento [°]
S	0,24	-150
L	0,16	-40

Fonte: Autor

Conclui-se então que para um deslocamento do duto curto (S) na direção -150° o *Swirl* aumenta 0,24 e na direção oposta o mesmo diminui na mesma

proporção. Ortogonalmente a essa direção (120°) este efeito se anula. O mesmo raciocínio aplica-se ao duto longo.

A Figura 12 identifica os dutos/canais citados e por motivos de sigilo, substituiu-se o nome da empresa por “Empresa W”.

Figura 12 – Dutos “S” e “L”

Fonte: Empresa W (2010) modificado pelo autor

Os valores apontados por Souza (2016, p. 69) são bem próximos aos encontrados neste estudo sendo os valores -136° para o duto curto (S) e -41° para o duto longo (L). Considerando-se que neste estudo utilizou-se um motor com sistema de injeção “COMMON RAIL” e no estudo de Souza (2016) utilizou-se um motor com sistema de injeção PDE, conclui-se que o fenômeno *Swirl* ocorre de maneira similar em ambos os casos.

Diante das premissas e explicações descritas no decorrer deste capítulo, foram escolhidas as variações controladas a serem testadas no motor, totalizando 4 amostras, onde:

- a) Amostra 1: mover ambos os dutos 1mm aumentando o *Swirl* sendo S a -150° e L a -40° ;
- b) Amostra 2: mover ambos os dutos 1mm reduzindo o *Swirl* sendo S a 30° e

L a 140° ;

- c) Amostra 3: mover ambos os dutos 1mm nas direções ortogonais às da amostra 1, S a -60° e L a 50° ; e
- d) Amostra 4: mover ambos os dutos 1mm nos sentidos opostos aos da amostra 3, S a 120° e L a -130° .

Figura 13 – Variações controladas dutos “S” e “L”

Fonte: Empresa W (2010) modificado pelo autor.

As variações controladas a serem testadas no motor podem ser apreciadas através da Figura13.

3.2 Produção de Cabeçotes

Definidas as variações das peças a serem confeccionadas, conforme explanado no capítulo anterior, solicitou-se ao fornecedor de cabeçotes da empresa W a produção de 10 unidades de cada amostra sugerida.

A confecção das amostras é um processo artesanal, onde os machos de fundição originais foram manualmente modificados no intuito de se obter os desvios solicitados com relação ao posicionamento dos dutos de admissão.

A produção de cabeçotes é feita semanalmente, porém, o processo de preparação dos machos de fundição alterados torna este processo longo.

Além disso, a preparação manual tornou o processo com grandes variações quando comparadas as amostras entre si. Logo, as amostras confeccionadas semanalmente nem sempre eram aproveitadas, levando então a um novo processo de preparação de machos de fundição, fornadas, etc.

Todos estes fatos, aliados ao aumento da demanda da empresa que confeccionaria os cabeçotes, gerou uma espera de 3 meses para o recebimento do primeiro lote de cabeçotes que contemplava a 7 unidades da amostra 1 (1-1 a 1.7), 6 unidades de cada uma das demais amostras 2 (2.1 a 2.6), 3 (3.1 a 3.6) e 4 (4.1 a 4.6).

Devido à grande variação entre as peças de cada amostra, novas unidades de cada amostra foram solicitadas, sendo recebidas 5 unidades da amostra 1 (1A ao 1E), 6 unidades da amostra 2 (2A ao 2F), 5 unidades da amostra 3 (3A ao 3E) e 4 unidades da amostra 4 (4A ao 4D).

Do total de peças acima citado, foram selecionadas 6 unidades de cada amostra para a realização dos testes em motor. Os procedimentos de medição e seleção de amostras serão descritos nos próximos capítulos.

3.3 Medição e Correção dos Cabeçotes

Após a confecção das peças, as mesmas foram medidas e conferidas em relação às dimensões e posicionamentos pré-determinados, sabendo-se que o processo de fundição possui uma tolerância da ordem de 0,5 mm nas direções x e y.

Os cabeçotes nominais (peças padrão) a serem testados foram retirados do estoque da Empresa W como peças de produção, selecionados aleatoriamente.

Para todas as peças envolvidas neste estudo, adotou-se como procedimento a medição da peça bruta bem como da peça usinada através de programação de medição disponível na máquina de medição tridimensional da empresa W, equipamento que pode ser visualizado através da Figura 14.

Figura 14 – Máquina de medição tridimensional ZEISS ACCURA

Fonte: DirectIndustry (2017).

Em vista dos atrasos na confecção das peças fundidas com os desvios pré-determinados, por motivos já explanados anteriormente, decidiu-se fazer uma análise visando saber se as amostras disponíveis gerariam resultados significantes, em vista dos problemas de variação detectados e informados pelo fornecedor de cabeçotes.

A tabela 17 apresenta o resumo dos dados sobre as geometrias obtidas bem como sobre o valor de *Swirl* de cada uma das peças padrão.

Tabela 17 – Dimensões e *Swirl* – peças padrão

Tipo	ID	Sx ref $\pm 0,6$	Sy ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	Lx ref $\pm 0,6$	Ly ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	<i>Swirl</i> ref $\pm 0,2$	Mysigma
Bruto	1	0,3279	-0,1578	0,1135	0,1446	0,1264	0,0971	-0,10739	0,421452
Bruto	2	-0,0439	-0,2568	0,1204	0,0344	0,2584	0,0994	-0,08604	0,423202
Bruto	3	-0,1024	-0,0441	0,1097	0,0603	0,2914	0,0938	-0,1016	0,421662
Bruto	4	-0,2601	-0,0144	0,1143	0,2702	0,0859	0,0941	0,04575	0,420873
Bruto	5	-0,3994	0,1153	0,1256	0,1371	0,4572	0,111	-0,02555	0,424093
Bruto	6	0,1198	-0,1194	0,1311	-0,1413	0,2119	0,1086	-0,13038	0,419635
Usin.	1	-0,0463	-0,0328	0,1135	-0,046	-0,0156	0,0971	-0,10739	0,421452
Usin.	2	-0,0473	-0,0372	0,1204	-0,0457	-0,0194	0,0994	-0,08604	0,423202
Usin.	3	-0,0436	-0,0333	0,1097	-0,041	-0,0227	0,0938	-0,1016	0,421662
Usin.	4	-0,0451	-0,0352	0,1143	-0,0418	-0,215	0,0941	0,04575	0,420873
Usin.	5	-0,0494	-0,0388	0,1256	-0,0478	-0,0282	0,111	-0,02555	0,424093
Usin.	6	-0,051	-0,0412	0,1311	-0,0464	-0,0281	0,1086	-0,13038	0,419635

Fonte: Autor

A tabela 18 apresenta o resumo dos dados sobre as geometrias obtidas bem como sobre o valor de *Swirl* de cada uma das peças da Amostra 1, notando-se o aumento de *Swirl*, confirmando os resultados da análise previamente realizada.

Tabela 18 – Dimensões e *Swirl* – Amostra 1 (primeira etapa)

Tipo	ID	Sx ref $\pm 0,6$	Sy ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	Lx ref $\pm 0,6$	Ly ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	<i>Swirl</i> ref $\pm 0,2$	Mysigma
Bruto	1.1 = 13	-1,321	-1,0342	0,5082	1,6369	-1,01	-0,4549	0,654644	0,411924
Bruto	1.2 = 12	-1,0425	-0,597	0,4705	1,2441	-0,8648	0,0666	0,531202	0,412316
Bruto	1.3 = 6	-1,1325	-0,9436	0,3484	1,5172	-0,4834	-0,0517	0,613153	0,406662
Bruto	1.4 = 11	-1,2713	-0,6688	0,3848	1,1658	-0,2956	-0,1026	0,499622	0,416469
Bruto	1.5 = 7	-0,9545	-0,3871	0,4159	1,2905	-0,7187	-0,0437	0,472916	0,417928
Bruto	1.6 = 3	-0,4763	-1,1033	0,4544	0,6378	-0,3716	0,122	0,383107	0,413458
Bruto	1.7 = 2	-0,7948	-0,1926	0,5573	0,9119	-0,7649	0,0911	0,513065	0,412974
Usin.	13	-0,0142	-0,022	0,5082	-0,0199	0,0008	-0,4549	0,654644	0,411924
Usin.	12	-0,0319	-0,0633	0,4705	-0,0292	-0,0436	0,0666	0,531202	0,412316
Usin.	6	-0,0179	-0,0241	0,3484	-0,0517	-0,0025	-0,0517	0,613153	0,406662
Usin.	11	-0,027	-0,0556	0,3848	-0,0327	-0,0389	-0,1026	0,499622	0,416469
Usin.	7	-0,0145	-0,03113	0,4159	-0,0334	0,0157	-0,0437	0,472916	0,417928
Usin.	3	-0,0382	-0,0475	0,4544	-0,0349	-0,0245	0,122	0,383107	0,413458
Usin.	2	-0,0082	-0,0176	0,5573	-0,021	0,0084	0,0911	0,513065	0,412974

Fonte: Autor

A tabela 19 mostra o resumo das geometrias obtidas bem como do *Swirl* de cada uma das peças da amostra 2.

Tabela 19 – Dimensões e *Swirl* – Amostra 2 (primeira etapa)

Tipo	ID	Sx ref $\pm 0,6$	Sy ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	Lx ref $\pm 0,6$	Ly ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	<i>Swirl</i> ref $\pm 0,2$	Mysigma
Bruto	2.1 = 10	0,8544	-0,1808	0,1711	-0,2678	0,5633	-0,0445	-0,29901	0,419033
Bruto	2.2 = 9	0,9713	-0,2961	0,2652	-0,8562	0,3963	0,0603	-0,47043	0,421721
Bruto	2.3 = 8	1,0975	0,1834	0,403	-0,1532	0,635	0,172	-0,37503	0,423807
Bruto	2.4 = 4	0,9829	-0,1728	0,4723	-0,4785	0,4791	-0,0026	-0,3981	0,42363
Bruto	2.5 = 5	0,6425	0,2565	0,3131	-0,1499	0,5974	0,0478	-0,35181	0,41945
Bruto	2.6 = 1	1,0093	0,3916	0,2558	0,0506	0,7999	0,0043	-0,36464	0,42202
Usin.	10	-0,0064	-0,0527	0,1711	-0,0117	-0,0292	-0,0445	-0,29901	0,419033
Usin.	9	-0,0151	-0,0848	0,2652	-0,0332	-0,0559	0,0603	-0,47043	0,421721
Usin.	8	-0,0132	-0,0322	0,403	-0,021	-0,0111	0,172	-0,37503	0,423807
Usin.	4	-0,062	-0,088	0,4723	-0,0572	-0,0662	-0,0026	-0,3981	0,42363
Usin.	5	-0,0157	-0,0992	0,3131	-0,0183	-0,0757	0,0478	-0,35181	0,41945
Usin.	1	-0,288	-0,0451	0,2558	-0,0381	-0,0192	0,0043	-0,36464	0,42202

Fonte: Autor

Através da tabela 20, nota-se que o conjunto de amostras representado pelas amostras padrão, amostras 1 e amostras 2 acima mencionadas, possuem uma capacidade de 99% em explicar o fenômeno em questão, conforme constatado através do R-quadrado. O R-quadrado ajustado é bem próximo ao R-quadrado, concluindo-se que a exclusão de amostras levaria a um resultado próximo do atual.

Tabela 20 – Regressão do *Swirl* contendo peças padrão, amostras 1 e 2

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,993502
R-Quadrado	0,987046
R-quadrado ajustado	0,983345
Erro padrão	0,051195
Observações	19

Fonte: Autor

Nota-se também que o erro padrão está próximo ao desejado, ou seja, 0,05.

Através da tabela 21 verifica-se que a soma dos quadrados das variações apresenta valores maiores do que os apresentados pelas amostras utilizadas na seleção dos desvios a serem confeccionados, cujo valor era de aproximadamente 0,84 no caso dos dados sem alteração e 0,27 no caso dos dados alterados pela média.

O F de significação na tabela 21, é muito próximo de zero, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

Tabela 21 – Anova *Swirl* contendo peças padrão, amostras 1 e 2

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	2,795851	0,698963	266,6843	4,84E-13
Resíduo	14	0,036693	0,002621		
Total	18	2,832544			

Fonte: Autor

Os erros padrão dos coeficientes são pequenos, conforme se pode observar através da tabela 22.

Observando-se a coluna valor-P, pode-se concluir que o valor do *Swirl* será alterado com maior significância quando a variável Y1 for alterada. Nota-se que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes estão coerentes.

Tabela 22 – Resumo contendo peças padrão, amostras 1 e 2

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,053916	0,023728	69,37425	3,62E-19	-0,10480675	-0,003025512	-0,104806753	-0,003026
Variável X 1	-0,173404	0,038463	-4,5083	0,000491	-0,25589945	-0,090908448	-0,255899447	-0,09091
Variável Y 1	-0,075022	0,044667	-1,67959	0,115206	-0,17082321	0,020778868	-0,170823208	0,020779
Variável X 2	0,196995	0,045569	4,322966	0,000702	0,09925849	0,294732105	0,099258491	0,294732
Variável Y 2	-0,164043	0,055885	-2,93536	0,010856	-0,28390457	-0,044181141	-0,283904567	-0,04418

Fonte: Autor

Tabela 23 – Módulo e argumento da alteração do *Swirl* em função dos deslocamentos de S e L para amostras padrão, 1 e 2

	Módulo	Argumento [°]
S	0,19	-156,6
L	0,26	-39,8

Fonte: Autor

A coluna Argumento da tabela 23 mostra as direções de máximo acréscimo de *Swirl* correspondentes aos módulos para S e L, sendo os valores encontrados muito próximos dos preditos anteriormente, apresentados na tabela 23.

Os valores calculados de *Swirl* para o conjunto composto pelas amostras padrão, amostra 1 e amostra 2 apresentam-se na tabela 24, obtidos através dos dados contidos no “Apêndice D” deste trabalho.

Tabela 24 – *Swirl* calculado para amostras padrão, 1 e 2

Mantida a tolerância de $\pm 0,5$ mm em x e y	
Sw#max	1,250816
Sw#nom	-0,05391613
Sw#min	-0,35864827

Fonte: Autor

As tabelas a seguir apresentam dados relacionados ao mysigma ($\mu\sigma_m$).

O R-quadrado apresentado da tabela 25 apresenta um valor de 0,75, significando que o resultado do mysigma obtido através do conjunto de amostras padrão, 1 e 2 explica 75% do fenômeno em questão. Sendo o R-quadrado ajustado bem próximo ao R-quadrado, conclui-se que a exclusão de amostras levaria a um resultado próximo do atual.

O valor do R-múltiplo significa que as amostras em questão apresentam 86% de correlação linear. Embora 86% aparente ser um valor adequado, há de se analisar a quantidade de amostras envolvidas. Neste caso, das 19 peças analisadas, 14% não possuem comportamento similar aos demais e se distanciam da reta.

Tabela 25 – Regressão do mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,868694
R-Quadrado	0,75463
R-quadrado ajustado	0,723958
Erro padrão	0,002596
Observações	19

Fonte: Autor

Através da tabela 26 verifica-se que a soma dos quadrados das variações apresenta valores menores do que os apresentados pelas amostras utilizadas na seleção dos desvios a serem confeccionados, cujo valor era de aproximadamente 0,18 no caso dos dados do lote 365 e 0,27 no caso dos dados alterados pela média.

O F de significação na tabela 26, é muito próximo de zero, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

Tabela 26 – Anova mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,000332	0,000166	24,60378	1,3139E-05
Resíduo	16	0,000108	6,74E-06		
Total	18	0,000439			

Fonte: Autor

Os erros padrão dos coeficientes são pequenos, conforme se observa através da tabela 27, onde se observa também que o F de significação, ou valor P, é aproximadamente zero, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral. Os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes estão coerentes.

Tabela 27 – Resumo mysigma contendo peças padrão, amostras 1 e 2

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,421221	0,000718	586,972925	0,000000	0,419700	0,422743	0,419700	0,422743
Var Y 1	0,004872	0,001959	2,486698	0,024316	0,000719	0,009026	0,000719	0,009026
Var X 2	-0,003608	0,001154	-3,127684	0,006492	-0,006054	-0,001163	-0,006054	-0,001163

Fonte: Autor

Com os resultados apresentados até o momento, conclui-se que embora o *Swirl* desejado tenha sido obtido tanto com relação à amostra 1 quanto em relação à amostra 2, a grande variação entre as peças de cada lote inviabiliza os testes em motor, já que algumas peças possuem o deslocamento com medidas cujos valores são o dobro do solicitado, gerando interferências na vazão de ar e mysigma. Um teste em motor contemplando as peças em questão, traria resultados inconclusivos.

Através do gráfico13, cujo resultado é baseado nos dados as amostras 1 e 2, nota-se que o mysigma de algumas peças se distancia do resultado gerado pela reta que representa o coeficiente de linearidade, sugerindo que a utilização das amostras 1 e 2 não gerariam resultados precisos ao ponto de explicar o fenômeno que se deseja estudar neste trabalho.

Gráfico 13 – Variação do $\mu\sigma$ – Amostra 1 e 2

Fonte: Autor

Pelos motivos apresentados, solicitaram-se novas amostras com as mesmas

dimensões, visando obter um grupo de peças mais homogêneo, cujos resultados são apresentados a seguir.

As tabelas a seguir detêm o resumo das geometrias obtidas bem como do *Swirl* de cada uma das peças das amostras 1, 2, 3 e 4, sendo algumas destas peças já apresentadas neste estudo.

As tabelas 28 e 29 estão relacionadas às amostras 1 e 2 respectivamente.

Tabela 28 – Dimensões e *Swirl* – Amostra 1

Tipo	ID	Sx	Sy	Diâmetro	Lx	Ly	Diâmetro	Swirl	Mysigma
		ref ±0,6	ref ±0,5	ref ±1	ref ±0,6	ref ±0,5	ref ±1	ref ±0,2	
Bruto	1.1 = 13	-1,321	-1,0342	0,5082	1,6369	-1,01	-0,4549	0,654644	0,411924
Bruto	1.2 = 12	-1,0425	-0,597	0,4705	1,2441	-0,8648	0,0666	0,531202	0,412316
Bruto	1.3 = 6	-1,1325	-0,9436	0,3484	1,5172	-0,4834	-0,0517	0,613153	0,406662
Bruto	1.4 = 11	-1,2713	-0,6688	0,3848	1,1658	-0,2956	-0,1026	0,499622	0,416469
Bruto	1.5 = 7	-0,9545	-0,3871	0,4159	1,2905	-0,7187	-0,0437	0,472916	0,417928
Bruto	1.6 = 3	-0,4763	-1,1033	0,4544	0,6378	-0,3716	0,122	0,383107	0,413458
Bruto	1.7 = 2	-0,7948	-0,1926	0,5573	0,9119	-0,7649	0,0911	0,513065	0,412974
Usin.	13	-0,0142	-0,022	0,5082	-0,0199	0,0008	-0,4549	0,654644	0,411924
Usin.	12	-0,0319	-0,0633	0,4705	-0,0292	-0,0436	0,0666	0,531202	0,412316
Usin.	6	-0,0179	-0,0241	0,3484	-0,0517	-0,0025	-0,0517	0,613153	0,406662
Usin.	11	-0,027	-0,0556	0,3848	-0,0327	-0,0389	-0,1026	0,499622	0,416469
Usin.	7	-0,0145	-0,03113	0,4159	-0,0334	0,0157	-0,0437	0,472916	0,417928
Usin.	3	-0,0382	-0,0475	0,4544	-0,0349	-0,0245	0,122	0,383107	0,413458
Usin.	2	-0,0082	-0,0176	0,5573	-0,021	0,0084	0,0911	0,513065	0,412974
Bruto	1A	-1,0221	-0,3661	0,7824	1,3182	-0,3163	0,2381	0,398056	0,410985
Bruto	1B	-1,0415	-0,7693	0,8143	1,5242	-0,4392	-0,4376	0,539055	0,408056
Bruto	1C	-1,085	-0,888	0,7197	1,1441	-0,7654	-0,6235	0,620791	0,40208
Bruto	1D	-1,1113	-0,608	0,6632	1,0046	-0,258	-0,1562	0,344288	0,417686
Bruto	1E	-0,5441	-0,3235	0,7591	1,4248	-0,5702	-0,1834	0,394033	0,412103
Usin.	1A	-0,031	-0,0707	0,7824	-0,0235	0,0864	0,2381	0,398056	0,410985
Usin.	1B	-0,0336	0,088	0,8143	-0,0221	0,0961	-0,4376	0,539055	0,408056
Usin.	1C	-0,0127	0,0457	0,7197	0,005	0,0601	-0,6235	0,620791	0,40208
Usin.	1D	-0,0137	0,069	0,6632	-0,0003	0,084	-0,1562	0,344288	0,417686
Usin.	1E	-0,0151	0,0392	0,7591	-0,0003	0,0507	-0,1834	0,394033	0,412103

Fonte: Autor

Tabela 29 – Dimensões e *Swirl* – Amostra 2

Tipo	ID	Sx	Sy	Diâmetro	Lx	Ly	Diâmetro	<i>Swirl</i>	Mysigma
		ref $\pm 0,6$	ref $\pm 0,5$	ref ± 1	ref $\pm 0,6$	ref $\pm 0,5$	ref ± 1	ref $\pm 0,2$	
Bruto	2.1 = 10	0,8544	-0,1808	0,1711	-0,2678	0,5633	-0,0445	-0,29901	0,417954
Bruto	2.2 = 9	0,9713	-0,2961	0,2652	-0,8562	0,3963	0,0603	-0,47043	0,418646
Bruto	2.3 = 8	1,0975	0,1834	0,403	-0,1532	0,635	0,172	-0,37503	0,418967
Bruto	2.4 = 4	0,9829	-0,1728	0,4723	-0,4785	0,4791	-0,0026	-0,3981	0,418113
Bruto	2.5 = 5	0,6425	0,2565	0,3131	-0,1499	0,5974	0,0478	-0,35181	0,418033
Bruto	2.6 = 1	1,0093	0,3916	0,2558	0,0506	0,7999	0,0043	-0,36464	0,417812
Bruto	2A	0,5489	0,1417	0,0532	-0,3116	0,7164	0,1292	-0,2206	0,421092
Bruto	2B	0,9156	-0,0039	0,3558	0,0591	0,8432	0,1658	-0,30549	0,420387
Bruto	2C	0,5525	0,3374	0,6668	-0,245	0,7149	0,2946	-0,34888	0,419304
Bruto	2D	0,8557	0,017	0,3802	-0,1237	0,8272	0,2582	-0,31973	0,417622
Bruto	2E	0,486	0,3675	0,8832	-0,3646	0,6214	0,5866	-0,38667	0,42
Bruto	2F	0,7521	0,1714	0,3209	-0,1746	0,7669	0,1629	-0,30781	0,419652
Usin.	10	-0,0064	-0,0527	0,1711	-0,0117	-0,0292	-0,0445	-0,29901	0,417954
Usin.	9	-0,0151	-0,0848	0,2652	-0,0332	-0,0559	0,0603	-0,47043	0,418646
Usin.	8	-0,0132	-0,0322	0,403	-0,021	-0,0111	0,172	-0,37503	0,418967
Usin.	4	-0,062	-0,088	0,4723	-0,0572	-0,0662	-0,0026	-0,3981	0,418113
Usin.	5	-0,0157	-0,0992	0,3131	-0,0183	-0,0757	0,0478	-0,35181	0,418033
Usin.	1	-0,288	-0,0451	0,2558	-0,0381	-0,0192	0,0043	-0,36464	0,417812
Usin.	2A	-0,0209	0,0513	0,0532	-0,0149	0,0691	0,1292	-0,2206	0,421092
Usin.	2B	-0,0113	0,1292	0,3558	-0,0043	0,142	0,1658	-0,30549	0,420387
Usin.	2C	-0,0261	0,0778	0,6668	-0,0022	0,0851	0,2946	-0,34888	0,419304
Usin.	2D	-0,0386	0,0742	0,3802	-0,0156	0,0851	0,2582	-0,31973	0,417622
Usin.	2E	-0,0161	0,0981	0,8832	-0,0041	0,1085	0,5866	-0,38667	0,42
Usin.	2F	-0,0339	0,0706	0,3209	-0,0228	0,0848	0,1629	-0,30781	0,419652

Fonte: Autor

Verificando-se os dados contidos nas tabelas 28, 29, 30 e 31, nota-se que o lote da amostra 4 foi o único conjunto de amostras que não atingiu o *Swirl* desejado em relação à totalidade das peças, sendo o objetivo inicial para tal amostra atingir um *Swirl* dentro de uma tolerância de $\pm 0,2$ em relação à referência.

As tabelas 30 e 31 referem-se às amostras 3 e 4 respectivamente.

Tabela 30 – Dimensões e Swirl – Amostra 3

Tipo	ID	Sx ref ±0,6	Sy ref ±0,5	Diâmetro ref ±1	Lx ref ±0,6	Ly ref ±0,5	Diâmetro ref ±1	Swirl ref ±0,2	Mysigma
Bruto	3.1	0,8095	-0,8946	0,0967	1,4766	0,4652	-1,1493	0,129984	0,411693
Bruto	3.2	1,113	-0,8948	0,0913	1,1662	0,8081	-1,2938	0,076952	0,410642
Bruto	3.3	0,6084	-0,5762	-0,0344	0,8017	0,8087	-0,6218	0,084258	0,41248
Bruto	3.4	1,004	-0,6157	-0,0827	0,8878	1,1223	-1,19	-0,00146	0,409086
Bruto	3.5	0,7187	-1,0963	0,0484	0,5159	0,7804	-0,0004	-0,00669	0,415535
Bruto	3.6	0,3507	-0,8853	-0,051	0,8806	1,1135	-1,2338	0,07263	0,410731
Bruto	3A	0,7541	-1,2927	0,3677	0,9625	0,905	-0,3936	0,049106	0,411969
Bruto	3B	0,6769	-1,1939	0,4744	0,7384	0,9705	-0,3126	0,059518	0,411091
Bruto	3C	0,0584	-1,3851	0,4373	0,726	0,94	-0,8434	0,263893	0,410399
Bruto	3D	0,4794	-1,2089	0,2704	0,474	1,0015	-0,6351	0,044076	0,411578
Bruto	3E	0,3497	-1,5732	0,345	1,004	0,9154	-1,3592	0,19061	0,40927
Usin.	3.1	-0,0736	0,0905	0,0967	-0,0507	0,0977	-1,1493	0,129984	0,411693
Usin.	3.2	-0,0432	0,0717	0,0913	-0,0317	0,0866	-1,2938	0,076952	0,410642
Usin.	3.3	-0,0174	0,1077	-0,0344	-0,002	0,1184	-0,6218	0,084258	0,41248
Usin.	3.4	-0,016	0,1251	-0,0827	-0,0231	0,1422	-1,19	-0,00146	0,409086
Usin.	3.5	-0,0374	0,1217	0,0484	-0,0235	0,1337	-0,0004	-0,00669	0,415535
Usin.	3.6	-0,0206	0,0979	-0,051	-0,0218	0,1138	-1,2338	0,07263	0,410731
Usin.	3A	-0,0457	0,0784	0,3677	0,0069	0,1034	-0,3936	0,049106	0,411969
Usin.	3B	-0,0246	0,0681	0,4744	0,0065	0,0773	-0,3126	0,059518	0,411091
Usin.	3C	-0,0143	0,088	0,4373	-0,0097	0,1023	-0,8434	0,263893	0,410399
Usin.	3D	-0,0223	0,1277	0,2704	-0,0112	0,1475	-0,6351	0,044076	0,411578
Usin.	3E	0,002	0,0782	0,345	0,0072	0,0957	-1,3592	0,19061	0,40927

Fonte: Autor

A partir deste ponto, cálculos foram realizados no intuito de encontrar as medidas (em milímetros) que pudessem corrigir ou minimizar o impacto criado pelo deslocamento incorreto dos dutos proveniente da peça fundida, conforme se pode constatar através dos dados contidos no “Apêndice E” (Amostra 4).

O intuito era retrabalhar as peças fundidas, adicionando ou removendo material nos pontos de apoio que a usinagem utiliza vislumbrando reposicionar toda a peça, incluindo os dutos, redirecionando os dutos para a direção desejada, reduzindo assim a variação entre as peças referentes a tal amostra.

Tabela 31 – Dimensões e Swirl – Amostra 4

Tipo	ID	Sx ref $\pm 0,6$	Sy ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	Lx ref $\pm 0,6$	Ly ref $\pm 0,5$	Diâmetro ref ± 1	Swirl ref $\pm 0,2$	Mysigma
Bruto	4.1	-1,1231	0,9056	-0,2371	-0,8377	-0,4217	-0,0076	0,043297	0,411817
Bruto	4.2	-1,2622	0,4599	0,1097	-0,7236	-0,3571	0,1067	0,094754	0,411041
Bruto	4.3	-1,6531	0,3911	-0,4041	-1,0808	-0,1025	0,0112	-0,01338	0,410275
Bruto	4.4	-1,7672	0,495	-1,7228	-0,4253	-0,8594	0,2294	0,298408	0,407447
Bruto	4.5	-1,1839	0,6196	-0,0318	-0,4506	-0,4803	-0,0558	0,183847	0,407341
Bruto	4.6	-1,5868	0,1889	-0,1974	-0,8417	-0,7026	-0,0924	0,373019	0,407782
Bruto	4A	-0,9042	-0,3055	0,7926	-0,3286	-0,6398	0,1063	0,454581	0,400038
Bruto	4B	-0,4471	0,6598	0,0703	-0,4642	-0,8392	0,2515	0,193535	0,408565
Bruto	4C	-1,0875	0,2664	0,5292	-0,2478	-0,4783	0,2573	0,27111	0,409475
Bruto	4D	-0,7961	-0,3695	0,9055	-0,5019	-0,651	0,2555	0,264804	0,407546
Usin.	4.1	-0,4361	-0,0494	-0,2371	-0,4016	-0,0461	-0,0076	0,043297	0,411817
Usin.	4.2	0,0103	-0,038	0,1097	0,0476	-0,0388	0,1067	0,094754	0,411041
Usin.	4.3	-0,3518	0,1619	-0,4041	-0,1468	-0,2213	0,0112	-0,01338	0,410275
Usin.	4.4	-0,1951	0,0568	-1,7228	-0,0704	0,0262	0,2294	0,298408	0,407447
Usin.	4.5	-0,1363	-0,0258	-0,0318	-0,01286	-0,0161	-0,0558	0,183847	0,407341
Usin.	4.6	-0,3214	0,2425	-0,1974	-0,2578	0,238	-0,0924	0,373019	0,407782
Usin.	4A	0,0637	-0,028	0,7926	0,0693	-0,0102	0,1063	0,454581	0,400038
Usin.	4B	0,0628	0,1237	0,0703	0,0726	0,1357	0,2515	0,193535	0,408565
Usin.	4C	0,0637	0,1063	0,5292	0,0743	0,1159	0,2573	0,27111	0,409475
Usin.	4D	0,0615	-0,1411	0,9055	0,0683	-0,1303	0,2555	0,264804	0,407546

Fonte: Autor

Tal procedimento foi realizado, adicionado plaquetas coladas e/ou removendo material com auxílio de um torno nos pontos referência para a usinagem, sendo que cada peça possuía uma medida a ser alterada. Porém, infelizmente tal procedimento não foi bem sucedido, pois os equipamentos para usinagem de cabeçotes realizam as operações através de linhas de transporte, ou seja, não são centros de usinagem onde a peça é usinada de uma única vez por uma única máquina. Sendo assim, notou-se apenas no final da linha que as peças tiveram as plaquetas arrancadas, não sendo possível avaliar em que ponto isso ocorreu (se antes ou após a utilização dos pontos de apoio alterados).

As medidas do dimensional das peças da amostra 4 são o resultado final do que foi obtido no procedimento acima mencionado.

Conforme os resultados de *Swirl* obtidos, nota-se que as tentativas de alterações não obtiveram êxito.

3.3.1 Seleção de peças

A seleção de peças baseou-se na análise dos dados presentes no “Apêndice E” deste trabalho, objetivando-se optar pelas amostras com maior semelhança entre elas, sendo que as 6 peças selecionadas de cada amostra para realização dos testes em motores estão contidas no “Apêndice F” deste trabalho.

Figura 15 – Cabeçote para motor com injeção *COMMON RAIL*

Fonte: Autor (2016).

Visando-se avaliar a qualidade das amostras em conjunto, realizou-se a regressão linear multivariada das amostras selecionadas para os testes em motor considerando-se todas como um conjunto, ou seja, são 30 peças sendo as mesmas

contidas no “Apêndice F” deste trabalho.

Avaliando os valores obtidos na tabela 32, nota-se que a correlação linear é de 95%. O R-quadrado é 0,91, representando um percentual de 91% em relação à capacidade da reta em explicar o fenômeno através do conjunto de amostras.

Tabela 32 – Regressão *Swirl* conjunto completo

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,954386
R-Quadrado	0,910852
R-quadrado ajustado	0,896588
Erro padrão	0,090135
Observações	30

Fonte: Autor

Nota-se que, apesar do R-quadrado ajustado estar próximo ao valor de R-quadrado, há potencial de melhoria no percentual de explicação do fenômeno caso haja inclusão ou exclusão de variáveis.

Tabela 33 – ANOVA *Swirl* conjunto completo

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	2,075223	0,518806	63,85797	9,3181E-13
Resíduo	25	0,203109	0,008124		
Total	29	2,278332			

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 33, é próximo de zero, sendo menor do que o nível de significância de 0,05. Logo, a hipótese nula deve ser rejeitada, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

O erro padrão dos coeficientes são pequenos, conforme se pode observar através da tabela 34.

Nota-se também que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes estão coerentes, conforme tabela 34.

Tabela 34 – Resumo *Swirl* conjunto completo

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-0,004035	0,022268	76,16193	4,05E-31	-0,04989664	0,041826492	-0,04989664	-0,041826
Variável X 1	-0,167693	0,047753	-3,51168	0,001715	-0,26604259	-0,069344054	-0,266042587	-0,06934
Variável X 2	-0,214284	0,047309	-4,52941	0,000126	-0,31171918	-0,116848065	-0,311719184	-0,11685
Variável X 3	0,077053	0,037077	2,07821	0,04811	0,0006923	0,153414558	0,000692296	0,153415
Variável X 4	-0,171031	0,059978	-2,85157	0,0086	-0,29455777	-0,047504156	-0,294557768	-0,0475

Fonte: Autor

Visto que os resultados dimensionais e de *Swirl* das peças referentes à amostra 4 não foram exatamente os desejados, e que houve grande variação entre as peças deste lote, supôs-se que as mesmas poderiam interferir de maneira mais acentuada nos resultados do conjunto das amostras apresentadas.

Diante deste fato, realizou-se nova análise de dados através de regressão linear multivariada, porém, agora se excluindo apenas as peças referentes às amostras 4 em relação à análise anterior, conforme resultados apresentados adiante.

Avaliando os valores obtidos na tabela 35, nota-se que a correlação linear é de 99%, sendo anteriormente 95% considerando-se a amostra 4. O R-quadrado que era 0,91 aumentou para 0,98, aumentando em 7% o percentual referente à capacidade da reta em explicar o fenômeno. Sendo o R-quadrado ajustado estar muito próximo ao valor de R-quadrado, a inclusão ou exclusão de variáveis não afetará o comportamento do fenômeno.

Tabela 35 – Regressão *Swirl* conjunto sem amostra 4

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,992724
R-Quadrado	0,9855
R-quadrado ajustado	0,982448
Erro padrão	0,038395
Observações	24

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 36, é ainda próximo de zero, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições. Porém, nota-se melhoras na soma dos quadrados, cujo valor reduziu de 2,07 para 1,90.

Tabela 36 – ANOVA conjunto sem amostra 4

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	1,90369	0,475922	322,8473	3,5344E-17
Resíduo	19	0,028009	0,001474		
Total	23	1,931699			

Fonte: Autor

Os erros padrão dos coeficientes foram reduzidos, conforme se pode observar através da tabela 37, sendo que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes continuam coerentes.

Tabela 37 – Resumo conjunto sem amostra 4

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,261E-17	0,003326	3,791E-15	1,000000	-0,006574	0,006574	-0,006574	0,006574
Sx [mm]	-0,210749	0,034197	-6,162779	6,885E-09	-0,278346	-0,143152	-0,278346	-0,143152
Sy [mm]	-0,122080	0,024844	-4,913869	0,000002	-0,171189	-0,072971	-0,171189	-0,072971
Lx[mm]	0,120970	0,025813	4,686397	0,000006	0,069946	0,171995	0,069946	0,171995
Ly [mm]	-0,102943	0,027289	-3,772263	0,000236	-0,156885	-0,049000	-0,156885	-0,049000

Fonte: Autor

Logo, em relação ao *Swirl*, pode-se concluir que houve significativa melhora na qualidade das amostras como conjunto após a exclusão das peças referentes à amostra 4.

A mesma análise será feita a seguir em relação ao *mysigma*, objetivando-se saber se a qualidade das amostras está adequada para os testes em motor.

Avaliando os valores obtidos na tabela 38, nota-se que a correlação linear é de 57% apenas. O R-quadrado é 0,32, representando um percentual de 32% em relação à capacidade da reta de regressão em explicar o fenômeno através do conjunto de amostras.

Nota-se também na tabela 38 que, há potencial de melhoria no percentual de explicação do fenômeno em caso de inclusão ou exclusão de variáveis, visto que há uma diferença entre R-quadrado ajustado em relação ao R-quadrado.

Tabela 38 – Regressão *mysigma* conjunto completo

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,57035
R-Quadrado	0,325299
R-quadrado ajustado	0,275322
Erro padrão	0,005001
Observações	30

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 39, é próximo de zero, sendo menor do que o nível de significância de 0,05. Logo, a hipótese nula deve ser rejeitada, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 39, é próximo de zero, sendo menor do que o nível de significância de 0,05, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

Tabela 39 – ANOVA mysigma conjunto completo

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,000326	0,000163	6,508875	0,00493173
Resíduo	27	0,000675	2,5E-05		
Total	29	0,001001			

Fonte: Autor

Tabela 40 – Resumo mysigma conjunto completo

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,41449	0,000931	445,1992	9,86E-54	0,41258019	0,41640079	0,412580189	0,416401
Variável X 1	0,000785	0,000993	0,790266	0,436259	-0,00125313	0,002823098	-0,001253131	0,002823
Variável X 2	0,004216	0,00132	3,193784	0,003554	0,00150754	0,006924947	0,001507539	0,006925

Fonte:

Observa-se através da tabela 40 que o erro padrão dos coeficientes são pequenos, bem como que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes estão coerentes.

Visto que os resultados da análise do mysigma em relação ao conjunto das amostras também possui potencial de melhoria em caso de inclusão ou exclusão de peças, e visando-se saber se a amostra 4 afeta significativamente a qualidade do conjunto de amostras, realizou-se a mesma comparação feita em relação ao *Swirl*, agora excluindo-se apenas as peças referentes às amostras 4 em relação à análise anterior, conforme resultados apresentados adiante.

Avaliando os valores obtidos na tabela 41, nota-se que a correlação linear é de 86%, sendo anteriormente 57% considerando-se a amostra 4. O R-quadrado que era 0,32 aumentou para 0,74, aumentando 42% o percentual referente à capacidade da reta em explicar o fenômeno.

Tabela 41 – Regressão mysigma conjunto sem amostra 4

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,86214
R-Quadrado	0,743286
R-quadrado ajustado	0,718837
Erro padrão	0,002587
Observações	24

Fonte: Autor

O F de significação, ou valor P, conforme tabela 3.2.26, é ainda próximo de zero, indicando que a equação de regressão múltipla possui boa significância geral e é útil para predições.

Tabela 42 – ANOVA mysigma conjunto sem amostra 4

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	2	0,000407	0,000203	30,40153	6,2983E-07
Resíduo	21	0,000141	6,69E-06		
Total	23	0,000547			

Fonte: Autor

Contudo, notam-se pioras na soma dos quadrados, cujo valor aumentou de 0,000326 para 0,000407, conforme pode ser verificado através da tabela 42.

O erro padrão dos coeficientes foi reduzido, conforme se observa através da tabela 43, sendo que os intervalos de confiança dos valores dos coeficientes continuam coerentes.

Tabela 43 – Resumo mysigma conjunto sem amostra 4

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,419179	0,000731	573,4118	1,55E-45	0,417659	0,420699503	0,417658997	0,4207
Variável X 1	-0,005626	0,000922	-6,10128	4,7E-06	-0,00754408	-0,003708615	-0,007544084	-0,00371
Variável X 2	0,004318	0,000722	5,977838	6,21E-06	0,00281594	0,005820424	0,002815942	0,00582

Fonte: Autor

Logo, em relação ao *mysigma* chega-se à mesma conclusão do *Swirl*, ou seja, houve significativa melhora na qualidade das amostras como conjunto após a exclusão das peças referentes à amostra 4.

Considerando-se os módulos e ângulos propostos para a confecção das amostras, pode-se dizer que o conjunto completo produziu valores diferentes daqueles propostos, sendo que o conjunto sem a amostra 4 produziu valores próximos para o duto curto (*short*) embora não tenha se assemelhado aos valores anteriores para o duto longo (*long*), conforme tabela 44.

Tabela 44 – Variação do *Swirl* por milímetro e ângulo em função dos deslocamentos de “S” e “L”

	Conjunto completo		Sem amostra 4	
	$\Delta Sw\#/\Delta mm$	Ângulo(°)	$\Delta Sw\#/\Delta mm$	Ângulo(°)
<i>Short</i>	0,27	-128,05	0,20	-140,79
<i>Long</i>	0,19	-65,75	0,25	-9,15

Fonte: Autor.

Com relação aos valores de *Swirl* calculados, pode-se dizer que o conjunto completo gerou valores de maior amplitude quando comparados aos valores gerados pelo conjunto sem a amostra 4.

Os valores calculados de *Swirl* podem ser verificados através da tabela 45, salientando-se que seu valor foi alterado subtraindo-se os valores originais pelo valor de referência.

Tabela 45 – *Swirl* calculado

Mantida a tolerância de $\pm 0,5$ mm em x e y		
	Conjunto completo	Sem amostra 4
Sw#max	0,310996	0,163001
Sw#nom	-0,004035	-0,123403
Sw#min	-0,319066	-0,409807

Fonte: Autor

4 ENSAIOS NO MOTOR *COMMON RAIL*

Visando atingir um dos objetivos deste trabalho, que é o de realizar ensaios em motor de injeção *COMMON RAIL* com as peças confeccionadas com desvios controlados, buscaram-se elementos, equipamentos, etc., que pudessem ser utilizados em análise comparativa posterior, sendo tal análise também um dos objetivos deste trabalho.

O motor disponibilizado para este estudo é utilizado exclusivamente para testes, sendo que as únicas peças trocadas seriam os cabeçotes a serem testados e respectivas peças de vedação e fixação. Este motor foi produzido pela Scania, classificado como DC13 147 450HP Euro 6, sem EGR, cujas principais características técnicas encontram-se no Anexo “A”.

A Tabela 46 apresenta os valores médios de swirl e mysigma de cada conjunto de 6 cabeçotes que foi ensaiado no motor anteriormente especificado. Os resultados para cada cabeçote que compõe cada amostra são apresentados no “Apêndice F”.

Tabela 46 – Resumo *Swirl* e *Mysigma*

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Swirl médio	-0,058	0,415	-0,368	0,042	0,244
Mysigma	0,4235	0,4121	0,4192	0,4117	0,4073

Embora o estudo esteja sendo feito no Brasil, os projetos da empresa W bem como outras empresas instaladas no Brasil atuando no setor de veículos pesados baseiam-se na norma europeia. Sendo assim, neste estudo serão analisados os dados de NO_x, CO, HC e MP, sendo estes alguns dos itens controlados por legislação.

Porém, os dados obtidos não serão comparados com os valores da norma, visto que os dados utilizados neste estudo foram coletados na saída do motor, antes da passagem pelo catalisador, excluindo-se assim a análise de uma variável que seria o sistema de pós-tratamento.

Para o consumo de combustível, foram adotados valores de referência obtidos no teste com os cabeçotes padrão.

Visando avaliar possíveis impactos no desempenho do mesmo em relação às emissões e ao consumo de combustível, foram realizadas duas curvas de plena carga e dois ciclos ESC em modo automático e 1 ciclo ESC ponto a ponto além de ensaios com alterações de injeção. Os procedimentos para cada teste serão detalhados a seguir, sendo realizados igualmente para as amostras padrão bem como para as quatro amostras com desvios controlados.

A curva de plena carga, também chamada em inglês de *fullload curve*, é obtida através do cruzamento dos dados de rotação versus a potência máxima em cada ponto de rotação selecionado. Neste estudo, para a seleção das rotações, adotaram-se valores similares aos praticados na Empresa W para motores Euro V, contemplando-se 12 pontos. Neste caso não houve coleta de material particulado.

Os resultados das curvas de plena carga apresentados no capítulo 5 são a média das duas curvas realizadas.

Delineando-se obter informações mais precisas sobre o comportamento do material particulado, definiu-se a realização de 2 ciclos ESC em modo automático, coletando-se o material particulado gerado de todos os pontos do ciclo num mesmo filtro, e o último ciclo ESC que seria realizado também em modo automático, porém, coletando-se o material particulado de cada ponto do ciclo num filtro diferente. Neste último caso, a soma do material particulado gerado em cada ponto seria comparável com o resultado gerado nos dois primeiros ciclos. Tal procedimento possibilitaria conhecer qual ponto possui maior influência na geração do material particulado.

Os resultados do ciclo ESC padrão apresentados são a média dos 3 ciclos ESC realizados, sendo 2 em modo automático e 1 ciclo ESC ponto a ponto.

O motor utilizado nos testes deste estudo possui tecnologia apta a realizar alterações na injeção (atrasos, avanços, injeções piloto etc.).

Objetivando-se adquirir um conhecimento acerca das possibilidades de correção tanto das emissões quanto do consumo de combustível, através da alteração do momento da injeção, decidiu-se realizar alguns testes envolvendo tal item.

O ideal neste caso seria realizar avanços e atrasos de mesma proporção em todos os pontos testados no ESC, visando comparar os resultados, porém, devido à reduzida disponibilidade do banco de testes, não havia tempo hábil para tal. Além disso, alguns pontos estavam em seus limites técnicos em relação à pressão na câmara de combustão, sendo que um avanço de injeção em tal ponto poderia ocasionar danos ao motor e/ou aos equipamentos de medição.

Diante desta situação, definiram-se dois pontos testados no ESC para realizar testes de avanço e atraso de injeção, salientando-se que nestes testes não houve alteração na quantidade de combustível injetada, alterando-se apenas o momento de início da injeção.

Os pontos 4 e 10 foram selecionados, pois estes causam proporcionalmente maior impacto nas emissões de NOx e particulados, além de apresentar valores não muito próximos dos limites de pressão dentro da câmara de combustão e temperatura de escape, parâmetros afetados quando da alteração do ponto de injeção.

Visando determinar quantos graus o início da injeção deveria ser alterado (atrasado e antecipado), de modo a gerar resultados úteis para este trabalho, verificou-se que estudos acerca da alteração do início de injeção obtiveram dados aceitáveis alterando-se de 2, conforme proposto por Desantes et al (2005) e 5 graus, conforme proposto por ZhenXu et al (2014). Diante deste range de 2 a 5 graus de alteração, determinou-se que o avanço e o atraso da injeção seriam da grandeza de 3 graus de modo a não gerar pressões da câmara de combustão que atingissem os limites, garantindo testes seguros.

Os dados utilizados para a análise e seleção dos pontos acima mencionados não podem ser divulgados por motivo de sigilo, porém, pode-se dizer que tais informações baseiam-se em resultados de testes contidos no banco de dados da Empresa W.

Em posse de todas as informações, peças e equipamentos necessários para a realização dos testes, os testes foram realizados com sucesso, sendo que os resultados dos mesmos são apresentados no capítulo a seguir, sendo estes baseados no conteúdo do “Apêndice G”.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados, de maneira gráfica, os resultados obtidos para cada uma das grandezas avaliadas nos testes em bancada com motor completo, bem como as respectivas análises. Lembrando que os dados são referentes aos gases brutos, antes de sua passagem pelo sistema de pós-tratamento.

Por razões de sigilo, todos os dados a seguir foram gerados subtraindo-se uma constante dos dados originais.

5.1 Ensaio em Plena Carga

Neste subitem cada gráfico apresentado contém dados referentes a média dos dois ensaios de plena carga com cada um dos grupos de cabeçotes.

5.1.1 Torque e consumo de combustível

Analisando-se o gráfico 14, nota-se que a amostra 3, cujo *swirl* está próximo ao valor da amostra padrão, mas cujo valor de $\mu\sigma$ é o maior dentre as amostras com *swirl* mais alto, apresentou valores de torque levemente superiores.

Gráfico 14 – Torque na curva de plena carga

Fonte: Autor

Analisando-se o gráfico 14, nota-se que a amostra 4 apresentou ligeira perda de torque em relação às demais amostras. Tal fato pode ter ocorrido, provavelmente pela ampla variação do valor de *swirl* entre as peças do lote, bem como por tal amostra apresentar a menor vazão comparando-se com as demais amostras.

O gráfico 15 apresenta o comportamento das amostras em relação ao consumo de combustível. Embora todas as amostras apresentem resultados semelhantes, em condições de rotação elevada, a amostra 2, de menor valor de *swirl*, apresenta reduções nítidas de consumo específico, que ultrapassam 1%. Já em rotações reduzidas, essa amostra perde eficiência em relação ao conjunto padrão.

Gráfico 15 – Consumo na curva de plena carga

Fonte: Autor

A amostra 4 possui um desequilíbrio, apresentando valores superiores e inferiores em relação às demais amostras, conforme gráfico 15.

Nota-se que enquanto as demais amostras apresentam comportamento similar, a amostra 4, assim como na curva de plena carga, apresenta picos de consumo em alguns pontos bem como queda no consumo em outros devido à sua variação no *swirl* de uma peça para outra além do σ menor.

5.1.2 Emissões de poluentes

Relembrando que os dados apresentados foram alterados de uma constante para manutenção de sigilo por parte do fabricante, ressalta-se que os dados originais para de emissões de poluentes foram medidos na saída do motor, e que o motor com seu sistema de pós-tratamento atende aos níveis de emissões regulamentados para Euro VI.

O gráfico 16 mostra níveis elevados de monóxido de carbono nos pontos de baixa rotação na curva de plena carga.

Nestes pontos de baixa rotação, a amostra 2 destaca-se, apresentando os maiores níveis de emissão, visto que tal amostra possui *swirl* baixo que aliado a baixas rotações promovem a geração de misturas ricas e consequentemente aumento nas emissões de monóxido de carbono, conforme gráfico 16.

Nota-se ainda que a amostra padrão e amostra 3, por possuírem *swirl* semelhante, geram uma qualidade de mistura ar-combustível similar, e, portanto, geram níveis de emissões semelhantes nos pontos de baixa rotação.

Gráfico 16 – Emissões de CO na curva de plena carga

Fonte: Autor

Ainda no gráfico 16, nota-se que as amostras 1 e 4, por possuírem *swirl*

mais alto em relação às demais, levam a melhor distribuição do combustível no ar na faixa de baixas rotações, gerando níveis menores de monóxido de carbono quando comparados ao das demais amostras. Já para a amostra 2, de menor *swirl*, o aumento das emissões de CO em baixas rotações fica patente.

Para as emissões de NOx, ressalta-se que os dados originais são próximos aos níveis de emissões regulamentados para Euro I.

Gráfico 17 – Emissões de NOx na curva de plena carga

Fonte: Autor

Em relação às emissões de óxido de nitrogênio, verifica-se um comportamento similar para todas as amostras, não acompanhando a variação apresentada na temperatura de entrada que será mostrada no gráfico 20. Logo, neste caso pode-se dizer que a variação da temperatura de entrada não ocasiona alterações nas emissões de NOx, conforme gráfico 17.

Nota-se que a amostra 2, por promover um *swirl* mais baixo deveria gerar pressões menores na câmara de combustão, e conseqüentemente a temperaturas mais baixas, levando a um nível menor de emissões de NOx em relação às demais amostras, principalmente sob condições de rotações maiores do motor.

Para as emissões de hidrocarbonetos, salienta-se que os dados originais

são próximos aos níveis de emissões regulamentados para Euro VI, sendo que as amostras com swirl reduzido apresentaram clara vantagem em altas rotações.

Gráfico 18 – Emissões de HC na curva de plena carga

Fonte: Autor

Neste estudo, concluiu-se através da revisão da literatura, que *swirl* baixo aliado a baixas rotações promovem a geração de misturas ricas e consequentemente aumento nas emissões de monóxido de carbono, que são resultado da queima incompleta de hidrocarbonetos.

No entanto, Majewski e Khair (2016, p. 109) citam que “um *swirl* excessivo pode produzir uma ignição de má qualidade, ou uma sobreposição dos sprays e um aumento nas emissões de hidrocarbonetos não queimados”.

Conforme constatado através do gráfico 18, a amostra 1 possui maior *swirl* e a mistura ar-combustível torna-se muito pobre em certas regiões para se autoinflamar ou para suportar uma chama propagadora, resultando em maior emissão de hidrocarbonetos, ainda que menores emissões de CO. A amostra 2 de menor *swirl*, apresenta comportamento oposto, emitindo maiores concentrações de CO e menores de hidrocarbonetos em rotações mais elevadas.

5.1.3 Pressão e temperatura

Os dados a seguir são apresentados a menos de uma constante aditiva por razões de sigilo.

Observa-se através do gráfico 19 que as amostras com mysigma maior apresentam pressões maiores no coletor de admissão com motor a plena carga. Possivelmente a menor perda de carga interna ao motor permite ao conjunto turbo-compressor promover um ganho na pressão de admissão.

Gráfico 19 – Pressão do coletor na curva de plena carga

Fonte: Autor.

O gráfico 20 mostra que as temperaturas de entrada variaram tanto de amostra para amostra quanto de ponto para ponto, sem manter um perfil relacionado ao comportamento do motor.

Gráfico 20 – Temperatura de entrada na curva de plena carga

Fonte: Autor.

Comparando-se as temperaturas de escape obtidas na curva de plena carga, notam-se valores similares entre as amostras, conforme gráfico 21.

Gráfico 21 – Temperatura de escape na curva de plena carga

Fonte: Autor.

5.2 Ciclo ESC Padrão e Ponto a ponto

Neste subcapítulo cada gráfico apresentado contém dados referentes à média dos três ciclos ESC com cada um dos grupos de cabeçotes. Tais dados foram subtraídos de uma constante por razões de sigilo.

Os três ciclos foram feitos em modo automático, porém, nos 2 primeiros o material particulado foi coletado considerando-se todo o ciclo, ou seja, 1 único filtro contém o material particulado de todos os pontos do ciclo. Para o último ciclo coletou-se o material particulado ponto a ponto, ou seja, 1 filtro contém o material particulado de cada ponto do ciclo.

5.2.1 Torque e consumo de combustível

Pode-se verificar, através do gráfico 22, que as amostras apresentaram comportamentos semelhantes entre si, mantendo-se os valores de torque no decorrer do ciclo, exceto a amostra 2 que apresentou menor torque nos pontos de carga máxima, assumindo o mesmo comportamento apresentado nos ensaios com curva de plana carga.

Gráfico 22 – Torque no ciclo ESC

Fonte: Autor.

Em relação aos resultados sobre consumo de combustível, nota-se, através do gráfico 23, que a amostra 4 apresentou valores superiores e inferiores às demais amostras, demonstrando desequilíbrio que pode ser associado à variação entre as peças deste lote (variação dimensional, de *swirl*, bem como μ).

Gráfico 23 – Consumo no ciclo ESC

Fonte: Autor.

5.2.2 Emissão de poluentes

Verificando-se o gráfico 24, nota-se comportamento semelhante à curva de plena carga, onde a amostra 2, por possuir *swirl* menor, gera maiores níveis de emissões de monóxido de carbono.

Ainda no gráfico 24, nota-se que as amostras padrão e 3 apresentam resultados semelhantes e intermediários entre as emissões mais altas provenientes da amostra 2 e as emissões mais baixas advindas da amostra 1.

Gráfico 24 – Emissões de CO no ciclo ESC

Fonte: Autor.

Nota-se através do gráfico 25 que a amostra 2, acompanhando o comportamento durante os ensaios na curva de plena carga, apresentou um nível menor de concentração de NOx em relação às demais amostras, ainda que tenha apresentado também menores torques à plena carga.

Gráfico 25 – Emissões de NOx no ciclo ESC

Fonte: Autor.

Gráfico 26 – Emissões de HC no ciclo ESC

Fonte: Autor.

Nota-se através do gráfico 26 que a amostra 1 que possui maior *swirl* traz maiores emissões de hidrocarbonetos, conforme constatado através dos ensaios na curva de plena carga.

As demais amostras também apresentaram resultados semelhantes, exceto a amostra 4, apresentando valores de HC superiores aos apresentados pela amostra 1 quando comparados aos ensaios na curva de plena carga.

Ambas as amostras, 1 e 4, apresentam valores possuem *swirl* mais alto em relação às demais amostras, o que pode explicar os resultados elevados de emissões de HC.

5.2.3 Pressão e temperatura

As características das curvas obtidas nos ciclos ESC são similares às decorrentes dos resultados da curva de plena carga, sendo que apenas alguns pontos das amostras 2 e 4 possuem valores mais baixos do que os das demais amostras, conforme gráficos 27.

Gráfico 27 – Pressão do coletor no ciclo ESC

Fonte: Autor.

O gráfico 28 apresenta temperaturas de entrada coletadas no ciclo ESC, mostrando que apesar de alguns pontos manterem valores similares comparando-se as amostras, em outros pontos não há similaridade, dificultando a correlação dos dados com o comportamento do motor.

Gráfico 28 – Temperatura de entrada no ciclo ESC

Fonte: Autor.

Gráfico 29 – Temperatura de escape no ciclo ESC

Fonte: Autor.

O gráfico 29 apresenta temperaturas de escape coletadas no ciclo ESC, sendo que as amostras apresentam valores similares de pressão de escape quando comparadas.

5.3 Alteração de injeção

Neste subcapítulo cada gráfico apresentado contém dados referentes aos testes realizados com avanço, ponto original e atraso da injeção para os pontos 4 e 10 do ciclo ESC, com cada um dos grupos de cabeçotes.

5.3.1 Torque e consumo de combustível

O gráfico 30 apresenta o comportamento das amostras considerando-se a alteração de injeção.

Para o ponto 4, conclui-se que mesmo com a alteração de injeção não houve alterações significativas em relação ao torque, exceto um leve declínio para a amostra 4.

No ponto 10, verifica-se que há um comportamento similar para as amostras

quando do atraso da injeção, ocasionando perda de torque. Quando se antecipa a injeção, valores de torque similares ao do ponto inicial são percebidos.

Gráfico 30 – Torque considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

Assim como no ciclo ESC ponto a ponto, a amostra 2 apresenta valores menores em relação às demais.

Devido à alta rotação no ponto 10, o atraso da injeção dificulta a mistura entre ar e combustível, ocasionando perda de torque. A antecipação da injeção aliada à alta rotação acaba por antecipar a combustão, elevando sutilmente o torque em relação ao ponto inicial, conforme retratado no gráfico 30.

O gráfico 31 mostra que mesmo com torque constante durante as alterações de injeção do ponto 4. O consumo de combustível altera-se, sendo maior para a condição de injeção atrasada. Com a antecipação da injeção, a combustão também se antecipa consumindo-se menos combustível para manter as condições de carga e rotação. Este comportamento se repete no ponto 10, sendo que em ambos os pontos o consumo é um pouco maior que o consumo inicial após se aplicar o atraso da injeção, pois, com o atraso da injeção consome-se mais combustível para manter as condições de carga e rotação.

Gráfico 31 – Consumo considerando alteração de injeção

Fonte: Autor

Novamente a amostra 4 vem corroborar o seu perfil levemente diferente dos demais apresentados, sugerindo que suas características não levam a um ciclo controlado, conforme gráfico 31.

5.3.2 Emissão de poluentes

O gráfico 32 mostra um comportamento similar para as amostras padrão, amostras 3 e 4, sendo tal comportamento repetido no ponto 10, porém, com valores diferentes (mais altos).

Nota-se que para amostra 1 cujo swirl é mais alto, os níveis de emissão de CO aumentam após antecipar-se a injeção, sendo que tal valor situa-se abaixo do valor inicial quando do atraso da injeção. Este comportamento se repete no ponto 10, porém, com valores inicialmente mais altos. Pode-se dizer que, a amostra 1, por possuir swirl mais alto, consegue uma melhor distribuição do combustível no ar, possibilitando a redução de CO, conforme gráfico 32.

Gráfico 32 – Emissões de CO considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

A amostra 2 possui swirl baixo e, como já citado, aliado a baixas rotações promovem a geração de regiões com misturas ricas e consequentemente aumento nas emissões de monóxido de carbono, conforme gráfico 32.

Gráfico 33 – Emissões de NOx considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

O gráfico 33 mostra a redução das emissões de NOx quando do atraso da

injeção e aumento de tais emissões quando da antecipação da injeção devendo-se atribuir tal comportamento à redução ou aumento da fração de combustível pré-misturada, quando do atraso e antecipação da injeção respectivamente.

A antecipação da combustão provoca maiores picos de pressão e temperatura na câmara, com o consequente aumento da produção de NOx, conforme gráfico 33.

Pode-se correlacionar o aumento de NOx com o consumo de combustível, sendo que o aumento de um ocorre em detrimento da redução do outro e vice – versa.

Sabe-se que há uma tendência de óxidos de nitrogênio aumentarem quando há aumento da temperatura de entrada do ar no motor. Porém, avaliando-se as temperaturas de entrada para cada amostra através dos gráficos no item 5.3.3, nota-se que estas são diferentes e variaram durante os testes.

O gráfico 34 apresenta as emissões de hidrocarbonetos durante as alterações de injeção.

Gráfico 34 – Emissões de HC considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

Com relação às alterações de injeção, em geral, pode-se concluir através da

análise do gráfico 34, que tanto o atraso quanto a antecipação da injeção geram aumento de emissões de hidrocarbonetos para as amostras de swirl reduzido, marcadamente para a amostra 2. Já para a amostra 1, de swirl elevado, o oposto parece ser observado, principalmente no ponto 10.

Considerando-se que o software do motor é programado para manter as condições ideais de funcionamento, outros parâmetros deveriam também ser analisados de modo a realizar uma análise mais apurada, bem como a repetitividade dos testes ajudaria a eliminar possíveis desvios de medição.

5.3.3 Pressão e temperatura

As variações da pressão de entrada durante a alteração de injeção foram quase nulas, mantendo-se pressões similares às iniciais, conforme pode-se constatar através do gráfico 35.

Gráfico 35 – Pressão do coletor considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

A temperatura de entrada não apresenta comportamento similar entre as amostras, conforme gráfico 36.

Gráfico 36 – Temperatura de entrada considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

A temperatura de escape é aumentada quando do atraso de injeção, já que a combustão é consequentemente atrasada, sendo que durante a antecipação da injeção, os valores assemelham-se aos iniciais, conforme pode verificar-se através do gráfico 37.

Gráfico 37 – Temperatura de escape considerando alteração de injeção

Fonte: Autor.

5.4 Material Particulado

Relembrando que os dados a seguir foram alterados por uma constante para efeito de sigilo, ressalta-se que os dados originais na saída do motor encontram-se entre os níveis de emissões regulamentados para Euro I e Euro II.

O material particulado do ciclo ESC completo foi obtido num único filtro, utilizando-se um filtro diferente para cada ponto do ciclo ponto a ponto, e o material particulado neste caso foi obtido através da soma da pesagem desses filtros.

O gráfico 38 traz a comparação do material particulado obtido no ciclo ESC completo em relação ao ciclo ESC ponto a ponto.

Gráfico 38 – Emissões de MP no ciclo ESC x ESC ponto a ponto

Fonte: Autor.

Após avaliar as diferenças entre o comportamento das emissões de material particulado do ciclo ESC completo em relação ao ciclo ponto a ponto, constata-se que os valores obtidos no cálculo de cada ciclo são semelhantes, sendo que o principal fator de alteração do valor final do material particulado específico é o valor em gramas de particulado retido nos filtros.

Ainda que o ciclo ESC com coleta única de particulado tenha sido com repetição, e o ESC ponto a ponto tenha sido realizado uma única vez, as diferenças entre os valores foram consideradas normais e coerentes com a alteração do processo padronizado de medição.

Através do gráfico 39, reforça-se o fato de que a amostra 2 possui os maiores níveis de emissão de material particulado, o que pode ser atribuído ao fato da amostra 2 possuir um *swirl* baixo. Observa-se que no ponto 4 (75% de carga e media rotação), o avanço da injeção reduz a emissão de particulados para a amostra 1 de *swirl* elevado e piora as emissões para as amostras padrão e 3 que possuem *swirl* normal. Já para o ponto 10 (100% carga e elevada rotação) o avanço da injeção parece beneficiar ligeiramente a amostra 1, ainda que piore para a amostra 3.

Gráfico 39 – Emissões de MP considerando alteração de injeção em (g/kWh)

Fonte: Autor.

O gráfico de barras 40 compara as emissões de particulado em cada um dos 13 modos do ciclo ESC, para cada conjunto de cabeçotes ensaiado no motor.

As amostras padrão e 3, cujos valores de *swirl* são normais e cujos *mysigmas* são elevados, mantêm menores níveis de material particulado nos pontos de baixa e média rotações, que correspondem aos pontos de 2 a 9 do ciclo,

conforme pode ser verificado no gráfico 40. Já a amostra 1, cujo valor de swirl é mais elevado, apresenta emissões menores de particulado nos pontos 10 em diante do ciclo ESC, que correspondem à rotação elevada do motor. A amostra 2, com swirl reduzido, não parece apresentar benefício sob quaisquer condições do ciclo. A amostra 4, apresenta resultados meio desbaratados devido possivelmente à pouca uniformidade dos elementos da amostra.

Gráfico 40 – Emissões de MP no ciclo ESC ponto a ponto em gramas

Fonte: Autor.

Embora seja usual correlacionar cargas elevadas e amostras com *swirl* baixo a altas concentrações de material particulado, há de se considerar que outros materiais podem ser filtrados e computados como material particulado, porém, sua origem advém de fontes diversas, tornando extremamente difícil elaborar um relatório sobre o comportamento detalhado destas amostras. De qualquer maneira, a amostra 1, com *swirl* mais elevado, apresenta nítida vantagem em condições de alta rotação (pontos 10, 11, 12 e 13), enquanto que na rotação intermediária (pontos 3, 4, 8 e 9) a desvantagem relativa à amostra padrão também fica clara, dificultando bastante a interpretação global dos resultados.

6 CONCLUSÃO

Os experimentos com as amostras fisicamente modificadas mostraram que a regressão pode ser utilizada para estudos futuros relacionados ao *swirl*, uma vez que se mostrou uma boa ferramenta para prever tal fenômeno.

Pode-se concluir que mesmo dentro das tolerâncias indicadas nos desenhos das peças, quando os desvios nas posições das portas dos dutos de admissão encontram-se nas direções provocadas na amostra 1 (S a -150° e L a -40°) maximizando o *swirl*, ou da amostra 2 (S a 30° e L a 140°) reduzindo ao máximo o *swirl*, podem ser produzidas peças com *swirl* fora das tolerâncias estipuladas.

Quando os desvios nos dutos de admissão são exagerados, há uma tendência de redução da vazão e consequente aumento da perda de carga na admissão, levando a reduções de consumo em certos pontos, bem como picos de consumo em outros. As amostras com *swirl* menor apresentaram consumo menor diante das demais, sendo que não foram notadas diferenças significativas dentre as amostras padrão, amostra 1 e amostra 3.

Embora os efeitos do *swirl* não sejam percebidos na indústria, visto que o aumento de emissões é substancialmente reduzido pelos catalizadores, devem ser verificados os prejuízos em relação à potência e consumo.

Com relação às emissões de poluentes, conclui-se que a amostra 2, com *swirl* mais baixo, mostrou-se sensível à produção de monóxido de carbono, gerando níveis superiores comparando-se às demais amostras que apresentaram emissões de CO mais baixas quando a vazão e o *swirl* eram maiores.

Para as emissões de óxidos de hidrogênio (NOx), novo destaque para a amostra 2, gerando níveis mais baixos de emissão já que gera pressões mais baixas na câmara de combustão devido à velocidade do ar ser menor, sendo que as diferenças de temperatura do ar de admissão não foi fator influenciável neste estudo.

Para os hidrocarbonetos, destacam-se as amostras com *swirl* mais alto ou com vazão prejudicada, gerando os maiores níveis de emissões de HC.

Conclui-se que o material particulado tem suas emissões aumentadas em

situações de baixa carga, sendo que a amostra 2, por propiciar a perda de carga, levou a níveis de emissões maiores.

Resumindo-se as análises em relação aos testes em motor, conclui-se que a amostra com *swirl* mais baixo possui impacto maior em relação às emissões, que são aumentadas, e o consumo de combustível que é reduzido, quando comparado com as demais amostras.

As alterações de injeção surtiram maior efeito nas emissões de NOx, sendo que o atraso da injeção gera redução significativa de NOx. Porém, há de se avaliar se os ganhos com tal alteração são viáveis pois, mesmo não havendo alterações significativas nas demais emissões quando do atraso ou antecipação da injeção, nota-se aumento no consumo de combustível quando ocorre o atraso da injeção.

Diante do exposto, conclui-se que os resultados obtidos neste trabalho podem ser considerados significativos para o desenvolvimento de motores diesel, bem como para a autora deste, tendo propiciado o enriquecimento do conhecimento em relação a um fenômeno que possui grande potencial exploratório.

Para trabalhos futuros, sugere-se que os testes relacionados ao material particulado sejam feitos da mesma forma, com os filtros ponto a ponto, porém com maior repetitividade, gerando conclusões mais precisas, excluindo-se possíveis desvios advindos de erros no processo de medição.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Bluscher, 2012. v. 2.

DESANTES, J.M.; BERMÚDEZ, V.; GARCÍA, J.M.; FUENTES, E. Effects of current engine strategies on the exhaust aerosol particle size distribution from a heavy-duty diesel engine. Valencia, **Journal of Aerosol Science**, 2005. v.36, n.10, p. 1251-1276.

DIESELNETPortal -Emission Test Cycles.**European Stationary Cycle (ESC)**. 1997a. Disponível em: <<http://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

_____.Emission Standards. **Cars and light trucks**. 1997b. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

_____.Emission Standards.**Heavy-DutyEngines**. 2012. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/br/hd.php>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

_____.**Emission Standards**. 2015. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

_____.**Heavy-DutyEngines**. 2017a.Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/br/hd.php>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

_____. **EU - Heavy-Duty Truck and Bus Engines**.2017b. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

DIRECT INDUSTRY. Máquina de medição tridimensional ZEISS ACCURA. 2017. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/product-5693-450470.html>>. Acesso em: 09 set. 2017

FERGUSON, Colin R. **Internal Combustion Engines**. New York: John Wiley & Sons, 1986.

HAIR, Joseph F.et al. Multivariate data analysis.5.th ed. Upper Saddle River/New Jersey: Prentice Hall, 1998.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2th. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

KHAN, I.M.; CRIGG, H.C. Process of combustion research.CIMAC. In:CONGRESSO INTERNACIONAL DE MOTORES DE COMBUSTÃO, 9.**Anais...**Stockholm, Suécia. Papern.A-18, 1971.

LAPPONI, Juan C. **Estatística usando Excel**. 4. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier: Campus, 2005.

MAJEWSKI, W. Addy; KHAIR, Magdi K. **Diesel emissions and their control**.Warrendale/ Pa.: SAE International, 2006.

MINGOTI, Sueli A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. 1. reimpressão. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

NEWHALL, H.; STARKMAN, E. **Direct Spectroscopic Determination of Nitric Oxide in Reciprocating Engine Cylinders**: SAE technical paper 670122, 1967, doi:10.4271/670122.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. 2th. ed. Upper Saddle River/ New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

SCANIA. **New 450 hp engine with SCR only**. 2014. Disponível em: <<https://www.scania.com/group/en/new-450-hp-engine-with-scr-only/>>. Acesso em: 27 set. 2017.

SOUZA, R. A. **Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de “swirl” e no desempenho de motor diesel**. 104 fls. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Versão corrigida.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à estatística**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

VOLVO TRUCKS. **Diagrama de emissões padrão**. 2015. Disponível em: <<http://www.volvotrucks.com/SiteCollectionImages/VTC/Market/Trucks/Environment/euro6/diagram-emissions-standard.gif>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

WATTS, R.; SCOTT, W.M. Air Motion and Fuel Distribution Requirements in High-Speed Direct Injection Diesel Engines: proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. **Conference Proceedings**, v.184, n. 10, p. 181-191, set. 1969.

ZHEN XU; XILING LI; CHUN GUAN; ZHEN HUANG. Effect of injection timing on particle size distribution from a diesel engine. Shanghai, **Journal of Aerosol Science**, v.134, p. 189-195, 2014.

APÊNDICE “A”

REGRESSÃO LINEAR MULTIVARIADA

Este apêndice contém definições bem como conceitos acerca da regressão linear multivariada, que foi utilizada como ferramenta para definição dos desvios a serem adotados para confecção das amostras utilizadas neste estudo.

Segundo Triola (2005, p. 397), dada uma coleção de dados amostrais emparelhados, a equação de regressão a seguir descreve algebricamente a relação entre duas variáveis, sendo estas x (chamada de variável independente, ou variável preditora ou variável explanatória) e $\hat{y}$ (chamada de variável dependente, ou variável resposta):

Equação 9 $\hat{y} = b_0 + b_1x$

onde b_0 é o intercepto y e b_1 é a inclinação.

Quadro 1 – Notação para a Equação de Regressão 3.1.1

	Parâmetro Populacional	Estatística Amostral
Intercepto y da equação de regressão	β_0	b_0
Inclinação da equação de regressão	β_1	b_1
Equação da reta de regressão	$\hat{y} = b_0 + b_1x$	$\hat{y} = b_0 + b_1x$

Fonte: Adaptado de Triola (2005, p. 397).

A notação dada mostra que b_0 e b_1 são estatísticas amostrais usadas para estimar os parâmetros populacionais β_0 e β_1 , sendo usados emparelhados para estimar a equação de regressão, conforme Quadro 1 (TRIOLA, 2005, p.397).

Triola (2005, p. 397) cita que, utilizando apenas dados amostrais, não se encontra os valores exatos dos parâmetros populacionais β_0 e β_1 , porém, pode-se utilizar os dados amostrais para estimá-los como b_0 e b_1 , que são encontrados com uso das fórmulas a seguir:

Inclinação: $b_1 = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$

Equação 9

Intercepto y : $\hat{y} = b_0 + b_1x$

Equação 10

Segundo Triola (2005, p.415), uma equação de regressão múltipla expressa uma relação linear entre uma variável dependente y e duas ou mais variáveis independentes $(x_1, x_2, \dots, x_k)$. A forma geral de uma equação de regressão múltipla é expressa da seguinte forma:

Equação 11 $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$

Onde:

k = número de variáveis independentes. (chamadas também de preditoras ou variáveis x)

$\hat{y}$ = valor predito da variável dependente y (calculado com o uso da equação de regressão múltipla)

$x_1, x_2, \dots, x_k$ são as variáveis independentes

β_0 = intercepto y , ou o valor de y quando todas as variáveis preditoras são 0 (sendo esse um parâmetro populacional)

b_0 = estimativa de β_0 , com base nos dados amostrais (b_0 é uma estatística amostral)

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são coeficientes das variáveis $x_1, x_2, \dots, x_k$

$b_1, b_2, \dots, b_k$ são as estimativas amostrais dos coeficientes $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$

No entanto, Triola (2005, p.399) cita que a regressão deve ser utilizada apenas em caso de correlação linear.

Segundo Triola (2005, p.400), na predição de um valor de y com base em algum valor de x , pode-se dizer que:

- a) Se não há correlação linear, o melhor valor predito de y é $\bar{y}$ (sua média); e
- b) Se há correlação linear, o melhor valor predito de y é encontrado pela substituição do valor de x na equação de regressão.

Para que a regressão linear multivariada seja utilizada, em geral, é necessário trabalhar com a suposição de que as variáveis observadas sejam provenientes de uma distribuição normal multivariada, sendo necessários métodos estatísticos de verificação da suposição de normalidade, estimação de parâmetros e construção de regiões de confiança. (MINGOTI, 2007).

Segundo Mingoti (2007, p.50), a suposição de normalidade bivariada pode ser

verificada através da construção de gráficos de dispersão do tipo x_i vs x_k , onde $i \neq k$. De acordo com a teoria sobre a distribuição normal multivariada, todos os pares (x_i, x_k) devem ter uma distribuição normal bivariada, portanto os gráficos de dispersão devem indicar uma forma de elipse.

Segundo Triola (2005, p. 402), em um diagrama de dispersão, um *outlier* é um ponto que se situa muito afastado dos demais pontos amostrais.

Dados amostrais emparelhados podem incluir um ou mais pontos influentes, que são pontos que afetam fortemente o gráfico da reta de regressão. Pontos influentes são, em geral, encontrados pela identificação daqueles *outliers* que serão horizontalmente distantes dos outros pontos (TRIOLA, 2005, p. 401).

Segundo Mingoti (2007, p. 57), valores discrepantes (*outliers*) podem afetar os resultados finais da análise estatística. Logo, é fundamental que seja feita uma análise exploratória dos dados, na tentativa de identificar pontos deste tipo.

A correlação é a medida mais adequada para avaliar o grau de relacionamento linear entre duas variáveis quantitativas, pois seus valores estão sempre entre os valores de referência -1 e 1. Assim, quanto mais próximo de 1, mais indicação se tem de que existe um relacionamento linear positivo entre as variáveis explicativas por exemplo S_x e S_y no estudo em questão, e quanto mais próximo de -1, mais indicação se tem de um relacionamento linear negativo. Uma indicação próxima de zero é uma indicação numérica de um não relacionamento linear entre as variáveis (MINGOTI, 2007).

Segundo Triola (2005, p. 390), o cálculo do R múltiplo se baseia na soma dos produtos dos momentos $(x - \bar{x})$ e $(y - \bar{y})$, isto é:

Equação 12 $\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})$

Triola (2005) cita ainda que o resultado da equação acima mencionado depende do tamanho dos números usados.

Para tornar R independente da escala particular usada, inclui-se o desvio padrão amostral, conforme segue:

Equação 13

$$R = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{(n-1)S_xS_y}$$

Onde:

 n = tamanho da amostra S = desvio padrão da amostra

Segundo Triola (2005, p. 417), R-Quadrado representa o coeficiente de determinação múltipla, que é uma medida de quão bem a equação de regressão múltipla se ajusta aos dados amostrais. Um ajuste perfeito resultaria em $R^2 = 1$, e um ajuste bem bom resulta em um valor próximo de 1. Um ajuste muito pobre resulta em um valor R^2 próximo de 0.

O coeficiente de determinação R^2 é definido como a relação que mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente, sendo sempre um número positivo entre zero e um. Representado através da equação abaixo (LAPPONI, 2005, p. 405).

Equação 14

$$R^2 = \frac{\text{Variação explicada}}{\text{Variação total}}$$

Segundo Lapponi (2005, p. 404-405), as seguintes definições se aplicam à equação acima referente ao coeficiente de determinação R^2 .

Variação total é o resultado da soma dos quadrados dos resíduos dos valores y com relação à média $\bar{y}$, conforme segue:

Equação 15

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Variação explicada é o resultado da soma dos quadrados dos resíduos dos valores estimados $\hat{y}$ com relação à média $\bar{y}$, conforme segue:

Equação 16

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

Variação nãoexplicada é o resultado da soma dos quadrados dos resíduos de y com relação aos valores projetados $\hat{y}$, conforme segue:

Equação 17

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Segundo Lapponi (2005, p. 405), a Figura 15 mostra que a variação total é o resultado da soma da variação não explicada, mais a variação explicada, demonstrada pela equação a seguir:

Equação 18 $\Rightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$

Figura 15 –Variação explicada e variação nãoexplicada

Fonte: Adaptado de Lapponi (2005, p. 405)

Segundo Lapponi (2005), o R^2 , ou coeficiente de determinação ajustado, tenta compensar o aumento natural de explicação provocado pelo aumento do número de variáveis independentes e o tamanho da amostra, sendo calculado com a expressão:

Equação 19 $\Rightarrow R^{-2} = R^2 - \frac{k}{n-k-1}(1 - R^2)$

Na expressão acima, n é o número de valores das amostras e k é o número de variáveis independentes.

Triola (2005, p. 402), define que para uma amostra de dados emparelhados (x, y) um resíduo é a diferença $(y - \hat{y})$ entre um valor amostral y observado e o valor de $\hat{y}$, que é o valor de y previsto pelo uso da equação de regressão. Isto é:

$$\text{Resíduo} = y \text{ observado} - y \text{ predito} = y - \hat{y}$$

Segundo Triola (2005), a análise dos resíduos, ou seja, distâncias verticais entre os pontos de dados originais e a reta de regressão, pode ser utilizada como critério de avaliação quanto à representatividade da reta de regressão em relação ao fenômeno estudado.

Segundo Lapponi (2005, p. 399), quanto menor for a soma de todos os resíduos, melhor será o ajuste da reta, ou o poder de explicação do modelo. O procedimento utilizado é denominado método dos quadrados mínimos, que parte da soma dos quadrados dos resíduos, conforme equações a seguir:

Equação 20 $\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$

Equação 21 $\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2$

O objetivo é determinar os coeficientes b_0 e b_1 da reta de regressão que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos, contudo, nem todos os n pares de valores estarão contidos na reta, eles estarão distribuídos ao redor da reta ajustada (LAPPONI, 2005).

A minimização da soma dos quadrados dos resíduos é uma propriedade desejada, pois obtém as melhores estimativas (não viesadas), onera os resíduos maiores, permite realizar testes de significância na equação de regressão, além da reta de regressão passar pelo ponto formado pelos valores das médias das amostras. Porém, tal método não garante que se tenha a melhor reta ajustada, sendo que quanto mais afastados estiverem os valores das amostras da reta de regressão, pior a reta representará a relação entre as amostras (LAPPONI, 2005).

Embora a reta de regressão tenha sido obtida minimizando a soma dos quadrados dos resíduos, sempre haverá uma variabilidade dos dados ao redor da reta, exceto se os dados façam parte da própria reta de regressão (LAPPONI, 2005, p. 407)

O desvio padrão dos dados ao redor da reta de regressão é denominado desvio padrão da estimativa (S_e), representado pela seguinte expressão:

Equação 22
$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1}}$$

O erro padrão da estimativa é também uma medida da qualidade do ajuste da reta, pois atendidas as premissas da regressão linear, espera-se que aproximadamente 95% dos valores da amostra y se encontrem no intervalo $\pm 2 \times S_e$ de seus respectivos valores projetados pela reta de regressão $\hat{y}$ (LAPPONI, 2005, p. 408)

Segundo Triola (2005, p. 232), um intervalo de confiança (ou estimativa

intervalar) é uma faixa (ou um intervalo) de valores usada para estimar o verdadeiro valor de um parâmetro populacional.

O nível de confiança (também chamado grau de confiança ou coeficiente de confiança) é a probabilidade $1 - \alpha$ (em geral, expressa em valor de percentagem) que é a proporção de vezes que o intervalo de confiança realmente contém o parâmetro populacional (TRIOLA, 2005, p. 232).

Segundo Triola (2005, p. 232), as escolhas mais comuns para o nível de confiança são 90% (com $\alpha = 0,10$), 95% (com $\alpha = 0,05$), e 99% (com $\alpha = 0,01$).

Segundo Triola (2005, p. 232), “a escolha de 95% é mais comum porque resulta em um bom equilíbrio entre precisão (conforme refletido na largura do intervalo de confiança) e confiabilidade (conforme expresso pelo nível de confiança)”, por tal motivo, decidiu-se utilizar o nível de confiança de 95% neste estudo.

Em estatística, uma hipótese é uma afirmativa sobre uma propriedade da população (TRIOLA, 2005, p. 284).

Um teste de hipótese (ou teste de significância) é um procedimento padrão para testar uma afirmativa sobre uma propriedade da população (TRIOLA, 2005, p. 284).

A hipótese nula (representada por H_0) é uma afirmativa de que o valor de um parâmetro populacional (como proporção, média ou desvio padrão) é igual a algum valor especificado (TRIOLA, 2005, p. 287).

Testamos a hipótese nula diretamente, no sentido de que supomos que ela seja verdadeira e chegamos a uma conclusão para rejeitar H_0 ou deixar de rejeitar H_0 (TRIOLA, 2005, p. 287).

A estatística de teste é um valor calculado a partir dos dados amostrais e é usada para se tomar a decisão sobre a rejeição da hipótese nula. A estatística de teste é encontrada pela conversão da estatística amostral em um escore com a suposição de que a hipótese nula seja verdadeira (TRIOLA, 2005, p. 288).

Segundo Triola (2005, p. 289), a equação a seguir representa a estatística de teste para média:

Equação 23

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \text{ou} \quad t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Onde μ é a média da das amostras, σ é o desvio padrão e S é a variância das mesmas.

O teste F é um teste de hipóteses utilizado para verificar se as variâncias de duas populações com distribuição normal são diferentes, ou para verificar qual das duas populações com distribuição normal tem mais variabilidade (LAPPONI, 2005, p. 368).

Segundo Lapponi (2005), conhecidas duas amostras com qualquer tamanho, o teste F permite determinar se as duas amostras pertencem à mesma população, conforme procedimento estatístico a seguir:

- a) De duas populações com distribuição normal são retiradas duas amostras aleatórias com variâncias σ_1^2 e σ_2^2 ;
- b) O teste tem as hipóteses: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ e $H_1: \sigma_1^2 > \sigma_2^2$, que podem ser reescritas como:

Equação 24 $H_0: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = 1$ e $H_1: \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} > 1$;

- c) Se as variâncias das populações não forem conhecidas, as variâncias das amostras deverão ser utilizadas, pois são as melhores estimativas das respectivas variâncias das populações. Com as variâncias será calculado o F observado ($F_0: S_1^2/S_2^2$). Como regra a variância do numerador de F_0 deve ser a da mesma amostra que tiver maior variância, pois essa escolha, F_0 sempre será maior do que 1 e, conseqüentemente, somente será utilizada a cauda superior da distribuição. A partir desse momento, o índice um sempre indicará a amostra com maior variância;
- d) Se n_1 e n_2 forem os tamanhos das amostras aleatórias retiradas das populações, a distribuição F terá $v_1 = n_1 - 1$ graus de liberdade do numerador e $v_2 = n_2 - 1$ graus de liberdade do denominador;
- e) Com o nível de significância α e os graus de liberdade, do numerador e do denominador, será obtido o F crítico (F_c) da tabela de distribuição F; e

f) A decisão do teste de hipóteses aplicando a distribuição F é a seguinte:

- Se $F_0 < F_c$ ou valor $P > \alpha$ então:
 - A hipótese nula deve ser aceita;
 - As variâncias das populações não são significativamente diferentes;
 - É razoável aceitar que a diferença entre as variâncias das populações seja devida somente à variabilidade amostral; e
 - O resultado não é estatisticamente significativo;
- Se $F_0 > F_c$ ou valor $P < \alpha$ então:
 - A hipótese nula não deve se aceita;
 - As variâncias das populações são significativamente diferentes;
 - Não é razoável aceitar que a diferença entre as variâncias das populações seja devida somente à variabilidade amostral; e
 - O resultado é estatisticamente significativo.

A região crítica é o conjunto de todos os valores da estatística de teste que nos fazem rejeitar a hipótese nula (TRIOLA, 2005, p. 289).

O nível de significância (α) é a probabilidade de que a estatística de teste cairá sobre a região crítica quando a hipótese nula for realmente verdadeira (TRIOLA, 2005, p. 289).

Se a estatística de teste cair na região crítica, rejeitaremos a hipótese nula, de modo que α é a probabilidade de cometermos o erro de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira (TRIOLA, 2005, p. 289-300).

Um valor crítico é um número na fronteira que separa estatísticas amostrais que têm chance de ocorrer daquelas que não tem. O numero $z_{\alpha/2}$ é um valor crítico que é um escore z com a propriedade de separar uma área de $\alpha/2$ na cauda da distribuição normal padronizada.

Segundo Triola (2005), o valor crítico para um intervalo de confiança de 95% é 1,96, representado na Figura 16.

Figura 16 – Valores críticos na Distribuição normal padrão

Fonte: Triola (2005, p. 235).

O valor P é a probabilidade de se obter um valor da estatística de teste que seja no mínimo tão extremo quanto o que representa os dados amostrais, supondo que a hipótese nula seja verdadeira. A hipótese nula é rejeitada quando o valor P for muito pequeno, tal como 0,05 ou menos (TRIOLA, 2005, p. 291).

Segundo Triola (2005), o método de valor P detém as seguintes premissas:

- a) Rejeite H_0 se o valor $P \leq \alpha$ (onde α é o nível de significância, tal como 0,05); e
- b) Deixe de rejeitar H_0 se o valor $P > \alpha$.

Segundo Lapponi (2005, p. 415), analisando-se o ANOVA, o valor das Observações é o número de valores das amostras que devem ter o mesmo tamanho.

Segundo Lapponi (2005), na coluna gl contida na tabela 1, são registrados os graus de liberdade. Nesta coluna, a primeira linha intitulada Regressão registra o número de variáveis independentes.

Tabela 1 – ANOVA contendo dados sem alteração

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	4	0,846083986	0,211520997	8,009561832	0,0000074
Resíduo	143	3,776424122	0,02640856		
Total	147	4,622508108			

Fonte: Autor

Na segunda linha intitulada Resíduo, ainda na coluna gl, é registrado o resultado de $n - k - 1$ onde n é o número de resíduos das amostras e k é o número de variáveis independentes (LAPPONI, 2005).

Na terceira linha intitulada Total, também na coluna gl, é registrado o resultado de $n - 1$ onde n é o número de resíduos das amostras (LAPPONI, 2005).

A coluna SQ da tabela 1 detém resultados da soma dos quadrados. Segundo Lapponi (2005), na primeira linha registra-se a soma dos quadrados das variações explicadas pela regressão (SSR), na segunda linha registra-se a soma dos quadrados das variações não explicadas pela regressão (SSE), e na terceira linha registra-se a soma dos quadrados das variações totais (SST).

Cada um dos valores apresentados na coluna MQ da tabela 1, é o resultado da divisão do valor do SQ pelo correspondente número de graus de liberdade da coluna gl (LAPPONI, 2005).

O valor F observado na coluna também denominada F na tabela 1 é o resultado da divisão do MQ da linha Regressão pelo MQ da linha Resíduo (LAPPONI, 2005).

O valor contido da coluna F de significação, é o valor P do F crítico correspondente (LAPPONI, 2005).

Segundo Triola (2005), o valor contido da coluna F de significação, apresenta a significância geral da equação de regressão múltipla. Como o R^2 ajustado, esse valor P é uma boa medida de quão bem a equação se ajusta aos dados amostrais (TRIOLA, 2005).

Na coluna Coeficientes presente na tabela 2, registram-se os valores dos

coeficientes, sendo que a linha Interseção contém o coeficiente b_0 e as demais linhas contém os coeficientes b_1 (representados por Sx, Sy, Lx e Ly).

Tabela 2 – Resumo contendo dados sem alteração

	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	1,7780309	0,0201402	88,2825138	0,0000000	1,7382198	1,8178419	1,7382198	1,8178419
Sx [mm]	0,0628766	0,1074673	0,5850763	0,5594185	-0,1495532	0,2753063	-0,1495532	0,2753063
Sy [mm]	-0,1989491	0,0929615	-2,1401245	0,0340415	-0,3827053	-0,0151929	-0,3827053	-0,0151929
Lx[mm]	-0,1551967	0,0811842	-1,9116619	0,0579199	-0,3156728	0,0052794	-0,3156728	0,0052794
Ly [mm]	-0,2271906	0,0947504	-2,3977802	0,0177853	-0,4144829	-0,0398982	-0,4144829	-0,0398982

Fonte: Autor

A coluna Erro padrão da tabela 2 apresenta os erros padrão dos coeficientes b_0 e b_1 .

Segundo Lapponi (2005), o erro padrão S_0 do coeficiente b_0 indica aproximadamente quão distante o coeficiente b_0 está do coeficiente da população devido à variabilidade amostral. A fórmula utilizada é a seguinte, mostrando que o erro padrão do coeficiente S_0 é proporcional ao erro padrão da estimativa S_e :

Equação 25
$$S_0 = S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{(n-1) \times S_x^2}}$$

Segundo Lapponi (2005), o erro padrão S_1 do coeficiente b_1 indica aproximadamente quão distante o coeficiente b_1 está do coeficiente da população devido à variabilidade amostral. A fórmula utilizada é a seguinte, mostrando que o erro padrão do coeficiente S_1 é diretamente proporcional ao erro padrão da estimativa S_e , e inversamente proporcional à variância de x e o tamanho da amostra menos um:

Equação 26
$$S_1 = \frac{S_e}{\sqrt{(n-1) \times S_x^2}}$$

A coluna Stat t é a estatística t ou t observado dos coeficientes b_0 e b_1 (LAPPONI, 2005, p. 416).

Segundo Lapponi (2005), referente ao Stat t do coeficiente b_0 , se as variáveis

x e y não são relacionadas, então $\alpha = 0$ e o teste de hipóteses é:

a) $H_0: \alpha = 0$; e

b) $H_1: \alpha \neq 0$

Utilizando a distribuição t, o t observado é $t = \frac{b_0/\alpha}{S_0}$ e como o coeficiente α é zero, o t observado será $t = \frac{b_0-0}{S_1}$.

Segundo Lapponi (2005), referente ao Stat t do coeficiente b_1 , se as variáveis x e y não são relacionadas, então $\beta = 0^{14}$ e o teste de hipóteses é:

a) $H_0: \beta = 0$; e

b) $H_0: \beta \neq 0$

Utilizando a distribuição t, o t observado é $t = \frac{b_1/\beta}{S_1}$ e como o coeficiente β é zero, o t observado será $t = \frac{b_1-0}{S_1}$.

A coluna valor P é a probabilidade $P(t \geq t_{observado})$, ou valor P correspondente (LAPPONI, 2005).

Coluna 95% inferiores é o limite inferior do intervalo de confiança de cada coeficiente de regressão (LAPPONI, 2005).

Segundo Lapponi (2005), o limite inferior do coeficiente de regressão b_0 é calculado através da seguinte fórmula:

Equação 27 $b_{0min} = b_0 - t \times S_0$

Lapponi (2005) cita ainda que o limite inferior do coeficiente de regressão b_1 é calculado através da seguinte fórmula:

Equação 28 $b_{1min} = b_1 - t \times S_1$

Coluna 95% superiores é o valor do limite superior de cada coeficiente de regressão (LAPPONI, 2005).

Segundo Lapponi (2005), o limite superior do coeficiente de regressão b_0 é calculado através da seguinte fórmula:

Equação 29
$$b_{0_{max}} = b_0 + t \times S_0$$

Lapponi (2005) cita ainda que o limite inferior do coeficiente de regressão b_1 é calculado através da seguinte fórmula:

Equação 30
$$b_{1_{max}} = b_1 + t \times S_1$$

APÊNDICE “B”

HISTÓRICO DE MEDIÇÕES DO SWIRL

" ID marking DM"	Core manuf date	Sx	Sy	Lx	Ly	Swirlref +/- 0,2	Mysigma
		(ref +/- 0,6)	(ref +/- 0,5)	(ref +/- 0,6)	(ref +/- 0,5)		
1	365	0,000	0,104	0,249	-0,041	-0,09	0,424
2	365	0,148	-0,103	0,361	-0,156	-0,07	0,425
3	365	-0,190	-0,222	0,058	-0,219	0,03	0,421
4	365	-0,128	-0,042	0,055	0,005	0	0,424
5	365	-0,087	-0,316	0,376	-0,141	0,04	0,423
6	365	0,071	-0,114	0,276	-0,196	-0,01	0,423
7	365	-0,160	-0,357	-0,064	-0,259	-0,01	0,421
8	365	0,061	-0,046	0,258	-0,114	-0,07	0,42
9	365	-0,120	-0,090	-0,147	-0,050	-0,1	0,419
10	365	-0,158	-0,327	-0,009	-0,364	0,01	0,419
1	F042	0,000	-0,132	0,415	-0,092	-0,38	0,422
2	F042	0,150	-0,064	0,278	-0,355	-0,43	0,427
3	F032	-0,075	-0,063	0,173	-0,097	-0,32	0,427
4	F037	-0,213	-0,380	0,027	-0,306	-0,32	0,422
5	F037	0,118	-0,135	-0,008	0,035	-0,46	0,429
6	F042	-0,165	-0,286	0,039	-0,248	-0,39	0,423
7	F042	-0,145	0,025	0,215	0,052	-0,39	0,426
8	F042	0,021	0,002	-0,001	-0,297	-0,46	0,424
9	F042	-0,041	-0,026	-0,092	-0,157	-0,46	0,426
10	F042	0,069	-0,419	0,349	-0,370	-0,28	0,418
1	F142	-0,099	-0,085	0,110	-0,069	-0,36	0,419
2	F142	-0,113	-0,199	0,115	-0,081	-0,37	0,416
3	F142	-0,111	-0,016	0,222	-0,058	-0,42	0,419
4	F142	-0,078	-0,100	0,168	-0,037	-0,37	0,419
5	F142	-0,027	-0,125	0,127	-0,145	-0,35	0,424
6	F142	0,045	0,124	0,402	-0,028	-0,43	0,421
7	F142	-0,055	0,008	-0,001	0,027	-0,36	0,419
8	F142	-0,024	-0,124	0,130	0,300	-0,45	0,418
9	F142	-0,011	0,119	0,181	0,096	-0,43	0,422
10	F142	-0,175	-0,071	0,030	-0,151	-0,38	0,416
1	354	-0,203	-0,262	0,220	-0,188	-0,24	0,423
2	354	0,156	0,104	0,144	0,099	-0,42	0,427
3	354	-0,041	-0,217	0,060	-0,368	-0,29	0,422

.....continua

" ID marking DM"	Core manuf date	Sx (ref +/- 0,6)	Sy (ref +/- 0,5)	Lx (ref +/- 0,6)	Ly (ref +/- 0,5)	Swirtref +/- 0,2	Mysigma
4	354	0,012	0,097	0,369	0,155	-0,32	0,425
5	354	-0,078	0,052	0,433	-0,035	-0,26	0,425
6	354	-0,197	-0,321	-0,001	-0,145	-0,27	0,423
7	354	0,023	-0,306	0,491	-0,155	-0,22	0,422
8	354	-0,217	-0,048	0,233	-0,063	-0,22	0,425
9	354	-0,158	-0,171	0,000	-0,010	-0,26	0,419
10	354	-0,142	-0,108	0,029	-0,035	-0,29	0,418
1	452	-0,019	0,136	0,165	0,003	-0,4	0,423
2	452	0,033	-0,314	0,236	-0,226	-0,34	0,425
3	452	-0,054	-0,102	0,432	0,014	-0,4	0,428
4	452	0,052	-0,421	0,275	0,054	-0,35	0,422
5	452	0,231	-0,342	0,302	0,002	-0,38	0,421
6	451	0,178	-0,130	-0,016	-0,016	-0,5	0,423
7	451	-0,084	-0,457	0,069	-0,142	-0,35	0,422
8	451	-0,237	-0,262	-0,011	-0,437	-0,29	0,42
9	444	0,124	0,144	0,434	-0,001	-0,42	0,428
10	444	0,011	-0,160	0,346	-0,293	-0,35	0,422
1	193	-0,088	-0,170	0,389	-0,068	-0,33	0,423
2	193	0,083	-0,155	-0,075	0,131	-0,48	0,426
3	193	-0,032	0,179	-0,039	0,288	-0,5	0,427
4	193	0,009	-0,258	0,016	0,001	-0,49	0,423
5	193	-0,149	-0,026	-0,065	0,360	-0,5	0,427
6	193	0,077	0,000	-0,011	-0,158	-0,38	0,423
7	193	0,043	-0,083	-0,179	-0,038	-0,53	0,421
8	193	-0,076	0,386	-0,151	0,170	-0,51	0,427
9	193	0,004	-0,271	0,063	-0,212	-0,41	0,421
10	193	0,136	0,177	0,061	0,035	-0,58	0,424
1	454	0,121	0,165	0,088	-0,056	-0,05	
2	454	-0,165	-0,358	-0,074	-0,013	0,01	
3	454	-0,132	-0,010	-0,017	-0,172	0	
4	454	-0,204	-0,472	-0,090	-0,198	0,04	
5	454	-0,153	0,133	-0,178	0,063	0,01	
6	454	-0,116	-0,639	-0,003	-0,571	0,1	
7	454	-0,023	0,217	0,055	0,044	-0,07	
8	454	0,168	-0,129	0,097	-0,319	0	
9	454	-0,064	0,003	-0,062	-0,126	-0,06	
10	454	-0,015	-0,159	0,040	-0,111	0,08	

.....continua

" ID marking DM"	Core manuf date	Sx (ref +/- 0,6)	Sy (ref +/- 0,5)	Lx (ref +/- 0,6)	Ly (ref +/- 0,5)	Swirtref +/- 0,2	Mysigma
1	E055	-0,055	-0,014	0,139	-0,060	-0,44	
2	E055	0,033	-0,008	0,214	-0,030	-0,41	
3	E055	0,023	-0,016	0,028	-0,001	-0,45	
4	E055	0,112	-0,357	0,168	-0,040	-0,38	
5	E055	-0,031	0,050	0,030	0,039	-0,49	
6	E055	0,227	-0,005	0,369	0,161	-0,46	
7	E055	-0,263	0,179	-0,034	0,169	-0,49	
8	E055	0,246	0,176	0,246	0,085	-0,58	
9	E055	0,140	0,078	0,023	0,062	-0,56	
10	E055	-0,145	-0,565	0,138	-0,463	-0,27	
1	135	-0,142	-0,297	0,224	-0,227	-0,07	
2	135	0,125	-0,520	0,458	-0,236	-0,03	
3	135	-0,012	-0,095	-0,074	-0,539	-0,05	
4	135	0,074	-0,539	0,121	-0,517	0,02	
5	135	-0,028	-0,255	0,348	-0,027	-0,05	
6	135	-0,310	-0,596	0,020	-0,591	0,06	
7	135	0,094	-0,433	0,128	-0,494	0,12	
8	135	-0,025	-0,508	0,258	-0,463	0,17	
9	135	0,013	-0,391	0,166	-0,336	0,12	
10	135	-0,001	-0,362	0,257	-0,461	0,09	
2	241	-0,208	-0,349	-0,038	-0,406	-0,36	
3	241	-0,127	-0,316	0,165	-0,205	-0,31	
4	241	0,142	-0,086	0,290	-0,025	-0,48	
5	241	-0,121	-0,330	0,113	-0,449	-0,29	
6	241	-0,177	-0,305	0,196	-0,371	-0,31	
8	241	0,048	-0,117	0,008	-0,217	-0,48	
9	241	0,180	-0,071	0,422	-0,123	-0,35	
10	241	-0,073	-0,236	0,250	-0,261	-0,39	
1	341	0,354	-0,355	-0,083	-0,069	-0,08	
2	341	0,234	-0,131	0,050	-0,124	-0,06	
3	341	0,349	0,135	0,087	0,303	-0,17	
4	341	0,192	-0,548	0,069	-0,365	-0,05	
5	341	0,247	-0,098	0,044	0,207	-0,21	
6	341	0,183	-0,220	0,132	0,174	-0,1	
7	341	0,074	-0,057	0,024	0,178	-0,08	
8	341	0,266	-0,021	0,114	-0,092	-0,09	
9	341	0,259	-0,335	-0,216	-0,149	-0,13	
10	341	0,122	-0,074	-0,008	0,037	-0,12	

.....continua

" ID marking DM"	Core manuf date	Sx (ref +/- 0,6)	Sy (ref +/- 0,5)	Lx (ref +/- 0,6)	Ly (ref +/- 0,5)	Swirref +/- 0,2	ysigma
1	362	0,022	-0,458	0,349	-0,394	-0,41	
2	362	-0,071	-0,316	0,212	-0,364	-0,42	
3	362	0,169	-0,225	0,168	-0,287	-0,44	
4	362	0,005	-0,281	0,449	-0,318	-0,3	
5	362	-0,093	-0,390	0,091	-0,175	-0,34	
6	362	0,037	-0,091	0,150	-0,008	-0,44	
7	362	-0,101	-0,207	-0,058	-0,270	-0,4	
8	362	-0,032	-0,249	0,234	-0,181	-0,43	
9	362	-0,145	-0,332	0,173	-0,201	-0,38	
10	362	-0,044	-0,352	0,127	-0,301	-0,3	
1	445	-0,014	-0,537	0,488	-0,275	-0,32	
2	422	-0,038	-0,325	0,402	-0,058	-0,33	
3	422	-0,044	-0,206	0,069	-0,246	-0,26	
4	422	-0,152	-0,149	0,330	-0,271	-0,32	
5	422	-0,252	-0,250	0,181	-0,401	-0,32	
6	445	-0,177	-0,455	0,230	-0,520	-0,19	
7	445	0,120	-0,284	0,825	-0,554	-0,36	
8	445	-0,020	-0,407	0,263	-0,227	-0,33	
9	445	-0,086	-0,452	0,273	-0,365	-0,31	
10	445	-0,150	-0,086	0,306	-0,258	-0,33	
11	193	-0,071	0,009	-0,028	0,131	-0,42	
12	193	0,147	0,086	0,138	0,213	-0,43	
13	193	0,066	0,022	-0,066	0,124	-0,43	
14	193	-0,070	-0,347	-0,053	-0,079	-0,29	
15	193	-0,094	-0,234	-0,042	-0,287	-0,35	
16	193	0,187	0,244	0,260	0,211	-0,41	
17	193	0,058	-0,249	0,048	-0,019	-0,39	
18	193	0,065	-0,044	0,064	0,006	-0,43	
19	193	-0,047	-0,051	-0,048	0,274	-0,41	
20	193	0,025	-0,134	0,080	0,128	-0,36	
1	234	-0,085	-0,236	0,364	-0,171	-0,32	
2	234	-0,006	-0,367	0,552	-0,290	-0,28	
3	234	-0,103	-0,167	0,285	-0,136	-0,3	
4	234	0,111	-0,234	0,151	-0,283	-0,37	
5	234	-0,049	-0,242	0,222	-0,243	-0,32	
6	234	-0,067	-0,390	0,278	-0,410	-0,32	
7	234	0,106	-0,454	0,232	-0,228	-0,34	
8	234	-0,119	-0,170	0,183	-0,041	-0,31	
9	234	0,095	-0,129	0,395	-0,071	-0,35	
10	234	0,257	-0,012	0,149	-0,024	-0,49	

APÊNDICE “C”

SWIRL CALCULADO

Lote	MEDIDO					CALCULADO				
	Swirlref ±0,2	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]	Swirl	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]
365	-0,09	0	0,104	0,249	-0,041	-0,063	0,0563	0,2553	0,1077	0,1125
365	-0,07	0,148	-0,103	0,361	-0,156	-0,043	0,2043	0,0483	0,2197	-0,0025
365	0,03	-0,19	-0,222	0,058	-0,219	0,057	-0,1337	-0,0707	-0,0833	-0,0655
365	0	-0,128	-0,042	0,055	0,005	0,027	-0,0717	0,1093	-0,0863	0,1585
365	0,04	-0,087	-0,316	0,376	-0,141	0,067	-0,0307	-0,1647	0,2347	0,0125
365	-0,01	0,071	-0,114	0,276	-0,196	0,017	0,1273	0,0373	0,1347	-0,0425
365	-0,01	-0,16	-0,357	-0,064	-0,259	0,017	-0,1037	-0,2057	-0,2053	-0,1055
365	-0,07	0,061	-0,046	0,258	-0,114	-0,043	0,1173	0,1053	0,1167	0,0395
365	-0,1	-0,12	-0,09	-0,147	-0,05	-0,073	-0,0637	0,0613	-0,2883	0,1035
365	0,01	-0,158	-0,327	-0,009	-0,364	0,037	-0,1017	-0,1757	-0,1503	-0,2105
F042	-0,38	-1,3E-05	-0,13206	0,415449	-0,09216	0,009	0,0280	0,0157	0,2759	0,0913
F042	-0,43	0,150184	-0,06405	0,278025	-0,35484	-0,041	0,1782	0,0837	0,1385	-0,1714
F032	-0,32	-0,07542	-0,0627	0,172822	-0,09674	0,069	-0,0474	0,0851	0,0333	0,0867
F037	-0,32	-0,21333	-0,37984	0,02665	-0,30603	0,069	-0,1853	-0,2320	-0,1129	-0,1226
F037	-0,46	0,118334	-0,13538	-0,00789	0,035036	-0,071	0,1464	0,0124	-0,1474	0,2185
F042	-0,39	-0,16547	-0,28567	0,039028	-0,24795	-0,001	-0,1374	-0,1379	-0,1005	-0,0645
F042	-0,39	-0,14459	0,024932	0,214792	0,052111	-0,001	-0,1165	0,1727	0,0752	0,2355
F042	-0,46	0,021274	0,001726	-0,0005	-0,29736	-0,071	0,0493	0,1495	-0,1400	-0,1139
F042	-0,46	-0,0407	-0,02571	-0,09235	-0,15674	-0,071	-0,0127	0,1221	-0,2319	0,0267
F042	-0,28	0,069283	-0,41913	0,349409	-0,36962	0,109	0,0973	-0,2713	0,2099	-0,1862
F142	-0,36	-0,099	-0,085	0,11	-0,069	0,032	-0,0342	-0,0381	-0,0384	-0,0544
F142	-0,37	-0,113	-0,199	0,115	-0,081	0,022	-0,0482	-0,1521	-0,0334	-0,0664
F142	-0,42	-0,111	-0,016	0,222	-0,058	-0,028	-0,0462	0,0309	0,0736	-0,0434
F142	-0,37	-0,078	-0,1	0,168	-0,037	0,022	-0,0132	-0,0531	0,0196	-0,0224
F142	-0,35	-0,027	-0,125	0,127	-0,145	0,042	0,0378	-0,0781	-0,0214	-0,1304
F142	-0,43	0,045	0,124	0,402	-0,028	-0,038	0,1098	0,1709	0,2536	-0,0134
F142	-0,36	-0,055	0,008	-0,001	0,027	0,032	0,0098	0,0549	-0,1494	0,0416
F142	-0,45	-0,024	-0,124	0,13	0,3	-0,058	0,0408	-0,0771	-0,0184	0,3146
F142	-0,43	-0,011	0,119	0,181	0,096	-0,038	0,0538	0,1659	0,0326	0,1106
F142	-0,38	-0,175	-0,071	0,03	-0,151	0,012	-0,1102	-0,0241	-0,1184	-0,1364
354	-0,24	-0,20273	-0,26183	0,220168	-0,18755	0,039	-0,1181	-0,1438	0,0223	-0,1133
354	-0,42	0,155993	0,103976	0,144437	0,099413	-0,141	0,2406	0,2220	-0,0535	0,1736

.....continua

Lote	MEDIDO					CALCULADO				
	Swirlref ±0,2	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]	Swirl	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]
354	-0,29	-0,04118	-0,21738	0,059635	-0,36761	-0,011	0,0434	-0,0993	-0,1383	-0,2934
354	-0,32	0,012164	0,096573	0,368982	0,155413	-0,041	0,0968	0,2146	0,1711	0,2296
354	-0,26	-0,0783	0,051535	0,432817	-0,03517	0,019	0,0063	0,1696	0,2349	0,0390
354	-0,27	-0,19731	-0,3209	-0,00106	-0,14519	0,009	-0,1127	-0,2029	-0,1990	-0,0710
354	-0,22	0,022515	-0,30607	0,491367	-0,15465	0,059	0,1071	-0,1880	0,2935	-0,0804
354	-0,22	-0,2173	-0,04787	0,233412	-0,06262	0,059	-0,1327	0,0702	0,0355	0,0116
354	-0,26	-0,15822	-0,17066	3,75E-05	-0,00953	0,019	-0,0736	-0,0526	-0,1979	0,0647
354	-0,29	-0,14189	-0,1077	0,029122	-0,03467	-0,011	-0,0573	0,0103	-0,1688	0,0395
452	-0,4	-0,01927	0,135544	0,16513	0,002925	-0,022	-0,0428	0,3265	-0,0580	0,1071
452	-0,34	0,033108	-0,31404	0,235614	-0,22588	0,038	0,0096	-0,1231	0,0125	-0,1217
452	-0,4	-0,05401	-0,10203	0,431826	0,014364	-0,022	-0,0775	0,0889	0,2087	0,1185
452	-0,35	0,051577	-0,42124	0,274875	0,054445	0,028	0,0281	-0,2303	0,0518	0,1586
452	-0,38	0,23121	-0,34242	0,302272	0,002055	-0,002	0,2077	-0,1515	0,0792	0,1062
451	-0,5	0,178092	-0,13008	-0,01613	-0,01559	-0,122	0,1546	0,0608	-0,2392	0,0886
451	-0,35	-0,08414	-0,45734	0,069213	-0,14152	0,028	-0,1076	-0,2664	-0,1539	-0,0374
451	-0,29	-0,23724	-0,2618	-0,0113	-0,43748	0,088	-0,2608	-0,0709	-0,2344	-0,3333
444	-0,42	0,124452	0,144254	0,433722	-0,00143	-0,042	0,1009	0,3352	0,2106	0,1027
444	-0,35	0,011328	-0,15995	0,345983	-0,29339	0,028	-0,0122	0,0310	0,1229	-0,1892
193	-0,33	-0,08802	-0,17024	0,388772	-0,06821	0,141	-0,0888	-0,1481	0,3878	-0,1190
193	-0,48	0,083285	-0,15485	-0,07465	0,130896	-0,009	0,0825	-0,1327	-0,0756	0,0801
193	-0,5	-0,03217	0,179126	-0,03938	0,28797	-0,029	-0,0330	0,2013	-0,0404	0,2372
193	-0,49	0,009386	-0,25808	0,015813	0,000931	-0,019	0,0086	-0,2359	0,0148	-0,0498
193	-0,5	-0,14878	-0,02646	-0,0647	0,360363	-0,029	-0,1496	-0,0043	-0,0657	0,3096
193	-0,38	0,076712	0,00049	-0,01057	-0,15833	0,091	0,0759	0,0226	-0,0115	-0,2091
193	-0,53	0,042982	-0,08308	-0,17887	-0,03813	-0,059	0,0422	-0,0609	-0,1799	-0,0889
193	-0,51	-0,07602	0,385884	-0,15065	0,169643	-0,039	-0,0768	0,4080	-0,1516	0,1189
193	-0,41	0,004214	-0,27134	0,063187	-0,21207	0,061	0,0034	-0,2492	0,0622	-0,2628
193	-0,58	0,136226	0,176953	0,060874	0,034687	-0,109	0,1354	0,1991	0,0599	-0,0161
454	-0,05	0,121	0,165	0,088	-0,056	-0,056	0,1793	0,2899	0,1024	0,0899
454	0,01	-0,165	-0,358	-0,074	-0,013	0,004	-0,1067	-0,2331	-0,0596	0,1329
454	0	-0,132	-0,01	-0,017	-0,172	-0,006	-0,0737	0,1149	-0,0026	-0,0261
454	0,04	-0,204	-0,472	-0,09	-0,198	0,034	-0,1457	-0,3471	-0,0756	-0,0521
454	0,01	-0,153	0,133	-0,178	0,063	0,004	-0,0947	0,2579	-0,1636	0,2089
454	0,1	-0,116	-0,639	-0,003	-0,571	0,094	-0,0577	-0,5141	0,0114	-0,4251
454	-0,07	-0,023	0,217	0,055	0,044	-0,076	0,0353	0,3419	0,0694	0,1899
454	0	0,168	-0,129	0,097	-0,319	-0,006	0,2263	-0,0041	0,1114	-0,1731

.....continua

Lote	MEDIDO					CALCULADO				
	Swirlref ±0,2	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]	Swirl	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]
454	-0,06	-0,064	0,003	-0,062	-0,126	-0,066	-0,0057	0,1279	-0,0476	0,0199
454	0,08	-0,015	-0,159	0,04	-0,111	0,074	0,0433	-0,0341	0,0544	0,0349
E055	-0,44	-0,055	-0,014	0,139	-0,06	0,013	-0,0837	0,0342	0,0069	-0,0522
E055	-0,41	0,033	-0,008	0,214	-0,03	0,043	0,0043	0,0402	0,0819	-0,0222
E055	-0,45	0,023	-0,0157	0,028	-0,001	0,003	-0,0057	0,0325	-0,1041	0,0068
E055	-0,38	0,112	-0,357	0,168	-0,04	0,073	0,0833	-0,3088	0,0359	-0,0322
E055	-0,49	-0,031	0,05	0,03	0,039	-0,037	-0,0597	0,0982	-0,1021	0,0468
E055	-0,46	0,227	-0,005	0,369	0,161	-0,007	0,1983	0,0432	0,2369	0,1688
E055	-0,49	-0,263	0,179	-0,034	0,169	-0,037	-0,2917	0,2272	-0,1661	0,1768
E055	-0,58	0,246	0,176	0,246	0,085	-0,127	0,2173	0,2242	0,1139	0,0928
E055	-0,56	0,14	0,078	0,023	0,062	-0,107	0,1113	0,1262	-0,1091	0,0698
E055	-0,27	-0,145	-0,565	0,138	-0,463	0,183	-0,1737	-0,5168	0,0059	-0,4552
135	-0,07	-0,142	-0,297	0,224	-0,227	-0,108	-0,1208	0,1026	0,0334	0,1621
135	-0,03	0,125	-0,52	0,458	-0,236	-0,068	0,1462	-0,1204	0,2674	0,1531
135	-0,05	-0,012	-0,095	-0,074	-0,539	-0,088	0,0092	0,3046	-0,2646	-0,1499
135	0,02	0,074	-0,539	0,121	-0,517	-0,018	0,0952	-0,1394	-0,0696	-0,1279
135	-0,05	-0,028	-0,255	0,348	-0,027	-0,088	-0,0068	0,1446	0,1574	0,3621
135	0,06	-0,31	-0,596	0,02	-0,591	0,022	-0,2888	-0,1964	-0,1706	-0,2019
135	0,12	0,094	-0,433	0,128	-0,494	0,082	0,1152	-0,0334	-0,0626	-0,1049
135	0,17	-0,025	-0,508	0,258	-0,463	0,132	-0,0038	-0,1084	0,0674	-0,0739
135	0,12	0,013	-0,391	0,166	-0,336	0,082	0,0342	0,0086	-0,0246	0,0531
135	0,09	-0,001	-0,362	0,257	-0,461	0,052	0,0202	0,0376	0,0664	-0,0719
241	-0,36	-0,208	-0,349	-0,038	-0,406	0,011	-0,1660	-0,1228	-0,2138	-0,1489
241	-0,31	-0,127	-0,316	0,165	-0,205	0,061	-0,0850	-0,0898	-0,0108	0,0521
241	-0,48	0,142	-0,086	0,29	-0,025	-0,109	0,1840	0,1403	0,1143	0,2321
241	-0,29	-0,121	-0,33	0,113	-0,449	0,081	-0,0790	-0,1038	-0,0628	-0,1919
241	-0,31	-0,177	-0,305	0,196	-0,371	0,061	-0,1350	-0,0788	0,0203	-0,1139
241	-0,48	0,048	-0,117	0,008	-0,217	-0,109	0,0900	0,1093	-0,1678	0,0401
241	-0,35	0,18	-0,071	0,422	-0,123	0,021	0,2220	0,1553	0,2463	0,1341
241	-0,39	-0,073	-0,236	0,25	-0,261	-0,019	-0,0310	-0,0098	0,0743	-0,0039
341	-0,08	0,354308	-0,35542	-0,08251	-0,06855	0,029	0,1262	-0,1850	-0,1038	-0,0787
341	-0,06	0,234103	-0,13118	0,049933	-0,12444	0,049	0,0060	0,0393	0,0287	-0,1346
341	-0,17	0,349321	0,135295	0,086715	0,302912	-0,061	0,1212	0,3057	0,0654	0,2928
341	-0,05	0,191584	-0,54763	0,069404	-0,36482	0,059	-0,0365	-0,3772	0,0481	-0,3750
341	-0,21	0,247417	-0,09824	0,044067	0,207482	-0,101	0,0193	0,0722	0,0228	0,1973
341	-0,1	0,18261	-0,2195	0,131607	0,174448	0,009	-0,0455	-0,0491	0,1103	0,1643

.....continua

Lote	MEDIDO					CALCULADO				
	<i>Swirl</i> _{ref} ±0,2	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]	<i>Swirl</i>	Sx [mm]	Sy [mm]	Lx[mm]	Ly [mm]
234	-0,32	-0,06685	-0,38973	0,277671	-0,41039	0,020	-0,0807	-0,1497	-0,0035	-0,2207
234	-0,34	0,105622	-0,4538	0,232083	-0,22778	0,000	0,0917	-0,2138	-0,0491	-0,0381
234	-0,31	-0,1189	-0,16982	0,183284	-0,04143	0,030	-0,1328	0,0702	-0,0979	0,1483
234	-0,35	0,095163	-0,12897	0,394887	-0,07098	-0,010	0,0813	0,1110	0,1137	0,1188
234	-0,49	0,257013	-0,01202	0,149023	-0,02412	-0,150	0,2431	0,2280	-0,1321	0,1656

APÊNDICE “D”

CÁLCULO DE SWIRL PARA AS AMOSTRAS PADRÃO, 1 E 2

	X1	Y1	X2	Y2	Short		Long		Sw#		Desv.Ajust	Grupo		Desv.Ajust	ΣΔxy _{max}		
					módulo	ângulo	módulo	ângulo	Medido	Calculado		Média	Desvio				
1	0,3279	-0,1578	0,1446	0,1264	0,364	-25,7	0,192	41,2	-0,1074	-0,0912	0,016	-0,060	0,054	0,4215	0,4199	-0,0015	0,556
2	-0,0439	-0,2568	0,0344	0,2584	0,261	-99,7	0,261	82,4	-0,0860	-0,0627	0,023			0,4232	0,4198	-0,0034	0,521
3	-0,1024	-0,0441	0,0603	0,2914	0,111	-156,7	0,298	78,3	-0,1016	-0,0688	0,033			0,4217	0,4208	-0,0009	0,409
4	-0,2601	-0,0144	0,2702	0,0859	0,260	-176,8	0,284	17,6	0,0458	0,0314	0,014			0,4209	0,4202	-0,0007	0,544
5	-0,3994	0,1153	0,1371	0,4572	0,416	163,9	0,477	73,3	-0,0255	-0,0413	0,016			0,4241	0,4213	-0,0028	0,893
6	0,1198	-0,1194	-0,1413	0,2119	0,169	-44,9	0,255	123,7	-0,1304	-0,1283	0,002			0,4196	0,4211	0,0015	0,424
1.1 = 13	-1,321	-1,0342	1,6369	-1,01	1,678	-141,9	1,923	-31,7	0,6546	0,7409	0,086	0,477	0,108	0,4119	0,4103	-0,0016	3,601
1.2 = 12	-1,0425	-0,597	1,2441	-0,8648	1,201	-150,2	1,515	-34,8	0,5312	0,5586	0,027			0,4123	0,4138	0,0015	2,716
1.3 = 6	-1,1325	-0,9436	1,5172	-0,4834	1,474	-140,2	1,592	-17,7	0,6132	0,5914	0,022			0,4067	0,4111	0,0045	3,066
1.4 = 11	-1,2713	-0,6688	1,1658	-0,2956	1,436	-152,3	1,203	-14,2	0,4996	0,4949	0,005			0,4165	0,4138	-0,0027	2,639
1.5 = 7	-0,9545	-0,3871	1,2905	-0,7187	1,030	-157,9	1,477	-29,1	0,4729	0,5128	0,040			0,4179	0,4147	-0,0032	2,507
1.6 = 3	-0,4763	-1,1033	0,6378	-0,3716	1,202	-113,4	0,738	-30,2	0,3831	0,2981	0,085			0,4135	0,4135	0,0001	1,940
1.7 = 2	-0,7948	-0,1926	0,9119	-0,7649	0,818	-166,4	1,190	-40,0	0,5131	0,4035	0,110	-0,373	0,044	0,4130	0,4170	0,0040	2,008
2.1 = 10	0,8544	-0,1808	-0,2678	0,5633	0,873	-11,9	0,624	115,4	-0,2990	-0,3337	0,035			0,4190	0,4213	0,0023	1,497
2.2 = 9	0,9713	-0,2961	-0,8562	0,3963	1,015	-17,0	0,943	155,2	-0,4704	-0,4338	0,037			0,4217	0,4229	0,0011	1,959
2.3 = 8	1,0975	0,1834	-0,1532	0,635	1,113	9,5	0,653	103,6	-0,3750	-0,3923	0,017			0,4238	0,4227	-0,0011	1,766
2.4 = 4	0,9829	-0,1728	-0,4785	0,4791	0,998	-10,0	0,677	135,0	-0,3981	-0,3842	0,014			0,4236	0,4221	-0,0015	1,675
2.5 = 5	0,6425	0,2565	-0,1499	0,5974	0,692	21,8	0,616	104,1	-0,3518	-0,3121	0,040			0,4194	0,4230	0,0036	1,308
2.6 = 1	1,0093	0,3916	0,0506	0,7999	1,083	21,2	0,801	86,4	-0,3646	-0,3796	0,015	0,4220	0,4229	0,0009	1,884		

APÊNDICE “E”

ANÁLISE DAS AMOSTRAS

AMOSTRA	
2.1 = 10	
2.2 = 9	
2.3 = 8	
2.4 = 4	
2.5 = 5	
2.6 = 1	
2A	
2B	
2C	
2D	
2E	
2F	

AMOSTRA 2

	Rho	Delta	Theta	Rho	Delta	Theta	
	1	0	30	1	0	140	
-0,24331 0,380144	0,87332	0,680899	-12	0,623718	0,504545	115	0,006985 -0,00101
-0,00750 0,521294	1,01543	0,80303	-17	0,943408	0,262458	155	-0,13423 -0,00032
-0,42216 0,162194	1,112718	0,392194	9	0,653219	0,612894	104	-0,06699 1,83E-06
-0,20221 0,418244	0,997974	0,682876	-10	0,677126	0,330871	135	-0,09588 -0,00085
-0,19631 0,144444	0,691808	0,330539	22	0,615919	0,617814	104	0,013517 -0,00093
-0,47996 -0,02436	1,082607	0,179661	21	0,801499	0,83162	86	-0,01789 -0,00115
-0,06866 0,142344	0,566895	0,478484	14	0,781232	0,460368	114	0,143342 0,002127
-0,43736 0,151744	0,915608	0,506333	0	0,845269	0,849134	86	0,058456 0,001422
-0,10376 0,045244	0,647375	0,353181	31	0,755716	0,526011	109	0,015062 0,000339
-0,31601 0,149294	0,855869	0,48311	1	0,836398	0,668292	99	0,044217 -0,00134
-0,01071 0,076944	0,609305	0,402462	37	0,720466	0,402014	120	-0,02273 0,001035
-0,23876 0,102244	0,771383	0,347789	13	0,786524	0,604326	103	0,056135 0,000687

Como ficariam corrigidos			
	0,866	0,500	-0,766
	0,611	0,199	-0,511
	0,964	0,225	-0,864
	0,675	0,346	-0,575
	0,781	0,245	-0,681
	0,446	0,401	-0,346
	0,529	0,367	-0,429
	0,480	0,284	-0,380
	0,478	0,148	-0,378
	0,449	0,383	-0,349
	0,540	0,166	-0,440
	0,475	0,444	-0,375
	0,513	0,274	-0,413
			0,643
			0,943
			0,918
			0,797
			0,897
			0,742
			0,776
			0,859
			0,995
			0,760
			0,976
			0,698
			0,869

	1	0	30	1	0	140
	0,642783	0,39419	18	1,072995	0,39419	118
	0,989701	0,291662	13	1,260182	0,291662	133
	0,75863	0,245361	27	0,983136	0,245361	126
	0,818364	0,268479	17	1,126318	0,268479	127
	0,599868	0,431362	42	0,818653	0,431362	115
	0,644259	0,361913	35	0,886464	0,361913	119
	0,557953	0,442117	31	0,939169	0,442117	114
	0,500571	0,523824	17	1,064422	0,523824	111
	0,589732	0,433473	40	0,836332	0,433473	115
	0,56473	0,466749	17	1,070927	0,466749	114
	0,650716	0,394665	43	0,792806	0,394665	118
	0,554704	0,416075	20	0,920400	0,416075	115

AMOSTRA
3.1
3.2
3.3
3.4
3.5
3.6
3A
3B
3C
3D
3E

AMOSTRA 3

	Rho	Delta	Theta	Rho	Delta	Theta		
	1	0	-60	1	0	50		
0,571656 -0,16471	1,206482	0,310816	-48	1,548147	0,886426	17	0,04245	0,000378
-0,56821 -0,00664	1,428088	0,613675	-39	1,418819	0,525099	35	-0,01058	-0,00067
-0,13366 -0,16624	0,837948	0,309434	-43	1,138736	0,164538	45	-0,00328	0,001164
-0,37451 -0,30329	1,177753	0,562742	-32	1,430995	0,432376	52	-0,089	-0,00223
-0,04591 0,10796	1,310879	0,317578	-57	0,935509	0,127697	57	-0,09422	0,004219
-0,04426 -0,16409	0,952232	0,150539	-68	1,419626	0,421046	52	-0,0149	-0,00058
-0,28691 0,14386	1,496576	0,496607	-60	1,321148	0,348604	43	-0,03843	0,000654
-0,13626 0,06171	1,37244	0,372552	-60	1,219469	0,225707	53	-0,02802	-0,00022
0,179194 0,17256	1,386331	0,681505	-88	1,187719	0,192834	52	0,176358	-0,00092
0,094694 0,05371	1,300486	0,343493	-68	1,108006	0,289704	65	-0,04346	0,000262
-0,10546 0,27891	1,611598	0,72297	-77	1,358666	0,390873	42	0,103076	-0,00205

Como ficaram corrigidos			
0,500	-0,866	0,643	0,766
1,381	-1,059	2,048	0,300
0,545	-0,901	0,598	0,801
0,475	-0,742	0,668	0,642
0,629	-0,919	0,513	0,819
0,673	-0,988	0,470	0,888
0,306	-1,049	0,836	0,949
0,467	-1,149	0,676	1,049
0,541	-1,132	0,602	1,032
0,238	-1,213	0,905	1,113
0,574	-1,155	0,569	1,055
0,244	-1,294	0,899	1,194

	1	0,057103	-60	1	0,057103	50
	1,740612	0,902106	-37	2,070181	1,480568	8
	1,053278	0,057103	-59	0,999967	0,057103	53
	0,881249	0,126139	-57	0,926842	0,126139	44
	1,113915	0,139907	-56	0,966565	0,139907	58
	1,195604	0,211704	-56	1,005026	0,211704	62
	1,093219	0,266621	-74	1,265247	0,266621	49
	1,240203	0,284711	-68	1,247611	0,284711	57
	1,254652	0,26925	-64	1,195004	0,26925	60
	1,235599	0,43466	-79	1,434282	0,43466	51
	1,28998	0,298507	-64	1,198699	0,298507	62

AMOSTRA	
4.1	
4.2	
4.3	
4.4	
4.5	
4.6	
4A	
4B	
4C	
4D	

AMOSTRA 4

	Rho	Delta	Theta	Rho	Delta	Theta	
	1	0	120	1	0	-130	
-0,40901 0,19196	1,442728	0,624355	141	0,937855	0,395682	-153	-0,12348
-0,06955 -0,03089	1,343375	0,863647	160	0,806918	0,416853	-154	-0,05404
-0,2525 -0,06529	1,698734	1,247074	167	1,08565	0,795076	-175	-0,09323
0,0645 -0,01334	1,835217	1,3204	164	0,958879	0,236677	-116	0,172055
0,08545 0,04896	1,336235	0,726942	152	0,658581	0,344363	-133	-0,00561
-0,395 -0,16639	1,598004	1,280482	173	1,096406	0,208785	-140	0,055986
0,3433 -0,41359	0,954415	1,239294	-161	0,719251	0,338602	-117	0,065488
-0,026 0,06906	0,797016	0,212902	124	0,95903	0,19299	-119	-0,0802
-0,50695 -0,12764	1,119654	0,839468	166	0,53868	0,488684	-117	0,043792
-0,14925 -0,44559	0,87767	1,270511	-155	0,822013	0,181892	-128	0,019242

	x2-x1	y2-y1
	19,15721	50,36793
	19,5854	0,4282
	19,8386	0,6814
	19,8723	0,7151
	20,6419	1,4847
	20,0333	0,8761
	20,0451	0,8879
	19,8756	0,7184
	19,2829	0,1257
	20,1397	0,9825
	19,5942	0,4370
	50,6727	0,3048
	51,183	0,8151
	51,5064	1,1385
	50,6456	0,2777
	50,9001	0,5322
	51,1085	0,7406
	51,6657	1,2978
	50,501	0,1331
	51,2553	0,8874
	51,7185	1,3506

$\Delta x > 0$	$\Delta y > 0$		Como ficariam após deslocamento nas referências para usinagem	
0,409	-0,192		-0,5	0,866 46,566 -0,643 -0,766
0,422	-0,001		-0,71409	0,714 46,414 -0,429 -0,614
0,796	-0,094		-0,84069	0,458 46,158 -0,302 -0,359
0,525	0,232		-0,85754	0,297 45,997 -0,285 -0,197
0,246	-0,020		-1,24234	0,727 46,427 0,100 -0,627
0,643	0,307		-0,93804	0,600 46,300 -0,205 -0,500
0,045	0,523		-0,94394	0,496 46,196 -0,199 -0,396
-0,116	0,140	não	-0,85919	0,217 -0,284 -0,117
0,096	0,156	usinados	-0,56284	0,799 -0,580 -0,700
0,078	0,560		-0,99124	0,422 -0,152 -0,322
			-0,71849	0,191 -0,424 -0,091

	Rho	Delta	Theta	Rho	Delta	Theta
	1	0	120	1	0	-130
	1,009561	0,262788	135	0,74857	0,262788	-125
	0,957591	0,531185	151	0,468817	0,531185	-130
	0,90745	0,67221	161	0,346552	0,67221	-145
	1,439522	0,755215	150	0,635062	0,755215	-81
	1,113488	0,512527	147	0,540259	0,512527	-112
	1,066203	0,578098	152	0,442905	0,578098	-117
	0,886208	0,741668	166	0,306842	0,741668	-158
não	0,977741	0,091522	125	0,908652	0,091522	-130
usinados	1,077467	0,661949	157	0,356204	0,661949	-115
	0,743381	0,709753	165	0,433892	0,709753	-168

APÊNDICE “F”
AMOSTRAS SELECIONADAS

	X1	Y1	X2	Y2	Short		Long		Sw#		Desv.Ajust	Grupo				Desv.Ajust	ΣΔxymax	Var X	Var Y
					módulo	ângulo	módulo	ângulo	Medido +/- ref	Calculado +/- ref		Média	Desvio						
1	0,3279	-0,1578	0,1446	0,1264	0,364	-25,7	0,192	41,2	-0,1074	-0,1227	- 0,015	-0,068	0,053	0,4215	0,4207	-0,0008	0,556	0,4725	-0,0314
2	-0,0439	-0,2568	0,0344	0,2584	0,261	-99,7	0,261	82,4	-0,0860	-0,0862	- 0,000			0,4232	0,4208	-0,0024	0,521	-0,0095	0,0016
3	-0,1024	-0,0441	0,0603	0,2914	0,111	-156,7	0,298	78,3	-0,1016	-0,0987	0,003			0,4217	0,4197	-0,0020	0,409	-0,0421	0,2473
4	-0,2601	-0,0144	0,2702	0,0859	0,260	-176,8	0,284	17,6	0,0458	-0,0168	- 0,063			0,4209	0,4204	-0,0004	0,544	0,0101	0,0715
5	-0,3994	0,1153	0,1371	0,4572	0,416	163,9	0,477	73,3	-0,0255	-0,0603	- 0,035			0,4241	0,4191	-0,0050	0,893	-0,2623	0,5725
6	0,1198	-0,1194	-0,1413	0,2119	0,169	-44,9	0,255	123,7	-0,1304	-0,1711	- 0,041			0,4196	0,4192	-0,0004	0,424	-0,0215	0,0925
1.2 = 12	-1,0425	-0,597	1,2441	-0,8648	1,201	-150,2	1,515	-34,8	0,4870	0,4614	- 0,026	0,415	0,039	0,4090	0,4279	0,0189	2,716	0,2016	-1,4618
1.4 = 12	-1,2713	-0,6688	1,1658	-0,7187	1,436	-152,3	1,370	-31,7	0,4161	0,4800	0,064			0,4126	0,4280	0,0154	2,806	-0,1055	-1,3875
1.5 = 6	-0,9545	-0,3871	1,2905	-0,3716	1,030	-157,9	1,343	-16,1	0,4503	0,4131	- 0,037			0,4107	0,4269	0,0162	2,373	0,3360	-0,7587
1A	-1,0221	-0,3661	1,3182	-0,3163	1,086	-160,3	1,356	-13,5	0,3981	0,4256	0,028			0,4110	0,4269	0,0159	2,441	0,2961	-0,6824
1D	-1,1113	-0,608	1,0046	-0,258	1,267	-151,3	1,037	-14,4	0,3443	0,3883	0,044			0,4177	0,4269	0,0093	2,304	-0,1067	-0,866
1E	-0,5441	-0,3235	1,4248	-0,5702	0,633	-149,3	1,535	-21,8	0,3940	0,3838	- 0,010			0,4121	0,4272	0,0150	2,168	0,8807	-0,8937
2.3	1,0975	0,1834	-0,1532	0,635	1,113	9,5	0,653	103,6	-0,4309	-0,3800	0,051	-0,368	0,022	0,4190	0,4175	-0,0015	1,766	0,9443	0,8184
2.5	0,6425	0,2565	-0,1499	0,5974	0,692	21,8	0,616	104,1	-0,3504	-0,3168	0,034			0,4180	0,4171	-0,0009	1,308	0,4926	0,8539
2.6	1,0093	0,3916	0,0506	0,7999	1,083	21,2	0,801	86,4	-0,3818	-0,3479	0,034			0,4178	0,4172	-0,0006	1,884	1,0599	1,1915
2C	0,5525	0,3374	-0,245	0,7149	0,647	31,4	0,756	108,9	-0,3489	-0,3418	0,007			0,4193	0,4162	-0,0031	1,403	0,3075	1,0523
2E	0,486	0,3675	-0,3646	0,6214	0,609	37,1	0,720	120,4	-0,3867	-0,3618	0,025			0,4200	0,4155	-0,0045	1,330	0,1214	0,9889
2F	0,7521	0,1714	-0,1746	0,7669	0,771	12,8	0,787	102,8	-0,3078	-0,3361	- 0,028			0,4211	0,4175	-0,0036	1,558	0,5775	0,9383
3.3	0,6084	-0,5762	0,8017	0,8087	0,838	-43,4	1,139	45,2	0,0843	0,0247	- 0,060	0,042	0,048	0,4125	0,4259	0,0134	1,977	1,4101	0,2325
3.4	1,004	-0,6157	0,8878	1,1223	1,178	-31,5	1,431	51,7	-0,0015	-0,0223	- 0,021			0,4091	0,4265	0,0174	2,609	1,8918	0,5066
3.5	0,7187	-1,0963	0,5159	0,7804	1,311	-56,8	0,936	56,5	-0,0067	0,0021	0,009			0,4155	0,4276	0,0120	2,246	1,2346	-0,3159
3.6	0,3507	-0,8853	0,8806	1,1135	0,952	-68,4	1,420	51,7	0,0726	0,1108	0,038			0,4107	0,4280	0,0172	2,372	1,2313	0,2282
3B	0,6769	-1,1939	0,7384	0,9705	1,372	-60,4	1,219	52,7	0,0595	0,0693	0,010			0,4111	0,4291	0,0180	2,592	1,4153	-0,2234
3D	0,4794	-1,2089	0,474	1,0015	1,300	-68,4	1,108	64,7	0,0441	0,0336	- 0,010			0,4116	0,4280	0,0164	2,408	0,9534	-0,2074
4.2	-1,2622	0,4599	-0,7236	-0,3571	1,343	160,0	0,807	-153,7	0,0948	-0,1548	- 0,250	0,244	0,082	0,4110	0,4135	0,0024	2,150	-1,9858	0,1028
4.5	-1,1839	0,6196	-0,4506	-0,4803	1,336	152,4	0,659	-133,2	0,1838	-0,1131	- 0,297			0,4073	0,4137	0,0064	1,995	-1,6345	0,1393
4A	-0,9042	-0,3055	-0,3286	-0,6398	0,954	-161,3	0,719	-117,2	0,4546	-0,0026	- 0,457			0,4000	0,4195	0,0194	1,674	-1,2328	-0,9453
4B	-0,4471	0,6598	-0,4642	-0,8392	0,797	124,1	0,959	-118,9	0,1935	-0,2205	- 0,414			0,4086	0,4135	0,0049	1,756	-0,9113	-0,1794
4C	-1,0875	0,2664	-0,2478	-0,4783	1,120	166,2	0,539	-117,4	0,2711	-0,0324	- 0,304			0,4095	0,4166	0,0071	1,658	-1,3353	-0,2119
4D	-0,7961	-0,3695	-0,5019	-0,651	0,878	-155,1	0,822	-127,6	0,2648	-0,0545	- 0,319			0,4075	0,4191	0,0115	1,700	-1,2980	-1,0205

APÊNDICE “G”
RESULTADOS TESTES EM MOTOR “COMMON RAIL”

Ensaio em Plena Carga

Torque

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
2000	686	686	689	691	680
1950	786	792	790	792	780
1900	892	895	895	901	885
1800	997	999	1003	1004	989
1600	1196	1199	1199	1204	1186
1540	1269	1274	1274	1280	1258
1400	1479	1479	1481	1494	1458
1300	1651	1645	1652	1665	1628
1250	1670	1671	1665,5	1690	1650
1200	1670	1669	1679	1686	1651
1180	1676	1676	1684	1689	1658
1000	1726	1719	1731	1731	1694

Consumo de Combustível

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
2000	141,85	140,35	136,75	141,75	139,05
1950	137,15	135,65	133,05	137,45	136,85
1900	133,15	132,25	129,75	133,25	132,05
1800	126,55	125,85	124,85	126,85	126,15
1600	111,65	111,85	110,75	113,05	106,95
1540	108,55	108,95	107,85	110,05	105,75
1400	103,65	104,15	102,15	104,85	104,65
1300	99,95	100,55	99,65	101,35	101,75
1250	99,55	99,35	99,05	100,25	98,55
1200	97,05	97,25	98,45	97,95	98,05
1180	96,45	96,55	97,55	97,35	98,65
1000	93,55	92,35	97,75	92,25	94,95

Emissões Concentradas de CO (ppm)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2000	31,128	24,566	44,511	31,205	26,914
1950	32,29	24,797	46,469	34,111	26,248
1900	35,221	25,575	50,849	34,848	28,571
1800	32,462	21,901	49,963	33,669	23,373
1600	16,569	13,123	23,914	17,952	14,18
1540	14,347	10,997	17,624	13,56	11,769
1400	9,253	8,511	10,876	10,552	9,012
1300	8,628	8,461	8,097	10,334	9,599
1250	7,753	7,797	8,594	9,704	8,788
1200	8,83	7,917	9,091	9,905	8,653
1180	9,085	7,82	8,485	11,406	8,746
1000	12,883	25,457	13,312	11,062	27,424

Emissões Concentradas de NOx (ppm)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2000	325,967	351,764	303,888	354,541	318,564
1950	351,026	374,649	341,171	368,88	349,008
1900	391,66	399,972	374,838	407,123	385,025
1800	404,54	404,229	381,559	409,141	400,294
1600	538,9	526,409	509,352	497,038	517,003
1540	585,106	577,996	556,699	547,515	561,17
1400	715,733	683,787	688,634	675,734	707,042
1300	872,013	810,262	844,666	799,982	835,922
1250	852,112	805,062	856,74846	777,342	822,396
1200	873,642	835,637	891,802	795,982	838,782
1180	894,3	850,552	909,592	812,362	866,032
1000	1243,32	1193,661	1226,782	1187,004	1192,874

Emissões Concentradas de HC (ppm)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
2000	30,799	44,303	25,921	31,442	32,185
1950	36,272	41,783	26,448	32,799	34,292
1900	33,98	41,236	26,549	32,936	36,644
1800	28,832	35,492	24,942	30,372	31,086
1600	21,151	27,535	18,699	23,058	23,508
1540	21,121	24,638	17,859	21,411	22,055
1400	18,31	21,863	17,382	19,049	19,935
1300	18,278	21,642	17,579	18,169	19,543
1250	18,294	21,11	18,1495	17,879	19,277
1200	19,287	21,181	18,72	17,504	19,129
1180	19,682	20,801	19,087	18,518	19,566
1000	29,606	26,408	30,476	25,649	28,561

Pressão de Entrada (bar)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	bar	bar	bar	bar	bar
2000	0,795	0,795	0,775	0,785	0,775
1950	0,855	0,875	0,845	0,845	0,855
1900	0,935	0,955	0,915	0,915	0,925
1800	1,035	1,055	1,025	1,025	1,025
1600	1,195	1,225	1,195	1,235	1,175
1540	1,255	1,275	1,245	1,295	1,225
1400	1,375	1,395	1,375	1,445	1,335
1300	1,455	1,475	1,455	1,525	1,405
1250	1,455	1,475	1,43	1,535	1,405
1200	1,415	1,425	1,405	1,495	1,365
1180	1,395	1,415	1,395	1,475	1,355
1000	1,055	1,065	1,045	1,135	1,015

Temperatura de Entrada (°C)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	°C	°C	°C	°C	°C
2000	14,65	15,55	15,45	15,75	15,85
1950	14,25	15,75	14,65	16,05	16,05
1900	14,25	15,55	14,75	15,05	15,95
1800	14,15	15,45	15,25	15,05	14,75
1600	14,35	15,55	15,45	16,15	14,65
1540	14,45	15,55	15,45	15,55	14,75
1400	14,15	15,25	15,25	14,55	13,95
1300	14,35	15,75	14,75	14,95	13,65
1250	14,95	15,95	14,9	15,95	13,65
1200	15,25	16,05	15,05	15,15	13,75
1180	15,35	15,95	15,45	16,05	13,55
1000	14,95	15,65	15,25	15,15	14,55

Temperatura de Escape (°C)

Enginespeed	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
rpm	°C	°C	°C	°C	°C
2000	233	234	235	228	236
1950	239	241	240	240	241
1900	246	247	247	247	247
1800	237	238	237	238	238
1600	205	207	206	208	207
1540	196	198	198	198	199
1400	193	194	194	194	192
1300	193	194	193	194	192
1250	191	191	190,5	192	189
1200	188	187	188	186	186
1180	187	186	187	186	185
1000	204	201	205	199	204

Ciclo ESC padrão e ponto a ponto (média)

Torque

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
2	2344,5	2332,5	2164,75	2335,5	2308
3	923,5	925,5	925,25	928	918,75
4	1410,25	1412,75	1413,5	1416	1402,25
5	1159,5	1157,75	1160,25	1167	1148,75
6	1752,5	1746,75	1719,25	1762	1733,5
7	576,75	575	574,5	579,5	571,75
8	1882,5	1878,5	1787,75	1875	1859,75
9	454,5	455,5	454,75	456,5	452
10	1366,5	1367,25	1361	1362,5	1360
11	326,25	326	326,75	327	324
12	1035,5	1035,25	1037,5	1036,5	1030,75
13	677	676,5	679	680	675

Consumo de Combustível

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
1	49644,75	80770,5	103862,4	11357,1	-149289,8
2	102,025	101,625	102,325	102	98,65
3	120,125	118,125	120,975	124,5	141,375
4	112,65	111,625	114,725	112,35	101
5	102,275	101,275	102,8	104,55	104,15
6	96,7	95,725	98,35	96,3	90,95
7	123,15	121,7	123,125	121,5	125,825
8	114,175	113,625	115,7	114,2	110,975
9	150,625	147,75	149,725	149	154,55
10	142,775	142,3	144,125	143,5	138,625
11	233,225	228,3	230,375	232,5	236,65
12	148,2	147,175	149,15	148,5	127,025
13	167,275	164,075	167,125	165,25	187,25

Emissões Concentradas de CO (ppm)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	16,35775	17,46	18,35975	17,8675	17,85425
2	5,31425	5,32225	9,4255	10,25425	5,7355
3	16,91325	14,55375	21,3065	17,14925	16,18975
4	16,71175	13,58175	22,7725	17,4495	14,30425
5	20,34075	14,49775	21,9995	19,4545	21,40525
6	12,6855	8,24475	14,26375	12,93575	12,425
7	27,45675	22,092	32,25275	27,03875	25,74725
8	16,05325	12,55625	25,77425	17,526	12,97225
9	24,904	21,3935	29,4595	25,0735	23,8185
10	30,1405	23,278	44,5035	28,397	23,64425
11	27,569	27,68075	30,441	28,50125	28,5855
12	20,79375	19,1595	27,315	21,168	19,3465
13	19,7115	18,28775	24,05175	20,52725	19,205

Emissões Concentradas de NOx (ppm)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	87,324	72,434	79,50075	69,963	81,8335
2	1161,553	1130,682	1050,86475	1127,726	1157,37925
3	452,4945	462,5315	428,77775	437,2445	453,92925
4	638,11625	642,73675	576,61775	628,642	634,14875
5	757,006	787,44175	687,31125	722,474	745,37875
6	1043,069	1087,7045	904,92625	1011,0155	1044,662
7	535,78225	546,712	487,34925	528,0645	541,86425
8	773,84525	782,293	691,3305	770,0835	785,37375
9	333,54275	338,71925	314,946	323,122	341,43825
10	587,323	578,14775	549,1825	572,988	588,86725
11	163,62625	160,588	155,912	157,156	165,0295
12	461,1115	448,03425	429,15125	446,1425	456,20475
13	321,10225	316,86375	296,13325	309,0035	321,08325

Emissões Concentradas de HC (ppm)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	35,263875	42,004625	41,198375	40,862375	45,516875
2	22,642375	23,598125	22,480875	20,937875	26,932375
3	22,221375	24,608875	21,549125	22,375375	28,248625
4	21,487875	22,859875	19,574875	20,936375	26,630875
5	25,923125	29,205375	24,937625	25,452375	31,744875
6	21,526125	23,505125	19,646125	21,008875	26,655875
7	31,910375	36,438875	32,421625	32,631375	38,597125
8	26,007125	27,631125	22,769625	24,303375	29,743875
9	33,670375	37,629375	33,614875	34,852875	41,194875
10	37,403625	40,410625	33,600625	37,496375	42,868875
11	30,897625	35,495625	31,131375	33,599875	38,583875
12	27,258375	30,593125	24,953625	27,809875	32,199375
13	25,647375	29,580375	24,758875	27,195875	31,526875

Pressão de Entrada (bar)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	bar	bar	bar	bar	bar
1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2	2,2775	2,2425	2,1175	2,27	2,2175
3	1,29	1,2675	1,28	1,3	1,2525
4	1,715	1,7075	1,71	1,72	1,6875
5	1,165	1,15	1,1775	1,185	1,1425
6	1,75	1,725	1,7375	1,77	1,7075
7	0,55	0,54	0,56	0,565	0,54
8	1,9925	1,9775	1,92	1,975	1,96
9	0,735	0,72	0,725	0,74	0,7175
10	1,5575	1,5575	1,525	1,53	1,5425
11	0,9225	0,9075	0,905	0,935	0,9
12	1,4375	1,435	1,415	1,43	1,4175
13	1,2425	1,23	1,2275	1,245	1,2175

Temperatura de Entrada (°C)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	°C	°C	°C	°C	°C
1	18,65	19,375	18,9	18,875	20,225
2	18,225	17,925	17,625	17,475	18,675
3	17,575	17,75	17,575	17,125	18,425
4	18,55	18,75	18,225	17,775	19,3
5	17,625	17,9	16,525	15,925	18,375
6	18,2	18,075	17,475	16,325	18,75
7	17,05	17,575	17,2	16,075	18,05
8	17,95	17,8	15,675	15,075	18,275
9	15,475	16,825	14,5	13,425	16,3
10	16,325	17,1	15,4	15,325	17,6
11	17,125	17,275	15,075	14,775	17,825
12	17,975	18,775	18,075	17,575	18,95
13	18,225	19,175	16,55	17,275	19,375

Temperatura de Escape (°C)

ESC	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	°C	°C	°C	°C	°C
1	69,5	75	76,5	72	77,5
2	258	260,75	250	256	259,25
3	205,5	207,75	207	206	210
4	238,25	241,25	245	239	242,5
5	227,25	228,25	231,25	226,5	231
6	246	247,75	250	245,5	250,5
7	199	198,75	203	198	202
8	293,75	296,25	288,25	290	295
9	184	185,5	184,75	183,5	187,5
10	319,25	323,25	322,25	318	321
11	174	175,5	176,75	174,5	178
12	255,75	257,75	261,5	256,5	258
13	208,75	209	213,5	209,5	212

Material Particulado ESC padrão x ESC ponto a ponto

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
ESC	0,01400343	0,01576343	0,01831843	0,01877843	0,01599843
ponto a ponto	0,01814375	0,01876968	0,01333157	0,01419206	0,02428106

Material Particulado específico (g/kWh)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
P4 antec	0,02388304	0,01438198	0,02780571	0,02980637	0,02980637
Ponto 4	0,01739071	0,02041445	0,0282587	0,01577004	0,011604
P4 atrasa	0,01965593	0,02830305	0,02780571	0,0174729	0,02998258
P10 antec	0,03690135	0,02477249	0,05269866	0,0275669	0,03704133
Ponto 10	0,03813959	0,03243069	0,04564082	0,02406106	0,03471908
P10 atrasa	0,04012933	0,03535842	0,06354625	0,02188096	0,04445327

Material Particulado (g)

ESC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Padrão	0,0175	0,0285	0,0385	0,0435	0,0065	0,0175	0,0175	0,0475	0,0295	0,0905	0,0355	0,0565	0,0375
Amostra 1	0,0035	0,0365	0,0625	0,0635	0,0125	0,0225	0,0085	0,0475	0,0355	0,0735	0,0245	0,0475	0,0315
Amostra 2	0,0035	0,0355	0,0445	0,0755	0,0055	0,0225	0,0105	0,0615	0,0075	0,0955	0,0335	0,0445	0,0385
Amostra 3	0,0055	0,0085	0,0385	0,0705	0,0005	0,0115	0,0025	0,0715	0,0355	0,0995	0,0405	0,0605	0,0255
Amostra 4	0,0095	0,0315	0,0485	0,0535	0,0185	0,0265	0,0175	0,0715	0,0385	0,0995	0,0415	0,0605	0,0405

Alteração de Injeção

Torque

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
P4 antec	763	760	766	764	757
Ponto 4	763	759	765	764	758
P4 atrasa	762	759	764	764	756
P10 antec	710	717	728	738	723
Ponto 10	715	716	717	694	707
P10 atrasa	665	659	666	662	654

Consumo de Combustível

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
P4 antec	100,1	98,9	100,8	99,8	101
Ponto 4	104,7	103,9	105,4	104,3	101,3
P4 atrasa	111,6	111,6	112,2	111,2	109,9
P10 antec	126,1	125,5	127,5	128,4	125,2
Ponto 10	135,1	134,6	135,8	135,8	132,3
P10 atrasa	144,5	145,3	145,7	145,1	143,4

Emissões Concentradas de CO (ppm)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
P4 antec	17,756	9,837	25,462	15,858	12,498
Ponto 4	14,858	12,597	21,212	14,793	11,769
P4 atrasa	15,778	16,085	21,294	15,258	14,207
P10 antec	34,422	15,852	49,21	29,634	23,052
Ponto 10	29,861	22,137	46,302	25,714	22,505
P10 atrasa	30,788	30,39	46,872	27,871	28,068

Emissões Concentradas de NOx (ppm)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
P4 antec	695,168	709,316	659,241	717,296	721,276
Ponto 4	488,422	459,975	471,768	501,678	494,422
P4 atrasa	292,798	267,617	291,727	311,157	301,78
P10 antec	628,373	626,278	569,692	644,564	635,622
Ponto 10	409,997	406,181	376,218	409,699	432,573
P10 atrasa	259,772	242,756	228,726	273,559	260,732

Emissões Concentradas de HC (ppm)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
P4 antec	29,951	29,574	28,753	25,291	34,285
Ponto 4	27,246	27,601	15,396	13,329	28,071
P4 atrasa	26,863	26,854	23,103	21,463	30,687
P10 antec	44,255	40,669	46,48	39,55	51,721
Ponto 10	44,33	44,064	42,038	39,86	50,515
P10 atrasa	45,257	41,775	46,408	39,737	53,501

Pressão de Entrada (bar)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	bar	bar	bar	bar	bar
P4 antec	0,92	0,93	0,9	0,95	0,9
Ponto 4	0,96	0,98	0,95	1	0,95
P4 atrasa	1,03	1,05	1	1,06	1,01
P10 antec	0,77	0,81	0,76	0,81	0,78
Ponto 10	0,81	0,84	0,78	0,82	0,8
P10 atrasa	0,83	0,86	0,8	0,83	0,82

Temperatura de Entrada (°C)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	°C	°C	°C	°C	°C
P4 antec	16,15	15,65	15,25	14,45	16,85
Ponto 4	17,55	15,95	15,15	14,25	18,55
P4 atrasa	15,95	15,65	14,75	14,05	17,15
P10 antec	15,15	14,65	15,85	14,25	16,35
Ponto 10	15,35	14,65	15,65	14,65	18,05
P10 atrasa	15,25	15,05	16,15	15,05	16,05

Temperatura de Escape (°C)

	Padrão	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
	°C	°C	°C	°C	°C
P4 antec	159	156	163	154	161
Ponto 4	161	168	171	160	159
P4 atrasa	178	178	180	173	179
P10 antec	249	248	261	255	257
Ponto 10	258	263	262	257	256
P10 atrasa	275	279	280	272	276

ANEXO “A”
MOTOR “COMMON RAIL”

DC13 147 450 Euro 6

Fonte: Scania (2014)