EWERTON CORRÊA DOS REIS XAVIER

**Influência do posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido
e usinado no resultado *swirl***

São Paulo

2017

EWERTON CORRÊA DOS REIS XAVIER

**Influência do posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido
e usinado no resultado *swirl***

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

São Paulo

2017

EWERTON CORRÊA DOS REIS XAVIER

**Influência do posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido
e usinado no resultado *swirl***

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. Marcelo Augusto Leal
Alves

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, 13 de setembro de 2017

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Xavier, Ewerton Corrêa dos Reis

Influência do posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido e usinado no resultado swirl / E. C. R. Xavier -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

154 p.

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

1.Deslocamento dos dutos de admissão do cabeçote 2.Emissão de poluentes 3.Motor diesel 4.Swirl 5.Usinagem I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Centro de Engenharia Automotiva II.t.

XAVIER, Ewerton Corrêa dos Reis. **Influência do posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido e usinado no resultado *swirl***. São Paulo. 2017. 154 p. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

Dedico este trabalho em especial à minha esposa, aos meus pais e ao meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar com muita saúde durante essa etapa de minha vida.

Aos meus pais Hécio e Ilma, ao meu irmão Jefferson e à minha esposa Aline, pois a família é a base para perseverarmos e conquistarmos nossos objetivos. É quem nos estimula, motiva a seguir em frente, mesmo quando encontramos dificuldades ou nos privamos de momentos em família para chegarmos ao objetivo final.

Agradeço também aos amigos e colegas de trabalho por proporcionar-me essa oportunidade de aprendizado e participarem direta ou indiretamente dos desafios encontrados e superados no decorrer deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Augusto Leal Alves agradeço inicialmente por aceitar-me como seu orientando e posteriormente pelos seus ensinamentos durante este trabalho de pesquisa até os seus resultados finais, com muita paciência, respeito, amizade e motivação.

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe.
Esta é provavelmente a razão pela qual tão
poucos se dedicam a ele.”

Henry Ford

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência sobre o número de *swirl* e desempenho do motor diesel a partir de cabeçotes fabricados com variação no posicionamento relativo dos dutos de admissão em duas direções perpendiculares. Inicialmente definiu-se que o valor a ser deslocado seria de 1 milímetro, e então para cada combinação entre os dutos de admissão curto e longo deveria ser fabricado um número mínimo de seis cabeçotes para posteriores ensaios em bancada com dinamômetro. Após a fundição fabricar as nove combinações definidas, sendo uma delas com os eixos em suas condições nominais, isto é, sem o deslocamento de um milímetro, obtiveram-se um total de 60 cabeçotes. Os cabeçotes foram então controlados em máquina tridimensional, usinados e montados todos os seus componentes e enviados para a medição do número de *swirl* em máquina desenvolvida especialmente para este teste. Para cada cabeçote mediu-se o número de *swirl* duas vezes, e em seguida cada uma das nove combinações foram ensaiadas no mesmo dinamômetro e avaliados os respectivos parâmetros: consumo específico de combustível, curva de torque e emissão de poluentes. Para cada combinação mediu-se a curva de torque duas vezes e mediu-se três vezes o ciclo de emissões com treze pontos (ESC). Nos resultados de *swirl*, três combinações apresentaram-se fora dos limites da tolerância, uma abaixo do mínimo da tolerância em 22,7% e as outras duas além do máximo da tolerância em respectivamente 18,2% e 17,8%. Nos resultados de dinamômetro, nenhuma combinação se apresentou fora dos limites estabelecidos para o modelo de motor ensaiado nos seguintes parâmetros: consumo específico de combustível, torque e emissões de CO, HC, MP e NOx.

Palavras-chave: Deslocamento dos dutos de admissão do cabeçote. Emissão de poluentes. Motor diesel. *Swirl*. Usinagem.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to evaluate the influence on the *swirl* number and the engine diesel performance based on cylinder heads produced with variation on relative positioning of inlet ports in two perpendicular directions. Firstly, it was defined that the value to be displaced would be 1 millimeter, and then for each combination between the short and the long inlet ports should be produced a minimum of six cylinder heads for further testing on the dynamometer. After the foundry production of the defined nine combinations, one of them having the axis in their nominal positions, i.e. without the displacement of 1 millimeter, a total of 60 cylinder heads were obtained. These cylinder heads were measured in a tridimensional machine, machined and all of their components were assembled and their *swirl* number were measured in the machine developed specially for this method. For each cylinder head the *swirl* number was measured twice and after that all nine combinations were performed at the same dynamometer and the following parameters were evaluated: fuel consumption, torque curve and pollutants emission. For each combination the torque curve was measured twice and the thirteen point's emissions cycle (ESC) was measured three times. Concerning the *swirl* results, three combinations ended up out of the tolerance limits, one of them as 22,7% below the minimum tolerance and the other two as 18,2% and 17,8% respectively over the maximum tolerance. Regarding the dynamometer results, no combination ended up out of defined tolerances for the kind of engine tested in the following parameters: fuel consumption specific, torque and emissions of CO, HC, PM and NOx.

Keywords: Displacement of the cylinder head intake ports. Pollutants emission. Diesel engine. *Swirl*. Machining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Motor Diesel de 1897	27
Figura 2.2 – Exemplo esquemático de medidor de <i>swirl</i> de fluxo constante	28
Figura 2.3 – Métodos para geração do <i>swirl</i>	29
Figura 2.4 – Percurso do fluxo de ar de admissão	30
Figura 2.5 – Diagrama esquemático de medidor de <i>swirl</i>	35
Figura 2.6 – Composição do gás de escape do diesel	38
Figura 2.7 – Ciclo ECE R49	51
Figura 2.8 – Ciclo ESC	53
Figura 2.9 – Ciclo ELR	54
Figura 2.10 – Ciclo Transiente FIGE - Velocidade do veículo	56
Figura 2.11 – Ciclo Transiente ETC - Velocidade do motor	56
Figura 2.12 – Ciclo Transiente ETC - Torque do motor	57
Figura 2.13 – Ciclo Transiente WHTC	59
Figura 2.14 – Ferramental de moldagem superior	60
Figura 2.15 – Ferramental de moldagem inferior	61
Figura 2.16 – Ferramental de macharia	62
Figura 2.17 – Macharia extraída do ferramental	62
Figura 2.18 – Machos das câmaras d'água superior e inferior	63
Figura 2.19 – Macho base	63
Figura 2.20 – Montagem da câmara inferior no macho base	64
Figura 2.21 – Montagem dos machos de admissão e escape	64
Figura 2.22 – Montagem da câmara superior	65
Figura 2.23 – Fechamento do pacote de machos	65
Figura 2.24 – Molde superior	66
Figura 2.25 – Molde inferior	66
Figura 2.26 – Pacote de machos no molde	67
Figura 2.27 – Vazamento do ferro fundido no molde	67
Figura 2.28 – Acabamento do cabeçote	68
Figura 2.29 – Controle dos cabeçotes	68
Figura 2.30 – Pontos de referência da fundição	69
Figura 2.31 – Elementos de referência da usinagem	70
Figura 2.32 – Face inferior do cabeçote	71

Figura 2.33 – Face superior do cabeçote	71
Figura 2.34 – Face esquerda do cabeçote	72
Figura 2.35 – Face de admissão do cabeçote.....	72
Figura 2.36 – Face de escape do cabeçote	73
Figura 2.37 – Usinagem dos alojamentos dos assentos e guias de válvulas.....	73
Figura 2.38 – Usinagem dos alojamentos das molas e bico injetor.....	74
Figura 2.39 – Montagem e usinagem dos assentos de válvulas	74
Figura 2.40 – Montagem e usinagem das guias de válvulas.....	75
Figura 2.41 – Montagem da luva do injetor, dos retentores e pinos.....	75
Figura 2.42 – Montagem das válvulas de admissão e escape	76
Figura 2.43 – Montagem das molas, arruelas e travas das válvulas	77
Figura 3.1 – Perfil dos dutos de admissão e localização de seus eixos X e Y	80
Figura 3.2 – Combinação 1 do deslocamento dos dutos de admissão	80
Figura 3.3 – Combinação 2 do deslocamento dos dutos de admissão	81
Figura 3.4 – Combinação 3 do deslocamento dos dutos de admissão	81
Figura 3.5 – Combinação 4 do deslocamento dos dutos de admissão	82
Figura 3.6 – Combinação 5 do deslocamento dos dutos de admissão	82
Figura 3.7 – Combinação 6 do deslocamento dos dutos de admissão	83
Figura 3.8 – Combinação 7 do deslocamento dos dutos de admissão	83
Figura 3.9 – Combinação 8 do deslocamento dos dutos de admissão	84
Figura 3.10 – Combinação Nominal (N) do deslocamento dos dutos de admissão ..	84
Figura 3.11 – Retrabalho do macho base nos diâmetros de admissão.....	85
Figura 3.12 – Colagem das tiras de papelão nos diâmetros de admissão	86
Figura 3.13 – Posicionamento dos machos de admissão para colagem.....	87
Figura 3.14 – Colagem dos machos de admissão	87
Figura 3.15 – Cabeçotes fundidos recebidos na usinagem.....	89
Figura 3.16 – Identificação dos cabeçotes fundidos antes da medição tridimensional	90
Figura 3.17 – Cabeçote fundido durante medição tridimensional.....	91
Figura 3.18 – Cabeçotes durante processo de usinagem	93
Figura 3.19 – Cabeçotes embalados para envio de medição do <i>swirl</i>	94
Figura 3.20 – Layout da máquina de medir <i>swirl</i>	95
Figura 3.21 – Cabeçote padrão para medição de <i>swirl</i>	96
Figura 3.22 – Cabeçote instrumentado para início da medição de <i>swirl</i>	98

Figura 3.23 – Condição inicial da medição de <i>swirl</i> com a máxima abertura de válvulas	99
Figura 3.24 – Condição final da medição de <i>swirl</i> com a mínima abertura de válvulas	100
Figura 3.25 – Vista lateral direita do motor no dinamômetro	103
Figura 3.26 – Vista lateral esquerda do motor no dinamômetro.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites de variação do número de <i>swirl</i> médio para cabeçotes de modelo X	36
Tabela 2.2 – Limites de variação do número de <i>swirl</i> médio para cabeçotes de modelo P	36
Tabela 2.3 – Variação do número de <i>swirl</i> médio com legislação de emissões para cabeçotes de modelo X	37
Tabela 2.4 – Variação do número de <i>swirl</i> médio com legislação de emissões para cabeçotes de modelo P	37
Tabela 2.5 – Estratégia de implantação do Proconve para veículos pesados (Fases “P”)	44
Tabela 2.6 – Normas de emissões para caminhões e ônibus a diesel.....	45
Tabela 2.7 – Normas de emissões para motores pesados a diesel e a gás (Durabilidade dos testes: 160.000 km / 5 anos)	46
Tabela 2.8 – Padrões da norma Euro para veículos pesados com motor a diesel: teste estacionário	47
Tabela 2.9 – Padrões da norma Euro para veículos pesados com motor a diesel e a gás: teste transiente	47
Tabela 2.10 – Períodos de durabilidade de emissões.....	48
Tabela 2.11 – Definição das categorias dos veículos	49
Tabela 2.12 – Ciclos de 13 modos ECE R49 e US	51
Tabela 2.13 – Ciclo de 13 modos ESC	52
Tabela 2.14 – Ciclo Estacionário WHSC.....	58
Tabela 3.1 – Quantidade de cabeçotes fundidos por combinação.....	88
Tabela 3.2 – Relação dos cabeçotes fundidos para usinagem após medição tridimensional	92
Tabela 3.3 – Especificação do motor utilizado no dinamômetro	101
Tabela 4.1 – Resultados das medições dos cabeçotes fundidos	106
Tabela 4.2 – Resultados médios das medições dos cabeçotes fundidos	107
Tabela 4.3 – Resultados relativizados das duas medições de <i>swirl</i> dos cabeçotes	109
Tabela 4.4 – Resultados médios de <i>swirl</i> relativizados para cada combinação dos cabeçotes	110
Tabela 4.5 – Resultados relativizados das duas medições de $\mu\sigma$ dos cabeçotes...	112

Tabela 4.6 – Resultados médios de $\mu\sigma$ relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	113
Tabela 4.7 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 1 ...	114
Tabela 4.8 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 2 ...	115
Tabela 4.9 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 3 ...	115
Tabela 4.10 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 4 .	116
Tabela 4.11 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 5 .	116
Tabela 4.12 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 6 .	117
Tabela 4.13 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 7 .	117
Tabela 4.14 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 8 .	118
Tabela 4.15 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação N.	118
Tabela 4.16 – Resultados de emissões do primeiro ensaio ESC relativizados	122
Tabela 4.17 – Resultados de emissões do segundo ensaio ESC relativizados	122
Tabela 4.18 – Resultados de emissões do terceiro ensaio ESC relativizados	123
Tabela 4.19 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 1	126
Tabela 4.20 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 2	126
Tabela 4.21 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 3	127
Tabela 4.22 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 4	127
Tabela 4.23 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 5	128
Tabela 4.24 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 6	128
Tabela 4.25 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 7	129
Tabela 4.26 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 8	129
Tabela 4.27 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação N	130

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Resultados médios de <i>swirl</i> relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	110
Gráfico 4.2 – Resultados de torque relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	119
Gráfico 4.3 – Resultados de consumo específico de combustível relativizados para cada combinação dos cabeçotes	120
Gráfico 4.4 – Resultados de fumaça relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	121
Gráfico 4.5 – Resultados médios de emissões CO relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	123
Gráfico 4.6 – Resultados médios de emissões NOx relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	124
Gráfico 4.7 – Resultados médios de emissões HC relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	124
Gráfico 4.8 – Resultados médios de emissões MP relativizados para cada combinação dos cabeçotes.....	125
Gráfico 4.9 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados	130
Gráfico 4.10 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados	131
Gráfico 4.11 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados	131
Gráfico 4.12 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados	132
Gráfico 4.13 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados	133
Gráfico 4.14 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados	133
Gráfico 4.15 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados	134
Gráfico 4.16 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados	134

Gráfico 4.17 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados	135
Gráfico 4.18 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados	135
Gráfico 4.19 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados	136
Gráfico 4.20 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados	136
Gráfico 4.21 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados	143
Gráfico 4.22 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados	143
Gráfico 4.23 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados	144
Gráfico 4.24 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados	144
Gráfico 4.25 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados	145
Gráfico 4.26 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados	145
Gráfico 4.27 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados	146
Gráfico 4.28 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados	146
Gráfico 4.29 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados	147
Gráfico 4.30 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados	147
Gráfico 4.31 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados	148
Gráfico 4.32 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados	148

Gráfico 4.33 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados	149
Gráfico 4.34 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados	149
Gráfico 4.35 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados	150
Gráfico 4.36 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados	150
Gráfico 4.37 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados	151
Gráfico 4.38 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados	151
Gráfico 4.39 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados	152
Gráfico 4.40 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados	152
Gráfico 4.41 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados	153
Gráfico 4.42 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados	153
Gráfico 4.43 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados	154
Gráfico 4.44 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados	154

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARLA	Agente Redutor Líquido Automotivo
CFD	Computational Fluid Dynamics ou Dinâmica dos Fluídos Computacional
CH₄	Methane ou Metano
CO	Carbon Monoxide ou Monóxido de Carbono
CO₂	Carbon Dioxide ou Dióxido de Carbono
COP	Conformity of Production ou Conformidade da Produção
CR	Common Rail
DPF	Diesel Particulate Filter ou Filtro de Partículas
ECE	Economic Commission for Europe ou Comissão Econômica para Europa
EEVs	Enhanced Environmentally friendly Vehicles ou Veículos Ecológicos Avançados
EGR	Exhaust Gas Recirculation ou Recirculação do Gás de Escape
ELR	European Load Response ou Teste de Resposta de Carga Europeu
ESC	European Stationary Cycle ou Ciclo Estacionário Europeu
ETC	European Transient Cycle ou Ciclo Transiente Europeu
FLC	Full Load Curve ou Ensaio a Plena Carga
FSN	Filter Smoke Number ou Fumaça
GTR	Global Technical Regulation ou Regulamento Técnico Global
H₂O	Fórmula Química da Água
HC	Hydrocarbons ou Hidrocarbonetos
IF	Inorganic Fraction ou Fração Inorgânica
LPG	Liquefied Petroleum Gas ou Gás Liquefeito de Petróleo
MAN	Maschinenfabrik-Augsburg-Nürnberg
MP	Particulate Matter ou Material Particulado
N₂	Nitrogen ou Nitrogênio
NG	Natural Gas ou Gás Natural
NO	Nitrogen Oxide ou Óxido de Nitrogênio
NO_x	Nitrogen Oxides ou Óxidos de Nitrogênio
NO₂	Nitrogen Dioxide ou Dióxido de Nitrogênio
O₂	Oxygen ou Oxigênio
OBD	Onboard Diagnostics ou Sistema para Autodiagnose
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior

PPM	Parts Per Million ou Partes Por Milhão
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
S10	Sulfur ou Enxofre 10 (10 ppm de enxofre no Diesel)
SCR	Selective Catalytic Reduction ou Redução Catalítica Seletiva
SO₂	Sulfur Dioxide ou Dióxido de Enxofre
SOF	Soluble Organic Fraction ou Fração Orgânica Solúvel
SR	Swirl Number ou Número de Swirl
WHDC	World-wide Harmonized Heavy-duty Certification ou Certificação Mundial de Veículos Pesados Harmonizados
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle ou Ciclo Mundial Estacionário Harmonizado
WHTC	World Harmonized Transient Cycle ou Ciclo Mundial Transiente Harmonizado
WHVC	World Harmonized Vehicle Cycle ou Ciclo Mundial Harmonizado de Veículo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	24
2	REVISÃO TEÓRICA	26
2.1	HISTÓRICO DO MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA	26
2.2	CONCEITOS DO <i>SWIRL</i>	27
2.3	MEDIÇÃO DO <i>SWIRL</i>	31
2.3.1	Propósito para medição de <i>swirl</i> de um cabeçote.....	31
2.3.2	Descrição da medição.....	31
2.3.3	Definição do valor <i>swirl</i>	32
2.3.4	Definição do valor $\mu\sigma$	34
2.3.5	Descrição do equipamento de teste	35
2.3.6	Frequência do teste.....	36
2.3.7	Tolerância de produção para número de <i>swirl</i> médio.....	36
2.4	PRINCIPAIS EMISSÕES DO MOTOR DIESEL	37
2.4.1	Monóxido de carbono (CO).....	39
2.4.2	Hidrocarbonetos (HC)	39
2.4.3	Material particulado (MP)	40
2.4.4	Óxidos de nitrogênio (NOx)	41
2.5	REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA DE EMISSÕES PARA MOTORES PESADOS.....	43
2.6	CICLOS DE TESTE DO MOTOR	49
2.6.1	Ciclo ECE R49.....	50
2.6.2	Ciclo ESC	52
2.6.3	Ciclo ELR.....	54
2.6.4	Ciclo ETC.....	55
2.6.5	Ciclo WHSC.....	57
2.6.6	Ciclo WHTC	58
2.7	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE.....	60
2.7.1	Processo de fabricação de um cabeçote fundido	60
2.7.2	Processo de fabricação de um cabeçote usinado.....	69
3	DEFINIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	78
3.1	CONTROLE DIMENSIONAL DOS CABEÇOTES FUNDIDOS.....	79

3.1.1	Combinações de deslocamentos nos dutos de admissão	79
3.1.2	Medição tridimensional dos cabeçotes fundidos	90
3.2	USINAGEM E MONTAGEM DOS CABEÇOTES FUNDIDOS PARA TESTE DE <i>SWIRL</i>	92
3.3	ENSAIO DOS CABEÇOTES EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE <i>SWIRL</i>	94
3.4	ENSAIO DOS CABEÇOTES NO DINAMÔMETRO	101
4	RESULTADOS	105
4.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS DIMENSIONAIS DOS CABEÇOTES FUNDIDOS	105
4.2	ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CABEÇOTES EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE <i>SWIRL</i>	108
4.2.1	Análise dos resultados de <i>swirl</i>	108
4.2.2	Análise dos resultados de $\mu\sigma$	111
4.3	ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CABEÇOTES EM DINAMÔMETRO	113
4.3.1	Análise dos resultados de plena carga	114
4.3.2	Análise dos resultados de emissões ESC	121
4.3.3	Análise dos resultados ponto a ponto de emissões ESC	125
5	CONCLUSÕES	138
	REFERÊNCIAS	141
	APÊNDICE A – Gráficos de consumo específico ponto a ponto	143
	APÊNDICE B – Gráficos de NOx ponto a ponto	147
	APÊNDICE C – Gráficos de FSN ponto a ponto	151

1 INTRODUÇÃO

Com o constante avanço da tecnologia de motores para a redução dos níveis de emissões, torna-se fundamental na indústria automobilística conhecer e estudar os fenômenos que influenciam em um melhor desempenho e menores índices de emissões de poluentes no motor.

Um dos importantes fatores para o adequado funcionamento de um motor diesel está relacionado ao fenômeno *swirl* que ocorre no cabeçote e no interior da camisa do cilindro. Esta turbulência é gerada a partir do fluxo de ar que passa pelos dutos de admissão. Um alto índice *swirl* aumenta a formação da mistura ar-combustível, acelera a combustão e reduz as emissões de material particulado no escape. E um baixo índice *swirl* aumenta os níveis de emissões dos óxidos de nitrogênio devido à alta temperatura de combustão.

A geometria dos dutos de admissão do cabeçote e a de seus componentes, como assentos de válvulas e válvulas, propiciam direta influência no resultado final do *swirl*. Outros fatores como as variações dos processos de fundição ou de usinagem do cabeçote também contribuem para o resultado do *swirl*. A partir da compreensão desses fatores irá criar-se um melhor controle para o funcionamento do motor de acordo com a tecnologia atual e a possibilidade de contribuição no desenvolvimento de plataformas futuras.

Através da criação de um projeto de parceria entre uma empresa automobilística e a Universidade de São Paulo (USP), onde doze funcionários tornaram-se alunos do curso de mestrado profissional da universidade e cada um deles escolheu um tema de pesquisa diferente para o mesmo assunto principal, o *swirl*. Além disso, nesta parceria seria desenvolvida uma nova máquina de medição do efeito *swirl* do cabeçote.

A proposta de estudo deste trabalho consiste na avaliação da influência de posicionamento dos dutos de admissão de um cabeçote fundido e usinado no resultado *swirl* e, conseqüentemente, ao funcionamento final do motor em relação ao consumo específico de combustível, ao torque e às emissões de poluentes: Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Material Particulado (MP) e Óxidos de Nitrogênio (NOx).

1.1 OBJETIVOS

A motivação para a escolha do tema de pesquisa deste trabalho desencadeou-se da ideia de trabalhar em um problema que estivesse relacionado ao processo de usinagem de cabeçotes, pois percebeu-se que em algumas peças, após a usinagem dos assentos de válvulas de admissão, o posicionamento entre os diâmetros de admissão oriundos da fundição e de seus assentos de válvulas usinados fica excêntrico, observando-se um pequeno ressalto. Acredita-se que esse ressalto causa maior variação no resultado final do *swirl*, diferentemente de quando este posicionamento fica mais próximo da condição ideal de desenho, concêntrico.

O objetivo geral deste trabalho é compreender a influência gerada no resultado do *swirl* a partir das diferentes variações de posicionamento nos eixos X e Y entre os dutos de admissão do cabeçote fundido conhecido como modelo X e de seus assentos de válvulas usinados.

Esse tipo de cabeçote possui o sistema de injeção *Common Rail (CR)*, com uma bomba injetora de alta pressão separada. Com isso, a pressão de injeção torna-se independente da rotação e quantidade de combustível injetado, e o controle da injeção torna-se mais preciso.

Como parte do objetivo geral, têm-se os objetivos específicos conforme ordem cronológica apresentada:

- Pesquisar os conceitos básicos do *swirl*, preferencialmente para motores de combustão a diesel;
- Definir os testes a serem fabricados pela fundição;
- Realizar o controle dimensional dos cabeçotes fundidos;
- Analisar os resultados do controle dimensional dos cabeçotes fundidos;
- Realizar a usinagem dos cabeçotes fundidos até a condição para medição do *swirl*, isto é, montagem e usinagem dos assentos de válvulas e montagem das válvulas;
- Realizar a medição de *swirl* dos cabeçotes usinados;
- Analisar os resultados da medição de *swirl* dos cabeçotes usinados;
- Realizar os ensaios das combinações de cabeçotes no motor seis cilindros em bancada de dinamômetro;

- Avaliar o impacto gerado para o funcionamento do motor dentre as diversas combinações de deslocamento no posicionamento dos dutos de admissão.

Acredita-se que o presente estudo contribuirá em princípio para um melhor entendimento do fenômeno *swirl* e, a partir das variações geométricas de posicionamento nos dutos de admissão dos cabeçotes fundidos, objetiva-se compreender qual a influência que essas variações ocasionarão no resultado do *swirl* quando forem montados e usinados os assentos de válvulas. Uma vez que estes impactos são conhecidos, torna-se possível minimizá-los ou controlá-los, de forma a estabelecer melhores resultados de desempenho e emissões do motor, além de auxiliar no desenvolvimento de futuros modelos de cabeçotes.

Além deste estudo, desenvolveram-se outros trabalhos com este mesmo tema principal de pesquisa, o *swirl*. Por exemplo, o trabalho de Souza (2016) utilizou um modelo de cabeçote diferente do modelo deste trabalho, porém criaram-se também combinações de deslocamentos nos dutos de admissão para entendimento de seus efeitos ao resultado *swirl* e ao desempenho do motor. Já o trabalho de Silva (2016) utilizou o mesmo modelo de cabeçote deste trabalho, porém seu estudo foi desenvolvido por simulação *Computational Fluid Dynamics* ou Dinâmica dos Fluídos Computacional (CFD). Portanto, este presente estudo demonstrará os resultados práticos de algumas simulações demonstradas por Silva (2016) e comparará se há similaridade com os resultados encontrados por Souza (2016) em outro modelo de cabeçote.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DO MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA

Heywood (1988) afirma em seu livro que o alemão J. J. E. Lenoir (1822-1900) desenvolveu na década de 1860 os primeiros motores a combustão interna comercializados. Esse motor utilizava a queima da mistura do ar e gás de carvão na pressão atmosférica e não havia compressão antes da combustão. O gás e o ar entravam no cilindro durante a primeira metade do curso do pistão. Essa carga entrava em ignição por uma centelha, a pressão no cilindro então aumentava e os gases queimados eram transformados em energia para o pistão na segunda metade do curso. O ciclo era completado com um curso de exaustão.

Em 1867, Nicolaus A. Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) desenvolveram um motor que utilizava alta pressão resultante da combustão da taxa de combustível-ar no final do curso para acelerar um pistão livre, gerando um vácuo no cilindro.

Porém, em 1876, Otto propôs um motor com ciclo de quatro tempos no pistão. O primeiro era curso de admissão, depois um curso de compressão antes da ignição, então um curso de expansão, no qual o trabalho era entregue ao virabrequim, e por último, um curso de exaustão. Este projeto obteve grande redução no peso e volume do motor e foi considerado como a invenção mais moderna para motores de combustão interna por centelha.

Em 1892, o engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913) desenvolveu um novo conceito de motor de combustão interna, no qual a combustão iniciava pelo combustível injetado no ar quente e a queima era gerada por compressão exclusivamente, conseguindo assim mais eficiência, maiores taxas de expansões e sem detonação ou batidas. No entanto, somente cinco anos depois, em 17 de fevereiro de 1897, Diesel em parceria com a *Maschinenfabrik-Augsburg-Nürnberg* (MAN) conseguiu aplicar melhorias e desenvolver um motor, conforme ilustrado na Figura 2.1, que teve seus testes bem-sucedidos, com eficiência de 26,2%, contra os motores populares da época que apresentavam cerca de 10%.

Figura 2.1 – Motor Diesel de 1897

Fonte: Dieselnets (2016)

2.2 CONCEITOS DO SWIRL

Segundo Heywood (1988), o *swirl* é geralmente definido como a rotação organizada da carga sobre o eixo do cilindro. É criado ao carregar o fluxo de admissão para dentro do cilindro com um momento angular inicial. É utilizado em motores diesel e em alguns conceitos de motores de carga estratificada para promover uma mistura mais rápida entre a carga de ar introduzida e o combustível injetado, ou para acelerar o processo de combustão em motores de ignição por centelha.

A Figura 2.2 demonstra um exemplo esquemático de um medidor de *swirl* de fluxo constante, segundo Heywood (1988).

Figura 2.2 – Exemplo esquemático de medidor de *swirl* de fluxo constante

Fonte: Adaptado de Heywood (1988)

Para Pulkrabek (2004), *swirl* é um movimento rotacional do principal movimento de massa dentro do cilindro. É gerado por meio da construção do sistema de admissão para proporcionar uma componente tangencial para o fluxo de entrada no cilindro. Isso é feito por meio da formulação e do contorno do coletor de admissão, das portas de válvulas, e às vezes até mesmo da face do pistão. O *swirl* aumenta a mistura de ar-combustível, produzindo uma mistura homogênea em um curto tempo disponível nos motores modernos de alta velocidade. É também um

mecanismo principal para a rápida propagação da frente da chama durante o processo de combustão.

A Figura 2.3 demonstra: (a) o movimento *swirl* dentro do cilindro do motor, (b) os métodos para gerá-lo como a entrada de ar do cilindro em direção tangencial, (c) duto de admissão com contornos e (d) contornos nas portas das válvulas.

Figura 2.3 – Métodos para geração do *swirl*

Fonte: Adaptado de Pulkrabek (2004)

A Figura 2.4 mostra o percurso do fluxo de ar de admissão em um motor de ignição por centelha.

Figura 2.4 – Percurso do fluxo de ar de admissão

Fonte: Adaptado de Pulkrabek (2004)

Segundo Pulkrabek (2004), uma das maneiras que o número de *swirl* pode ser quantificado na literatura técnica é:

$$SR = \frac{\omega}{n} \quad (1)$$

Onde:

SR = número de *swirl*

ω = velocidade angular do ar de admissão (rad/s)

n = rotação do motor por minuto (rpm)

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

Segundo Heisler (2002), *swirl* é o fluxo rotacional da carga de ar dentro do cilindro sobre o seu eixo. O *swirl* na indução é conseguido pelo posicionamento do pórtico de admissão para um lado do eixo do cilindro. Heisler afirma ainda que o *swirl* é gerado no interior do pórtico, acima da sede da válvula e sobre o seu eixo, antes do ar ser descarregado para dentro do cilindro. A taxa do fluxo no pórtico de indução é guiada pelas paredes de passagem, que carregam o fluxo, em forma de espiral acima da sede da válvula. Portanto, quando ele é ejetado no cilindro, terá adquirido um movimento rotacional, que continuará conforme estabelecido no cilindro durante o movimento do pistão para além do ponto morto superior.

2.3 MEDIÇÃO DO SWIRL

2.3.1 Propósito para medição de *swirl* de um cabeçote

Além do *swirl* ser um complemento às especificações de desenho do cabeçote, o contínuo controle de seus níveis tem o propósito de detectar o desgaste do ferramental da fundição e dos dispositivos de posicionamento da usinagem. Também afirma que o nível de *swirl* tem uma grande influência sobre o consumo de combustível e das emissões, e por isso é um importante parâmetro para a certificação do motor.

2.3.2 Descrição da medição

Quando o *swirl* é medido, o ar é aspirado através dos dutos de admissão para o interior de uma camisa de cilindro. Esta camisa deve ter as mesmas dimensões que a camisa do cilindro original do motor. No interior da camisa do cilindro, o movimento rotativo do ar é medido através de uma colmeia integrada com um medidor de torque. O sinal do torque é então recalculado para um número de *swirl*.

2.3.3 Definição do valor *swirl*

A definição do número de *swirl* pode variar de acordo com a literatura consultada. Neste trabalho o método de calculado utilizado é similar a referência encontrada no trabalho de (OTTOSSON e HOLMBERG, 2011), onde a razão do número de *swirl*, N , é definida como:

$$N = \frac{n_D}{n} \quad (2)$$

Onde:

n_D = velocidade de rotação do ar;

n = velocidade teórica do motor.

A densidade do ar na saída dos dutos de admissão do cabeçote, ρ_s , pode ser calculada através da equação:

$$\rho_s = \frac{p_e}{R * T} * \left(\frac{p_s}{p_e} \right)^{\frac{1}{k_{ar}}} \quad (3)$$

Onde:

p_e = pressão de entrada do ar;

R = constante específica do ar;

T = temperatura no tanque ou *plenum* do equipamento de medição de *swirl*;

p_s = pressão de saída do ar;

k_{ar} = coeficiente de compressão isentrópica do ar.

O cálculo da vazão em massa do ar na saída dos dutos de admissão do cabeçote, Q_m , é definida como:

$$Q_m = Q_v * \rho_s \quad (4)$$

Onde:

Q_v = vazão em volume do ar.

Assim, a razão do número de *swirl* para cada abertura das válvulas de admissão do cabeçote pode ser definida pela equação:

$$N = \frac{2 * M * S * \rho_s}{Q_m^2} \quad (5)$$

Onde:

M = torque resultante pela passagem do ar na colmeia do equipamento de medição de *swirl*;

S = curso do pistão.

A equação da relação entre a velocidade instantânea do pistão e sua velocidade média, $\frac{c(\alpha)}{c_m}$, é definida como:

$$\frac{c(\alpha)}{c_m} = \frac{\pi}{2} * \left[1 + \frac{\lambda * \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \lambda^2 * \sin^2(\alpha)}} \right] * \sin(\alpha) \quad (6)$$

Sendo:

α = o ângulo do virabrequim;

λ = a razão entre o curso do pistão (S) e o comprimento da biela (L), conforme equação:

$$\lambda = \frac{S * 0,5}{L} \quad (7)$$

Assim, podemos também expressar a equação (6) como:

$$\frac{c(\alpha)}{c_m} = \frac{\pi}{2} * \left[1 + \frac{\left(\frac{S*0,5}{L}\right) * \cos(\alpha)}{\sqrt{1 - \left(\frac{S*0,5}{L}\right)^2 * \sin^2(\alpha)}} \right] * \sin(\alpha) \quad (8)$$

Então, a razão do número de *swirl* médio pode ser definida como:

$$N_m = \frac{1}{\pi} * \int_0^\pi N(\alpha) * \left(\frac{c(\alpha)}{c_m}\right)^2 * d\alpha \quad (9)$$

Onde:

N_m = razão do número de *swirl* médio;

$N(\alpha)$ = razão do número de *swirl* para cada abertura de válvulas de admissão corresponde à posição (α) do virabrequim.

A integral definida na equação (9) corresponde ao intervalo no qual o pistão do motor encontra-se no ponto morto superior ou PMS durante o ciclo de admissão

e encerra-se quando o pistão atinge o ponto morto inferior ou PMI em seu ciclo de admissão.

2.3.4 Definição do valor $\mu\sigma$

O coeficiente $\mu\sigma$ pode ser compreendido como a razão entre a vazão em massa do ar medida e a vazão em massa do ar teórica, para uma redução de pressão de 250mmH₂O ao longo dos dutos de admissão.

$$\mu\sigma = \frac{Q_m}{Q_{mt}} \quad (10)$$

Onde:

$\mu\sigma$ = coeficiente de descarga referente a área projetada das válvulas de admissão do cabeçote;

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

A vazão em massa do ar teórica pode ser definida através da equação:

$$Q_{mt} = z * \frac{\pi * d^2}{4} * \rho * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho}} \quad (11)$$

Onde:

z = número de válvulas de admissão do cabeçote;

d = diâmetro dos assentos de válvulas de admissão do cabeçote;

ρ = densidade média do ar durante o escoamento;

Δp = redução de pressão imposta.

Assim, pode-se calcular o coeficiente de descarga médio ($\mu\sigma_m$), referente ao tempo de admissão do motor, através da equação:

$$\mu\sigma_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\pi} * \int_0^\pi \left(\frac{c(\alpha)}{c_m}\right)^3 * \frac{1}{(\mu\sigma(\alpha))^2} * d\alpha}} \quad (12)$$

2.3.5 Descrição do equipamento de teste

O banco de teste para *swirl* foi projetado para ser utilizado para dutos de admissão ou escape. No teste dos dutos de admissão, o ar é aspirado para dentro da camisa do cilindro através dos dutos de admissão e para tornar isso possível, uma válvula direcional é montada entre o ventilador e o tambor dois, conforme ilustra a Figura 2.5. Durante o teste, é importante que uma peça de aresta arredondada seja montada na entrada dos dutos, para permitir uma entrada suave do fluxo de ar dentro do cilindro. Se esta aresta não for montada, pode haver uma influência significativa sobre o torque medido e a taxa do fluxo de ar.

A Figura 2.5 apresenta um diagrama esquemático de um equipamento de medição de *swirl*, similar ao equipamento que será utilizado neste trabalho.

Figura 2.5 – Diagrama esquemático de medidor de *swirl*

Fonte: Autor (2017)

2.3.6 Frequência do teste

Os testes da produção são amostrais e feitos a cada vinte e cinco mil cabeçotes produzidos. A amostra do ensaio deve conter dez cabeçotes e abranger as diferentes combinações entre as cavidades do ferramental da fundição.

Para uma aprovação de um novo ferramental de produção, a amostra definida é de vinte e cinco cabeçotes e estes devem estar aprovados conforme as tolerâncias de *swirl* definidas em desenho e demonstradas a seguir.

2.3.7 Tolerância de produção para número de *swirl* médio

Os cabeçotes de produção são testados conforme o procedimento apresentado e devem cumprir os seguintes limites de variação no número de *swirl* médio:

Tabela 2.1 – Limites de variação do número de *swirl* médio para cabeçotes de modelo X

Valor mínimo	Valor nominal	Valor máximo
N-0,2	N	N+0,2

Fonte: Autor (2017)

Tabela 2.2 – Limites de variação do número de *swirl* médio para cabeçotes de modelo P

Valor mínimo	Valor nominal	Valor máximo
N-0,35	N	N+0,35

Fonte: Autor (2017)

O valor nominal (N) na Tabela 2.1 e na Tabela 2.2 varia de acordo com a legislação de emissão utilizada. O modelo de cabeçote utilizado neste trabalho é o X e sua legislação para o número de *swirl* é a Euro 6, com a faixa de emissão (A).

A Tabela 2.3 e a Tabela 2.4 demonstram, para os diferentes níveis de emissões, os valores nominais relativizados, considerando o valor N da legislação deste trabalho como referência (R).

Tabela 2.3 – Variação do número de *swirl* médio com legislação de emissões para cabeçotes de modelo X

Nível de emissão	Valor nominal (N)
Euro 5	R+0,4
Euro 6 (B)	R+0,4
Euro 6 (A)	R
Euro 4-6	R-0,4

Fonte: Autor (2017)

Tabela 2.4 – Variação do número de *swirl* médio com legislação de emissões para cabeçotes de modelo P

Nível de emissão	Valor nominal (N)
Euro 3	R+0,4

Fonte: Autor (2017)

2.4 PRINCIPAIS EMISSÕES DO MOTOR DIESEL

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição dos principais elementos das emissões do motor diesel, com ênfase aos elementos pertinentes a este trabalho.

Conforme Bosch (2005), o motor diesel é um motor de autoignição que utiliza mistura de ar e combustível. O ar é altamente comprimido no interior da câmara de combustão, fazendo com que o combustível inflame espontaneamente quando é injetado dentro do cilindro. Portanto, o motor diesel usa calor para liberar energia química contida no combustível e para convertê-la em força mecânica.

Segundo Prasad e Bella (2010), assim como a maioria dos combustíveis fósseis, o diesel possui carbono e hidrogênio em sua origem. Em um equilíbrio termodinâmico ideal, a combustão completa do diesel deveria gerar na câmara de combustão somente CO₂ e H₂O. Entretanto, alguns fatores como a proporção entre ar-combustível, a sincronização da ignição, a turbulência na câmara de combustão, a forma da combustão, a concentração de ar-combustível, a temperatura de combustão, faz com que um número de substâncias nocivas seja gerado durante a combustão. As substâncias nocivas mais significativas que estão regulamentadas de acordo com a resolução vigente, denominada Programa de Controle de Poluição do

Ar por Veículos Automotores (Proconve), fase P7, relacionada com a norma europeia Euro V são:

- *Carbon Monoxide* ou Monóxido de Carbono (CO);
- *Hydrocarbons* ou Hidrocarbonetos (HC);
- *Particulate Matter* ou Material Particulado (MP);
- *Nitrogen Oxides* ou Óxidos de Nitrogênio (NOx).

Conforme Majewski (2006), a Figura 2.6 demonstra a composição aproximada do gás de escape do diesel. As emissões de poluentes de escape compõem uma taxa menor que 1% dos gases de escape. O NOx tem a maior proporção entre os emissores poluentes, com uma taxa de mais de 50%. MP possui a segunda maior proporção, seguido do CO e HC, os quais possuem baixa concentração. Dependendo das especificações e da qualidade do diesel, pode-se ter também uma pequena proporção de SO₂, produzida por sulfetos presentes no combustível.

Figura 2.6 – Composição do gás de escape do diesel

Fonte: Adaptado de Majewski (2006)

2.4.1 Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono resulta da combustão incompleta, na qual o processo de oxidação não ocorre completamente. Este processo é altamente dependente da mistura ar-combustível e torna-se mais alto quando o valor de λ é inferior a 1,0, que é classificada como uma mistura rica e pode ser causada especialmente no momento da partida e aceleração instantânea do motor, onde são necessárias as misturas ricas. Devido à deficiência do ar e a concentração do reagente, nas misturas ricas o carbono não pode converter-se em CO_2 . Segundo Faiz et al. (1996), embora o CO seja produzido durante as misturas ricas, uma pequena quantidade de CO também pode ser gerada através de misturas pobres devido a efeitos de cinética química.

Segundo Demers e Walters (1999), como o motor diesel possui uma relação de ar-combustível alta ($\lambda > 1$), então a formação de CO é mínima. No entanto, o CO é produzido se as gotas de combustível forem muito grandes ou se a turbulência ou *swirl* for insuficiente na câmara de combustão.

Segundo Kampa e Castanas (2008), o monóxido de carbono é um gás inodoro e incolor. Nos seres humanos, o CO no ar é inalado pelos pulmões e transmitido para a corrente sanguínea, ligando-se à hemoglobina e inibindo a capacidade de transferir oxigênio. Dependendo da concentração de CO no ar, pode resultar em dificuldade de concentração, reflexos lentos e até conduzir para asfixia.

2.4.2 Hidrocarbonetos (HC)

Segundo Demers e Walters (1999), os hidrocarbonetos são compostos de combustíveis não queimados, como resultado da temperatura insuficiente que ocorre próximo à parede do cilindro, onde a temperatura da mistura ar-combustível é significativamente menor do que no centro do cilindro. Os hidrocarbonetos consistem em milhares de espécies, tais como alcanos, alcenos, aromáticos, e são normalmente expressos em termos de teor de CH_4 equivalente.

Segundo Zheng et al. (2008), o motor diesel normalmente emite baixos níveis de hidrocarbonetos. Porém, tais emissões ocorrem principalmente em cargas

leves e sua principal fonte é a mistura pobre de ar-combustível. Nas misturas pobres, a velocidade da chama pode ser muito baixa para a combustão ser completada ou ela pode não ocorrer.

Segundo Payri et al. (2009), no motor diesel, o tipo de combustível, ajustes de motor, e o design afetam o teor de hidrocarbonetos. Além disso, as emissões de HC nos gases de escape dependem das condições operacionais irregulares. Altos níveis de mudança instantânea da velocidade do motor, injeção desordenada, excessivas cavidades no injetor e ressaltos na agulha do injetor podem causar quantidades significativas de combustível não queimado para o escape.

Segundo Faiz et al. (1996), os hidrocarbonetos não queimados continuam a reagir no escape se a temperatura for superior a 600°C e tiver oxigênio presente, então as emissões de hidrocarbonetos no tubo do escape podem ser significativamente menores do que as que saem do cilindro. Tais emissões podem ocorrer também no cárter do motor, no sistema de combustível e dos vapores atmosféricos durante a distribuição e injeção do combustível.

Segundo Diaz-Sanchez (1997), os hidrocarbonetos têm efeitos nocivos sobre o meio ambiente e a saúde humana. Juntamente com outras emissões poluentes, eles desempenham um papel significativo na formação da camada de ozônio, sendo os veículos responsáveis por cerca de 50% das emissões que formam a camada de ozônio. Hidrocarbonetos são tóxicos, com potencial de irritação das vias respiratórias e causam câncer.

2.4.3 Material particulado (MP)

Segundo Demers e Walters (1999), as emissões de material particulado no gás de escape resultam do processo de combustão. Elas podem ser originadas a partir da aglomeração de pequenas partículas de combustível ou de óleo lubrificante parcialmente queimado, do teor de cinzas de óleo combustível, óleo lubrificante do cilindro ou sulfatos e água.

Segundo Agarwal (2006), a maioria do material particulado é resultado da combustão incompleta dos hidrocarbonetos no combustível ou no óleo lubrificante. Relata-se que o MP consiste de carbono elementar (~31%), sulfatos e umidade (~14%), combustível não queimado (~7%), óleo lubrificante não queimado (~40%) e o restante podem ser metais ou outras substâncias.

Segundo Tighe et al. (2012), os materiais particulados do diesel são normalmente esferas com cerca de 15 a 40nm no diâmetro, e aproximadamente 90% dos MP é menor do que 1µm no diâmetro. O processo de formação do MP depende de vários fatores como o processo de combustão e expansão, a qualidade do combustível e do óleo lubrificante, do consumo, da temperatura de combustão, do arrefecimento dos gases de escape. As emissões dos materiais particulados do motor diesel são consideravelmente maiores do que do motor a gasolina (seis a dez vezes). As partículas podem ser divididas em três componentes principais: fuligem, *Soluble Organic Fraction* ou Fração Orgânica Solúvel (SOF) e *Inorganic Fraction* ou Fração Inorgânica (IF). Mais de 50% do total das emissões do MP é fuligem que é entendida como fumaça. A SOF consiste em hidrocarbonetos pesados absorvidos ou condensados na fuligem e são derivados parcialmente de óleo lubrificante, de combustível não queimado e de componentes formados durante a combustão. Os valores da SOF são altos em cargas leves, quando as temperaturas de escape são baixas.

Segundo Englert (2004), pesquisas são realizadas para detectar o impacto das emissões do MP no meio ambiente e na saúde humana. Segundo elas, a inalação dessas partículas pode causar importantes problemas de saúde como morte prematura, asma, câncer pulmonar ou outros problemas cardiovasculares. Estas emissões contribuem para a poluição do ar, da água e do solo, na redução da visibilidade, na produtividade da agricultura e na mudança climática global.

2.4.4 Óxidos de nitrogênio (NOx)

O motor diesel utiliza ar quente altamente comprimido para inflamar o combustível. O ar, composto principalmente de oxigênio e nitrogênio é inicialmente direcionado para a câmara de combustão. Em seguida, ele é comprimido e o combustível é injetado na câmara de combustão próximo ao final do curso de compressão e então o combustível é queimado e o calor liberado. Normalmente, neste processo o nitrogênio do ar não reage com o oxigênio da câmara de combustão e ele é produzido de forma idêntica para fora do motor. Entretanto, temperaturas maiores que 1600°C nos cilindros fazem com que o nitrogênio reaja com o oxigênio formando emissões de NOx. Portanto, as principais influências de formação de NOx são a temperatura e a concentração de oxigênio na combustão.

Segundo Bosch (2005), a maioria das emissões de NOx é formada durante o processo de combustão, quando o pistão ainda está perto do topo do curso, isto é, quando a temperatura da chama é a mais alta. Com o aumento da temperatura de combustão, aumenta a quantidade de NOx três vezes mais para cada 100°C aumentado.

Segundo Hoekman e Robbins (2012), os óxidos de nitrogênio são referenciados como óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). NO constitui 85 a 90% dos NOx e ele é gradualmente convertido em NO₂ no ar atmosférico. Enquanto NO e NO₂ são agrupados como NOx, existem algumas diferenças entre esses dois poluentes. NO é um gás incolor e inodoro, enquanto NO₂ é um gás marrom avermelhado, com odor pungente.

Segundo Lee et al. (2013), o transporte rodoviário é a causa mais importante das emissões urbanas de NOx e mundialmente contribuem para 40-70% do NOx. Entre os diversos tipos de veículos, os veículos a diesel são os que contribuem mais para as emissões de NOx, pois necessitam de temperaturas mais altas por serem motores de ignição por compressão. Eles são responsáveis por cerca de 85% de todas as emissões de NOx provenientes de fontes móveis, principalmente na forma de NO.

Segundo Kagawa (2002), as emissões de NOx contribuem para a acidificação, formação de ozônio, o enriquecimento de nutrientes e formação de fumaça, as quais tornaram-se problema considerável na maioria das grandes cidades do mundo. Na atmosfera, as emissões de NOx reagem quimicamente com outros poluentes para formar o ozônio troposférico, principal componente da fumaça fotoquímica e outros poluentes tóxicos. O NO e NO₂ são considerados tóxicos, porém, o NO₂ tem um nível de toxicidade cinco vezes maior do que o NO e é também uma preocupação direta de doença pulmonar. O dióxido de nitrogênio pode irritar os pulmões e causar menor resistência a infecção respiratória, como a *influenza*. As emissões de NOx são importantes precursores para a chuva ácida, que pode afetar os ecossistemas terrestres e aquáticos.

2.5 REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA DE EMISSÕES PARA MOTORES PESADOS

No Brasil, a regulamentação adotada para controle das emissões de veículos automotores foi denominada Proconve, e tendo como referência a regulamentação europeia Euro, que também adotou níveis de controle por fases, estes cada vez mais rigorosos. Neste capítulo serão abordadas as normas aplicáveis aos veículos pesados, sendo estes ônibus e caminhões projetados para o transporte de passageiros e/ou de cargas, com massa total máxima maior que 3856kg, ou massa do veículo em ordem de marcha maior que 2720kg, caracterizados como fase P.

O controle de fumaça ou, indiretamente, o controle de material particulado (MP) começou em 1987 com a adoção ao limite de opacidade ($k > 2,5$) ao longo de toda curva de torque máximo dos motores diesel. Conforme ilustrado na Tabela 2.5, os padrões de emissões foram aprovados pelas fases:

- Proconve P1: normas voluntárias foram estabelecidas em 1990, seguidas por normas obrigatórias em 1993 (P2), em 1994 (P3) e em 1998 (P4). Estas normas também foram aplicadas para motores utilizados em caminhões leves.
- Proconve P5: com base nos padrões da norma Euro 3 e incluído o teste transiente, foi gradualmente estabelecida durante 2004 a 2006.
- Proconve P6: com base nos padrões da norma Euro 4, foi programada para entrar em vigor a partir de 2009. No entanto, pelo combustível diesel com menor teor de enxofre não estar disponível, a fase P5 manteve-se em vigor até o final do ano de 2011.
- Proconve P7: com base na Resolução Conama 403/2008, a fase P7 foi aprovada em 2008, porém entrou em vigor a partir de 1º de janeiro de 2012. Essa fase introduziu o diesel com teor de 10 ppm de enxofre.

Tabela 2.5 – Estratégia de implantação do Proconve para veículos pesados (Fases “P”)

Fase	Implantação	Característica / inovação
Fase P1 e P2	1990-1993	Já em 1990 estavam sendo produzidos motores com níveis de emissão menores que aqueles que seriam requeridos em 1993 (ano em que teve início o controle de emissão para veículos deste tipo com a introdução das fases P1 e P2). Neste período, os limites para emissão gasosa (fase P1) e material particulado (fase P2) não foram exigidos legalmente.
Fase P3	1994- 1997	O desenvolvimento de novos modelos de motores visou a redução do consumo de combustível, aumento da potência e redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) por meio da adoção de <i>intercooler</i> e motores turbo. Nesta fase se deu uma redução drástica das emissões de CO (43%) e HC (50%).
Fase P4	1998 – 2002	Reduziu ainda mais os limites criados pela fase P3.
Fase P5	2003 - 2008	Teve como objetivo a redução de emissões de material particulado, NO e HC.
Fase P6	2009 – 2011	Assim como a fase P5, a fase P6, estabelecida pela Resolução CONAMA nº 315/2002, teve como objetivo principal a redução de emissões de material particulado, NOx e HC.
Fase P7	A partir de 2012	Além de reduzir o limite para emissão de NOx, a fase P7 estabeleceu a obrigatoriedade de incorporação de dispositivos ou sistemas para <i>Onboard Diagnostics</i> ou Autodiagnose (OBD). Outra melhoria expressiva advinda dessa fase é relacionada à qualidade dos combustíveis, cujo teor de enxofre foi estabelecido em no máximo 10 ppm. Em termos de novas tecnologias para redução das emissões, destaca-se a <i>Exhaust Gas Recirculation</i> ou Recirculação dos Gases de Escape (EGR) associado ao <i>Diesel Particulate Filter</i> ou Filtro de Partículas (DPF) e o <i>Selective Catalytic Reduction</i> ou Catalisador de Redução Seletiva (SCR), que associado ao Agente Redutor Líquido Automotivo (Arla 32), um insumo a base de ureia, é capaz de reduzir o NOx.

As tabelas a seguir contêm um resumo dos níveis de emissões regulamentados pelas fases do Proconve e da norma europeia Euro para veículos pesados a diesel e suas respectivas datas de introdução.

A Tabela 2.6 está relacionada às normas de emissões do período de 1993 até 2005 para motores de ônibus e caminhões, incluindo aqueles utilizados em caminhões leves, certificados em um banco de motores (ciclo de teste ECE R-49).

Tabela 2.6 – Normas de emissões para caminhões e ônibus a diesel

Fase	Ano		CO	HC	NOx	MP	Norma Referência
	Ônibus	Todos					
			g/kWh				
P1	1990 ⁺		14,0	3,50	18,0	-	-
P2	1993		11,2	2,45	14,4	-	Euro 0
P3	1994	1996	4,9	1,23	9,0	0,4 ^a	Euro 1 [*]
P4	1998	2000	4,0	1,1	7,0	0,15 ^b	Euro 2

⁺ - normas voluntárias

^{*} - limite de conformidade de produção

^a - multiplicar pelo fator de 1,7 para motores abaixo de 85 kW

^b - 0,25 g/kWh para motores até 0,7 litros, velocidade nominal acima de 3000 rpm

⁺ - normas voluntárias

^{*} - limite de conformidade de produção

^a - multiplicar pelo fator de 1,7 para motores abaixo de 85 kW

^b - 0,25 g/kWh para motores até 0,7 litros, velocidade nominal acima de 3000 rpm

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

A Tabela 2.7 está relacionada às normas de emissões do período de 2006 em diante para motores pesados a diesel e a gás. Motores a diesel podem ser testados em ambos os testes (ESC e ETC), enquanto motores a gás são testados somente no teste ETC.

Tabela 2.7 – Normas de emissões para motores pesados a diesel e a gás (Durabilidade dos testes: 160.000 km / 5 anos)

Fase	Data	Teste	CO	HC	NMHC	NOx	MP ⁺	Fumaça
			g/kWh					1/m
P5	1.1.2006 ^{1,2,3}	ESC/ELR	2,1	0,66	-	5,0	0,10 ou 0,13 ⁵	0,8
		ETC ⁴	5,45	-	0,78	5,0	0,16 ou 0,21 ⁵	-
P6	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	-
P7	1.1.2012	ESC/ELR	1,5	0,46	-	2,0	0,02	0,5
		ETC	4,0	-	0,55	2,0	0,03	-

⁺ Aplicável somente para motores diesel

(1) 1.1.2004 para ônibus urbanos ou 60% da produção anual de ônibus urbanos (100% pelo 01/01/2005); neste caso, os fabricantes devem produzir pelo menos 60% da produção anual de acordo com Proconve P5 para ônibus pesados não urbanos

(2) 1.1.2005 para micro-ônibus

(3) 1.1.2005 40% da produção/ano de pesados (exceto ônibus urbano e micro-ônibus) por fabricante

(4) veículos diesel sem catalisador ou filtro particulado pode ser testado apenas pelo teste ESC

(5) Para motores com cilindrada menor que 0,75 dm³ por cilindro e uma velocidade nominal acima de 3000 rpm

(6) Normas Proconve P6 nunca foi exigida devido ao diesel com menor teor de enxofre não estava disponível, então a fase P5 permaneceu em vigor até o final de 2011

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Existem dois tipos de padrões de emissões para o motor diesel, com diferentes tipos de requisitos de testes para cada um deles. O teste de motor estacionário é aplicável somente em motor diesel com ignição por compressão, conforme Tabela 2.8. Já o teste de motor transiente, pode ser aplicável em motores diesel ou gás com ignição positiva, conforme Tabela 2.9.

Tabela 2.8 – Padrões da norma Euro para veículos pesados com motor a diesel: teste estacionário

Nível	Data	Teste	CO	HC	NOx	MP	PN	Fumaça
			g/kWh			1/kWh		1/m
Euro 1	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,61		
	1992, > 85 kW		4,5	1,1	8,0	0,36		
Euro 2	1996.10		4,0	1,1	7,0	0,25		
	1998.10		4,0	1,1	7,0	0,15		
Euro 3	1999.10	ESC & ELR	1,5	0,25	2,0	0,02		0,15
	2000.10		2,1	0,66	5,0	0,10 ^a		0,8
Euro 4	2005.10		1,5	0,46	3,5	0,02		0,5
Euro 5	2008.10		1,5	0,46	2,0	0,02		0,5
Euro 6	2013.01	WHSC	1,5	0,13	0,4	0,01	8,0x10 ¹¹	

^a - MP = 0,13 g/kWh para motores com cilindrada menor que 0,75 dm³ por cilindro uma velocidade nominal acima de 3000 rpm

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016) e Delphi (2012)

Tabela 2.9 – Padrões da norma Euro para veículos pesados com motor a diesel e a gás: teste transiente

Nível	Data	Teste	CO	NMHC	CH ₄ ^a	NOx	MP ^b	PN ^e
			g/kWh			1/kWh		
Euro 3	1999.10	ETC	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02	
	2000.10		5,45	0,78	1,6	5,0	0,16 ^c	
Euro 4	2005.10		4,0	0,55	1,1	3,5	0,03	
Euro 5	2008.10		4,0	0,55	1,1	2,0	0,03	
Euro 6	2013.01	WHTC	4,0	0,16 ^d	0,5	0,46	0,01	6,0x10 ¹¹

^a - apenas para motores a gás (Euro 3 a 5: somente NG; Euro 6: NG + LPG)
^b - não aplicável para motores a gás nos níveis Euro 3 a 4
^c - MP = 0,21 g/kWh para motores com cilindrada menor que 0,75 dm³ por cilindro uma velocidade nominal acima de 3000 rpm
^d - HC para motores a diesel
^e - para motores a diesel; limite PN para motores com ignição positiva TBD

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Na regulamentação Euro 6 incluíram-se algumas disposições complementares:

- O limite de concentração de 10 ppm da amônia (NH₃) aplica-se para os motores diesel (WHSC + WHTC) e gás (WHTC).
- O limite máximo de NO₂ das emissões de NO_x pode ser definido em um estágio posterior.

Outras disposições do Euro 6, como o OBD e certos requisitos de teste estão regulamentadas em 2016/2017 (novos tipos / todos os veículos).

A partir do acordo efetivo “2005.10/2006.10”, os fabricantes devem comprovar que os motores cumprem com os valores limites de emissão para os períodos de vida útil, conforme a categoria do veículo.

Tabela 2.10 – Períodos de durabilidade de emissões

Categoria do Veículo ⁺	Período*	
	Euro 5-6	Euro 6
N1 e M2	100000 km / 5 anos	160000 km / 5 anos
N2	200000 km / 6 anos	300000 km / 6 anos
N3 ≤ 16 ton M3 Classe I, Classe II, Classe A e Classe B ≤ 7.5 ton		
N3 > 16 ton M3 Classe III e Classe B > 7.5 ton	500000 km / 7 anos	700000 km / 7 anos
+ Designações de massa (em toneladas métricas) significa a máxima massa tecnicamente permissível		
* km ou período do ano, o que ocorrer primeiro		

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Algumas categorias de veículos são citadas na Tabela 2.10 acima. Essa definição torna-se necessária para efeitos das normas de emissões e de outros regulamentos dos veículos. A Tabela 2.11 mostra a definição de cada uma das categorias dos veículos.

Tabela 2.11 – Definição das categorias dos veículos

Categoria	Descrição
M	Veículos movidos a motor com pelo menos quatro rodas, concebidos e construídos para transporte de passageiros.
M₁	Veículos concebidos e construídos para o transporte de passageiros, e não abranger mais do que oito assentos, além do assento do motorista.
M₂	Veículos concebidos e construídos para o transporte de passageiros, e não abranger mais do que oito assentos, além do assento do motorista, e ter um peso máximo que não exceda 5 toneladas.
M₃	Veículos concebidos e construídos para o transporte de passageiros, e não abranger mais do que oito assentos, além do assento do motorista, e ter um peso máximo superior a 5 toneladas.
N	Veículos movidos a motor com pelo menos quatro rodas, concebidos e construídos para transporte de mercadorias.
N₁	Veículos concebidos e construídos para transporte de mercadorias, e ter um peso máximo que não exceda 3,5 toneladas.
N₂	Veículos concebidos e construídos para transporte de mercadorias, e ter um peso máximo superior a 3,5 toneladas, mas que não exceda 12 toneladas.
N₃	Veículos concebidos e construídos para transporte de mercadorias, e ter um peso máximo superior 12 toneladas.
O	Reboques, incluindo semirreboques.
G*	Veículos fora de estrada.
* Categoria G pode ser combinado com qualquer categoria M ou N. Por exemplo, um veículo de categoria N₁ que é adequado para utilização de fora de estrada, pode ser designado como N₁G.	

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

2.6 CICLOS DE TESTE DO MOTOR

Até o início do Euro 3 no ano de 2000, o ciclo de teste estacionário válido era o *Economic Commission for Europe* ou Comissão Econômica para Europa (ECE R49), e este foi substituído por dois ciclos: o *European Stationary Cycle* ou Ciclo Estacionário Europeu (ESC) e o *European Transient Cycle* ou Ciclo Transiente Europeu (ETC). A opacidade da fumaça era medida durante o teste *European Load Response* ou teste de Resposta de Carga Europeu (ELR). Os testes possuíam os seguintes requisitos aplicados:

- Euro 3: teste ESC e ELR para motores a diesel convencionais, testes ESC e ELR + ETC para motores a diesel com pós-tratamento avançado (NOx com pós-tratamento ou Filtros de Partículas do Diesel, DPFs) e para *Enhanced Environmentally friendly Vehicles* ou Veículos Ecológicos Avançados, EEVs, e teste ETC para motores

com ignição positiva (*Natural Gas* ou Gás Natural, NG e *Liquefied Petroleum Gas* ou Gás Liquefeito de Petróleo, LPG).

- Euro 4 e 5: testes ESC e ELR + ETC para motores a diesel, e teste ETC para motores com ignição positiva.
- Euro 6: nesta fase, os motores diesel são testados com os testes *World Harmonized Stationary Cycle* ou Ciclo Mundial Estacionário Harmonizado (WHSC) + *World Harmonized Transient Cycle* ou Ciclo Mundial Transiente Harmonizado (WHTC), enquanto os motores com ignição positiva são testados somente com o teste WHTC.

2.6.1 Ciclo ECE R49

O ciclo ECE R49 possui esta nomenclatura por ter sido introduzido pela regulamentação de número 49 da *Economic Commission for Europe* ou Comissão Econômica para Europa.

O teste R-49 é realizado em um banco de teste por dinamômetro operado através de uma sequência de 13 condições de cargas e velocidades, sendo o resultado final uma média dos 13 modos. A Tabela 2.12 e a Figura 2.7 demonstram as condições desse teste e seus fatores de ponderação, além de demonstrar também os fatores do primeiro teste 13 modos dos Estados Unidos. As áreas dos círculos na figura são proporcionais ao fator de ponderação para o seu respectivo modo.

As condições de funcionamento dos ciclos são idênticas, porém, existem diferenças nos fatores de ponderação dos modos 6 e 8, máxima carga do motor, e estas se devem aos maiores valores médios da temperatura dos gases de escape para o ciclo europeu.

Tabela 2.12 – Ciclos de 13 modos ECE R49 e US

Nº Modo	Velocidade	Carga, %	Fatores Ponderação	
			R49	US
1	Marcha Lenta	-	0,25/3	0,20/3
2	Velocidade a Plena Carga	10	0,08	0,08
3		25	0,08	0,08
4		50	0,08	0,08
5		75	0,08	0,08
6		100	0,25	0,08
7	Marcha Lenta	-	0,25/3	0,20/3
8	Velocidade a Potência Nominal	100	0,10	0,08
9		75	0,02	0,08
10		50	0,02	0,08
11		25	0,02	0,08
12		10	0,02	0,08
13	Marcha Lenta	-	0,25/3	0,20/3

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Figura 2.7 – Ciclo ECE R49

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

2.6.2 Ciclo ESC

O ciclo ESC foi introduzido com os testes ETC e o ELR pela regulamentação Euro 3, através da Diretiva 1999/96/EC, no ano de 2000, para medição das emissões dos motores diesel pesados. O ensaio ESC também é procedimento em estado estacionário, com 13 modos, que substituiu o teste R49.

O motor é testado em um dinamômetro em uma sequência de modos em estado estacionário e deve funcionar durante o tempo prescrito em cada modo, completando a rotação do motor e as mudanças de carga nos primeiros 20 segundos. A velocidade especificada deve ser mantida entre ± 50 rpm e o torque deve ser mantido entre $\pm 2\%$ do máximo torque da velocidade do teste. As emissões são medidas durante cada modo e da média durante o ciclo utilizando um conjunto de fatores de ponderação. As emissões do material particulado são recolhidas em um filtro ao longo dos 13 modos e os resultados finais das emissões são expressos em g/kWh.

A Tabela 2.13 e a Figura 2.8 demonstram as condições de teste para o ciclo ESC.

Tabela 2.13 – Ciclo de 13 modos ESC

Modo	Velocidade do motor	Carga %	Peso %	Duração min
1	Marcha lenta	0	15	4
2	A	100	8	2
3	B	50	10	2
4	B	75	10	2
5	A	50	5	2
6	A	75	5	2
7	A	25	5	2
8	B	100	9	2
9	B	25	10	2
10	C	100	8	2
11	C	25	5	2
12	C	75	5	2
13	C	50	5	2

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Figura 2.8 – Ciclo ESC

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

As velocidades do motor são definidas da seguinte maneira:

- A alta velocidade n_{hi} é determinada pelo cálculo de 70% da máxima potência útil declarada. A maior velocidade do motor na qual este valor de potência ocorre, isto é, acima da velocidade nominal na curva de potência, é definida como n_{hi} .
- A baixa velocidade n_{lo} é determinada pelo cálculo de 50% da máxima potência útil declarada. A menor velocidade do motor onde este valor de potência ocorre, isto é, abaixo da velocidade nominal na curva de potência, é definida como n_{lo} .
- As velocidades do motor A, B e C usadas durante o teste são calculadas através das seguintes fórmulas:

$$A = n_{lo} + 0,25 (n_{hi} - n_{lo}) \quad (13)$$

$$B = n_{lo} + 0,50 (n_{hi} - n_{lo}) \quad (14)$$

$$C = n_{lo} + 0,75 (n_{hi} - n_{lo}) \quad (15)$$

Durante os testes de certificação de emissões, a equipe responsável pela certificação pode solicitar modos de teste aleatórios adicionais dentro da área de controle do ciclo. A máxima emissão para estes modos extras é determinada pela interpolação entre os resultados dos modos de teste regulares vizinhos.

O teste ESC é caracterizado por taxas de cargas médias elevadas e temperaturas de gases de escape muito elevadas.

2.6.3 Ciclo ELR

O teste ELR foi introduzido pela regulamentação Euro 3, através da Diretiva 1999/96/EC, no ano de 2000, com o propósito da medição de opacidade da fumaça para motores diesel pesados.

O teste consiste em uma sequência de três passos de carga em cada uma das três velocidades do motor: A (ciclo 1), B (ciclo 2) e C (ciclo 3), seguido pelo ciclo 4 a uma velocidade entre as velocidades A e C, e a carga entre 10% e 100%, selecionado pela equipe responsável pela certificação. As velocidades A, B e C são definidas no ciclo ESC e a sequência de operação do dinamômetro no teste do motor é demonstrada na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Ciclo ELR

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

O valor final de fumaça é determinado como a média ponderada dos valores médios das velocidades, sendo: 0,43 o valor de ponderação para a velocidade A, 0,56 para B e 0,01 para C.

2.6.4 Ciclo ETC

O ciclo ETC foi introduzido juntamente com o ciclo ESC, através da Diretiva 1999/96/EC, no ano de 2000, substituindo o ciclo R49.

O ciclo ETC, também conhecido como o ciclo transiente FIGE, foi desenvolvido pelo instituto FIGE, de Aachen, na Alemanha, baseado em medições de ciclos reais de veículos pesados. O ciclo final ETC é uma versão abreviada e ligeiramente modificada da proposta original de FIGE.

Diferentes condições de condução são representadas por três partes do ciclo ETC, incluindo condução urbana, rural e autoestrada. A duração total do ciclo é de 1800 segundos, sendo 600 segundos a duração de cada parte:

- A primeira parte representa a condução pela cidade, com velocidade máxima de 50 km/h, partidas frequentes, paradas e marcha lenta.
- A segunda parte representa a condução rural, começando com um segmento de aceleração íngreme. A velocidade média é em torno de 72 km/h.
- A terceira parte representa a condução autoestrada, com velocidade média de 88 km/h.

O instituto FIGE desenvolveu o ciclo em duas variantes: como um chassi e como um teste de dinamômetro. A velocidade do veículo em relação ao tempo ao longo do ciclo é mostrada na Figura 2.10 (a versão do veículo do ciclo FIGE nunca foi padronizada). Para efeitos de aprovação da certificação ou tipo do motor, o ciclo ETC é realizado em um dinamômetro. As curvas pertinentes de velocidade do motor e de torque são apresentadas nas Figura 2.11 e Figura 2.12, respectivamente.

Figura 2.10 – Ciclo Transiente FIGE - Velocidade do veículo

Fonte: Adaptado de Dieselnets (2016)

Figura 2.11 – Ciclo Transiente ETC - Velocidade do motor

Fonte: Adaptado de Dieselnets (2016)

Figura 2.12 – Ciclo Transiente ETC - Torque do motor

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

2.6.5 Ciclo WHSC

O ciclo WHSC é um teste de dinamômetro em estado estacionário definido pelo *Global Technical Regulation* ou Regulamento Técnico Global (GTR número 4), que é desenvolvido pelo grupo UN ECE GRPE. O GTR cobre o procedimento *World-wide Harmonized Heavy-duty Certification* ou Certificação Mundial de Veículos Pesados Harmonizados (WHDC) para as emissões do motor. Dois ciclos de ensaios foram criados para abranger as condições típicas de condução da União Europeia, Estados Unidos, Japão e Austrália, o WHSC, que é um ciclo de estado estacionário com arranque a quente, e o WHTC, que é um ciclo de ensaio transiente com arranque a frio e a quente.

O ciclo WHSC possui uma sequência de modos estacionários em rampa, com critérios de velocidades e torques definidos em cada modo e de rampa entre esses modos, conforme demonstra a Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Ciclo Estacionário WHSC

Modo	Velocidade	Carga	Fator de Ponderação	Modo de Duração
-	%	%	-	s*
0	Motora	-	0,24	-
1	0	0	0,17/2	210
2	55	100	0,02	50
3	55	25	0,10	250
4	55	70	0,03	75
5	35	100	0,02	50
6	25	25	0,08	200
7	45	70	0,03	75
8	45	25	0,06	150
9	55	50	0,05	125
10	75	100	0,02	50
11	35	50	0,08	200
12	35	25	0,10	250
13	0	0	0,17/2	210
Total			1	1895

*** Inclui rampa de 20s**

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

O ciclo WHSC é executado a partir de um arranque a quente, após pré-condicionamento do motor no modo 9. O modo de marcha lenta é separado em dois modos, sendo o modo 1 no início e o modo 13 no final do ciclo de teste. O modo 0 não é executado, ele só é contabilizado matematicamente por um fator de ponderação de 0,24 e com zero em potência e emissões.

Para o cálculo das emissões específicas do freio, o ciclo de trabalho real é calculado através da potência real do motor durante o ciclo. Os fatores de ponderação são dados apenas como referência.

2.6.6 Ciclo WHTC

Assim como o ciclo WHSC, o ciclo WHTC é um ensaio definido pelo GTR número 4 e desenvolvido pelo grupo UN ECE GRPE, porém, trata-se de um teste de dinamômetro em estado transiente. Este regulamento baseia-se no padrão mundial do uso real de veículos comerciais pesados.

Os requisitos de teste do ciclo WHTC foram adotados pela primeira vez para motores pesados pelo regulamento de emissões Euro 6.

O WHTC é um teste com duração de 1800 segundos, com vários segmentos de avaliação do motor. Os valores de velocidade e de torque normalizados durante o ciclo são representados na Figura 2.13.

Fonte: Adaptado de Dieselnet (2016)

Uma versão de teste de dinamômetro para chassis World Harmonized *Vehicle Cycle* ou Ciclo Mundial Harmonizado de Veículo (WHVC) também foi desenvolvida, porém não faz parte dos procedimentos de testes padrões internacionais.

2.7 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE UM CABEÇOTE

Uma parte significativa deste trabalho foi a produção dos cabeçotes fundidos e usinados com os desvios dimensionais visando alterar a formação do *swirl*. Esta etapa demandou um total de sete meses, desde seu início com as discussões de viabilidade técnica sobre os deslocamentos dimensionais que seriam realizados, até a sua conclusão com os cabeçotes usinados e montados, prontos para a medição do efeito *swirl*.

Nas páginas seguintes deste capítulo há uma breve descrição de como foram produzidos os cabeçotes deste trabalho na linha normal de produção da fundição e posteriormente da usinagem. As fotos utilizadas exemplificam com mais clareza cada uma das etapas nos processos de fabricação.

2.7.1 Processo de fabricação de um cabeçote fundido

O processo de fundição inicia-se a partir do desenvolvimento e fabricação do ferramental de moldagem superior e inferior, conforme ilustram a Figura 2.14 e a Figura 2.15 respectivamente.

Figura 2.14 – Ferramental de moldagem superior

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.15 – Ferramental de moldagem inferior

Fonte: Autor (2017)

Após construir-se o ferramental de moldagem, é desenvolvido o ferramental de macharia, do qual se obtêm os machos: base, tampa, complemento, admissão, escape, da câmara d'água superior e inferior, conforme demonstrado na Figura 2.16, na Figura 2.17 e na Figura 2.18.

Figura 2.16 – Ferramental de macharia

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.17 – Macharia extraída do ferramental

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.18 – Machos das câmaras d'água superior e inferior

Fonte: Autor (2017)

Após a fabricação de todos os machos de fundição necessários, faz-se a montagem do pacote de machos, para assim montá-lo no molde principal e receber o vazamento do ferro fundido. Para isso, no macho base são montados a câmara inferior, os machos de admissão e de escape e a câmara superior, conforme demonstrado na Figura 2.19, na Figura 2.20, na Figura 2.21 e na Figura 2.22.

Figura 2.19 – Macho base

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.20 – Montagem da câmara inferior no macho base

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.21 – Montagem dos machos de admissão e escape

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.22 – Montagem da câmara superior

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.23 – Fechamento do pacote de machos

Fonte: Autor (2017)

Torna-se possível então executar o fechamento do pacote de machos, conforme a Figura 2.23 e prepará-lo entre os moldes superior e inferior, conforme a Figura 2.24, a Figura 2.25 e a Figura 2.26, para então receber o vazamento do ferro fundido para a fabricação dos cabeçotes, conforme a Figura 2.27.

Figura 2.24 – Molde superior

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.25 – Molde inferior

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.26 – Pacote de machos no molde

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.27 – Vazamento do ferro fundido no molde

Fonte: Autor (2017)

Após a fabricação dos cabeçotes pelo vazamento do ferro fundido, as peças são retiradas do molde e seguem o fluxo pela linha da fundição, com os processos de acabamento, conforme a Figura 2.28 e o controle dos cabeçotes, conforme a

Figura 2.29, além dos processos de pintura, armazenagem e expedição, para posterior envio ao cliente.

Figura 2.28 – Acabamento do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.29 – Controle dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

2.7.2 Processo de fabricação de um cabeçote usinado

Nos desenhos de dimensionamento dos cabeçotes são utilizadas referências que definem como o elemento geométrico, teoricamente exato, está relacionado a outros elementos no conjunto de tolerâncias. Através dos pontos de referência é possível construir um sistema de coordenadas referencial, que é utilizado tanto para a referência da fundição, quanto da usinagem.

Para determinar exatamente o sistema de coordenadas são exigidos seis pontos de referência: três (3) pontos que definem o plano, um livre para translação e dois para rotação, dois (2) pontos que definem a linha, um com translação e um com rotação e um (1) ponto para translação. Os pontos de referência da fundição são ilustrados na Figura 2.30 e consistem de três pontos no eixo Z (marcados em vermelho), dois pontos no eixo X (marcados em azul) e um ponto no eixo Y (marcado em verde).

Figura 2.30 – Pontos de referência da fundição

Fonte: Autor (2017)

Entretanto, os valores de referência não precisam ser necessariamente pontos, podendo ser elementos de função, como um plano ou furo. No caso da

usinagem, conforme Figura 2.31, o plano E e os furos de referência A e B definem o sistema de referência, no qual o centro do furo da referência B é a origem para o sistema de coordenadas em x e y, enquanto que o plano E define a origem em z. O plano E define também o alinhamento sobre os eixos x e y, enquanto a referência A define o alinhamento sobre o eixo z.

Figura 2.31 – Elementos de referência da usinagem

Fonte: Autor (2017)

Inicialmente o cabeçote é recebido dos fornecedores de fundição em seu formato bruto. Na linha de produção da usinagem, o processo inicia-se pelo fresamento das faces do cabeçote e pela furação de alguns furos que serão referências da peça para o restante do processo produtivo, conforme Figura 2.32, Figura 2.33, Figura 2.34, Figura 2.35 e Figura 2.36.

Figura 2.32 – Face inferior do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.33 – Face superior do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.34 – Face esquerda do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.35 – Face de admissão do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.36 – Face de escape do cabeçote

Fonte: Autor (2017)

Posteriormente ocorre o fresamento dos furos para alojamento dos assentos de válvulas de admissão e de escape, das molas e das guias de válvulas. Também são feitas as furações dos furos de lubrificação, de arrefecimento, do bico injetor e os furos e roscas dos furos de fixação dos coletores de admissão e escape, conforme Figura 2.37 e Figura 2.38.

Figura 2.37 – Usinagem dos alojamentos dos assentos e guias de válvulas

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.38 – Usinagem dos alojamentos das molas e bico injetor

Fonte: Autor (2017)

Então ocorre a montagem e a usinagem dos assentos de válvulas de admissão e de escape e das guias das válvulas, a montagem da luva do bico injetor, dos retentores, dos pinos, das válvulas de admissão e de escape, das molas, das arruelas e das travas das válvulas, conforme Figura 2.39, Figura 2.40, Figura 2.41, Figura 2.42 e Figura 2.43.

Figura 2.39 – Montagem e usinagem dos assentos de válvulas

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.40 – Montagem e usinagem das guias de válvulas

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.41 – Montagem da luva do injetor, dos retentores e pinos

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.42 – Montagem das válvulas de admissão e escape

Fonte: Autor (2017)

Figura 2.43 – Montagem das molas, arruelas e travas das válvulas

Fonte: Autor (2017)

Durante o processo produtivo, existem duas máquinas de lavar, uma intermediária que está localizada logo após o término das etapas de usinagem e a lavadora final, que está situada antes da inspeção final do operador. Sobre os controles de qualidade do processo, podem-se destacar os postos de controle que estão localizados em todas as máquinas que executam algum tipo de usinagem na peça, os quais contêm instrumentos de medição como paquímetro, súbito, calibradores passa-não-passa.

Existem sistemas a prova de erros humanos ou *poka-yokes* em algumas etapas da linha de produção, como câmeras, sensores de precisão ou dispositivos mecânicos e também uma máquina tridimensional que executa a medição do cabeçote nas suas principais etapas de processo, garantindo a conformidade da peça em relação às especificações do desenho de produto e para o seu cliente, por exemplo, a linha de montagem.

3 DEFINIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo serão descritos os experimentos que compõem a parte prática do trabalho, conforme sequência cronológica:

- Controle dimensional dos cabeçotes brutos;
- Usinagem dos cabeçotes fundidos e montagem de seus componentes para teste de *swirl*;
- Ensaio dos cabeçotes usinados em máquina de medir *swirl*;
- Ensaio dos cabeçotes usinados em bancada com dinamômetro.

Antes do detalhamento da parte prática, torna-se extremamente importante explicar as principais restrições encontradas no decorrer de cada uma dessas etapas e de que maneira foram solucionadas para que este trabalho pudesse ser concluído.

A primeira restrição importante ocorreu na definição técnica de quais combinações de deslocamentos nos machos de admissão a fundição realizaria. Após negociações com o orientador e a fundição, definiu-se por fabricar nove combinações e um mínimo de seis peças para cada uma delas. Apesar da fundição já ter feito trabalho similar no estudo de Souza (2016) quando fabricaram cinco combinações, o modelo de cabeçote era outro. Então, para se conseguir todas as peças, algumas dezenas de cabeçotes foram rejeitados pela fundição, após executar o controle dimensional e perceber que o posicionamento havia ficado distante das tolerâncias definidas, pois a preparação dos machos de admissão na fundição tratava-se de um retrabalho manual. Com isso, demandaram-se novas negociações, maior tempo, maiores gastos para a fundição fabricar todas as peças e o prazo de entrega estendeu-se por mais alguns meses ao inicialmente definido.

A segunda restrição técnica importante ocorreu após o recebimento das peças fabricadas pela fundição, quando necessitou-se negociar com as áreas internas da empresa, para viabilizar cada uma das etapas seguintes deste trabalho. A negociação iniciou-se com a área da qualidade para executar o controle dimensional de todos os cabeçotes, posteriormente com a área da produção de cabeçotes para usinagem das peças. Em seguida, com os engenheiros que trabalham no laboratório de Sorocaba para disponibilizar a máquina de medir *swirl*. Logo após, a negociação foi com a linha de montagem, para disponibilizar um motor

seis cilindros para os testes no dinamômetro. E, por fim, com a área dos bancos de testes da produção de motores, para viabilizar um banco de dinamômetro e testar as nove combinações existentes. Como todas estas áreas possuem fluxo de trabalho definido, isto é, já existe uma demanda de trabalho pré-existente, todos os testes ou ensaios necessários foram alocados em meio a estas demandas. Porém, em algumas destas etapas, para atender o prazo estipulado, foi necessário o uso de horas extras, o que encareceu os custos globais deste projeto.

3.1 CONTROLE DIMENSIONAL DOS CABEÇOTES FUNDIDOS

3.1.1 Combinações de deslocamentos nos dutos de admissão

Com o intuito de verificar a influência dos deslocamentos nos dutos de admissão do cabeçote no resultado *swirl*, solicitou-se à fundição um total de nove combinações, sendo quatro combinações relacionadas ao eixo X com deslocamentos de um milímetro ou 1mm, quatro combinações relacionadas ao eixo Y com deslocamentos de 1mm e uma combinação considerando os eixos X e Y entre suas medidas nominais de processo, conforme as Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10.

Cada combinação deveria ter uma produção mínima de seis cabeçotes, para posterior teste no motor seis cilindros em dinamômetro e um máximo de oito cabeçotes, pois poderia ocorrer algum desvio durante o processo de usinagem dessas peças ou mesmo durante as fases de transportes, nas quais ocorrem manipulações destes cabeçotes.

A Figura 3.1 demonstra o perfil dos dutos de admissão e a localização de seus eixos X e Y relacionados.

Figura 3.1 – Perfil dos dutos de admissão e localização de seus eixos X e Y

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.2 – Combinação 1 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 1

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.3 – Combinação 2 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 2

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.4 – Combinação 3 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 3

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.5 – Combinação 4 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 4

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.6 – Combinação 5 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 5

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.7 – Combinação 6 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 6

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.8 – Combinação 7 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 7

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.9 – Combinação 8 do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação 8

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.10 – Combinação Nominal (N) do deslocamento dos dutos de admissão

Combinação N
Manter as medidas nominais.

Fonte: Autor (2017)

Durante o processo de fabricação das peças fundidas, fez-se uma visita técnica à fundição para melhor entendimento da dificuldade da empresa no trabalho de deslocamento e controle dos dutos. É necessário executar um trabalho de modelagem manual pelo operador durante a preparação dos machos de admissão para atingir os resultados de deslocamento conforme solicitado. Inicia-se pelo retrabalho do macho base em seus diâmetros de admissão com o auxílio de um rebolo, na região onde serão montados os assentos de válvulas de admissão, conforme Figura 3.11. Posteriormente, com os diâmetros já retrabalhados, adicionam-se pequenas tiras de papelão ao redor do diâmetro, com exceção apenas da região onde se pretende conseguir o deslocamento, conforme Figura 3.12. Em seguida, posicionam-se e colam-se os machos de admissão no sentido do deslocamento esperado, conforme Figura 3.13 e Figura 3.14. Este procedimento deve ser executado para todas as peças das oito combinações que exigem um deslocamento fora das tolerâncias que o ferramental padrão da fundição permite.

Figura 3.11 – Retrabalho do macho base nos diâmetros de admissão

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.12 – Colagem das tiras de papelão nos diâmetros de admissão

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.13 – Posicionamento dos machos de admissão para colagem

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.14 – Colagem dos machos de admissão

Fonte: Autor (2017)

Como resultado, conseguiu-se fabricar um total de sessenta cabeçotes conforme sequência descrita na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Quantidade de cabeçotes fundidos por combinação

Combinação	Deslocamento Duto Curto		Deslocamento Duto Longo		Quantidade cabeçotes fundidos
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	
1	0	1	0	-1	7
2	0	1	0	1	7
3	0	-1	0	-1	6
4	0	-1	0	1	7
5	1	0	1	0	7
6	1	0	-1	0	6
7	-1	0	1	0	7
8	-1	0	-1	0	7
N	0	0	0	0	6

Fonte: Autor (2017)

Com os cabeçotes fabricados de acordo com as combinações de deslocamentos solicitadas, estes foram enviados para usinagem, conforme demonstra a Figura 3.15, porém antes de usiná-los fez-se necessário efetuar seu controle dimensional pela área da qualidade. Nesta análise dimensional, os dutos de admissão são controlados em sua posição de entrada e saída, de acordo com as referências de desenho, as quais serão as mesmas utilizadas pela usinagem no início de seu processo. Porém, a região de saída dos dutos de admissão é a área diretamente relacionada ao estudo deste trabalho.

Figura 3.15 – Cabeçotes fundidos recebidos na usinagem

Fonte: Autor (2017)

3.1.2 Medição tridimensional dos cabeçotes fundidos

Para este controle utilizou-se em uma sala de medição, uma máquina de medição por coordenadas, modelo Accura e marca Carl Zeiss, com incerteza de medição de $3\mu\text{m}$, devidamente calibrada e com seus apalpadores de medição devidamente aferidos, em uma temperatura controlada dentro de seu valor nominal de 20°C , com tolerância de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para garantir uma rastreabilidade das peças durante o período em que elas permanecessem na sala de medição, criou-se uma identificação em uma das laterais dos cabeçotes, conforme ilustrado na Figura 3.16.

Figura 3.16 – Identificação dos cabeçotes fundidos antes da medição tridimensional

Fonte: Autor (2017)

A partir desta identificação foi definida a relação de nomeação das peças e esta nomeação seria utilizada para todos os relatórios ou ensaios destes cabeçotes. Na Figura 3.16, por exemplo, definiu-se C8_7, onde “C8” se refere a combinação 8, mas pode ser de C1 até CN, seguido do separador _ e o número do cabeçote daquela combinação, que no exemplo foi “_7”, que se trata da sétima peça da combinação 8.

A Figura 3.17 demonstra um dos cabeçotes durante a medição na tridimensional. Após o controle dimensional das sessenta peças, os relatórios foram analisados para descartar as seis peças sobressalentes do volume necessário para os testes na bancada com dinamômetro. O critério utilizado para o descarte das peças foi avaliar entre as combinações que possuíam sete peças, qual era a peça que possuía o menor deslocamento dentro do 1mm esperado.

Figura 3.17 – Cabeçote fundido durante medição tridimensional

Fonte: Autor (2017)

Com as peças sobressalentes descartadas, obteve-se a relação de cabeçotes, conforme demonstra a Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Relação dos cabeçotes fundidos para usinagem após medição tridimensional

Combinação	Peça 01	Peça 02	Peça 03	Peça 04	Peça 05	Peça 06
1	C1_1	C1_2	C1_3	C1_4	C1_5	C1_6
2	C2_1	C2_2	C2_3	C2_4	C2_5	C2_6
3	C3_1	C3_2	C3_3	C3_4	C3_5	C3_6
4	C4_1	C4_2	C4_3	C4_4	C4_5	C4_6
5	C5_1	C5_2	C5_3	C5_4	C5_5	C5_6
6	C6_1	C6_2	C6_3	C6_4	C6_5	C6_6
7	C7_2	C7_3	C7_4	C7_5	C7_6	C7_7
8	C8_1	C8_2	C8_3	C8_4	C8_5	C8_6
N	CN_1	CN_2	CN_3	CN_4	CN_5	CN_6

Fonte: Autor (2017)

3.2 USINAGEM E MONTAGEM DOS CABEÇOTES FUNDIDOS PARA TESTE DE *SWIRL*

Após os cabeçotes fundidos estarem controlados, já era possível usina-los e montar seus componentes para deixá-los em condições de efetuar-se o controle do número de *swirl*.

No início da usinagem todos os cabeçotes na face de admissão foram identificados, conforme demonstra a Figura 3.18, com os mesmos números que haviam sido anteriormente numerados na face lateral, antes do início do controle das peças fundidas na sala de medição. Essa segunda identificação é necessária para garantir de que nenhum dos cabeçotes deste trabalho irá misturar-se com as demais peças do processo de usinagem.

Figura 3.18 – Cabeçotes durante processo de usinagem

Fonte: Autor (2017)

Conforme descrito anteriormente, durante o processo de fabricação de um cabeçote usinado montam-se entre outros componentes os assentos de válvulas e as válvulas de admissão e escape, porém são os assentos e as válvulas de admissão que exercem direta influência no resultado do *swirl*.

Com todos os cabeçotes usinados e montados, torna-se possível embalá-los em uma caixa e enviá-los para o laboratório localizado na cidade de Sorocaba, onde encontra-se a máquina de medir *swirl*, conforme Figura 3.19.

Figura 3.19 – Cabeçotes embalados para envio de medição do *swirl*

Fonte: Autor (2017)

3.3 ENSAIO DOS CABEÇOTES EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE SWIRL

Após os cabeçotes usinados e montados chegarem no laboratório de Sorocaba, iniciou-se a preparação do equipamento para efetuar a medição do número de *swirl* de cada um deles. A Figura 3.20 demonstra o layout com os principais componentes da máquina de medir *swirl*.

Figura 3.20 – Layout da máquina de medir *swirl*

- 1 → Cabeçote
- 2 → Cilindro de passagem
- 3 → Sensor de pressão
- 4 → Colmeia
- 5 → Sensor do torque aplicado na colmeia
- 6 → Tanque ou *Plenum*
- 7 → Bomba de vácuo e tacômetro
- 8 → Abafadores de ruído

Fonte: Autor (2017)

Antes de iniciar as medições, utilizou-se o cabeçote padrão da Figura 3.21 para garantir que a calibração atual no equipamento estava calculando valores corretos, isto é, valores conhecidos pelos engenheiros que trabalham no laboratório e executam esta rotina de comparação uma vez por semana ou quando há alguma

alteração no software da máquina ou antes do início da medição de um lote de cabeçotes.

Figura 3.21 – Cabeçote padrão para medição de *swirl*

Fonte: Autor (2017)

Após a medição do cabeçote padrão e a avaliação de seus resultados se apresentarem aprovados, era então possível iniciar as medições dos sessenta cabeçotes.

O método adotado nos ensaios consistiu em medir duas vezes cada cabeçote, totalizando cento e vinte ensaios ou medições.

A nomenclatura utilizada seguiu a relação já utilizada na medição dos cabeçotes fundidos, com o acréscimo do número do ensaio, por exemplo, “C1_1_E1”, onde “C1” é a qual combinação se relaciona, “_1” é qual a peça daquela combinação e “_E1” é o ensaio ou medição daquela peça. Posteriormente seria “C1_1_E2”, a segunda medição deste cabeçote e assim sucessivamente.

A medição inicia-se pela instrumentação do cabeçote na máquina de medir *swirl*, conforme demonstra a Figura 3.22, colocando-o sobre o cilindro de passagem. Encaixam-se então o terminal de válvulas de admissão, os tubos cilíndricos e as barras roscadas. Em seguida, apertam-se as porcas das barras roscadas e o parafuso de ajuste acoplado ao relógio comparador. Este parafuso é também responsável por determinar a abertura e fechamento das válvulas de admissão,

porém, para iniciar a medição o parafuso é apertado até a posição de abertura das válvulas em sua altura máxima de quinze milímetros e com o relógio comparador em zero e quinze voltas, conforme demonstra a Figura 3.23. Encaixam-se os dois moldes que auxiliam a entrada do ar nos dutos de admissão e então liga-se a máquina. Coletam-se os dados daquela posição de abertura de válvula por vinte segundos. Em seguida, a coleta de dados é pausada, move-se um milímetro do relógio comparador para a posição de abertura de quatorze milímetros, soltando o parafuso de ajuste, e inicia-se a coleta de dados desta posição por mais vinte segundos. Este procedimento é repetido para as quinze posições de aberturas de válvulas, quando os últimos vinte segundos são coletados e o relógio comparador encontra-se em zero, inclusive na escala de voltas, conforme demonstra a Figura 3.24.

Figura 3.22 – Cabeçote instrumentado para início da medição de *swirl*

- 1 → Cabeçote
- 2 → Cilindro de passagem
- 3 → Terminal de válvulas
- 4 → Tubos cilíndricos
- 5 → Barras roscadas
- 6 → Porcas das barras roscadas
- 7 → Relógio comparador
- 8 → Parafuso de ajuste
- 9 → Moldes dos dutos de admissão

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.23 – Condição inicial da medição de *swirl* com a máxima abertura de válvulas

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.24 – Condição final da medição de *swirl* com a mínima abertura de válvulas

Fonte: Autor (2017)

Para cada posição fixa no curso da válvula obtêm-se durante os vinte segundos de medição centenas de resultados dos seguintes dados: torque medido através do ar que passa pela colmeia, redução de pressão no cilindro, redução de pressão no tanque, temperatura no *plenum* e a rotação da bomba de vácuo. Adiciona-se manualmente o valor de pressão do ambiente, e com o valor calculado da vazão em massa do ar determina-se a razão do número de *swirl* para cada posição fixa no curso da válvula, e posteriormente, os valores médios do número de

swirl e de $\mu\sigma$ para cada cabeçote são calculados automaticamente através de planilha desenvolvida e fornecida pelos engenheiros do laboratório de Sorocaba, conforme as equações (9) e (12) apresentadas anteriormente no capítulo 2.3.

3.4 ENSAIO DOS CABEÇOTES NO DINAMÔMETRO

Após a conclusão das medições dos cabeçotes na máquina de medir *swirl*, as peças foram embaladas e retornaram à empresa para início das medições no dinamômetro. O banco utilizado nos ensaios é o denominado *Conformity of Production* ou Conformidade da Produção (COP), que é responsável por garantir a conformidade dos diversos modelos de motores da produção em relação às legislações vigentes.

Para a realização dos ensaios utilizou-se o motor diesel da Tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Especificação do motor utilizado no dinamômetro

Modelo	DC13 147
Combustível	Diesel S10
Número de cilindros	6 cilindros em linha
Número de válvulas por cabeçote	4 válvulas (2 admissão, 2 escape)
Curso do pistão	160 mm
Diâmetro da camisa	130 mm
Relação de compressão	17,3:1
Capacidade volumétrica	13 litros
Sistema de injeção	<i>Common rail</i> eletrônico, injeção direta
Número de orifícios do injetor	8
Pressão máxima de injeção	2500 bar
Potência máxima	324 kW @ 1900 rpm
Torque máximo	2300 Nm @ 1000-1300 rpm

Fonte: Autor (2017)

Definiu-se como critério de análise ensaiar para cada uma das combinações de cabeçotes duas medições do ensaio *Full Load Curve* ou Ensaio a Plena Carga (FLC) e três medições do ensaio de emissões ciclo ESC. Devido às características do motor e do dinamômetro disponíveis, os resultados dos ensaios ESC foram realizados seguindo a norma de emissões Euro 5, apesar dos cabeçotes possuírem componentes desenvolvidos para testes de emissões Euro 6.

Para melhor entendimento dos resultados de emissões, o motor permaneceu sem nenhum sistema de pós-tratamento dos gases de escape, isto é, sem os sistemas *SCR* e *EGR*. Isto torna-se favorável para análise somente dos gases gerados pela combustão do motor.

Com relação aos fatores obtidos nas medições de cada um dos testes, podem-se destacar no ensaio de plena carga:

- Rotação (rpm);
- Torque (Nm);
- Consumo específico de combustível (g/kWh);
- *Filter Smoke Number* ou Fumaça (FSN);
- Temperatura de arrefecimento (°C);
- Potência do motor (kW), entre outros.

Já no ensaio ESC podem-se destacar:

- CO (g/kWh);
- NOx (g/kWh);
- HC (g/kWh);
- MP (g/kWh).

Outro critério adotado está relacionado à disposição dos cabeçotes no motor. Para cada ensaio os seis cabeçotes da mesma combinação foram utilizados, isto é, com o mesmo deslocamento da fundição nos dutos de admissão, posicionando-os de acordo com a sua numeração. Portanto, o cabeçote de número um foi montado no cilindro um, o cabeçote número dois foi montado no cilindro dois e assim sucessivamente.

Durante as trocas dos cabeçotes entre uma combinação e outra, substituíram-se os parafusos e juntas dos cabeçotes e a cada três combinações os parafusos do bico injetor. Com isso garantiu-se a correta fixação desses componentes no motor e a segurança durante os ensaios no dinamômetro.

A Figura 3.25 e a Figura 3.26 demonstram o motor durante um dos testes no dinamômetro.

Figura 3.25 – Vista lateral direita do motor no dinamômetro

Fonte: Autor (2017)

Figura 3.26 – Vista lateral esquerda do motor no dinamômetro

Fonte: Autor (2017)

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados de cada uma das etapas executadas com os cabeçotes, desde a sua fabricação pela fundição até os ensaios no dinamômetro.

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DIMENSIONAIS DOS CABEÇOTES FUNDIDOS

A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 demonstram os resultados dimensionais de cada uma das peças fundidas controladas na sala de medição, assim como as médias dos seis cabeçotes de cada combinação para os eixos X e Y.

Percebeu-se que a ampla maioria dos cabeçotes demonstrou variação de deslocamento de posicionamento aceitável, isto é, entre $\pm 0,2\text{mm}$ do valor solicitado, embora a fundição declarasse durante a fabricação dificuldade em deslocar exatamente os valores solicitados de cada combinação.

Tabela 4.1 – Resultados das medições dos cabeçotes fundidos

	Deslocamento Duto Curto		Deslocamento Duto Longo	
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
C1_1	0,1094	1,2483	0,0806	-0,6956
C1_2	-0,1779	0,8143	-0,5094	-0,9398
C1_3	-0,2538	1,0172	-0,1001	-0,7049
C1_4	0,1533	1,0873	-0,2538	-0,6248
C1_5	-0,0732	1,2516	-0,0822	-0,8931
C1_6	0,3221	1,0262	-0,2636	-0,7743
C2_1	0,2170	1,1528	0,3276	0,9088
C2_2	0,2210	1,0074	-0,2712	1,2018
C2_3	0,4749	1,1119	0,0198	1,4517
C2_4	-0,4900	0,9370	-0,2595	0,9455
C2_5	-0,2317	1,0059	0,2224	1,0243
C2_6	0,3482	1,1243	-0,0166	0,9011
C3_1	0,4651	-1,0497	-0,2698	-1,0664
C3_2	0,0435	-0,7394	-0,0837	-0,7882
C3_3	0,4654	-1,0052	-0,2325	-1,1057
C3_4	-0,0442	-0,8961	-0,1240	-0,7650
C3_5	-0,2238	-0,8283	-0,4112	-0,8520
C3_6	0,2010	-0,8359	-0,4842	-0,8145
C4_1	0,0183	-0,7136	0,2844	0,6557
C4_2	0,3043	-0,7155	0,2393	0,8954
C4_3	0,0659	-1,3097	-0,3839	1,2085
C4_4	-0,0385	-1,2263	-0,4641	1,3589
C4_5	0,1760	-1,2266	0,0306	0,3909
C4_6	0,2022	-1,2809	-0,1517	1,4265
C5_1	0,8281	0,3845	0,6996	0,0892
C5_2	1,1353	0,4226	0,8340	0,2057
C5_3	0,9203	0,3643	0,7107	-0,2543
C5_4	0,8474	-0,4723	0,8027	0,2536
C5_5	1,0661	-0,1874	0,7670	-0,2985
C5_6	1,0744	-0,1796	0,7656	-0,2810
C6_1	0,8363	0,8743	-1,0808	0,0572
C6_2	0,2367	0,3167	-1,5780	-0,0271
C6_3	1,2090	0,5817	-1,2615	0,0850
C6_4	1,1460	0,4589	-1,0748	0,2714
C6_5	1,0272	0,5657	-1,1059	0,3937
C6_6	1,0942	0,1564	-0,4735	0,6595
C7_2	-1,0784	-0,2886	0,8093	-0,7289
C7_3	-0,7567	0,0514	0,7108	-0,2213
C7_4	-1,0353	0,1977	0,8172	-0,4211
C7_5	-0,6304	0,0769	0,7986	0,1740
C7_6	-0,9417	0,1009	1,0130	-0,6487
C7_7	-0,7179	0,2091	1,2309	-0,6180
C8_1	-0,8973	0,1161	-1,0255	0,1014
C8_2	-1,0188	0,0711	-1,1996	0,2720
C8_3	-0,8992	0,2567	-1,2063	0,4370
C8_4	-1,0480	0,3708	-1,2640	0,4373
C8_5	-1,0402	0,2851	-1,2265	0,5455
C8_6	-1,0508	-0,1936	-1,1319	0,5291
CN_1	0,0360	0,2616	0,2656	-0,4470
CN_2	0,1324	0,1766	0,1421	0,0122
CN_3	-0,0750	-0,0139	0,1975	-0,1193
CN_4	0,1518	0,3203	0,1968	0,0816
CN_5	0,3624	-0,0175	0,3124	-0,3573
CN_6	0,3202	0,3439	0,2577	-0,2097

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.2 – Resultados médios das medições dos cabeçotes fundidos

	Deslocamento Duto Curto		Deslocamento Duto Longo	
	Xmédio (mm)	Ymédio (mm)	Xmédio (mm)	Ymédio (mm)
C1_1	0,0133	1,0742	-0,1881	-0,7721
C1_2				
C1_3				
C1_4				
C1_5				
C1_6				
C2_1	0,0899	1,0566	0,0037	1,0722
C2_2				
C2_3				
C2_4				
C2_5				
C2_6				
C3_1	0,1512	-0,8924	-0,2676	-0,8986
C3_2				
C3_3				
C3_4				
C3_5				
C3_6				
C4_1	0,1214	-1,0788	-0,0742	0,9893
C4_2				
C4_3				
C4_4				
C4_5				
C4_6				
C5_1	0,9786	0,0554	0,7633	-0,0476
C5_2				
C5_3				
C5_4				
C5_5				
C5_6				
C6_1	0,9249	0,4923	-1,0958	0,2400
C6_2				
C6_3				
C6_4				
C6_5				
C6_6				
C7_2	-0,8601	0,0579	0,8966	-0,4107
C7_3				
C7_4				
C7_5				
C7_6				
C7_7				
C8_1	-0,9924	0,1510	-1,1756	0,3871
C8_2				
C8_3				
C8_4				
C8_5				
C8_6				
CN_1	0,1546	0,1785	0,2287	-0,1733
CN_2				
CN_3				
CN_4				
CN_5				
CN_6				

Fonte: Autor (2017)

4.2 ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CABEÇOTES EM MÁQUINA DE MEDIÇÃO DE *SWIRL*

4.2.1 Análise dos resultados de *swirl*

Na Tabela 4.3 estão os resultados relativizados das duas medições de *swirl* e sua média para cada um dos cabeçotes. Já na Tabela 4.4, consta a média relativizada por combinação, isto é, a média entre as seis peças daquela combinação relacionada com os deslocamentos nos dutos de admissão efetuados na fundição.

Para a configuração e modelo dos cabeçotes utilizados nas combinações, o número de *swirl* medido deve permanecer entre os limites aceitáveis de $\pm 0,2$. Portanto, os valores do número de *swirl* devem permanecer entre $N-0,2$ a $N+0,2$, onde N é o valor nominal. Porém, como o valor nominal está relativizado, os limites aceitáveis tornam-se $R-0,2$ a $R+0,2$.

Percebe-se que em três diferentes combinações o valor médio de *swirl* ficou fora dos limites aceitáveis. Pode-se notar também a variação de cada combinação quando comparadas à combinação nominal, a qual utilizou cabeçotes com deslocamento nos dutos de admissão dentro dos limites aceitáveis de fabricação da fundição.

Tabela 4.3 – Resultados relativizados das duas medições de *swirl* dos cabeçotes

	Ensaio_1	Ensaio_2	Média Ensaio_1 e 2
C1_1	0,10	0,07	0,08
C1_2	0,12	0,13	0,12
C1_3	0,04	0,05	0,04
C1_4	0,22	0,19	0,20
C1_5	0,11	0,11	0,11
C1_6	0,15	0,15	0,15
C2_1	0,01	-0,03	-0,01
C2_2	0,06	0,09	0,08
C2_3	-0,19	-0,20	-0,19
C2_4	-0,14	-0,12	-0,13
C2_5	-0,11	-0,11	-0,11
C2_6	-0,04	-0,03	-0,03
C3_1	0,41	0,42	0,41
C3_2	0,28	0,29	0,28
C3_3	0,34	0,35	0,35
C3_4	0,23	0,22	0,22
C3_5	0,30	0,31	0,31
C3_6	0,28	0,28	0,28
C4_1	0,12	0,12	0,12
C4_2	0,02	0,02	0,02
C4_3	0,27	0,26	0,26
C4_4	0,23	0,23	0,23
C4_5	0,15	0,15	0,15
C4_6	0,15	0,13	0,14
C5_1	-0,05	-0,05	-0,05
C5_2	-0,02	-0,03	-0,03
C5_3	0,01	0,01	0,01
C5_4	-0,04	-0,04	-0,04
C5_5	-0,05	-0,04	-0,04
C5_6	0,04	0,04	0,04
C6_1	0,28	0,28	0,28
C6_2	0,37	0,38	0,37
C6_3	0,39	0,39	0,39
C6_4	0,23	0,23	0,23
C6_5	0,30	0,29	0,29
C6_6	0,25	0,24	0,24
C7_2	-0,33	-0,33	-0,33
C7_3	-0,45	-0,45	-0,45
C7_4	-0,43	-0,42	-0,43
C7_5	-0,38	-0,37	-0,38
C7_6	-0,37	-0,38	-0,37
C7_7	-0,36	-0,36	-0,36
C8_1	-0,04	-0,03	-0,04
C8_2	0,04	0,03	0,04
C8_3	-0,08	-0,10	-0,09
C8_4	-0,03	-0,03	-0,03
C8_5	-0,03	-0,04	-0,04
C8_6	-0,01	-0,01	-0,01
CN_1	-0,11	-0,10	-0,11
CN_2	-0,10	-0,07	-0,09
CN_3	-0,10	-0,10	-0,10
CN_4	0,06	0,03	0,05
CN_5	-0,03	-0,03	-0,03
CN_6	-0,13	-0,13	-0,13

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.4 – Resultados médios de *swirl* relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Combinação	Deslocamento Duto Curto		Deslocamento Duto Longo		Valor médio do <i>swirl</i>	Variação do <i>swirl</i> médio em relação a referência R
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)		
1	0	1	0	-1	0,12	7,0%
2	0	1	0	1	-0,07	-3,9%
3	0	-1	0	-1	0,31	18,2%
4	0	-1	0	1	0,15	9,1%
5	1	0	1	0	-0,02	-1,1%
6	1	0	-1	0	0,30	17,8%
7	-1	0	1	0	-0,39	-22,7%
8	-1	0	-1	0	-0,03	-1,6%
N	0	0	0	0	-0,07	-4,0%

Fonte: Autor (2017)

O Gráfico 4.1 demonstra esta variação dos valores médios de *swirl* entre as combinações.

Gráfico 4.1 – Resultados médios de *swirl* relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

4.2.2 Análise dos resultados de $\mu\sigma$

Assim como demonstrado nos resultados de *swirl*, na Tabela 4.5 estão os resultados relativizados das duas medições de $\mu\sigma$ e sua média para cada um dos cabeçotes. Na

Tabela 4.6 consta a média relativizada por combinação relacionada com os deslocamentos nos dutos de admissão efetuados na fundição, onde a combinação N é a referência.

Percebe-se pelos resultados de variação de cada combinação, em relação a combinação N, que este fator se mantém estável, uma vez que a maior diferença foi da combinação 3 com -1,8%.

Tabela 4.5 – Resultados relativizados das duas medições de $\mu\sigma$ dos cabeçotes

	Ensaio_1	Ensaio_2	Média Ensaio_1 e 2
C1_1	-0,0028	-0,0027	-0,0028
C1_2	-0,0036	-0,0062	-0,0049
C1_3	0,0003	-0,0003	0,0000
C1_4	-0,0067	-0,0059	-0,0063
C1_5	-0,0024	-0,0026	-0,0025
C1_6	-0,0028	-0,0020	-0,0024
C2_1	-0,0038	0,0003	-0,0018
C2_2	0,0051	0,0047	0,0049
C2_3	0,0044	0,0043	0,0044
C2_4	0,0043	0,0047	0,0045
C2_5	0,0056	0,0047	0,0052
C2_6	0,0021	0,0018	0,0019
C3_1	-0,0115	-0,0118	-0,0117
C3_2	-0,0095	-0,0098	-0,0096
C3_3	-0,0079	-0,0084	-0,0081
C3_4	-0,0065	-0,0062	-0,0063
C3_5	-0,0052	-0,0036	-0,0044
C3_6	-0,0039	-0,0056	-0,0048
C4_1	0,0015	0,0017	0,0016
C4_2	-0,0003	-0,0002	-0,0003
C4_3	0,0006	0,0005	0,0006
C4_4	0,0002	-0,0002	0,0000
C4_5	-0,0024	-0,0011	-0,0017
C4_6	0,0008	0,0007	0,0007
C5_1	0,0027	0,0021	0,0024
C5_2	0,0013	0,0022	0,0017
C5_3	0,0014	0,0011	0,0013
C5_4	0,0007	0,0009	0,0008
C5_5	-0,0007	0,0001	-0,0003
C5_6	0,0013	0,0017	0,0015
C6_1	-0,0002	-0,0001	-0,0001
C6_2	-0,0009	-0,0007	-0,0008
C6_3	-0,0018	-0,0017	-0,0017
C6_4	0,0030	0,0036	0,0033
C6_5	0,0013	0,0028	0,0020
C6_6	0,0009	0,0006	0,0008
C7_2	0,0042	0,0049	0,0045
C7_3	0,0056	0,0057	0,0057
C7_4	0,0036	0,0043	0,0039
C7_5	0,0043	0,0043	0,0043
C7_6	0,0027	0,0028	0,0027
C7_7	0,0005	0,0011	0,0008
C8_1	0,0028	0,0028	0,0028
C8_2	-0,0007	0,0000	-0,0004
C8_3	-0,0019	-0,0019	-0,0019
C8_4	-0,0011	-0,0004	-0,0007
C8_5	0,0015	0,0016	0,0015
C8_6	0,0014	0,0019	0,0016
CN_1	-0,0021	0,0014	-0,0003
CN_2	0,0003	0,0025	0,0014
CN_3	-0,0001	-0,0001	-0,0001
CN_4	-0,0012	-0,0007	-0,0009
CN_5	0,0026	0,0020	0,0023
CN_6	-0,0023	-0,0020	-0,0022

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.6 – Resultados médios de $\mu\sigma$ relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Combinação	Deslocamento Duto Curto		Deslocamento Duto Longo		Valor médio do $\mu\sigma$	Variação do $\mu\sigma$ em relação a combinação N
	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)		
1	0	1	0	-1	-0,0032	-0,7%
2	0	1	0	1	0,0032	0,8%
3	0	-1	0	-1	-0,0075	-1,8%
4	0	-1	0	1	0,0001	0,0%
5	1	0	1	0	0,0012	0,3%
6	1	0	-1	0	0,0006	0,1%
7	-1	0	1	0	0,0037	0,9%
8	-1	0	-1	0	0,0005	0,1%
N	0	0	0	0	0,0000	

Fonte: Autor (2017)

4.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DOS CABEÇOTES EM DINAMÔMETRO

Para a realização dos ensaios de plena carga e de emissões utilizou-se metodologia simplificada para avaliação comparativa do *swirl*, isto é, dentre os diversos parâmetros disponíveis no motor, foram analisados o torque, consumo específico de combustível, o índice de fumaça, CO, HC, MP e NOx.

Necessitou-se efetuar uma relativização dos valores medidos no dinamômetro entre todas as combinações de cabeçotes, para manter a confidencialidade de informações da empresa, adotando-se como referência o menor valor medido de cada parâmetro, subtraindo-o dos demais valores daquele mesmo parâmetro.

Para todas as combinações utilizou-se o mesmo motor descrito anteriormente no capítulo 3.4 e o mesmo banco de dinamômetro.

Pode-se destacar como principais sistemas de controle e insumos utilizados nos ensaios:

- *Puma System*, que recebe as entradas e saídas do sistema, isto é, interpreta os protocolos dos sistemas e aquisição de dados;
- *Smart Sampler AVL 472*, que faz a medição de MP;
- *Smoke Meter AVL 415S*, que faz a medição de fumaça ou FSN;
- *Horiba Mexa 7100D*, que faz as medições dos emissores CO, HC, NOx;
- *Fuel Mass Flow Meter AVL 735S*, que faz a medição de vazão de massa de combustível;

- *Sensyflow FMT700-P*, que faz a medição de vazão para gás;
- Diesel S10;
- Líquido de arrefecimento *Zerex*;
- Filtro do *Smart* para análise do MP, com membrana de diâmetro de 70mm;
- Filtro do *Horiba* para análise das emissões, com membrana de diâmetro de 47mm.

4.3.1 Análise dos resultados de plena carga

As Tabela 4.7, Tabela 4.8, Tabela 4.9, Tabela 4.10, Tabela 4.11, Tabela 4.12, Tabela 4.13, Tabela 4.14 e Tabela 4.15 apresentam os resultados de plena carga para cada uma das combinações de cabeçotes. Consideraram-se como os fatores mais importantes para serem analisados: o torque, o consumo específico de combustível e o índice de fumaça ou FSN. É importante ressaltar que estes resultados são extraídos da média das duas medições de plena carga para cada combinação.

Tabela 4.7 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 1

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	34	48,3	0,21
1950	133	43,2	0,20
1900	238	39,0	0,20
1800	339	32,7	0,17
1600	532	19,4	0,06
1540	610	16,3	0,03
1400	813	11,8	0,01
1300	986	8,2	0,02
1250	1012	6,8	0,01
1200	1012	4,9	0,01
1180	1023	4,4	0,02
1000	1069	0,1	0,01

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.8 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 2

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	39	47,5	0,19
1950	138	42,7	0,19
1900	244	39,0	0,21
1800	354	32,7	0,18
1600	542	19,9	0,05
1540	616	16,6	0,04
1400	836	12,3	0,03
1300	1009	8,6	0,02
1250	1032	7,3	0,02
1200	1030	5,3	0,02
1180	1036	4,6	0,02
1000	1071	0,1	0,01

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.9 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 3

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	0	50,7	0,18
1950	103	46,0	0,19
1900	206	42,5	0,19
1800	310	35,3	0,17
1600	507	20,8	0,08
1540	579	18,0	0,04
1400	779	13,4	0,02
1300	945	9,7	0,02
1250	971	8,6	0,03
1200	971	6,7	0,02
1180	982	6,2	0,02
1000	1023	5,0	0,01

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.10 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 4

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	25	48,4	0,17
1950	121	43,2	0,14
1900	221	39,6	0,16
1800	324	33,2	0,15
1600	514	19,7	0,05
1540	591	16,4	0,04
1400	806	12,3	0,03
1300	987	8,8	0,02
1250	1017	7,5	0,01
1200	1013	6,0	0,02
1180	1018	4,7	0,01
1000	1057	0,4	0,02

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.11 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 5

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	37	48,0	0,18
1950	139	43,4	0,17
1900	243	39,5	0,15
1800	338	33,8	0,15
1600	545	22,6	0,06
1540	619	18,7	0,03
1400	828	13,9	0,02
1300	1005	10,3	0,02
1250	1024	8,5	0,01
1200	1017	6,0	0,02
1180	1027	5,1	0,02
1000	1068	0,2	0,01

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.12 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 6

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	25	48,4	0,14
1950	120	43,6	0,16
1900	220	39,9	0,15
1800	319	33,7	0,15
1600	517	20,5	0,07
1540	593	17,7	0,04
1400	811	12,8	0,02
1300	992	9,6	0,01
1250	1018	7,6	0,01
1200	1013	6,0	0,01
1180	1021	5,2	0,01
1000	1066	0,3	0,02

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.13 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 7

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	34	48,0	0,20
1950	133	43,0	0,20
1900	234	39,1	0,18
1800	332	33,2	0,16
1600	526	20,9	0,07
1540	604	18,9	0,05
1400	820	14,5	0,03
1300	1013	11,6	0,02
1250	1044	9,9	0,01
1200	1030	6,8	0,02
1180	1034	5,5	0,02
1000	1076	0,5	0,02

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.14 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação 8

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	44	47,1	0,14
1950	143	42,1	0,09
1900	246	38,4	0,09
1800	345	32,2	0,10
1600	542	19,3	0,04
1540	617	16,0	0,03
1400	835	11,7	0,01
1300	1014	8,5	0,01
1250	1044	7,2	0,01
1200	1048	5,4	0,02
1180	1064	4,9	0,01
1000	1109	0,0	0,00

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.15 – Resultados médios de plena carga relativizados da combinação N

Rotação (rpm)	Torque (Nm)	Consumo específico (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
2000	11	50,6	0,21
1950	113	46,1	0,24
1900	219	42,2	0,26
1800	326	35,5	0,26
1600	525	20,9	0,06
1540	599	17,8	0,05
1400	806	13,0	0,03
1300	975	9,2	0,02
1250	995	8,4	0,02
1200	994	6,4	0,01
1180	1000	5,8	0,02
1000	1045	2,3	0,02

Fonte: Autor (2017)

O Gráfico 4.2 apresenta os resultados de torque das combinações de cabeçotes.

Gráfico 4.2 – Resultados de torque relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Percebe-se uma uniformidade no formato da curva, entretanto, a combinação 3, seguida da combinação N apresentam os menores valores de torque medidos. Uma possível razão para este fenômeno é o fato da combinação 3 apresentar o maior resultado de *swirl* médio e o menor resultado de $\mu\sigma$ médio.

A combinação 6, que apresenta o segundo maior resultado de *swirl* médio, não demonstrou a mesma variação da combinação 3, provavelmente porque o resultado de $\mu\sigma$ médio não obteve variação considerável.

A combinação 7, que obteve menor resultado de *swirl* médio e maior resultado $\mu\sigma$ médio, apresenta maior valor de torque apenas no ponto de 1250rpm. Já a combinação 8 obteve os maiores valores para a maioria dos pontos de rotação medidos, com um aumento entre 2 a 3,5% quando comparada à combinação 3.

O Gráfico 4.3 apresenta os resultados de consumo específico de combustível das combinações de cabeçotes.

Gráfico 4.3 – Resultados de consumo específico de combustível relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Percebe-se que a combinação 3 e N apresentam os maiores valores de consumo específico de combustível nos três primeiros e nos quatro últimos pontos de rotações do gráfico, com um aumento entre 1 a 1,5% em relação as demais combinações.

Nos pontos de médias rotações do gráfico, isto é, de 1250rpm a 1600rpm, quem demonstra maior consumo específico de combustível são as combinações 5 e 7. Uma possível razão é que estas combinações possuem os maiores valores médios de $\mu\sigma$.

Já a combinação 8, que obteve os maiores valores de torque para a maioria dos pontos medidos, também coerentemente obteve os menores valores de consumo específico de combustível para a maioria dos pontos medidos, com uma redução entre 0,7% a 1,8% quando comparada a combinação 3.

O Gráfico 4.4 apresenta os resultados do número de fumaça das combinações de cabeçotes.

Gráfico 4.4 – Resultados de fumaça relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

As combinações apresentam entre elas uma uniformidade nos valores medidos até o ponto de rotação de 1600rpm. A partir do ponto de 1800rpm até o último ponto de 2000rpm, percebe-se um aumento brusco nos valores medidos do FSN, com a combinação N demonstrando os maiores valores e a combinação 8 os menores valores deste trecho, repetindo o fato apresentado para os resultados de consumo de combustível. Já a combinação 3, que também apresentou alto consumo de combustível neste trecho, para os resultados de FSN não demonstrou esta correlação.

4.3.2 Análise dos resultados de emissões ESC

As Tabela 4.16, Tabela 4.17 e Tabela 4.18 apresentam os resultados das três medições do ensaio de emissões ESC para cada uma das combinações de cabeçotes.

Tabela 4.16 – Resultados de emissões do primeiro ensaio ESC relativizados

	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	MP (g/kWh)
C1	0,016	0,382	0,021	0,008
C2	0,019	0,481	0,014	0,008
C3	0,000	0,128	0,011	0,000
C4	0,014	0,560	0,030	0,009
C5	0,015	0,316	0,009	0,010
C6	0,005	0,309	0,023	0,012
C7	0,041	0,271	0,017	0,010
C8	0,008	0,367	0,019	0,007
CN	0,012	0,138	0,000	0,007

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.17 – Resultados de emissões do segundo ensaio ESC relativizados

	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	MP (g/kWh)
C1	0,010	0,460	0,022	0,007
C2	0,024	0,487	0,024	0,010
C3	0,003	0,118	0,017	0,001
C4	0,016	0,560	0,036	0,007
C5	0,015	0,305	0,014	0,012
C6	0,009	0,224	0,033	0,011
C7	0,040	0,206	0,006	0,010
C8	0,007	0,317	0,014	0,007
CN	0,015	0,113	0,001	0,008

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.18 – Resultados de emissões do terceiro ensaio ESC relativizados

	CO (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	MP (g/kWh)
C1	0,008	0,348	0,019	0,008
C2	0,017	0,524	0,024	0,008
C3	0,000	0,000	0,001	0,002
C4	0,011	0,544	0,038	0,008
C5	0,013	0,291	0,014	0,011
C6	0,015	0,239	0,041	0,011
C7	0,045	0,178	0,009	0,010
C8	0,007	0,327	0,016	0,008
CN	0,017	0,101	0,000	0,006

Fonte: Autor (2017)

Os Gráfico 4.5, Gráfico 4.6, Gráfico 4.7 e Gráfico 4.8 apresentam os resultados médios entre as três medições dos ensaios ESC para cada combinação de cabeçotes.

Gráfico 4.5 – Resultados médios de emissões CO relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.6 – Resultados médios de emissões NOx relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.7 – Resultados médios de emissões HC relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.8 – Resultados médios de emissões MP relativizados para cada combinação dos cabeçotes

Fonte: Autor (2017)

Para melhor entendimento da influência do *swirl* e do $\mu\sigma$ durante a combustão do motor testado no dinamômetro, estudaram-se as emissões de cada ponto do ensaio. Nesta avaliação os seguintes fatores foram considerados: consumo específico de combustível, NOx e FSN.

4.3.3 Análise dos resultados ponto a ponto de emissões ESC

As Tabela 4.19, Tabela 4.20, Tabela 4.21, Tabela 4.22, Tabela 4.23, Tabela 4.24, Tabela 4.25, Tabela 4.26 e Tabela 4.27 demonstram os resultados médios de cada uma das combinações entre os três ensaios ESC, para cada um dos treze pontos avaliados.

Tabela 4.19 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 1

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	2312,7	85,780	0,11
1300	100	5,5	3,822	0,00
1600	50	22,2	0,637	0,08
1600	75	15,6	1,165	0,06
1300	50	4,9	2,210	0,07
1300	75	0,2	3,786	0,01
1300	25	22,8	2,384	0,13
1600	100	17,2	1,342	0,04
1600	25	48,4	1,932	0,14
2000	100	45,2	0,255	0,16
2000	25	125,1	0,847	0,13
2000	75	49,2	0,352	0,12
2000	50	66,0	0,363	0,12

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.20 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 2

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	1876,8	74,160	0,11
1300	100	5,6	3,922	0,00
1600	50	22,1	0,757	0,08
1600	75	15,4	1,389	0,08
1300	50	4,7	2,269	0,06
1300	75	0,0	3,736	0,01
1300	25	21,8	2,444	0,13
1600	100	16,8	1,436	0,03
1600	25	48,3	2,042	0,13
2000	100	44,3	0,377	0,14
2000	25	124,9	0,899	0,12
2000	75	49,0	0,428	0,10
2000	50	65,7	0,481	0,10

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.21 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 3

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	4408,8	113,977	0,10
1300	100	7,3	2,996	0,00
1600	50	25,3	0,557	0,07
1600	75	14,2	0,959	0,08
1300	50	8,2	2,045	0,06
1300	75	1,0	3,476	0,01
1300	25	28,9	2,297	0,13
1600	100	19,0	0,983	0,06
1600	25	54,3	1,859	0,12
2000	100	48,0	0,001	0,16
2000	25	135,6	0,679	0,15
2000	75	49,2	0,011	0,12
2000	50	72,9	0,266	0,10

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.22 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 4

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	2061,1	82,017	0,11
1300	100	6,1	3,890	0,00
1600	50	22,6	0,832	0,07
1600	75	15,9	1,399	0,07
1300	50	5,1	2,482	0,07
1300	75	0,6	3,909	0,01
1300	25	22,3	2,497	0,14
1600	100	17,4	1,483	0,04
1600	25	49,7	2,104	0,14
2000	100	45,3	0,357	0,17
2000	25	126,6	1,053	0,15
2000	75	49,5	0,490	0,12
2000	50	66,0	0,535	0,11

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.23 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 5

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	1871,0	68,955	0,11
1300	100	6,1	3,663	0,00
1600	50	22,2	0,568	0,08
1600	75	15,9	1,053	0,08
1300	50	4,5	2,449	0,06
1300	75	0,3	3,536	0,01
1300	25	21,8	2,458	0,11
1600	100	18,0	1,037	0,04
1600	25	47,8	2,188	0,10
2000	100	45,4	0,189	0,16
2000	25	124,5	1,173	0,11
2000	75	49,7	0,214	0,10
2000	50	65,9	0,498	0,08

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.24 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 6

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	2317,2	85,925	0,11
1300	100	6,6	3,274	0,00
1600	50	22,4	0,653	0,08
1600	75	16,3	1,007	0,08
1300	50	4,9	2,507	0,05
1300	75	0,2	3,822	0,00
1300	25	22,7	2,259	0,12
1600	100	18,0	1,100	0,05
1600	25	49,8	2,085	0,11
2000	100	46,3	0,094	0,16
2000	25	127,8	1,024	0,14
2000	75	50,3	0,132	0,11
2000	50	66,8	0,431	0,10

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.25 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 7

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	2928,6	87,875	0,12
1300	100	7,8	3,739	0,01
1600	50	24,1	0,463	0,09
1600	75	17,5	0,875	0,07
1300	50	5,6	2,105	0,08
1300	75	1,5	3,529	0,01
1300	25	23,3	2,194	0,13
1600	100	18,3	1,083	0,06
1600	25	51,1	1,947	0,13
2000	100	47,0	0,000	0,18
2000	25	127,1	1,061	0,12
2000	75	51,5	0,108	0,12
2000	50	66,7	0,367	0,10

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.26 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação 8

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	3721,9	38,794	0,11
1300	100	6,8	3,524	0,00
1600	50	23,1	0,646	0,06
1600	75	16,2	1,101	0,05
1300	50	5,0	2,346	0,06
1300	75	0,5	3,741	0,00
1300	25	23,4	2,353	0,10
1600	100	17,9	1,190	0,03
1600	25	50,4	1,974	0,11
2000	100	46,3	0,187	0,13
2000	25	127,9	1,119	0,11
2000	75	50,2	0,267	0,07
2000	50	67,0	0,543	0,08

Fonte: Autor (2017)

Tabela 4.27 – Resultados médios dos ensaios ESC ponto a ponto relativizados para a combinação N

Rotação (rpm)	Carga (%)	Consumo específico (g/kWh)	NOx (g/kWh)	Fumaça (FSN) (-)
500	Marcha lenta	4341,5	119,277	0,11
1300	100	7,4	3,238	0,01
1600	50	25,0	0,554	0,10
1600	75	17,8	1,010	0,09
1300	50	7,5	2,041	0,07
1300	75	2,2	3,296	0,02
1300	25	27,3	2,396	0,13
1600	100	19,3	0,932	0,05
1600	25	53,7	1,826	0,13
2000	100	47,8	0,071	0,21
2000	25	134,2	0,736	0,14
2000	75	53,1	0,095	0,13
2000	50	71,2	0,330	0,10

Fonte: Autor (2017)

Os Gráfico 4.9, Gráfico 4.10, Gráfico 4.11 e Gráfico 4.12 estão relacionados com os resultados de ponto a ponto para o consumo específico de combustível nas diferentes rotações e cargas do ensaio no dinamômetro.

Gráfico 4.9 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.10 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.11 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.12 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Observa-se que para as faixas de rotações e de cargas apresentadas, as combinações 3, 7 e N demonstram os maiores valores medidos de consumo específico.

Estes resultados estão coerentes com os resultados demonstrados anteriormente nas análises de consumo específico para os ensaios de plena carga, onde as combinações 3, 7 e N possuem os maiores valores.

Os Gráfico 4.13, Gráfico 4.14, Gráfico 4.15 e Gráfico 4.16 estão relacionados com os resultados de ponto a ponto para a emissão de NOx nas diferentes rotações e cargas do ensaio no dinamômetro.

Gráfico 4.13 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.14 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.15 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.16 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Observa-se que para as faixas de rotações e de cargas apresentadas, as combinações 3, 7 e N demonstram comportamento oposto ao consumo específico, com os menores valores medidos de NOx.

Observa-se que a combinação 4 apresenta valores de emissão de NOx medidos comparativamente maiores.

Os Gráfico 4.17, Gráfico 4.18, Gráfico 4.19 e Gráfico 4.20 estão relacionados aos resultados de ponto a ponto para a emissão de FSN nas diferentes rotações e cargas do ensaio no dinamômetro.

Gráfico 4.17 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.18 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.19 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.20 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Observa-se que para as faixas de rotações e de cargas apresentadas, a combinação N demonstra os maiores valores medidos de fumaça.

Assim como para os resultados apresentados de plena carga, a combinação N é a que demonstra os maiores valores medidos, principalmente a partir dos 75% de carga.

Para os menores valores medidos também ocorre fato similar ao apresentado nos resultados de plena carga, pois a combinação 8 apresenta os menores medidos.

5 CONCLUSÕES

Para os resultados medidos do número de *swirl*, as combinações 3, 6 e 7 apresentaram valores além dos limites aceitáveis de desenho para o modelo de cabeçote utilizado, sendo a combinação 3 relevante ao deslocamento no eixo y e as combinações 6 e 7 relevantes ao deslocamento no eixo x. A combinação 7 apresentou resultado de -22,7% abaixo do limite mínimo aceitável e as combinações 3 e 6 apresentaram, respectivamente, resultados de 18,2% e 17,8% acima do limite máximo aceitável.

O estudo de Silva (2016) foi realizado através do modelamento em CFD com o mesmo tipo de cabeçote deste trabalho, porém com valor nominal de *swirl* diferente, devido ao modelo de assento de válvula considerado em sua simulação. Entre as suas simulações de deslocamento, cinco condições eram similares às combinações deste trabalho, sendo as combinações 1, 4, 6 e 7 com deslocamentos de 1mm no eixo x ou y, e a combinação N com os deslocamentos nominais. Observou-se em seus resultados de número de *swirl*, comportamento similar ao apresentado neste trabalho, entre o sentido de deslocamento dos dutos de admissão e a tendência positiva ou negativa de variação em relação ao valor nominal. A simulação referente à combinação 6 deste trabalho demonstrou valor de 16,7% acima da faixa de variação permissível.

No estudo de Soares (2010), os resultados finais do número de *swirl* demonstraram variação máxima em torno de 4% em relação aos cabeçotes da combinação nominal e 1% no valor de $\mu\sigma$, porém os resultados gerais de desempenho e níveis de emissões do motor não apresentaram variações significativas.

Nos resultados de plena carga observou-se coerência com a literatura estudada, principalmente na combinação 3, com o maior valor médio de *swirl*, menores valores de torque e maiores valores de consumo específico. A combinação 8 demonstrou maiores valores de torque e menores valores de consumo específico. Já a combinação 7, que apresentou menor valor médio de *swirl* e maior valor médio de $\mu\sigma$, esperava-se um comportamento inverso à combinação 3, com maiores valores de torque e menores valores de consumo específico, porém em médias rotações, apresentou os maiores valores de consumo específico. E os resultados de fumaça apresentaram uniformidade nos valores, todos próximos de zero para as

baixas e médias rotações, com variações em altas rotações, quando a combinação N demonstrou os maiores valores e a combinação 8 os menores valores deste trecho.

Os resultados das emissões ESC não demonstraram variação, além dos limites aceitáveis para o tipo de motor utilizado, nos índices avaliados de CO, NOx, HC e MP. Com isso, estudou-se o comportamento de ponto a ponto das emissões com o intuito de uma melhor correlação aos resultados do número de *swirl* e $\mu\sigma$. Os resultados de consumo específico permaneceram similares aos de plena carga, com os maiores valores para as combinações 3, 7 e N e consequentemente essas três combinações apresentaram menores valores de NOx. Os resultados de fumaça também demonstraram comportamento similar aos apresentados na plena carga, com a combinação N apresentando os maiores valores medidos e a combinação 8 com os menores valores medidos.

Em resumo, os resultados gerais deste estudo não evidenciaram variação relevante no comportamento do motor, mesmo para as combinações de cabeçotes que apresentaram valores do número de *swirl* além dos limites mínimos ou máximos aceitáveis.

Portanto, a conclusão deste estudo propõe aumentar as tolerâncias de posicionamento de X e Y dos dutos de admissão, na região de montagem dos assentos de válvulas de admissão.

Para respaldar esta proposição e definir os melhores valores para as novas tolerâncias de posicionamento de X e Y dos dutos de admissão, indica-se como ideias para trabalhos futuros:

- Considerar o estudo em CFD de Silva (2016) como ponto de partida para novas simulações, pois acredita-se ser possível aplicabilidade do estudo para outros modelos de assento de válvula e de válvula;
- Criar novas combinações em CFD para os dutos de admissão, com variações dos eixos x e y simultaneamente, para verificar o impacto das diagonais resultantes;
- Efetuar estudo estatístico para detectar quais seriam os deslocamentos entre os eixos x e y que mais comprometem o resultado do *swirl*, para este modelo de cabeçote;

- Verificar a possibilidade de agregar ao estudo em CFD modelos de combustão e compressão do motor, evitando-se a fabricação de uma quantidade maior de cabeçotes;
- Fabricar um lote de cada uma das combinações que demonstrarem maior impacto nos resultados de *swirl* e no funcionamento do motor, para comparar a eficácia entre a teoria do estudo em CFD e a prática com o funcionamento do motor.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, A. K. **Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuel for internal combustion engines**. Progress in Energy Combustion Science 33, 2007, p.233-271.

ANFAVEA. **Cartilha Proconve P7**. São Paulo, 2012. Website: <http://www.anfavea.com.br/cartilhas.html>. Acesso em 24 de novembro de 2016.

BOSCH, ROBERT. **Emissions-control technology for diesel engines**. Robert Bosch GmbH, Germany, 2005.

DELPHI. **Worldwide emissions standards-heavy duty and off-highway vehicles**. Delphi, 2012, Michigan.

DEMERS D., WALTERS G. **Guide to exhaust emission control options**. BAeSEMA, Bristol, 1999.

DIAZ-SANCHEZ D. **The role of diesel exhaust particles and their associated polyaromatic hydrocarbons in the induction of allergic airway disease**. Allergy 52, 1997, p.52-56.

DIESELNET. Website: https://www.dieselnet.com/tech/diesel_history.php. Acesso em 12 de julho de 2016.

ENGLERT N. **Fine particles and human health—a review of epidemiological studies**. Toxicology Letters 149, 2004, p.235-242.

FAIZ A., WEAVER C.S., WALSH M.P. **Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. The World Bank, Washington, 1996.

FERGUSON, C. R. **Internal Combustion Engines**. New York: John Wiley & Sons, 1986, p. 287-305.

HEISLER, H. **Advanced engine technology**. SAE Head of transport studies, London, 2002.

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

HOEKMAN S.K., ROBBINS C. **Review of the effects of biodiesel on NOx emissions**. Fuel Processing Technology 96, 2012, P.237-249.

KAGAWA J. **Health effects of diesel exhaust emissions-a mixture of air pollutants of worldwide concern**. Toxicology 181-182, 2002, p.349-353.

KAMPA M., CASTANAS E. **Human health effects of air pollution**. Environmental Pollution 151, 2008, p. 362-367.

LEE T., PARK J., KWON S., LEE J., KIM J. **Variability in operation-based NO_x emission factors with different test routes, and its effects on the real-driving emissions of light diesel vehicles.** Science of the Total Environment 461-462, 2013, p.377-385.

MAJEWSKI W.A., KHAIR M.K. **Diesel emissions and their control.** SAE International, Warrendale, 2006. ISBN 10: 0-7680-0674-0.

PAYRI F., BERMUDEZ V.R., TORMOS B., LINARES W.G. **Hydrocarbon emissions speciation in diesel and biodiesel exhausts.** Atmospheric Environment 43, 2009, p.1273-1279.

PRASAD R., BELLA V.R. **A Review on Diesel Soot Emission, its Effect and Control.** Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 5 (2), 2010, p.69-86.

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

SCANIA. Website: <http://www.scania.com.br/caminhoes/tecnologia-do-veiculo/scania-scr/>. Acesso em 21 de junho de 2016.

SILVA, S. R. **Estudo da variação do número de *swirl* em cabeçote de motor diesel através do modelamento em CFD.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. 161 p.

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

SOUZA, R. A. **Efeito do deslocamento dos dutos de admissão no número de “*swirl*” e no desempenho de motor diesel.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016. 104 p.

TIGHE C. J., TWIGG M. V., HAYHURST A. N., DENNIS J. S. **The kinetics of oxidation of Diesel soots by NO₂.** Combustion and Flame 159:77–90, 2012.

ZHENG M., MULENGA M.C., READER G.T., WANG M., TING D.S., TJONG J. **Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion.** Fuel 87, 2008, p.714-722.

APÊNDICE A – Gráficos de consumo específico ponto a ponto

Gráfico 4.21 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.22 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.23 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.24 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.25 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.26 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 2000rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.27 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.28 – Resultados de consumo específico ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

APÊNDICE B – Gráficos de NOx ponto a ponto

Gráfico 4.29 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.30 – Resultados de NOx ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.31 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.32 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.33 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.34 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.35 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1300rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.36 – Resultados de NOx ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

APÊNDICE C – Gráficos de FSN ponto a ponto

Gráfico 4.37 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.38 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 25% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.39 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.40 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 50% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.41 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1300rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.42 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 75% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.43 – Resultados de FSN ponto a ponto em 1600rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 4.44 – Resultados de FSN ponto a ponto em 2000rpm e 100% de carga relativizados

Fonte: Autor (2017)