

RICARDO BALBÃO CAMPIGLIA

Estudo da influência da geometria da tubulação a montante da válvula de aceleração no desempenho do sistema de admissão de ar de um motor de combustão interna de ignição por faísca

São Paulo
2007

RICARDO BALBÃO CAMPIGLIA

Estudo da influência da geometria da tubulação a montante da válvula de aceleração no desempenho do sistema de admissão de ar de um motor de combustão interna de ignição por faísca

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre
Profissional em Engenharia
Automotiva

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr.
Maurício Assumpção Trielli

São Paulo
2007

DEDICATÓRIA

À minha esposa Ligia

Companheira, amiga, que compreendendo a importância deste trabalho dispôs do tempo que temos reservado para a família, ofereceu apoio, se preocupou, torceu e vibrou com cada uma das etapas vencidas durante este desafio.

Muito Obrigado.

AGRADECIMENTOS

À Ligia minha esposa, por todo seu apoio.

Ao prof. Dr. Maurício Assumpção Trielli, meu orientador, que com sabedoria e paciência soube direcionar-me para que este trabalho fosse concluído com a qualidade aqui apresentada.

À Delphi Automotive System do Brasil Ltda, na pessoa do Sr. Roberto M. Stein, empresa onde trabalho que cedeu recursos para que os ensaios pudessem ser executados.

Aos técnicos dos dinamômetros de motores 2 e 3 do Centro Tecnológico da Delphi que souberam ouvir e compreender as necessidade impostas por este trabalho e conduzir os ensaios como solicitado.

A Wagner Lemmermann, meu chefe na Delphi, que sabendo da importância deste trabalho me liberou, por várias vezes, em horário comercial, para que etapas deste pudessem ser concluídas.

Henry Ford did not invent the automobile.

He didn't even "invent" the assembly line.

So what did he do?

He learned well.

He took risks.

He saw failure as a lesson.

He perfected the product, the process and the policies that shaped the American auto industry.

He became a celebrity, and he made some mistakes.

He found a remarkable museum to inspire others.

NEVER STOP LEARNING.

RESUMO

O impacto nos parâmetros de desempenho (potência, consumo específico e emissões) de um motor de combustão interna pela alteração de sua curva de eficiência volumétrica devida à modificação dos componentes do sistema de admissão de ar, deve ser muito bem conhecido pelos projetistas deste tipo de máquina térmica.

Com o objetivo de fornecer subsídios técnicos adicionais, este trabalho apresenta um estudo experimental realizado em motor de ignição por faísca, com sistema eletrônico de injeção de combustível, onde um reservatório de dimensões significativas (plenum) foi instalado a montante da válvula de aceleração do sistema de admissão de ar, em 3 diferentes configurações de montagem, buscando verificar a influência de sua presença na eficiência volumétrica do motor. Além disso, foi verificada, também, a influência do sentido de abertura da borboleta da válvula de aceleração, posicionando-a a 90° relativamente à sua montagem original.

Os ensaios realizados utilizaram como referência (*baseline*) a condição do motor operando com seu sistema de admissão de ar original.

Os resultados obtidos permitem verificar, por exemplo, que a utilização do plenum construído para os ensaios, promoveu um aumento de desempenho do motor para regimes de cargas parciais com abertura de borboleta acima de 75% e para rotações superiores a 3500 rpm.

Durante todos os ensaios realizados em bancada e descritos neste trabalho, foram, também, medidas as produções dos gases poluentes, com o objetivo de identificar a variação destas produções, buscando associá-las com mudança na eficiência volumétrica do sistema e por consequência no desempenho do motor.

Palavras-chave: Motor de combustão interna. Eficiência volumétrica. Sistema de admissão de ar.

ABSTRACT

The impact on internal combustion engine performance (power, fuel consumption and emissions) due to its volumetric efficiency variation based on changes in the intake air system components must be well known by thermal machines designers.

With the objective to provide additional technical subsidy, this work presents an experimental study done using a spark ignition internal combustion engine, equipped with electronic injection system, where a large reservoir (plenum) were assembled before intake air system throttle body. 3 different assembly configurations, with a proposal to verify the influence of its presence on engine volumetric efficiency, were tested. Besides it was also verified the influence of throttle body valve opening orientation, positioning it 90° relatively to its original position.

Ran tests used as reference (baseline) the engine operating conditions using its original intake air system

Obtained results allow verifying, as an example, that the plenum used during al. tests, promoted an engine performance increase at partial loads condition when the throttle valve was positioned at or above 75% and speeds greater than 3500 rpm.

During al. bench tests, which are described in here, production of emission gases were measured with the aim to identify their variation and associate them to system volumetric efficiency variation and, per consequence, to engine performance.

Keywords: Internal combustion engine. Volumetric efficiency. Intake air system

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Breve histórico do desenvolvimento de motores de combustão interna:	2
2.2	Sistema de preparação de mistura combustível-ar para motores de ignição por faísca:.....	4
2.2.1	Carburador:.....	5
2.2.2	Sistema eletrônico de injeção de combustível no coletor de admissão:	5
2.2.2.1	Sistema monoponto (<i>single point</i>):	6
2.2.2.2	Sistema multiponto (<i>multi point</i>):	6
2.2.3	Sistema Eletrônico de injeção direta na câmara de combustão (<i>GDI-Gasoline Direct Injection</i>):.....	7
2.3	Sistema de preparação de mistura combustível-ar para motores de ignição por compressão:.....	8
2.4	Eficiência Volumétrica:	9
2.4.1	Considerações iniciais:	9
2.4.2	Equacionamento:.....	13
2.4.2.1	Eficiência volumétrica de um ciclo ideal:.....	16
2.4.2.2	Efeito da composição do combustível, fase e relação combustível-ar:	17
2.4.2.3	Efeitos da fração do combustível vaporizado, do calor de vaporização, e do calor de transferência:.....	18
2.4.3	Outros efeitos sobre a eficiência volumétrica:	20
2.4.3.1	Efeito da relação da pressão de admissão e exaustão e relação de compressão:	20
2.4.3.2	Efeitos quasi-estáticos e dinâmicos combinados:	20
2.4.3.2.1	Perdas por atrito:	20
2.4.3.2.2	Efeito RAM	23
2.4.3.2.3	Fluxo reverso na admissão:.....	24
2.4.3.2.4	Sintonia (<i>Tunning</i>):.....	24
2.4.3.3	Velocidade média do pistão:	26
2.4.4	Redução da eficiência volumétrica às condições padrão:	29
2.4.5	Modelo matemático:	30
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL:	34
3.1	Considerações iniciais:	34
3.2	Procedimento Experimental:.....	36
4	RESULTADOS e ANÁLISES:.....	42
4.1	Considerações iniciais:	42
4.2	Resultados e análises comparativas entre os ensaios 1 e 2:	42
4.2.1	Análise comparativa de parâmetros de desempenho:.....	43
4.2.2	Análise comparativa de emissões:.....	47
4.3	Resultados e análises comparativos entre os ensaios 1 e 3, 4 e 5:	50
4.3.1	Análise comparativa de parâmetros de desempenho:.....	51
4.3.2	Análise comparativa de emissões:.....	54

4.3.3. Análise utilizando os grupos adimensionais número de Reynolds e coeficiente de perda de carga:	58
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	63
ANEXO 1 – EQUIPAMENTO E COMPONENTES UTILIZADOS:.....	65
1 Equipamento utilizado:	65
2 Componentes utilizados:.....	70
ANEXO 2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E INCERTEZAS:.....	76
1 Procedimento experimental:	76
2 Incerteza:	78
1 Ensaio 1:	89
2 Ensaio 2:	95
3 Ensaio 3:	101
4 Ensaio 4:	108
5 Ensaio 5:	115
ANEXO 4 – TEORIA DA SEMELHANÇA APLICADA AO ESCOAMENTO EM CONDUTOS:	122
1. O diagrama de Moody:	122
2. Perdas localizadas:	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	134

LISTA DE FIGURAS

Figuras Capítulo 2:

Figura 2.1- Ilustração motor de quartos tempos (ciclo Otto).....	2
Figura 2.2: Energia perdida entre o motor de combustão interna e as rodas de tração do veículo.....	9
Figura 2.3: Troca de gases em motor de quarto tempos de ignição por faísca	12
Figura 2.4: Perdas de pressão no sistema de admissão de um motor de combustão interna, quatro tempos com ignição por centelha, determinadas para uma condição de vazão permanente.....	22
Figura 2.5: Pressão instantânea nos coletores de admissão e exaustão de um motor de quatro cilindros, quatro tempos, com ignição por faísca e válvula de aceleração na posição de máxima abertura.	25
Figura 2.6: Eficiência volumétrica em função da velocidade média do pistão para motores Diesel e de ignição por faísca.	26
Figura 2.7: Impactos na eficiência volumétrica devidos a diferentes fenômenos os quais afetam a vazão de ar em função da rotação do motor.	27
Figura 2.8: Esquema ilustrativo representando componentes utilizados durante ensaios e volume de controle.....	31

Figuras Capítulo 3:

Figura 3.1: Volume de controle (linha tracejada azul) e locais onde pressão e temperatura foram medidas durante ensaios. (a) configuração sem plenum; (b) configuração com plenum.	35
Figura 3.2: Sistema de admissão de ar original do motor testado.....	38
Figura 3.3: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração rotacionada 90°.	38
Figura 3.4: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição vertical com entrada da massa de ar filtrada pelo lado superior deste.	39
Figura 3.5: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição vertical com entrada da massa de ar filtrada pelo lado direito deste.	39
Figura 3.6: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição horizontal com entrada da massa de ar filtrada pelo lado direito deste.	40
Figura 3.7: Reservatório de dimensões significantes ou plenum	40
Figura 3.8: Medidor de vazão de ar do tipo anemômetro e barril de 200 L.....	41

Figuras Capítulo 4:

Figura 4.1: Seção em corte de parte do sistema de admissão de ar (mangueira de conexão do filtro de ar à válvula de aceleração, válvula de aceleração e coletor de admissão). Figuras (a) válvula de aceleração montada na posição original do sistema (ensaio 1); (b) válvula de aceleração montada rotacionada 90° sentido horário (ensaio 2).	43
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos Capítulo 2

Gráfico 2.1: curva genérica de eficiência volumétrica	10
Gráfico 2.2: Efeito do vapor de combustível na relação de pressão parcial na admissão.	18
Gráfico 2.3: Pressão no coletor de escape em função da carga no coletor de admissão e rotação para um motor com quatro cilindros de quatro tempos com ignição por centelha.	23
Gráfico 2.4: Efeito do comprimento do duto do coletor de admissão na eficiência volumétrica em função da rotação.	28
Gráfico 2.5: Efeitos da variação do tempo (a) e curso (b) das válvulas na eficiência volumétrica em função da rotação.	29

Gráficos Capítulo 4

Gráfico 4.1: Comparação entre eficiências volumétricas obtidas nos ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	44
Gráfico 4.2: Torque medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	45
Gráfico 4.3: Potência medida durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	45
Gráfico 4.4: Consumo específico medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	46
Gráfico 4.5: Dióxido de carbono (CO_2) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	47
Gráfico 4.6: Monóxido de carbono (CO) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	48
Gráfico 4.7: Óxido de nitrogênio (NO_x) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	48
Gráfico 4.8: Oxigênio (O_2) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	49
Gráfico 4.9: Hidrocarboneto (HC) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	49
Gráfico 4.10: Comparação entre eficiências volumétricas obtidas nos ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	52
Gráfico 4.11: Torque medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	52
Gráfico 4.12: Potência medida durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	53
Gráfico 4.13: Consumo específico medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	53
Gráfico 4.14: Dióxido de carbono (CO_2) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	55
Gráfico 4.15: Monóxido de carbono (CO) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	55
Gráfico 4.16: Óxido de nitrogênio (NO_x) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	56
Gráfico 4.17: Oxigênio (O_2) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.	56
Gráfico 4.18: Hidrocarboneto (HC) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração e comparados com valores medidos durante ensaio 1.	57
Gráfico 4.19: Comparativo do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds para ensaios 1 e 3.	61
Gráfico 4.20: Comparativo do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds para ensaios 1 e 5.	62

LISTA DE TABELAS

Tabelas Capítulo 3

Tabela 3.1: ficha técnica do motor de combustão interna utilizado durante os ensaios realizados.....	35
Tabela 3.2: Valores correspondentes a condição atmosférica padrão.....	36

Tabelas Capítulo 4

Tabela 4.1: Valores calculados de eficiência volumétrica (E.V.) para ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.....	44
Tabela 4.2: Valores calculados de eficiência volumétrica (E.V.) para ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.....	51
Tabela 4.3: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 1 com 100% de abertura da válvula de aceleração.....	59
Tabela 4.4: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 3 com 100% de abertura da válvula de aceleração.....	59
Tabela 4.5: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 5 com 100% de abertura da válvula de aceleração.....	60
Tabela 4.6: Valores utilizados para cálculo do número de Reynolds e coeficiente de perda de carga.....	60

1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é mostrar a influência da geometria do sistema de admissão de ar no desempenho de motores de combustão interna de ignição por faísca.

Neste sentido, verificou-se, inicialmente, os efeitos do posicionamento da válvula borboleta de aceleração nos parâmetros de desempenho do motor, priorizando a eficiência volumétrica. Posteriormente, com o mesmo propósito, foi introduzido um reservatório de dimensões significativas (plenum) a montante desta válvula, montado em diferentes posições.

Este trabalho justifica-se pelo fato dos fabricantes de motores buscarem, a cada novo lançamento, melhorias em seus desempenhos para se manterem competitivos e enquadrados nos limites de exigências de naturezas ambientais.

Sintonia (*tunning*) de um plenum ou de dutos de um coletor de admissão ou coletores com mais de um perfil de dutos, também conhecidos como coletores variáveis, sincronismo das aberturas de válvulas de admissão e escape e correto dimensionamento do convergente-divergente (venturi) da válvula de aceleração, são exemplos de modificações apresentadas em novos lançamentos que melhoraram o desempenho desses motores.

Afim de atingir os objetivos desejados, foram realizados ensaios de motores em bancada dinamométrica para levantamento das curvas características necessárias para as comparações de desempenho. Buscou-se, também, desenvolver um modelo matemático simplificado para explicar os resultados obtidos e permitir a avaliação de novas propostas de projetos de sistemas de admissão de ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico do desenvolvimento de motores de combustão interna:

Em 1876, N. Otto juntamente com G. Daimler e W. Maybach desenvolveram um motor a quatro tempos (ciclo Otto), assim definidos:

1. admissão – onde ar e combustível são admitidos para dentro de uma câmara de combustão;
2. compressão seguida de ignição – onde a mistura previamente admitida é comprimida e então queimada, sendo que o início desta queima é dada por uma faísca e;
3. combustão e expansão – a mistura queimada expande-se gerando trabalho mecânico disponibilizado no eixo do motor;
4. exaustão – permite que os gases gerados após queima da mistura sejam expelidos da câmara de combustão, permitindo assim que um novo ciclo inicie-se.

A operação do motor de quatro tempos atualmente em produção e o utilizado para o experimento descrito nesta dissertação, está ilustrada na figura 2.1 reproduzida de Heywood (1988).

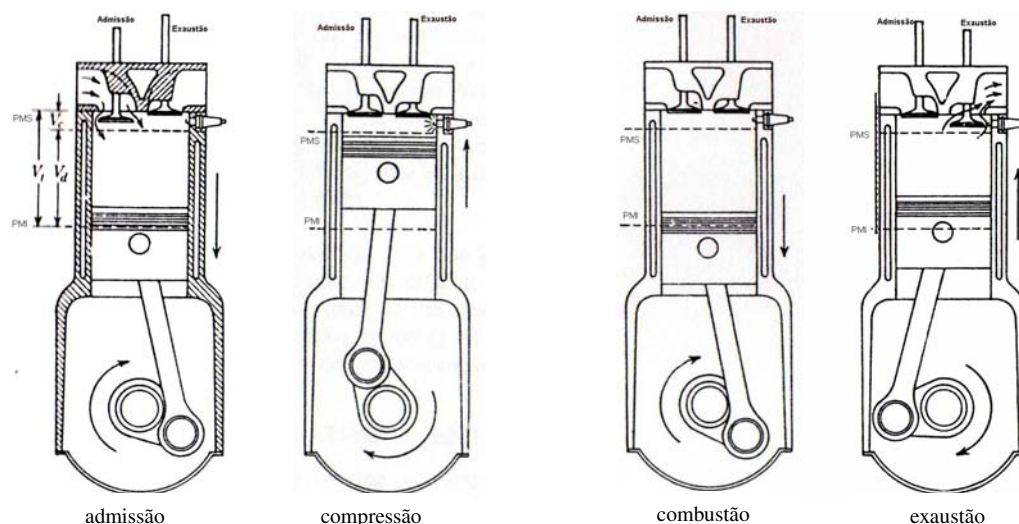


Figura 2.1- Ilustração motor de quartos tempos (ciclo Otto)

O ciclo inicia-se com a admissão de ar e combustível, nos motores equipados com carburadores ou sistemas eletrônicos de injeção de combustível montados no coletor de admissão ou apenas ar, para motores de injeção direta de combustível na câmara de combustão. Após a admissão a válvula se fecha iniciando o ciclo de compressão, onde mistura combustível-ar ou apenas ar é comprimido. A combustão é então iniciada via faísca do sistema de ignição ou devido a altas temperaturas resultantes de altas pressões. A combustão da mistura gera o ciclo de expansão, o qual é também conhecido como ciclo de trabalho. Este ciclo gera energia que impulsiona o pistão. Por fim o ciclo de exaustão, que encarrega-se de remover o resultado da queima da mistura para que um novo ciclo de admissão possa iniciar. A remoção dos gases gerados durante combustão é feita pela válvula de exaustão presente no cabeçote do motor.

Uma grande quantidade de novos desenvolvimentos para melhorar o motor de quatro tempos proposto por Otto, aconteceram quando foram percebidos os benefícios do sistema recém desenvolvido. Um dos resultados de todo este esforço foi a concepção de um motor de combustão interna de dois tempos, onde a exaustão e admissão (troca de gases) ocorrem durante o final da expansão e o início da compressão.

Posteriormente, observando que o desempenho desses motores de dois tempos era significativamente comprometido pelas dificuldades inerentes ao processo de troca de gases, suas aplicações resumiram-se a motores de ignição por faísca de pequeno porte (moto serra, ciclo motor) e a motores de ignição por compressão de grandes portes (navios, caminhões off-road). Estas aplicações típicas se justificam fundamentalmente pelo fato de serem motores em geral mais leves e de fabricação menos complexa que a dos motores de quatro tempos. Significativas melhorias nos motores de grande porte de dois tempos foram conseguidas com o uso de sobre-alimentadores que melhoraram sua eficiência volumétrica, compensando as perdas de ar que ocorrem durante o processo de troca de gases.

Outro fato importante no desenvolvimento de motores a quatro tempos apareceu no final dos anos 30. Eugene Houdry desenvolveu um novo processo de transformação do petróleo, o qual gerou um combustível com maior poder anti-detonante. Este novo combustível também chamado de gasolina permitiu o aumento

drástico da taxa de compressão que por sua vez melhorou torque, potência e eficiência volumétrica dos motores de combustão interna de ciclo Otto.

Nas últimas décadas novos fatores impulsionaram mudanças nos motores de combustão interna tipo ciclo Otto e em sua operação. O primeiro fator e o causador das maiores mudanças, foi a necessidade de se controlar as emissões de gases poluentes e poluição sonora, e o segundo foi a necessidade de se diminuir o consumo de combustível por quilômetro rodado.

O sistema eletrônico de injeção de combustível, a recirculação de gases advindos do sistema de escapamento do motor, isto é, após combustão e a sintonia (*tunning*) de coletores de admissão, são exemplos de modificações, que os fabricantes de motores de combustão interna desenvolveram para reduzir ou eliminar as emissões de poluentes e reduzir o consumo de combustível.¹

2.2 Sistema de preparação de mistura combustível-ar para motores de ignição por faísca:

Bosch *Handbook* (1993) descreve e ilustra vários tipos de sistemas de formação de mistura combustível-ar.

Para que ocorra uma combustão praticamente completa e, conseqüentemente a produção de pequenas quantidades de gases poluentes, a mistura deve ser próxima da estequiométrica, ou seja, as quantidades de ar e combustível presentes na câmara de combustão devem estar em quantidades adequadas para que não se verifique sobras desses reagentes.

Os sistemas de formação de mistura podem ser divididos em:

¹ Nota: A palavra *tunning*, quando empregada a coletor de admissão pode ser traduzida como sendo o dimensionamento do plenum e dutos do coletor de tal forma a utilizar a frequência de pulsação do ar admitido pelo sistema para aumentar o enchimento da câmara de combustão.

2.2.1 Carburador:

Sistema ultrapassado não mais utilizado pelas montadoras brasileiras, no qual a formação de mistura é conseguida com a passagem do ar por um convergente-divergente (tubo venturi) que promove a introdução do combustível na massa de ar. Este sistema pode ser chamado de mecânico (hidropneumático) pois é totalmente dependente de ações mecânicas como por exemplo abertura da borboleta aceleradora acionada pelo pedal do acelerador, ajustes internos ao carburador (*gicleurs* ou gargulantes, bóia), temperatura do ambiente entre outras.

2.2.2 Sistema eletrônico de injeção de combustível no coletor de admissão:

A razão da introdução dos sistemas eletrônicos de injeção de combustível em substituição ao carburador é diminuir a emissão de poluentes. Esse tipo de sistema quantifica a massa de ar admitida e busca injetar de forma estequiométrica o combustível para a formação da mistura.

Para quantificar a massa de ar admitida, há, atualmente, dois tipos de sistemas:

- o primeiro conhecido como velocidade/densidade, que calcula a massa de ar admitida pelo motor em função da rotação do mesmo, da temperatura do ar e da sua pressão (absoluta) no coletor de admissão, da constante universal dos gases, da cilindrada total do motor.

- o segundo utiliza um medidor de massa de ar do tipo anemômetro de fio quente onde a variação de temperatura no fio aquecido, devido ao fluxo de ar passando por este, faz variar sua resistência variando a tensão de retorno à central eletrônica do sistema de injeção de combustível. O funcionamento detalhado deste medidor está descrito no anexo 1.

Classificam-se em sistemas monoponto e multiponto.

2.2.2.1 Sistema monoponto (*single point*):

Normalmente este tipo de sistema utiliza o método de medição da massa de ar admitida conhecido como velocidade/densidade. O combustível é injetado acima da borboleta da válvula de aceleração misturando-se ao ar e formando a mistura combustível-ar. Em geral, a mistura formada neste sistema é mais próxima da mistura estequiométrica que aquela formada em sistemas carburados; o sistema define quando e qual a massa de combustível a ser injetada na massa de ar admitida. A desvantagem deste sistema está no fato da mistura combustível-ar percorrer todo o coletor de admissão e passar a(s) válvula(s) de admissão as quais podem gerar uma mistura não estequiométrica dentro da câmara de combustão.

2.2.2.2 Sistema multiponto (*multi point*):

No Brasil, os sistemas multiponto também utilizam o método de medição de massa de ar admitida conhecido como velocidade/densidade. Contudo há veículos de luxo que utilizam em seus motores sistema de medição de massa de ar com tecnologia de fio aquecido. O combustível é injetado logo acima da(s) válvula(s) de admissão onde estão localizados os injetores. Os injetores podem trabalhar em grupos (bancos), ou seja, acionados dois a dois, injetam combustível quando um cilindro está realizando o tempo de admissão e o outro o de expansão; podem ser seqüenciais, ou seja, cada injetor é acionado quando o cilindro correspondente estiver no seu tempo de admissão.

Para qualquer uma das tecnologias acima descritas, observa-se uma redução na produção de gases poluentes em comparação a motores que utilizam o sistema monoponto.

2.2.3 Sistema Eletrônico de injeção direta na câmara de combustão (*GDI-Gasoline Direct Injection*):

Esse sistema normalmente utiliza um sistema de medição da massa de ar com tecnologia de fio aquecido. O combustível é injetado diretamente na câmara de combustão (ou na pré-câmara). Devido às características funcionais deste sistema é possível trabalhar com misturas pobres que permitem a redução do consumo e da produção de emissões de poluentes.

Barbosa (1997), Brunetti (1996) e Bosch (1993) descrevem a mistura para motores ciclo Otto com injeção direta de combustível como mistura estratificada, onde tipicamente dentro da câmara de combustão, esta não é uniforme apresentando zonas onde a razão combustível-ar variam.

Em geral, este tipo de sistema satisfaz as exigências legais mais rígidas de emissões.

Stone (1999) assegura que, nos sistemas de injeção direta de combustível, devido ao pouco tempo de homogeneização do combustível com ar, a estratificação é um fato.

Kowalewicz (1984) descreve o uso intensivo do sistema de injeção direta de combustível em máquinas utilizadas durante a Segunda Guerra Mundial, como tanques e aviões, pois este sistema de injeção permite altas pressões médias efetivas e altas rotações do motor.

Barbosa (1997) descreve as seguintes razões para a utilização de sistemas de injeção direta de combustível com carga estratificada em motores ciclo Otto:

- a maior economia de combustível, principalmente em cargas parciais;
- menores emissões específicas;
- a possibilidade de queima de combustível de baixa octanagem.

Springer (1996) relata a grande quantidade de pesquisas realizadas por montadoras Japonesas como Toyota e Mitsubishi com motores com sistemas de injeção direta de combustível com cargas estratificadas. Segundo Springer, a Toyota desenvolveu um motor ciclo Otto de injeção direta e carga estratificada que opera com relação combustível-ar de até 50:1, isto é, 50 partes de ar para uma parte de combustível.

A Toyota do Japão apresentou em 1996 um novo motor com sistema de injeção direta de combustível e carga estratificada, onde a estratificação da carga é proporcionada pela alta pressão de injeção do combustível (12MPa), pelo formato da câmara de combustão e pela disposição das 4 válvulas por cilindro. O motor também possui sistema de recirculação de gases queimados (EGR). Este conjunto de modificações permitiu à Toyota construir um motor com consumo de combustível 30% menor e redução dos níveis de emissões em 95%.

Obert (1971), descreve que a mistura com carga estratificada é mais resistente à detonação pois o resultado da combustão não é um gás inflamável e o tempo de aquecimento do combustível é inferior, uma vez que a injeção do combustível inicia-se tardiamente durante a compressão.

Heywood (1988) descreve inúmeras tentativas de se construir um motor combinando as melhores vantagens do motor ciclo Otto com o motor ciclo Diesel. Uma das características que se busca é o motor ciclo Otto com relação combustível-ar entre 12:1 à 15:1. Para que este motor combinado seja uma realidade sugere-se a seguinte configuração:

- injeção de combustível direta, de alta pressão ocorrendo durante a compressão (evitando-se os problemas de detonação e ignição espontânea);
- início da combustão utilizando-se sistema de ignição para que seja possível controlar o início da queima;
- eliminação da restrição a passagem do ar admitido, controlando torque e potência do motor através da quantidade de combustível injetada por ciclo.

2.3 Sistema de preparação de mistura combustível-ar para motores de ignição por compressão:

Uma das grandes diferenças entre este tipo de motor e o ciclo Otto está na forma como a combustão é iniciada. Para esse sistema a combustão inicia-se instantes depois da injeção do combustível dentro da câmara ou da pré-câmara de combustão. Isto ocorre pois o ar presente no instante da injeção do combustível

estará na sua temperatura de auto-ignição decorrente da pressão aumentada devido a compressão deste.

Recentemente os motores de ignição por compressão fabricados no Brasil, passaram a utilizar controle eletrônico que quantifica a massa de ar admitida e gerencia a dosagem de combustível injetada.

2.4 Eficiência Volumétrica:

2.4.1 Considerações iniciais:

A eficiência de um veículo é medida pela potência disponível nas rodas de tração em relação à taxa de geração de energia conseguida com o combustível utilizado. A figura 2.2 reproduzida de Stockel et al. (1996), ilustra de forma simplista, porém objetiva, onde as perdas na conversão de energia estão localizadas.

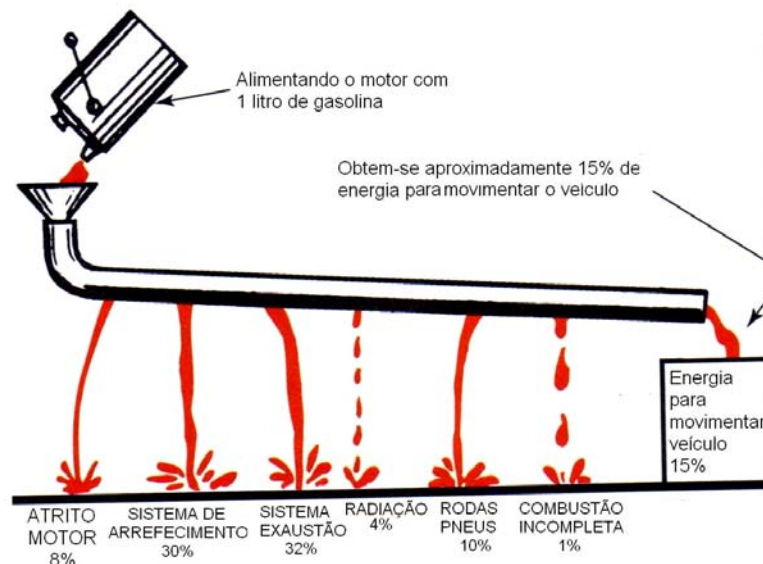


Figura 2.2: Energia perdida entre o motor de combustão interna e as rodas de tração do veículo

Cerca de 70% das perdas de um veículo provem do motor de combustão interna distribuídas em perdas térmicas, mecânicas e volumétricas.

A avaliação da eficiência térmica baseia-se na quantidade de energia existente na mistura combustível-ar convertida em trabalho durante a combustão.

A eficiência mecânica é a relação entre o trabalho gerado durante a combustão e o disponível no eixo de manivelas (virabrequim). Uma eficiência mecânica típica para este tipo de máquina é de aproximadamente 80%.

A eficiência volumétrica, também conhecida como capacidade de admissão ou rendimento volumétrico, é uma relação entre a capacidade real de um motor em admitir ar ou mistura combustível-ar e sua capacidade teórica de admitir ar ou mistura nas condições atmosféricas do local onde o motor funciona.

O gráfico 2.1, reproduzido de Stockel et al. (1996), ilustra uma curva genérica de eficiência volumétrica. É possível observar que em uma determinada rotação tem-se um valor máximo para esta eficiência. Com o aumento da velocidade do pistão e para uma fixada configuração dos componentes do sistema de admissão, ocorre o aumento dos efeitos de atrito sobre o escoamento que implicam na redução da vazão em massa de ar ou combustível-ar admitido.

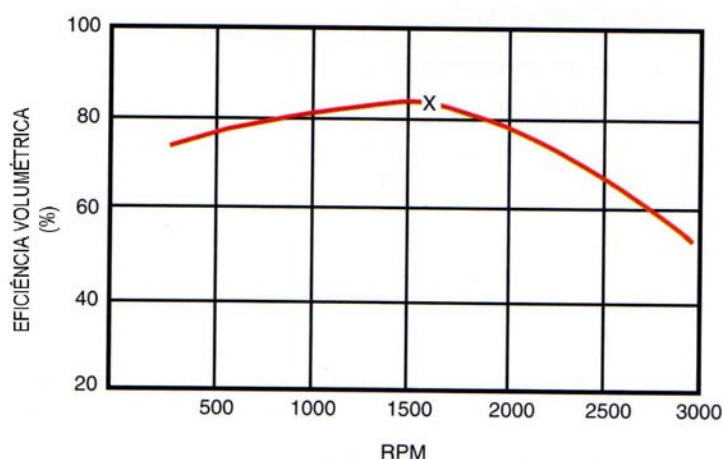


Gráfico 2.1: curva genérica de eficiência volumétrica

A remoção dos gases queimados ao final do ciclo de combustão e a admissão de nova carga de ar ou mistura combustível-ar no início do ciclo de admissão são, respectivamente, as funções dos ciclos de exaustão e admissão. Estes processos são também conhecidos como processos de troca de gases. Sabe-se que o momento de força (torque) de um motor de combustão interna para uma determinada rotação é função crescente da massa de ar admitida. Desta forma, admitir uma maior quantidade de massa de ar durante ciclo de admissão e reter esta massa dentro da câmara de combustão podem ser consideradas metas fundamentais do processo de troca de gases de um motor. Ou seja, para definir o

desempenho dos processos de troca de gases para motores alternativos de pistões, mede-se a eficiência volumétrica.

Vários estudos já foram realizados com o intuito de aumentar a eficiência volumétrica dos motores podendo citar como exemplo o desenvolvimento dos sobre-alimentadores (compressores mecânicos e turbo-compressor) ou o trabalho apresentado por Wyszynski et al. (2002) publicado no congresso da SAE com o título *The volumetric efficiency of direct and port injection gasoline engines with different fuels*.

Os componentes do sistema de admissão (filtro de ar, mangueira, válvula de aceleração, coletor de admissão e válvula de admissão, etc) introduzem perdas ao escoamento do ar atmosférico para o motor bem como alguns componentes do sistema de exaustão (coletor de escape, tubulação de escape, conversor catalítico e um silencioso).

Para ilustrar, a figura 2.3 reproduzida de Heywood (1988), mostra a troca de gases em um motor de quatro tempos de ignição por faísca. O item “a” desta figura mostra a evolução da pressão ao longo do sistema de admissão, que é dependente da rotação do motor, da resistência ao fluxo gerada por cada componente, da área da seção transversal por onde passa o ar que está sendo admitido e da densidade deste. O item “b” da mesma figura mostra os diagramas de válvulas e trecho do diagrama indicado ($p \times V$) correspondente à troca de gases. O item “c” corresponde a uma representação esquemática dos sistemas de troca de gases (admissão e exaustão). O item “d” mostra a evolução da pressão (p) internamente ao cilindro com o deslocamento das válvulas (L_v) de escape e admissão, em função do ângulo do eixo de manivelas. É comum nos motores modernos o denominado cruzamento das válvulas onde ambas permanecem abertas ao final do ciclo de exaustão e início do ciclo de admissão. Isso permite uma melhor eliminação dos gases queimados e um melhor enchimento da câmara de combustão com carga nova (processo de lavagem), aproveitando a inércia dos fluídos envolvidos (ar e gases queimados). O cruzamento de válvulas é particularmente interessante quando o motor está trabalhando em altas rotações permitindo aumentar a eficiência volumétrica nesses casos. As linhas cheias do item “a” representam a condição da válvula de aceleração em máxima abertura enquanto as linhas tracejadas representam a válvula de aceleração parcialmente aberta. T_0 e p_0 são as propriedades do ar atmosféricas

denominadas temperatura e pressão de estagnação, e Δp corresponde as perdas de pressão em diferentes pontos do sistema de admissão.

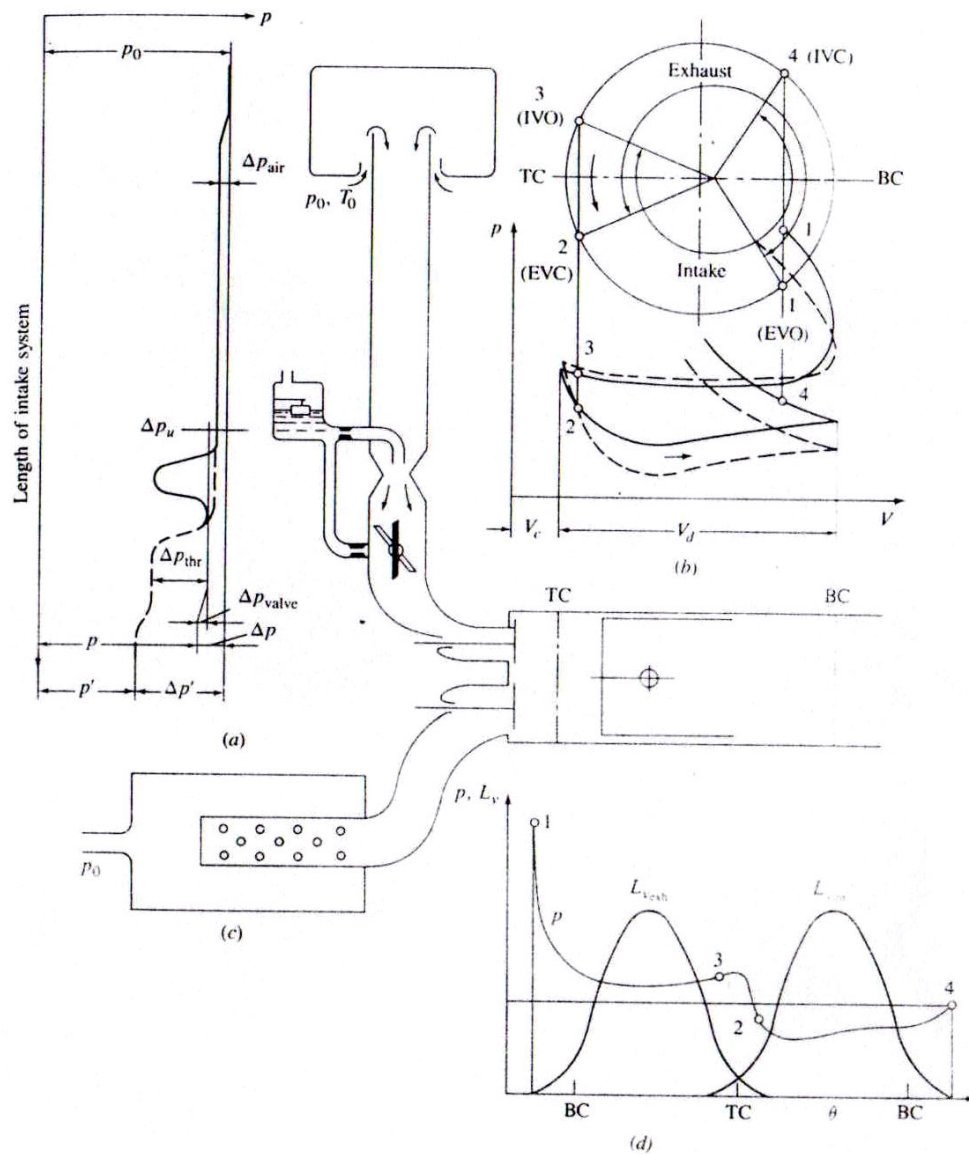


Figura 2.3: Troca de gases em motor de quarto tempos de ignição por faísca

Condições específicas de funcionamento do motor afetam a eficiência volumétrica como, por exemplo: variação do tempo de abertura da válvula, volume deslocado pelo cilindro (cilindrada), efeitos de inércia do gás, velocidade de propagação de ondas de pressão nos sistemas de admissão e escape, pressão atmosférica local. Por essas razões análises computacionais freqüentemente tornam-se complicadas, e parâmetros como eficiência volumétrica são verificados experimentalmente.

2.4.2 Equacionamento:

Taylor (1971) descreve que se mantidas a razão combustível-ar, a razão de compressão e a qualidade da faísca (intensidade e tempo de duração), a eficiência térmica indicada de um motor de ignição por faísca permanecerá constante e a potência indicada será diretamente proporcional à capacidade de admissão de ar. Já para motores Diesel, ou seja, motores de ignição por compressão, não se deve admitir que a eficiência indicada permaneça constante, pois o processo de ignição em motores Diesel pode ser afetado pela pressão e temperatura de admissão e a rotação do motor. Entretanto, pode-se afirmar que a potência máxima em qualquer conjunto de condições é limitada pela capacidade de admissão de ar de um motor de combustão interna.

A capacidade de admissão de ar de um motor de combustão interna corresponde ao produto da capacidade máxima de ar que poderia ser admitida por esta máquina por sua eficiência volumétrica, ou ainda, a capacidade volumétrica é uma relação entre a massa de ar admitida, durante o processo de aspiração, pela massa de ar teórica possível de ser aspirada. Esta relação é chamada de eficiência volumétrica e expressa conforme equação 2.1.

Quando a eficiência volumétrica é definida utilizando-se medições feitas na região da válvula de admissão, define-se a qualidade de bombeamento do cilindro e da válvula de admissão ou das válvulas de admissão. Quando as medições são feitas na tomada de ar para o motor, a eficiência volumétrica resultante mede o desempenho do escoamento para todos os componentes do sistema de admissão (caixa do filtro de ar, filtro de ar, mangueira de conexão da caixa do filtro de ar à válvula de aceleração, válvula de aceleração, coletor de admissão (plenum e dutos) e válvulas de admissão) e também da qualidade de bombeamento do cilindro.

Taylor também descreve que a eficiência volumétrica global pode ser utilizada quando tratar-se de um motor de combustão interna sem sobre-alimentação, pois as variações de pressão e temperatura nos componentes do sistema de admissão (filtro de ar, válvula de aceleração e coletor de admissão), são pequenas.

É possível avaliar a eficiência volumétrica para qualquer motor de combustão interna sob determinado conjunto de condições de operação, contanto que a massa de ar por unidade de tempo e a massa específica deste fluido possam ser medidas.

É possível perceber, com o exposto acima, que desde a invenção do motor de combustão interna, vários pontos que limitavam seu desempenho já foram desenvolvidos, como por exemplo, queima de combustível dentro de uma câmara de combustão sob pressão, utilização de combustível formulado, aditivos anti-detonantes entre outros.

Muito também foi feito com os componentes do sistema de admissão de ar, sendo que o ponto em comum para todos estes desenvolvimentos foi o aumento do torque e por consequência da potência. Porém, recentemente, devido às novas legislações, os fabricantes de motores foram obrigados a controlar os níveis de emissões de poluentes gerados por estes. Entretanto, para garantir mercado foram obrigados a reduzir o consumo de combustível. Para atingir as agressivas metas foram incorporados aos motores controles eletromecânicos, eletrônicos, softwares, entre outros .

Contudo a redução nas emissões e no consumo reduziu também o desempenho do motor (redução do torque e potência), sendo assim, os fabricantes viram-se forçados a buscar alternativas para recuperá-lo mantendo os níveis de emissões e consumo.

Para tal, uma das opções escolhidas pelos fabricantes é garantir um maior rendimento volumétrico ou eficiência volumétrica.

Como descrito acima, a eficiência volumétrica é o parâmetro utilizado para medir a eficiência do sistema de admissão de um motor de combustão interna. É expressa pela relação de massa de ar por unidade de tempo admitida durante ciclo de admissão, pela massa de ar por unidade de tempo possível de ser admitida.

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ar \text{ real}}}{\dot{m}_{ar \text{ teorica}}} \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde: η_v = eficiência volumétrica ou rendimento volumétrico.

\dot{m}_{ar} = massa de ar por unidade de tempo.

A massa de ar real por unidade de tempo é normalmente medida durante os ensaios de um experimento, enquanto a massa de ar teórica por unidade de tempo é calculada pela equação:

$$\dot{m}_{ar\text{teórica}} = \rho_{ar} V_t \frac{n}{x} \quad (\text{eq. 2.2})$$

onde ρ_{ar} = massa específica do ar admitido

V_t = cilindrada total do motor

n = números de rotações do eixo de manivelas por unidade de tempo

x = número de rotações completas do motor necessário para que todos seus cilindros realizem um tempo de admissão. Portanto, vale 2 para motores quatro tempos e 1 para motores de dois tempos.

A massa específica do ar admitido é calculada pela equação de estado dos gases perfeitos:

$$\rho_{ar} = \frac{P_{ar}}{RT_{ar}} \quad (\text{eq. 2.3})$$

onde p_{ar} = pressão absoluta do ar

T_{ar} = temperatura absoluta do ar

R = constante universal do ar como uma mistura de gases perfeitos (288 J/kg.K)

Substituindo ρ_{ar} na equação 2.2 pela equação 2.3 obtém-se:

$$\dot{m}_{ar\text{teórica}} = \frac{P_{ar}}{RT_{ar}} V_t \frac{n}{x} \quad (\text{eq. 2.4})$$

Substituindo-se $\dot{m}_{ar\text{teórica}}$ da equação 2.1 pela equação 2.4 define-se eficiência volumétrica como sendo:

$$\eta_v = \frac{xRT_{ar}\dot{m}_{ar_{real}}}{P_{ar}V_t n} \quad (\text{eq. 2.5})$$

2.4.2.1 Eficiência volumétrica de um ciclo ideal:

Uma expressão para eficiência volumétrica, considerando um ciclo idealizado, pode ser desenvolvida como função das seguintes variáveis:

- pressão da mistura na admissão p_i , temperatura T_i e relação combustível-ar (F/A);
- relação de compressão r_c ; pressão no escape p_e ; volumeno início da compressão; e massa total do fluído admitido.

A eficiência volumétrica global é, então:

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,0}V_d} = \frac{m(1-x_r)}{\rho_{a,0}[1+(F/A)]} \cdot \frac{r_c}{(r_c-1) \cdot V_1} \quad (\text{eq. 2.6})$$

onde: m é a massa total do fluído admitido;

m_a é a massa de ar disponível no estado 1 do ciclo (início da compressão);

V_d é a cilindrada total do motor;

r_c é a relação de compressão;

x_r é a fração da massa total correspondente ao gás residual

V_1 é o volume no início da compressão

O índice $a,0$ está associado às propriedades do ar nas condições atmosféricas. Em particular, $\rho_{a,0}$ é sua massa específica nessas condições.

Considerando os componentes gasosos da mistura como gases perfeitos, pode-se utilizar a equação de estado dos gases perfeitos

$$p = \rho RT \quad (\text{eq. 2.7})$$

para avaliar suas pressões parciais a partir das propriedades atmosféricas externas, como descrito a seguir.

2.4.2.2 Efeito da composição do combustível, fase e relação combustível-ar:

Para motores de ignição por faísca, quando no sistema de admissão estão presentes vapores de água e combustível gasoso, a pressão parcial do ar fica abaixo da pressão da mistura. Desta forma a pressão total no sistema de admissão pode ser escrita como a somatória das pressões dos componentes da mistura, isto se a mistura for formada por vapor d'água (p_w), combustível gasoso ou evaporado (p_f) e ar (p_a), a pressão na admissão é:

$$P_i = P_{a,i} + P_{f,i} + P_{w,i} \quad (\text{eq. 2.8})$$

Aplicando-se o conceito de gás ideal, tem-se:

$$\left(\frac{P_{a,i}}{P_i} \right) = \left[1 + \left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \right) \left(\frac{M_a}{M_f} \right) + \left(\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right) \left(\frac{M_a}{M_w} \right) \right]^{-1} \quad (\text{eq. 2.9})$$

A correção em função do vapor d'água é pequena, usualmente menor que 0,03. A relação entre pressões ($p_{a,i}/p_i$) em função da relação da massa de combustível-ar (m_f/m_a), para vários combustíveis comuns é mostrada no gráfico 2.2 reproduzido de Heywood (1988). Note que a relação da massa de combustível pela massa de ar (m_f/m_a) só se iguala à relação combustível-ar do motor se o combustível for totalmente vaporizado.

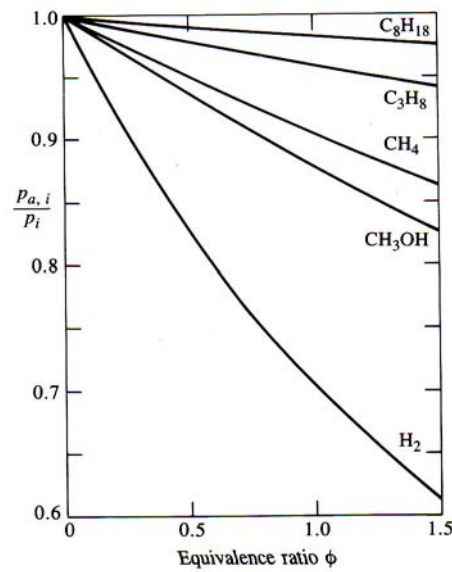


Gráfico 2.2: Efeito do vapor de combustível na relação de pressão parcial na admissão.

Para combustíveis líquidos convencionais como gasolina, o efeito do vapor de combustível e da relação combustível-ar é pequena, porém para combustíveis gasosos a eficiência volumétrica é reduzida consideravelmente devido ao vapor do combustível preencher um volume significativo do sistema de admissão.

2.4.2.3 Efeitos da fração do combustível vaporizado, do calor de vaporização, e do calor de transferência:

Para um escoamento a pressão constante, com vaporização do combustível líquido e transferência de calor, a equação da energia em regime permanente é:

$$\left[\dot{m} h_a + (1 - X_e) \dot{m}_f h_{f,L} + X_e \dot{m}_f h_{f,V} \right]_A + \dot{Q} + \left(\dot{m}_a h_a + \dot{m}_f h_{f,L} \right)_B \quad (\text{eq. 2.10})$$

Onde: X_e é a fração de massa evaporada;

Os índices da equação anterior significam:

a : propriedades do ar;

f : propriedades do combustível;

L : líquido;
 V : vapor;
 B : antes da evaporação;
 A : após evaporação;

Aproximando-se as variações das entalpias específicas h para cada componente da mistura por $c_p \Delta T$ e a entalpia de vaporização $h_{f,V} - h_{f,L}$ por $h_{f,LV}$, obtém-se:

$$T_A - T_B = \frac{(\dot{Q}\dot{m}_a - X_e)(F/A)h_{f,LV}}{C_{p,a} + (F/A)C_{v,L}} \quad (\text{eq. 2.11})$$

Uma vez que $c_{f,L} \approx 2c_{p,a}$ o último termo do denominador pode ser desprezado.

Se não houver transferência de calor para a mistura combustível-ar na admissão, a temperatura desta diminui na medida que o combustível é vaporizado. A completa evaporação do isooctano com $\phi = 1.0$ (relação combustível-ar adimensional), resulta em $T_A - T_B = -19^\circ\text{C}$ e para metanol nas mesmas condições, resulta em $T_A - T_B = -128^\circ\text{C}$. Na prática, o aquecimento da mistura ocorre e o combustível não vaporiza completamente antes de entrar na câmara de combustão. Dados experimentais mostram que a queda na temperatura do ar que acompanha a vaporização do combustível líquido é maior do que a redução da pressão parcial devida ao aumento do vapor de combustível. A eficiência volumétrica com vaporização de combustível, para uma mesma taxa de aquecimento, é alguns pontos percentuais maior.

Dados levantados durante testes de motor indicam que eficiência volumétrica tem uma dependência da raiz quadrada da temperatura, onde o resultado aproxima-se de um desempenho real de um motor de combustão interna.

2.4.3 Outros efeitos sobre a eficiência volumétrica:

2.4.3.1 Efeito da relação da pressão de admissão e exaustão e relação de compressão:

Heywood (1988) descreve que o aumento dos gases residuais na admissão diminui a eficiência volumétrica do motor. Esta variação da quantidade de gases residuais ocorre devido a variação das relações de pressão na admissão e no escape e compressão.

2.4.3.2 Efeitos quasi-estáticos e dinâmicos combinados:

Heywood (1988) e Barbosa (1997) descrevem que forças de atrito, pressão e inércia estão presentes quando um fluido escoar por tubos, câmaras, válvulas e outros sistemas. A importância dessas forças depende da velocidade do gás e da geometria das passagens e as junções. Os efeitos quasi-estáticos e dinâmicos são usualmente significantes. A eficiência volumétrica é afetada por parâmetros inter-relacionados como, por exemplo, rotação do motor, características dimensionais dos coletores de admissão e exaustão, válvula de admissão, e também por fenômenos não relacionados, são eles:

2.4.3.2.1. Perdas por atrito:

Durante o ciclo de admissão, as perdas geradas pelo fluxo de ar através de cada um dos componentes do sistema de admissão devido a atrito, faz com que a pressão na câmara de combustão (p_c) seja menor que a pressão atmosférica (p_{atm}) na dependência do quadrado da velocidade. A queda de pressão total é igual à

somatória das quedas de pressão em cada um dos componentes do sistema de admissão. As maiores perdas são registradas na válvula de admissão. Como resultado final, a pressão na câmara de combustão durante ciclo de admissão, quando o pistão desloca-se próximo de sua máxima velocidade, pode ser 10 à 20% menor que a atmosférica. A equação de Bernoulli pode ser usada para descrever, de forma simplificada, a queda de pressão para cada componente por onde o fluido atravessa, para um motor de ignição por faísca, a equação de Bernoulli pode ser aplicada para os componentes do sistema de admissão e exaustão.

$$\Delta p_j = \varepsilon_j \rho V_j^2 \quad (\text{eq. 2.12})$$

Onde: ξ_j = coeficiente de resistência para o componente em estudo (depende da geometria deste e das condições de escoamento);

V_j = velocidade local do fluido.

Se for considerado que o escoamento ocorre em regime permanente, V_j será igual à velocidade média do pistão e

$$V_j A_j = \bar{S}_p A_p \quad (\text{eq. 2.13})$$

Onde: A_j : mínima área de passagem do fluido;

A_p : área do pistão;

\bar{S}_p : velocidade média do pistão.

Com as equações acima pode-se avaliar a perda total de pressão por atrito como sendo:

$$P_{atm} - P_c = \sum \Delta P_j = \sum \varepsilon_j \rho V_j^2 = \rho \bar{S}_p^2 \sum \varepsilon_j \left(\frac{A_p}{A_j} \right)^2 \quad (\text{eq. 2.14})$$

Na equação 2.14 percebe-se o impacto da área de passagem do fluido para as perdas por atrito, quanto maior a área de passagem menor a perda e a dependência das perdas com a velocidade (rotação) do motor. A figura 2.4, reproduzida por Heywood (1988), demonstra as perdas por atrito quando o fluido atravessa os componentes do sistema de admissão de um motor quatro tempos de aplicação automotiva. Ratifica-se no teste por ele executado que as perdas de pressão por atrito variam com o quadrado da velocidade.

Uma análise equivalente de perda de pressão por atrito, para o sistema de exaustão indica níveis de pressão média maiores que a pressão atmosférica. O gráfico 2.3 reproduzido de Heywood (1988) demonstra a pressão medida no coletor de escape em função da pressão absoluta no coletor de admissão e da rotação de um motor automotivo com quatro cilindros e ignição por faísca. Para altas rotações e cargas do motor a pressão no coletor de escape é consideravelmente maior se comparada com a atmosférica.

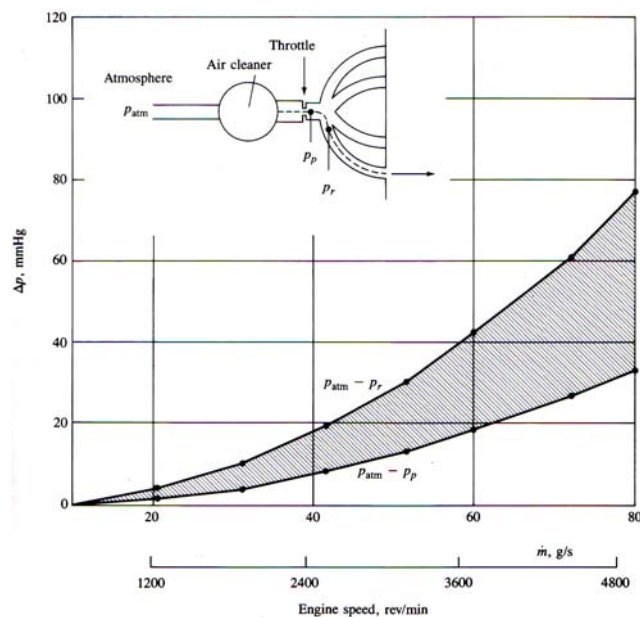


Figura 2.4: Perdas de pressão no sistema de admissão de um motor de combustão interna, quatro tempos com ignição por centelha, determinadas para uma condição de vazão permanente.

Curso = 89 mm. Diâmetro cabeça pistão = 84 mm

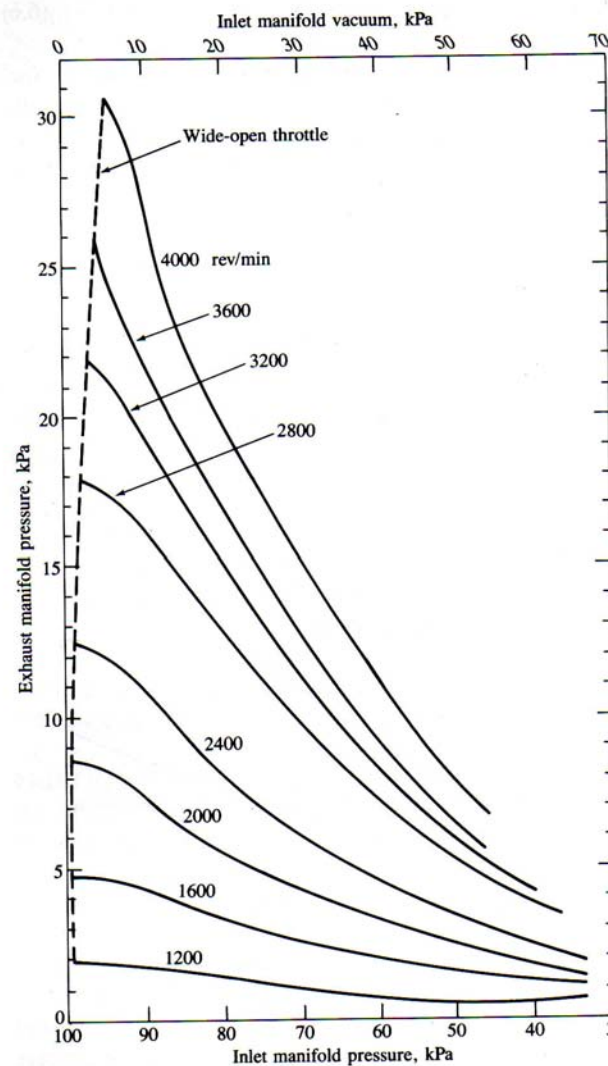


Gráfico 2.3: Pressão no coletor de escape em função da carga no coletor de admissão e rotação para um motor com quatro cilindros de quatro tempos com ignição por centelha.

2.4.3.2.2. Efeito RAM

A pressão no coletor de admissão varia para cada ciclo de admissão do motor. Este fenômeno ocorre devido às variações da velocidade do pistão e da área de abertura da válvula de admissão bem como dos efeitos da vazão não uniforme do fluido devido às variações de geometria. A massa de ar admitida e por consequência a eficiência volumétrica, é determinada pelo nível de pressão na região da válvula de admissão durante o período que esta está aberta. Para altas rotações do motor, a inércia do fluido presente no sistema de admissão aumenta a pressão na região da

válvula de admissão enquanto esta se fecha permitindo que o cilindro continue a encher enquanto o pistão reduz sua velocidade na região do ponto morto inferior (PMI) e início do ciclo de compressão. Este efeito aumenta com o aumento da rotação do motor.

2.4.3.2.3. Fluxo reverso na admissão:

Devido ao atraso no fechamento da válvula de admissão e sabendo que o fechamento ocorre após o início do ciclo de compressão, fluxo reverso de mistura recém admitida pode ocorrer empurrando mistura presente no cilindro de volta ao sistema de admissão. Este fenômeno é mais intenso quando o motor está funcionando em baixas rotações e inevitável se o sistema for dimensionado para utilizar o efeito RAM a altas rotações do motor.

2.4.3.2.4. Sintonia (*Tunning*):

Fluxo pulsante originado durante o ciclo de exaustão do motor de combustão interna, cria “ondas” de pressão no sistema de exaustão. A onda de pressão propaga-se na velocidade do som local relativa ao movimento dos gases no escape. As ondas de pressão são refletidas em direção ao cilindro do motor devido ao choque dessas com junções/obstruções existentes no coletor de escape. Para motores com vários cilindros as ondas de pressão refletidas interagem entre diferentes cilindros do motor, dificultando o processo de troca de gases. O sistema de exaustão é chamado de sintonizado quando a pressão na região da válvula de escape se reduz a medida que o ciclo de exaustão está chegando próximo ao seu fim.

Da mesma forma que ondas de pressão são refletidas no coletor de escape, este mesmo fenômeno ocorre no coletor de admissão, porém deseja-se que a pressão na região da válvula de admissão aumente ao final do ciclo de admissão

para que maior massa de ar seja admitida. Uma das formas de garantir o aumento da pressão na região da válvula de admissão é garantir que o tempo de propagação da “onda” existente no coletor de admissão coincida com o tempo entre uma abertura e outra da válvula de admissão. Sistema de admissão com tal característica é chamado sintonizado.

Este fenômeno é descrito por Jawad et al. (2001) em seu trabalho publicado no congresso SAE com o título *Intake system design for a formula SAE*, como uma das razões para o aumento de desempenho de um motor de combustão interna.

A figura 2.5, reproduzida por Heywood(1988), ilustra variações de pressão nos sistemas de admissão e exaustão de um motor de quatro cilindros, quatro tempos, com ignição por faísca e válvula de aceleração na posição de máxima abertura. A amplitude da flutuação de pressão aumenta substancialmente com o aumento da rotação do motor. As frequências primárias nos sistemas de admissão e exaustão correspondem às frequências do processo de admissão e exaustão de um cilindro individualmente.

A pressão p_1 foi medida à 150 mm a montante do cilindro 1 no duto 1 do coletor de admissão; a pressão p_2 foi medida à 200 mm a jusante do cilindro 1 no duto 1 do coletor de escape; a pressão p_3 , foi medida a 700 mm a jusante do cilindro 1 no duto 1 do coletor de escape. IO e EO correspondem ao período de abertura das válvulas de admissão e escape para o cilindro 1, respectivamente.

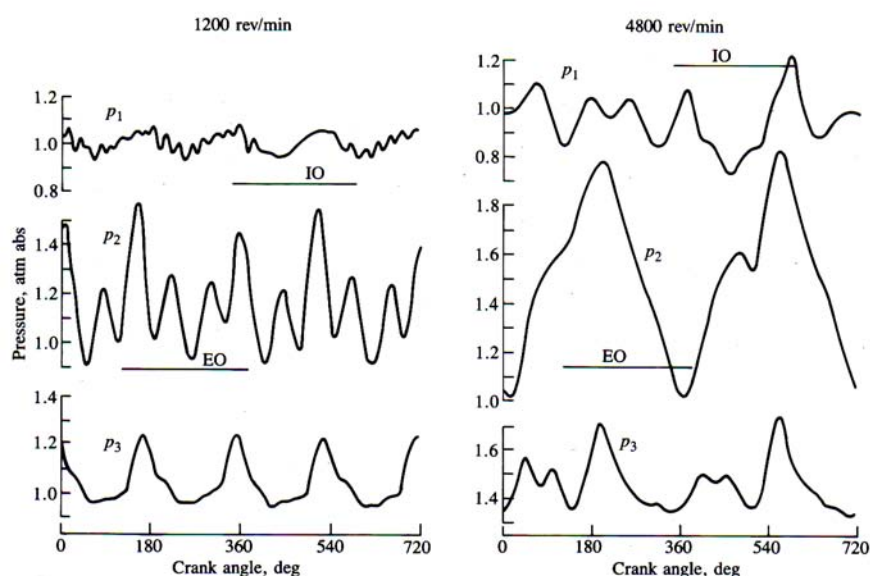


Figura 2.5: Pressão instantânea nos coletores de admissão e exaustão de um motor de quatro cilindros, quatro tempos, com ignição por faísca e válvula de aceleração na posição de máxima abertura.

2.4.3.3. Velocidade média do pistão:

Heywood (1988) descreve que os efeitos da vazão do fluido na eficiência volumétrica são dependentes da velocidade da mistura nos componentes do sistema de admissão, como por exemplo, velocidades no coletor de admissão e na região das válvulas de admissão. Velocidades locais para fluxos uniformes são iguais à vazão em volume dividida pela área da secção transversal por onde o fluido está se deslocando. Considerando que o sistema de admissão e a válvula de admissão estão em escala em relação ao tamanho do cilindro, as velocidades da mistura no coletor de admissão estão em escala em relação à rotação do pistão. Desta forma, a eficiência volumétrica é uma função da rotação do motor. Para comparar a eficiência volumétrica de diferentes motores, recomenda-se utilizar valores de eficiência volumétrica obtidos para pistões na mesma velocidade média. A figura 2.6, reproduzida de Heywood (1988), ilustra curvas de eficiência volumétrica em função da velocidade média do pistão para um motor ciclo Diesel de quatro cilindros, com injeção indireta e um motor ciclo Otto de seis cilindros e ignição por faísca em plena carga.

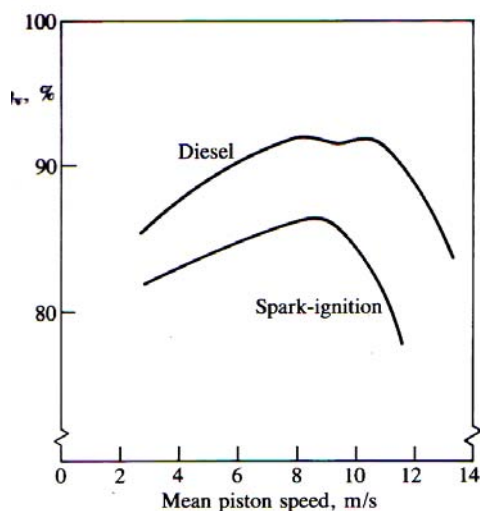


Figura 2.6: Eficiência volumétrica em função da velocidade média do pistão para motores Diesel e de ignição por faísca.

De acordo com o mostrado na figura 2.6, percebe-se que a eficiência volumétrica de um motor ciclo Otto é menor que a de um motor ciclo Diesel. Isso ocorre devido às perdas de pressão nos componentes do sistema de admissão que estão presentes em um tipo de motor e não estão no outro tais como existência de

válvula de aceleração bem como a presença de vapor de combustível e alta fração de gás residual nos motores de ignição por faísca.

Outra diferença observada na figura 2.6 corresponde aos dois picos de eficiência volumétrica presentes na curva do motor ciclo Diesel, este fenômeno ocorre devido ao efeito de sintonia (*tunning*), ou seja, coletor de admissão aproveitando as ondas de pressão para aumentar o enchimento do cilindro.

Uma curva característica da eficiência volumétrica em função da rotação do motor é mostrada na figura 2.7 reproduzido de Heywood (1988). Esse gráfico ilustra esquematicamente como os diferentes efeitos descritos acima afetam a eficiência volumétrica em função da rotação.

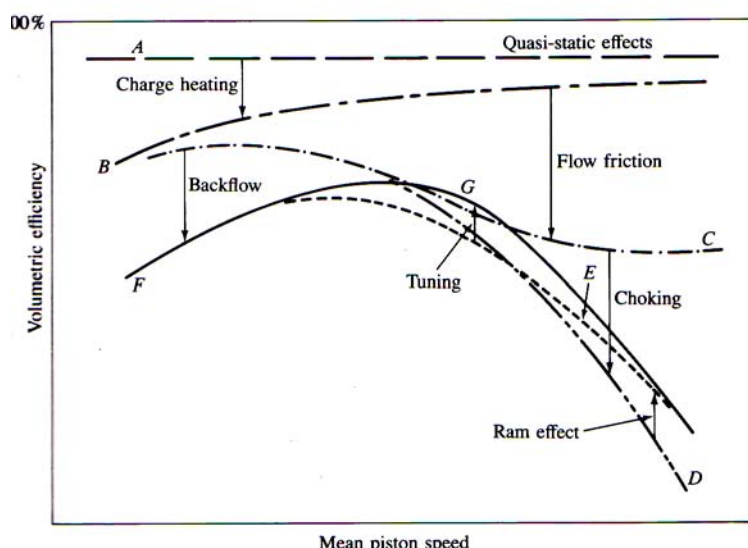


Figura 2.7: Impactos na eficiência volumétrica devidos a diferentes fenômenos os quais afetam a vazão de ar em função da rotação do motor.

A linha cheia representa a curva de eficiência volumétrica final (todos os fenômenos sendo considerados) em função da rotação.

Efeitos não dependentes da rotação fazem com que a eficiência volumétrica seja inferior a 100% (curva A da figura 2.7). Trocas de calor no coletor de admissão e no cilindro fazem com que a eficiência volumétrica diminua de A para B. A redução na eficiência volumétrica devido à troca de calor é acentuada para motores funcionando a baixas rotações. As perdas por atrito aumentam em função do quadrado da rotação fazendo com que a eficiência volumétrica diminua de B para C. Para altas rotações do motor, o fluxo de ar para o cilindro começa a ser bloqueado; quando este fenômeno se inicia, aumentos de rotação não aumentam o fluxo de ar o que implica em uma redução drástica da eficiência volumétrica, deslocando a curva

de C para D. O efeito RAM aumenta a eficiência volumétrica do sistema deslocando a curva D para E. Porém o atraso no fechamento da válvula de admissão, a qual apresenta vantagens quando o motor está em altas rotações, reduz a eficiência volumétrica quando o mesmo está em baixas rotações, deslocando a eficiência volumétrica para a curva F. Finalmente, o efeito da sintonia dos coletores de admissão e/ou exaustão, aumenta a eficiência volumétrica consideravelmente, deslocando a curva F para G.

O gráfico 2.4, reproduzido de Heywood (1988), ilustra os dutos sintonizados de um coletor de admissão de um motor de 2,3 litros, 4 cilindros e de ignição por faísca. O comprimento destes dutos foi aumentado por fator multiplicador 2. O duto com comprimento de 340 mm produziu uma curva de eficiência volumétrica desejada com aumento de vazão de ar a baixas rotações do motor e condições constantes a médias rotações. Por outro lado o duto mais longo melhorou a vazão de ar a baixas rotações e mostrou uma perda de eficiência volumétrica inconveniente em altas rotações.

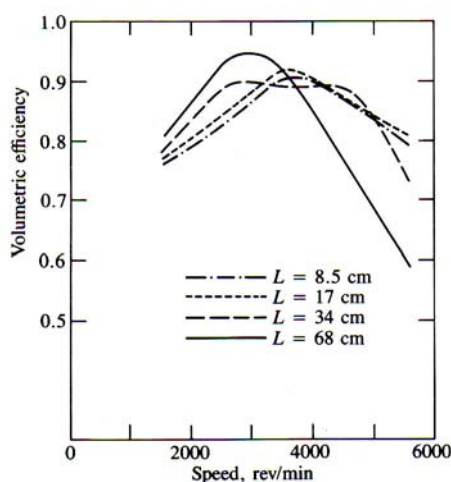


Gráfico 2.4: Efeito do comprimento do duto do coletor de admissão na eficiência volumétrica em função da rotação.

O gráfico 2.5, reproduzido de Heywood (1988), mostra dados levantados em um motor de quatro cilindros com ignição por faísca, os quais demonstram os efeitos da variação do tempo e curso das válvulas na eficiência volumétrica em função da rotação. O fechamento antecipado da válvula de admissão reduz a perda devido ao contra fluxo em baixas rotações e, por conseqüência, aumenta a eficiência volumétrica, porém reduz a massa de ar admitida a altas rotações do motor. O fechamento tardio da válvula de admissão só apresenta vantagens a altas rotações

do motor. Pequenos cursos de abertura da válvula restringem significativamente a capacidade de “respirar” do motor a médias e altas rotações de operação.

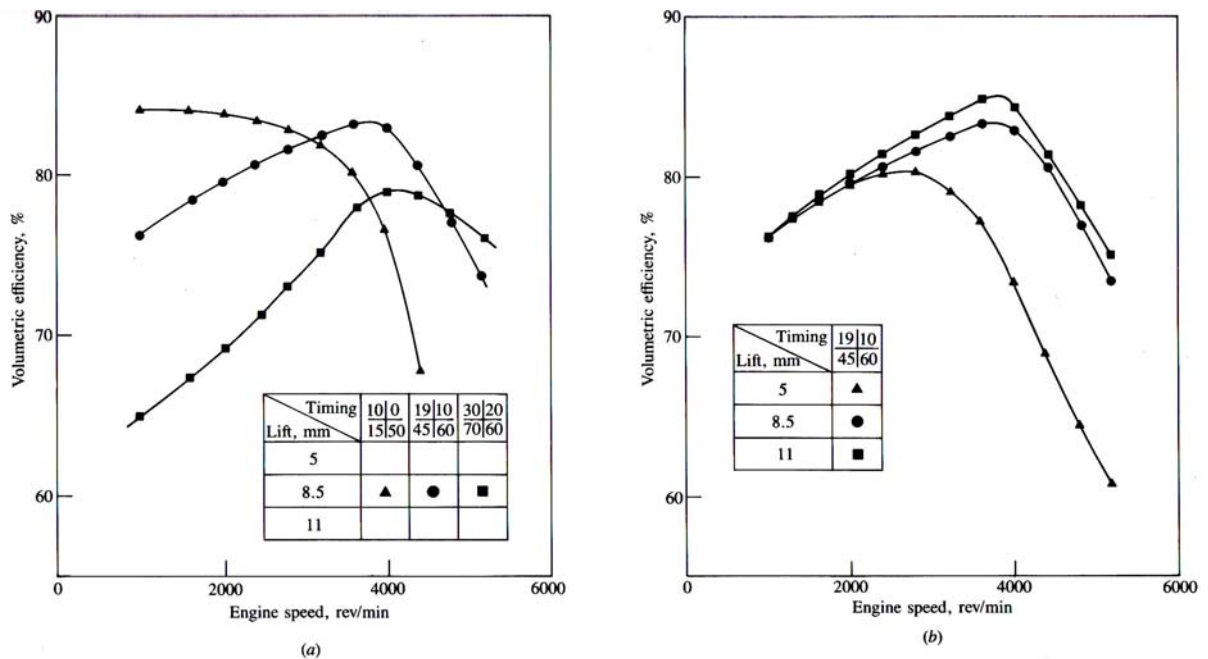


Gráfico 2.5: Efeitos da variação do tempo (a) e curso (b) das válvulas na eficiência volumétrica em função da rotação.

2.4.4. Redução da eficiência volumétrica às condições padrão:

Barbosa (1997), afirma que da mesma forma que o momento de força e a potência são influenciados pela pressão, temperatura e umidade do ar ambiente, a eficiência volumétrica também é. Para ajustar valores de eficiência volumétrica às condições-padrão, aplica-se fatores de correção possibilitando uma comparação entre diferentes motores testados em diferentes regiões do planeta.

Temperatura de 298 K, pressão do ar seco de 99 kPa e pressão do vapor d'água de 1 kPa são as condições que devem ser consideradas para o ajuste (correção) dos valores. Os valores indicados foram extraídos da norma ABNT-5484 (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Barbosa (1997), descreve que os fatores de correção são estabelecidos com base na equação 2.17, para o escoamento unidimensional, permanente e compressível através de um orifício ou restrição ao fluxo de área efetiva (A_E).

$$\dot{m} = \frac{A_E P_0}{\sqrt{RT_0}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_0} \right)^{\gamma/2} - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right] \right\}^{(1/2)} \quad (\text{eq. 2.15})$$

Na dedução da equação 2.15, assumiu-se que o fluido é um gás perfeito com (R) e ($\gamma = C_p/C_v$) constantes; (p_0 e T_0) são as pressões e temperaturas a montante da restrição e (p) é a pressão na garganta da restrição.

Se, em um motor operando em regime de plena carga, a relação de pressão (p/p_0) é considerada constante, a vazão de ar seco (\dot{m}_a) varia da seguinte forma: REYWOOD (1988)

$$\dot{m}_a \propto \frac{P_0}{\sqrt{T_0}} \quad (\text{eq. 2.16})$$

A eficiência volumétrica é proporcional à relação (\dot{m}_a / ρ_a), visto que (ρ_a) é proporcional à relação (p/T). O fator de correção para eficiência volumétrica é:

$$F'_C = \frac{\eta_{v,s}}{\eta_{v,m}} = \left(\frac{T_s}{T_m} \right)^{1/2} \quad (\text{eq. 2.17})$$

Onde: $\eta_{v,s}$: rendimento volumétrico padrão;

$\eta_{v,m}$: rendimento volumétrico medido;

T_m : temperatura ambiente média;

T_s : temperatura ambiente padrão.

2.4.5. Modelo matemático:

Para buscar um melhor entendimento dos fenômenos de escoamento associados ao sistema de admissão de ar do motor foi elaborado um modelo simplificado, conforme descrito abaixo. Este equacionamento, ao ser validado com os dados obtidos nos ensaios realizados, pode servir como ferramenta para aprimoramento da geometria do sistema.

Observando que este escoamento se caracteriza por ser turbulento mas de baixas velocidades, e que não ocorre variações significativas de pressão e temperatura, foi possível admitir perfis de velocidade uniformes nas seções de escoamento e massa específica praticamente constante. Assumindo pequenas variações locais de propriedades quando o motor funciona em condições fixas de carga e rotação, foi incorporado ao escoamento a hipótese de regime permanente.

Aplicando o Princípio da Conservação da Energia (1ª Lei da Termodinâmica) ao volume de controle da figura 2.8, com as hipóteses simplificadoras mencionadas acima, pode-se dizer que a energia em um ponto “s” (saída) é igual a energia no ponto “e” (entrada) menos as perdas existentes entre estes pontos e o fenômeno pode ser representado analiticamente por meio da equação 2.18.

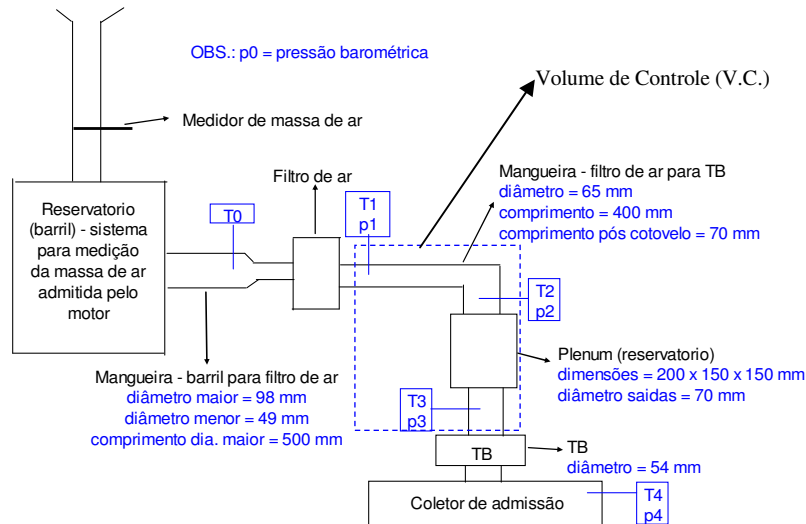


Figura 2.8: Esquema ilustrativo representando componentes utilizados durante ensaios e volume de controle.

$$H_s = H_e - K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{eq. 2.18})$$

onde: H_s = carga total na saída;

H_e = carga total na entrada;

K = coeficiente global de perda de carga;

V = velocidade do ar;

g = aceleração da gravidade.

Considerando-se as premissas que simplificam o modelo matemático mencionadas acima, a equação 2.18 pode ser escrita como mostrado na equação

2.19, uma vez que as velocidades médias nas seções de entrada e saída são mantidas constantes uma vez que a área da seção transversal (de diâmetro D) e as cotas verticais não variavam significativamente.

$$\frac{P_s}{\gamma_s} = \frac{P_e}{\gamma_e} - K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{eq. 2.19})$$

Substituindo “ γ ” (peso específico) por ρg , e “ p ” pela equação de estado dos gases perfeitos ($p = \rho RT$), obtém-se:

$$RT_s = RT_e - K \frac{V^2}{2} \quad (\text{eq. 2.20})$$

Isolando-se o coeficiente de perda de carga (K) da equação 2.20 e considerando $A = \pi D^2/4$, tem-se:

$$K = 2R \frac{(T_e - T_s)}{V^2} \quad (\text{eq. 2.21})$$

Com

$$V = \frac{\dot{m}_{ar}}{A\rho} \quad (\text{eq. 2.22})$$

e

$$\dot{m}_{ar} = \rho V_t \frac{n}{x} \eta_v \quad (\text{eq. 2.23})$$

tem-se:

$$K = \frac{2R(T_e - T_s)}{\left(\frac{\eta_v V_t n}{\pi \frac{D^2}{2}} \right)^2} \quad (\text{eq. 2.24})$$

onde: R = constante universal dos gases;

T_e = temperatura na entrada;

T_s = temperatura na saída;

η_v = eficiência volumétrica;

V_d = cilindrada do motor utilizado durante ensaios;

n = rotação do motor;

D = diâmetro da seção por onde ar está escoando.

Lembrar que, para motor de 4 tempos, $x=2$.

Já o cálculo do número de Reynolds é dado pela equação 2.25

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{eq. 2.25})$$

$$\text{onde } V = \frac{4\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar}\pi D^2} \quad (\text{eq. 2.26})$$

Substituindo a equação 2.26 em 2.25, obtém-se:

$$Re = \frac{1,273\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar}D\nu} \quad (\text{eq. 2.27})$$

Espera-se, desta forma, correlacionar gráficos de eficiência volumétrica em função da rotação e coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds. Ou seja, quanto maiores forem os valores de eficiência volumétrica menores serão os valores do coeficiente de perda de carga pois quanto menor a perda de carga melhor será o enchimento do câmara de combustão do motor.

Para garantir a correspondência entre o modelo e o fenômeno, o valor de K obtido experimentalmente será confrontado com aquele teórico considerando os resultados de semelhança obtidos a partir da aplicação da análise dimensional.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL:

3.1 Considerações iniciais:

Com o intuito de estudar o impacto no desempenho de um motor de combustão interna de ignição por faísca, quando da modificação do sistema de admissão de ar, procedeu-se da seguinte forma:

- modificou-se a posição da válvula de aceleração rotacionando-a em 90º sentido horário tomando como referência a posição de montagem original do componente;

- utilizando um reservatório, de dimensões significativas, montado a montante da válvula de aceleração, foi realizado um experimento composto de cinco ensaios, conforme descrito no item 3.2.

Com a utilização do reservatório (plenum), o experimento foi repetido 3 vezes, para verificar se os resultados iriam se repetir de forma consistente.

O volume de controle escolhido para avaliar a influência da instalação do plenum e onde pressões e temperaturas foram medidas está mostrado na figura 3.1. As hipóteses simplificadoras aplicadas a este volume de controle para a obtenção dos grupos adimensionais importantes na avaliação da eficiência volumétrica (número de Reynolds e coeficiente de perda de carga) são:

- Volume de controle indeformável;
- Regime permanente;
- Escoamento turbulento;
- Propriedades uniformes nas seções com fluxo de massa de ar;
- Escoamento incompressível (considerando as baixas velocidades na tubulação considerada).

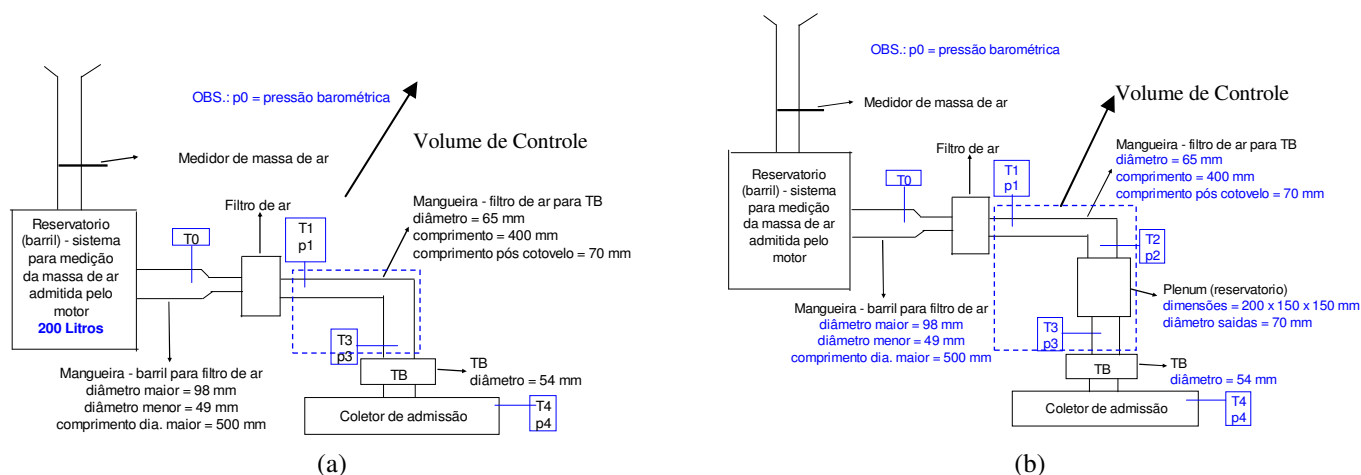


Figura 3.1: Volume de controle (linha tracejada azul) e locais onde pressão e temperatura foram medidas durante ensaios. (a) configuração sem plenum; (b) configuração com plenum.

Para medir as pressões e temperaturas citadas anteriormente foram utilizados transdutores de pressão absoluta e termopares descritos com maior detalhe no anexo 1. Porém, devido às posições onde estes foram montados, à calibração de cada um deles e à resolução dos valores medidos (número de casas decimais), os valores lidos foram expressos com número de algarismo significativos aproximados para utilização nas equações que modelam matematicamente o experimento.

O motor utilizado durante os ensaios está descrito na tabela 3.1.

Item #	Ficha Técnica - Motor combustão interna	
	descrição item	valores
1	cilindrada total	1795,6 cm ³
2	número de cilindros	4 em linha
3	posição de montagem	transversal anterior
4	taxa compressão	10,5 : 1
5	potência máxima	82,4 kW (gas) e 83,8 kW (alc) à 5500 rpm
6	Torque máximo	174,6 Nm (gas) e 181,4 Nm (alc) à 2800 rpm
7	Curso pistão	88,2 mm
8	Diâmetro pistão	80,5 mm
9	número de válvulas por cilindro	2
10	eixo comando de válvula	1 no cabeçote / SOHC roller finger
11	sistema eletrônico de injeção	Delphi, multiponto sequencial indireta
12	sistema de ignição	eletrônica digital incorporada ao sistema
13	combustível	gasolina (gas) e/ou alcool (alc)
14	comprimento biela	129,75 mm
15	Volume deslocado pelo pistão	448,9 cm ³
16	ordem de ignição	1 3 4 2

Tabela 3.1: ficha técnica do motor de combustão interna utilizado durante os ensaios realizados.

Os valores de torque, potência, consumo específico e emissões (HC, NOx, CO, CO₂, O₂) foram medidos em diversas rotações (1200, 1600, 2000, 2400, 2800, 3000, 3200, 3600, 4000, 4400, 4800, 5200, 5400, 5600, 6000, 6200 rpm) e corrigidos para as condições de atmosfera padrão descrita na tabela 3.2 de acordo com a norma Brasileira NBR 5484 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Esses valores são mostrados nos gráficos apresentados no capítulo 4 e nas tabelas do anexo 3. Esta correção é normalmente aplicada para que se consiga uma base comum de comparação (propriedades termodinâmicas do ar, conforme mostrado na tabela 3.2), podendo assim comparar os desempenhos de motores de combustão interna testados em diferentes localidades, pois sabe-se que a temperatura, pressão e umidade os afetam.

Item #	Atmosférica	Valores Padrão
1	pressão barométrica	746 mmHg (~ 150m de altitude)
2	temperatura ambiente	30 °C
3	pressão de vapor	10 mmHg
4	pressão barométrica de ar seco	736 mmHg
5	densidade absoluta do ar seco	1,129 kg/m ³

Tabela 3.2: Valores correspondentes a condição atmosférica padrão.

3.2 Procedimento Experimental:

Baseado no procedimento Delphi TCI-EDL-022 (descrito com maiores detalhes no anexo 2) e na norma ABNT NBR ISO 1585, foram levantadas e corrigidas para atmosfera padrão as curvas de torque e potência em função da rotação, nas seguintes situações:

- diferentes configurações do sistema de admissão de ar do motor em teste;
- quatro diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração (100% (máxima abertura), 75%, 50% e 25%).

Além disso, foram também levantadas as curvas de consumo específico e de concentrações de gases do escapamento em função da rotação.

Durante os ensaios foram também medidos e registrados os valores de pressão absoluta e temperatura no coletor de admissão e nos pontos definidos dentro do volume de controle ($p_1, T_1; p_2, T_2; p_3, T_3$), temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor, avanço de ignição, temperatura do óleo de lubrificação do motor, massa de ar (real) admitida, temperatura e umidade da célula de teste, conforme mostrado nas tabelas no anexo 3.

As configurações do sistema de admissão de ar do motor ensaiadas podem ser resumidas da seguinte forma:

Ensaio 1: Referência (*baseline*) – motor 1.8L com comando simples de válvula original de fábrica, conforme ilustrado na figura 3.2;

Ensaio 2: Motor original com válvula de aceleração do sistema eletrônico de injeção de combustível rotacionada 90° sentido horário, conforme ilustrado na figura 3.3;

Ensaio 3: Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significantes (plenum) na posição vertical, com entrada do ar filtrado pelo bocal superior deste, conforme ilustrado na figura 3.4;

Ensaio 4: Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significantes (plenum) na posição vertical, com entrada do ar filtrado pelo bocal lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.5;

Ensaio 5: Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significantes (plenum) na posição horizontal, com entrada do ar filtrado pelo bocal lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.6.

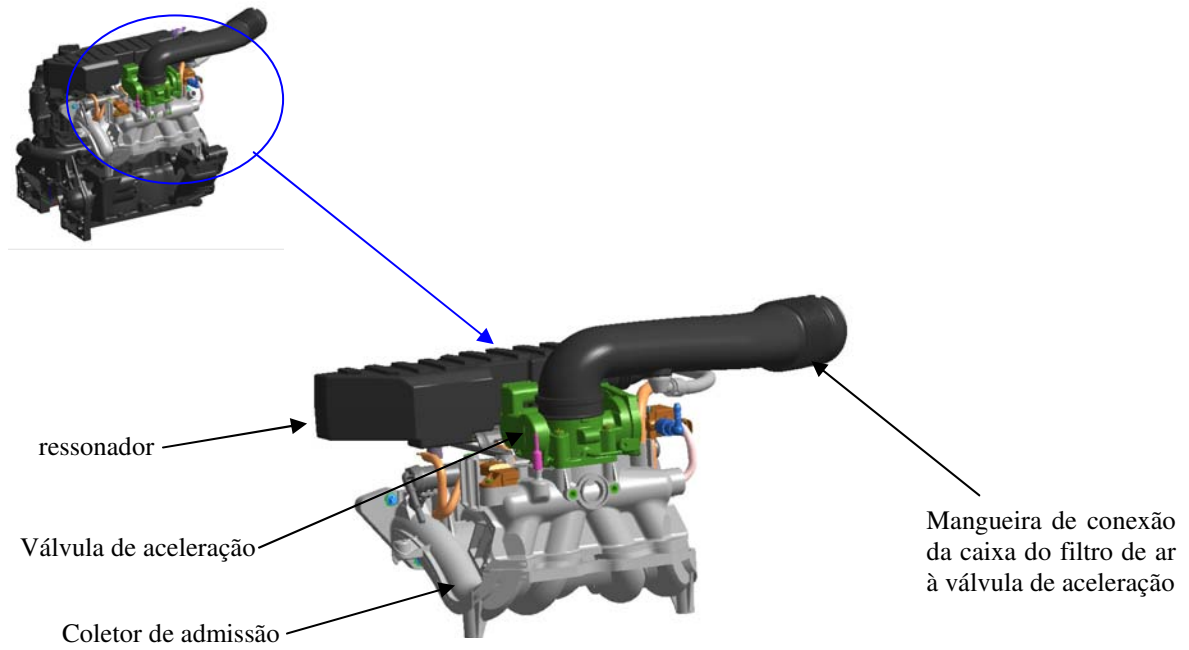


Figura 3.2: Sistema de admissão de ar original do motor testado

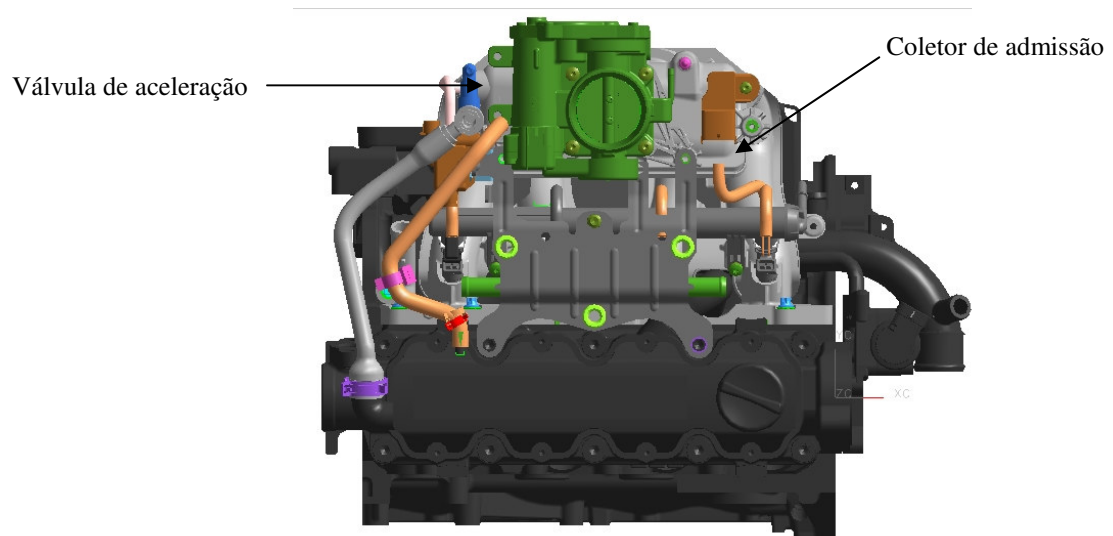


Figura 3.3: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração rotacionada 90°.

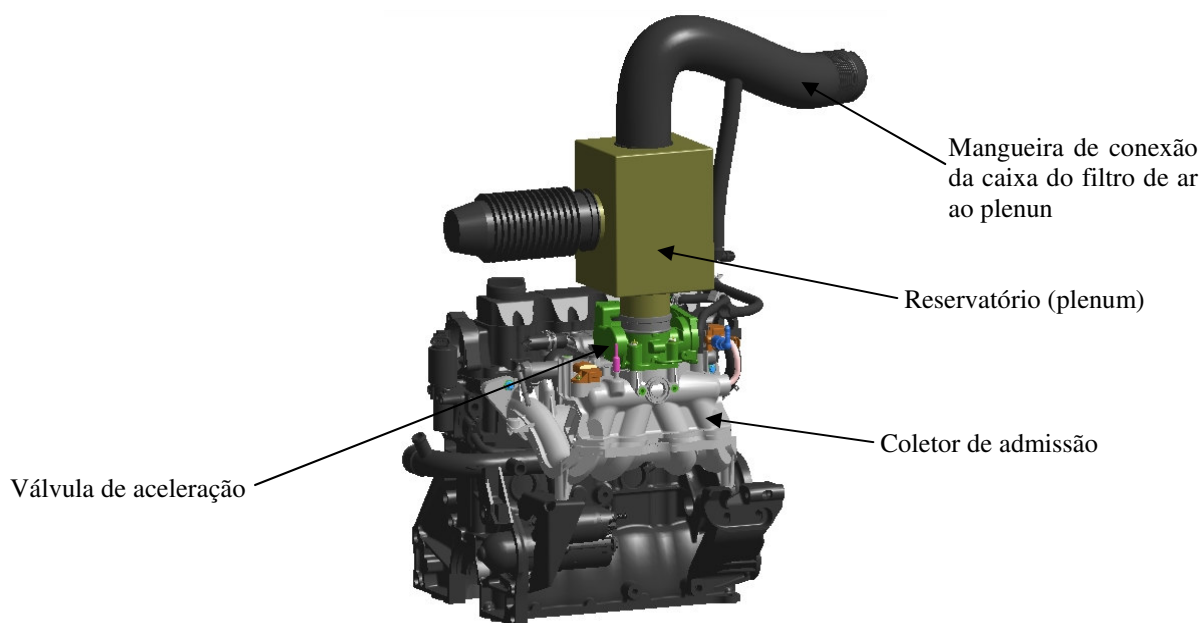


Figura 3.4: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição vertical com entrada da massa de ar filtrada pelo lado superior deste.

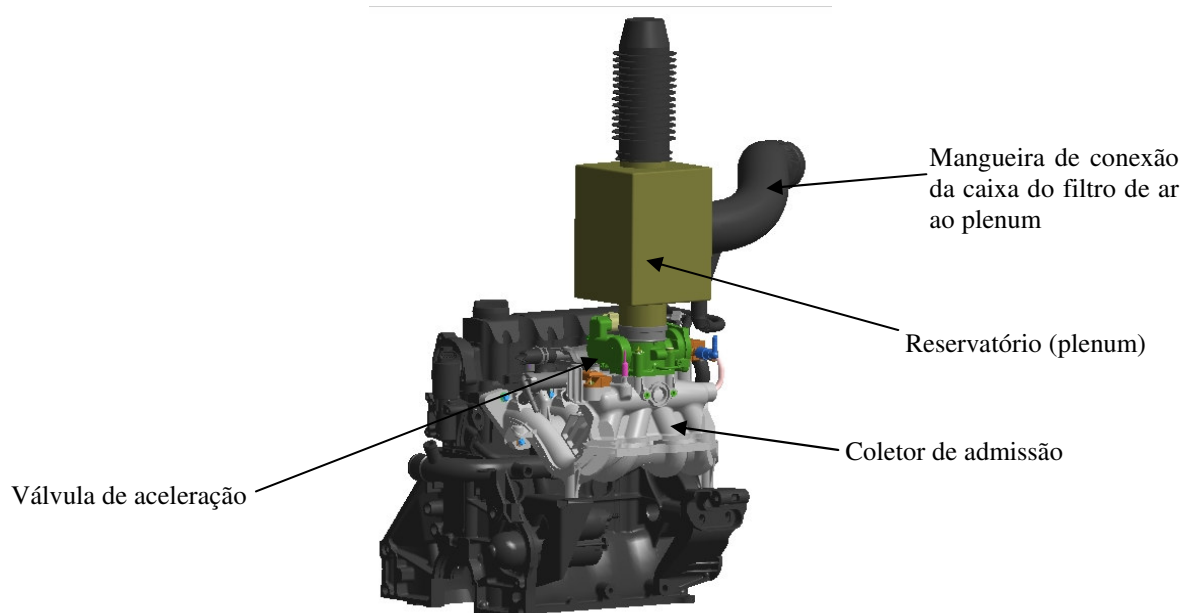


Figura 3.5: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição vertical com entrada da massa de ar filtrada pelo lado direito deste.

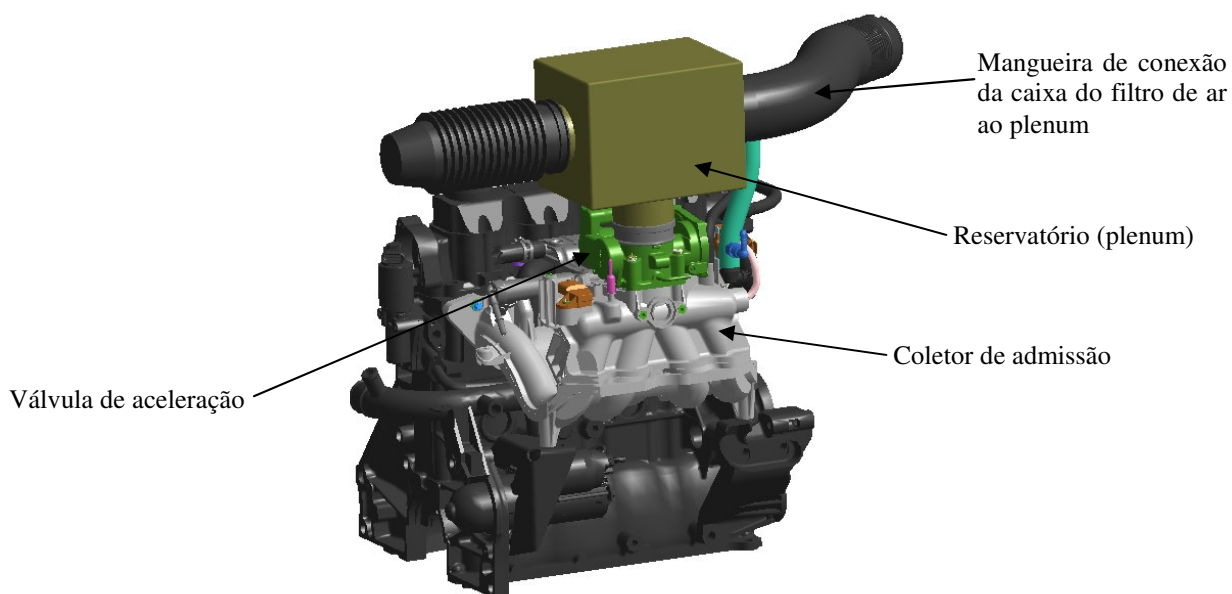


Figura 3.6: Sistema de admissão de ar do motor testado com válvula de aceleração montada na posição original e reservatório (plenum) montado na posição horizontal com entrada da massa de ar filtrada pelo lado direito deste.

O reservatório ou plenum, ilustrado na figura 3.7 e descrito em detalhes no anexo 1 item 2.3, foi concebido com o objetivo de uniformizar o escoamento do ar pela válvula de aceleração, buscando aumentar a eficiência volumétrica do motor de combustão interna. A estanquidade do reservatório foi verificada por meio de medições de vazamento injetando-se ar dentro do reservatório à 14.7 kPa e verificando-se a queda de pressão ao longo do tempo.

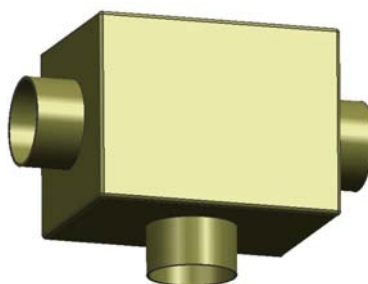


Figura 3.7: Reservatório de dimensões significantes ou plenum

Como o motor utilizado durante os ensaios já havia sido amaciado anteriormente, de acordo com as recomendações do fabricante deste, esta etapa necessária não foi executada.

O dinamômetro utilizado para execução dos ensaios está descrito no anexo 1. É do tipo assíncrono duplo (motor elétrico / gerador) marca Schenck Pegasus GmbH, modelo Dynas₂ 130. O software de operação e acompanhamento está ilustrado no anexo 1 figura A1.3 e faz também a integração entre o dinamômetro e a bancada de analisadores de gases do escapamento.

A vazão de ar real do motor foi medida utilizando um anemômetro de fio quente montado na tubulação a montante de um reservatório intermediário de 200 litros (barril).



Figura 3.8: Medidor de vazão de ar do tipo anemômetro e barril de 200 L

4 RESULTADOS e ANÁLISES:

4.1 Considerações iniciais:

Alguns valores lidos e registrados durante os ensaios descritos no capítulo 3, foram utilizados nos cálculos da eficiência volumétrica, do número de Reynolds e do coeficiente de perda de carga.

A eficiência volumétrica foi calculada para comprovar o impacto da posição da válvula de aceleração e do plenum nas diferentes configurações ensaiadas. Já o número de Reynolds e o coeficiente de perda de carga foram calculados para validar o modelo matemático desenvolvido para mostrar os efeitos das condições de escoamento e da geometria associados a estes experimentos.

Para tal, foram construídos gráficos de coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds, buscando comprovar a expectativa de que a redução dos valores dos coeficientes de perda de carga esteja associada a um aumento da eficiência volumétrica para um dado número de Reynolds. Ou seja, para diferentes configurações e um mesmo número de Reynolds, a eficiência volumétrica será maior quando o coeficiente de perda de carga for menor.

Os resultados e as análises comparativas apresentados neste capítulo serão divididos em duas partes, uma primeira onde os valores obtidos durante o ensaio 1 (referência) serão comparados com os valores obtidos durante o ensaio 2, e uma segunda parte onde os valores obtidos durante o ensaio 1 serão comparados com os valores obtidos durante os ensaios 3, 4 e 5. Esta divisão deve-se ao fato de apenas nos ensaios 3, 4 e 5 terem sido realizados utilizado o plenum.

4.2. Resultados e análises comparativas entre os ensaios 1 e 2:

A diferença entre os ensaios 1 e 2 que diz respeito ao sistema de admissão de ar do motor de combustão interna está na posição da válvula de aceleração.

Para o ensaio 2 esta peça foi rotacionada 90° no sentido horário (referência posição do motorista). A figura 4.1 ilustra as configurações dos ensaios 1 e 2 em corte e as setas mostradas nas figuras indicam o fluxo de ar (sentido e direção).

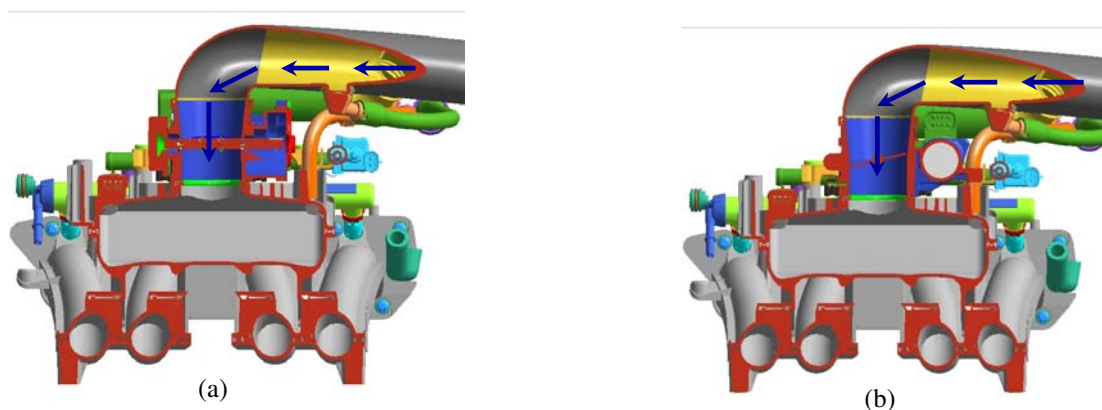


Figura 4.1: Seção em corte de parte do sistema de admissão de ar (mangueira de conexão do filtro de ar à válvula de aceleração, válvula de aceleração e coletor de admissão). Figuras (a) válvula de aceleração montada na posição original do sistema (ensaio 1); (b) válvula de aceleração montada rotacionada 90° sentido horário (ensaio 2).

4.2.1. Análise comparativa de parâmetros de desempenho:

Para o cálculo da eficiência volumétrica dos ensaios 1 e 2 foi utilizada a equação 2.5. Os valores foram calculados para quatro diferentes posições de abertura da válvula de aceleração (100% (plena carga), 75%, 50% e 25%) e estão indicados na tabela 4.1 e no gráfico 4.1.

Os valores de torque e potência corrigidos à atmosfera padrão estão indicados nas tabelas chamadas de “gerais” no anexo 3 e nos gráficos 4.2 e 4.3, respectivamente. Os valores de consumo específico são indicados nas mesmas tabelas e no gráfico 4.4.

Rotação (rpm)	Eficiência Volumétrica calculada							
	25%		50%		75%		100%	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
1200	58.20	58.03	72.95	71.71	71.07	71.86	72.20	73.31
1600	50.50	50.14	73.60	72.71	71.83	74.20	74.17	74.35
2000	41.96	42.39	71.35	70.10	72.83	73.70	73.65	73.66
2400	62.62	62.85	77.18	75.93	78.38	79.02	80.29	80.77
2800	61.11	61.23	78.80	78.04	82.66	82.67	84.96	85.13
3000	59.58	59.41	77.63	77.34	82.17	83.18	84.07	84.84
3200	58.06	57.32	77.13	76.86	80.56	81.21	81.01	82.46
3600	54.82	54.30	75.64	75.20	77.57	77.96	77.39	77.72
4000	51.95	51.61	75.24	75.36	76.48	76.84	75.99	77.57
4400	48.14	48.58	75.57	75.56	77.54	78.51	77.99	79.36
4800	45.41	45.30	74.28	74.03	76.82	77.38	77.35	78.14
5200	41.82	42.39	71.70	71.77	74.52	75.50	75.98	76.28
5400	40.69	40.97	70.18	69.99	72.72	73.82	73.92	74.35
5600	39.48	39.38	68.03	67.59	70.35	71.17	71.46	72.11
6000	36.76	36.69	64.09	63.87	67.04	67.60	67.75	68.41
6200	35.57	35.56	61.33	61.45	64.45	65.05	65.05	65.66

Tabela 4.1: Valores calculados de eficiência volumétrica (E.V.) para ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

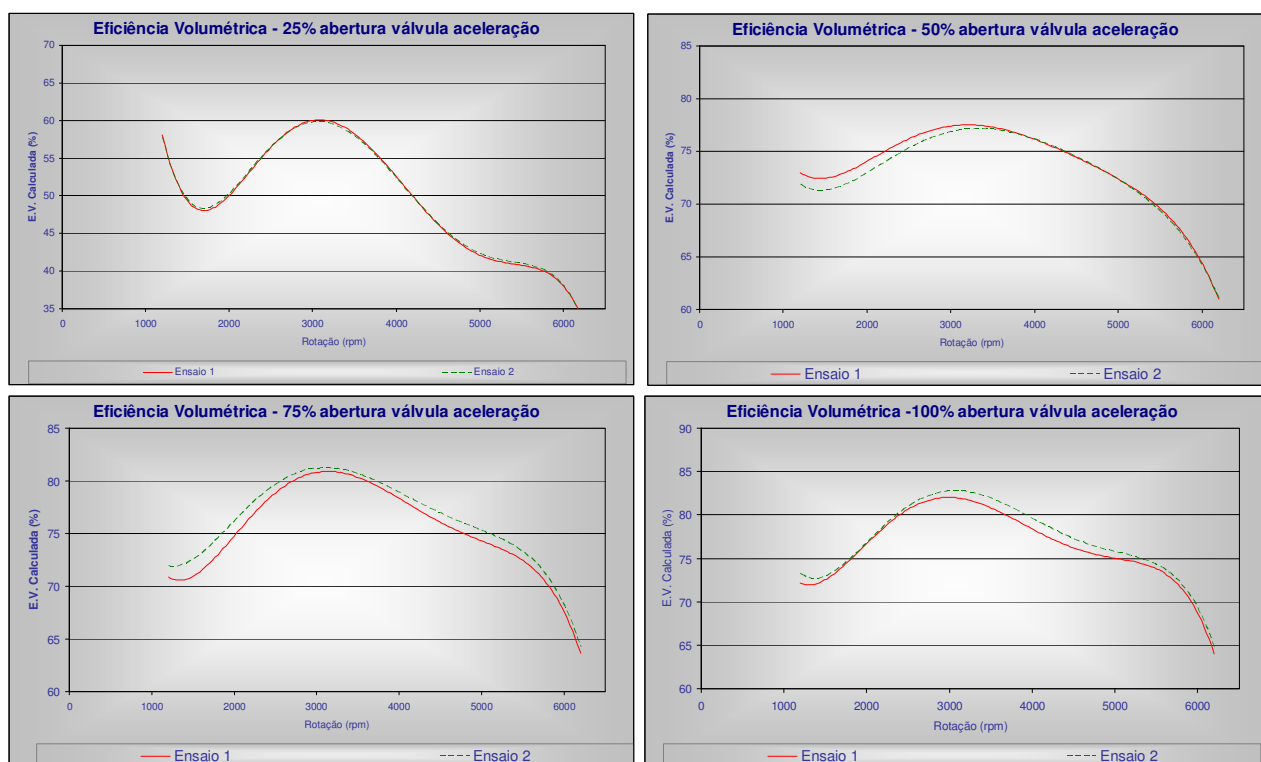


Gráfico 4.1: Comparação entre eficiências volumétricas obtidas nos ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

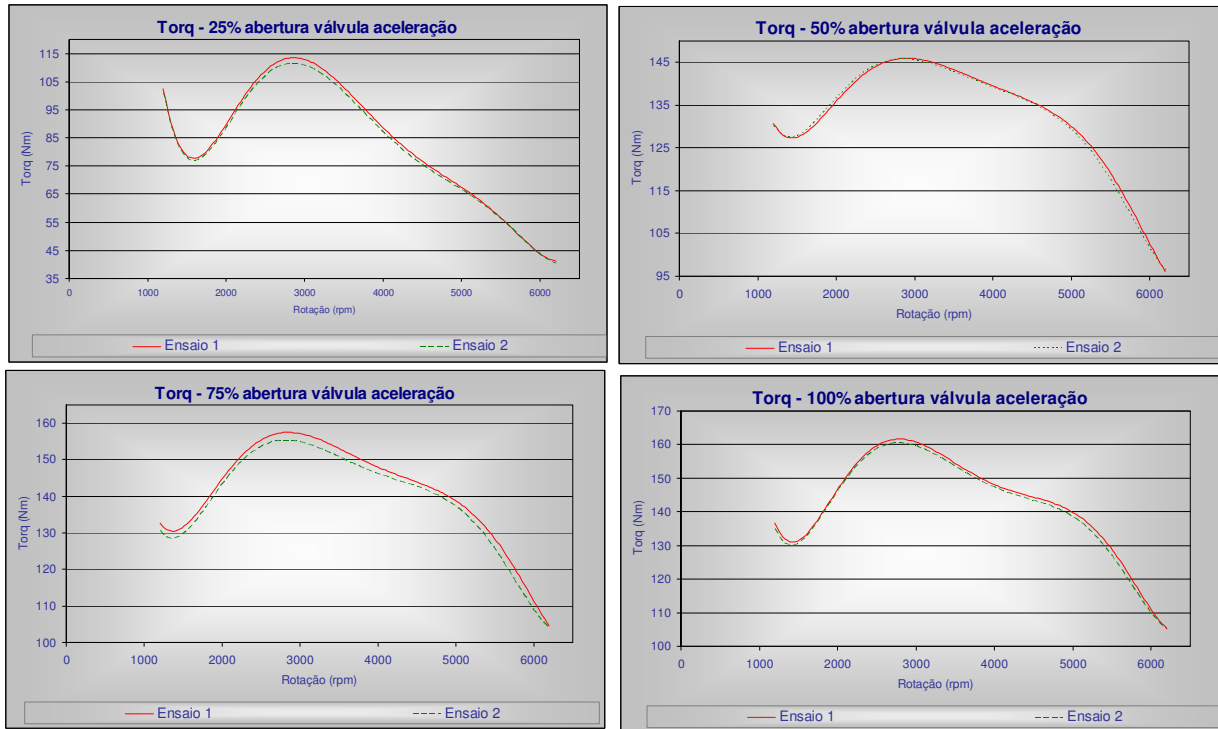


Gráfico 4.2: Torque medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

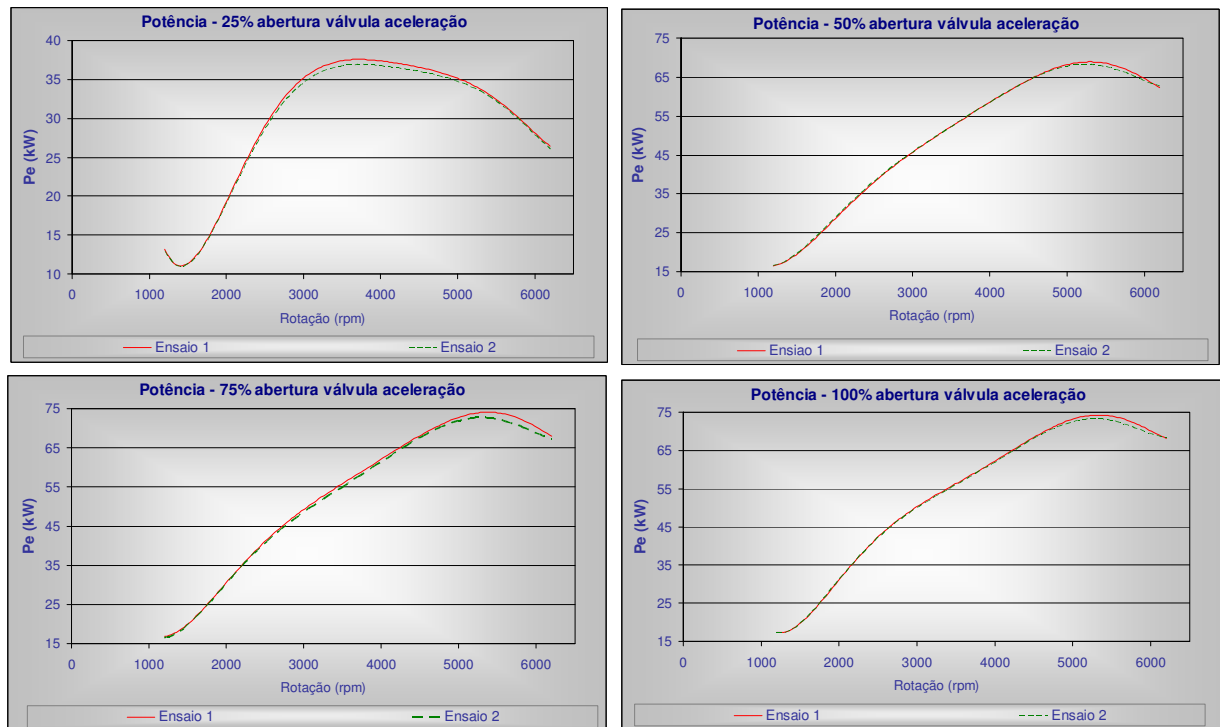


Gráfico 4.3: Potência medida durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

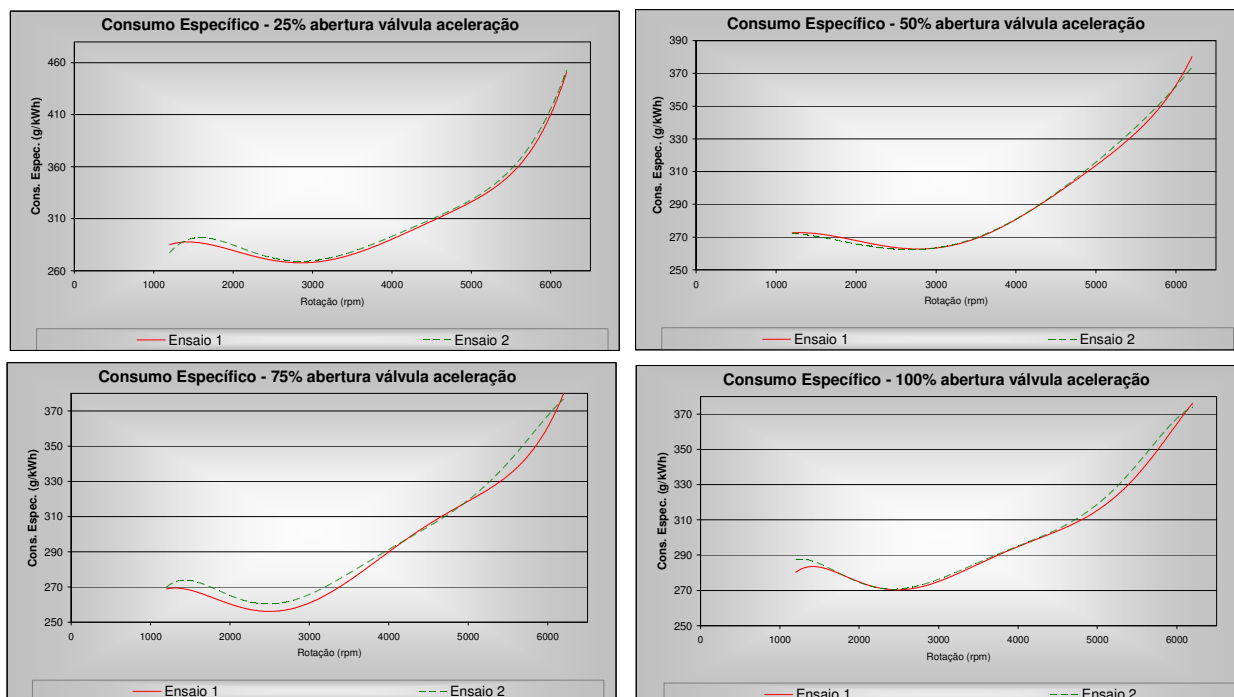


Gráfico 4.4: Consumo específico medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração

De acordo com as características construtivas da mangueira de conexão do filtro de ar à válvula de aceleração (cotovelo de 90° imediatamente antes da válvula de aceleração) e do sentido de abertura da borboleta, previa-se que as perturbações sofridas pelo ar admitido nesta região fossem maiores no ensaio 1, fazendo com que a eficiência volumétrica deste ensaio fosse menor que a do ensaio 2. Apesar de se verificar algum pequeno ganho de eficiência com o uso da configuração associada ao ensaio 2 em rotações superiores a 3000 rpm com o aumento da abertura da válvula de aceleração, as incertezas típicas das medições realizadas e utilizadas no cálculo (rotação, pressão e temperatura, indicadas no anexo 2), não permitem afirmar que houve alteração com significância estatística. Isso é corroborado pelo fato de, nos gráficos correspondentes a comparação dos torques, observar-se uma redução nos torques com a utilização da configuração 2 o que não é compatível com um aumento de eficiência volumétrica.

Desta forma, a comparação entre potência e consumo específico gera, também, uma igualdade dos resultados.

A alteração imperceptível quando da rotação da válvula de aceleração foi descrita também por Grimaldi et al (2003) em seu trabalho publicado no congresso

da SAE com o título *Flow Characterization of a High Performance S. I. Engine Intake System*.

4.2.2. Análise comparativa de emissões:

Os valores de cada um dos gases analisados, obtidos durante os ensaios 1 e 2 utilizando-se a bancada de emissões do dinamômetro descrito no anexo 1, foram medidos para quatro diferentes posições de abertura da válvula de aceleração (100% (plena carga), 75%, 50% e 25%) e estão indicados nas tabelas chamadas de “emissões de poluentes” no anexo 3 e nos gráficos 4.5 a 4.9 mostrados a seguir.

Os teores de oxigênio (O_2) (não poluente) e de dióxido de carbono (CO_2) foram incluídos para auxiliar a análise da combustão.

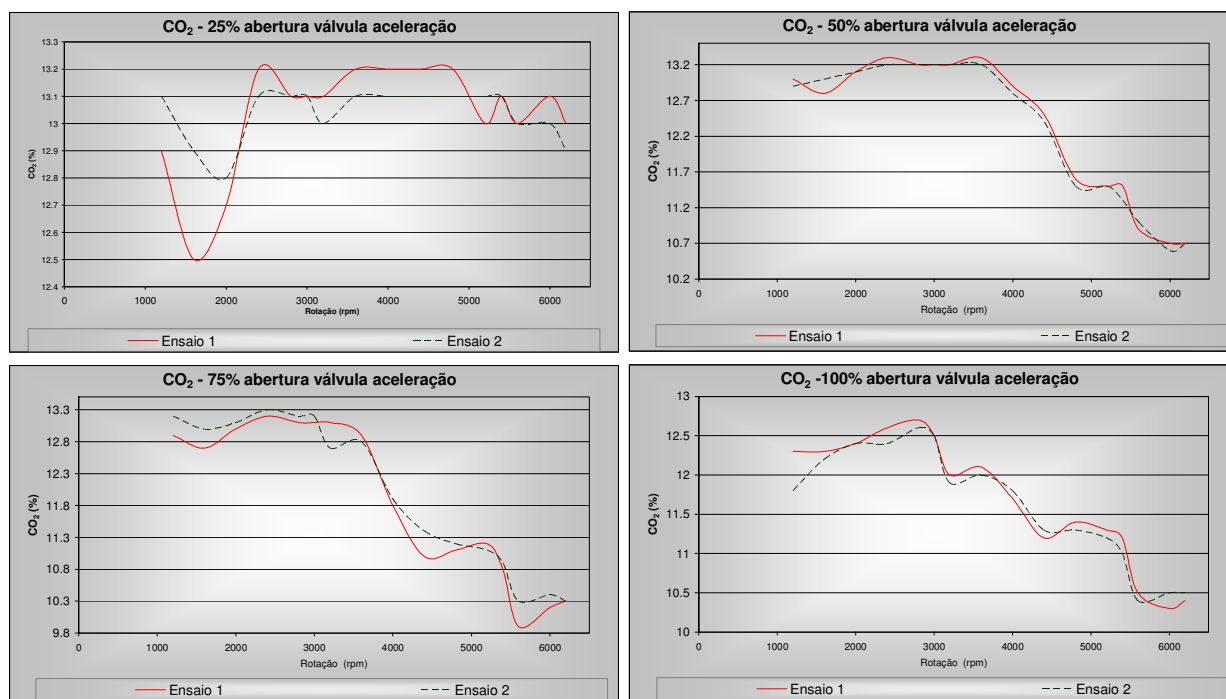


Gráfico 4.5: Dióxido de carbono (CO_2) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

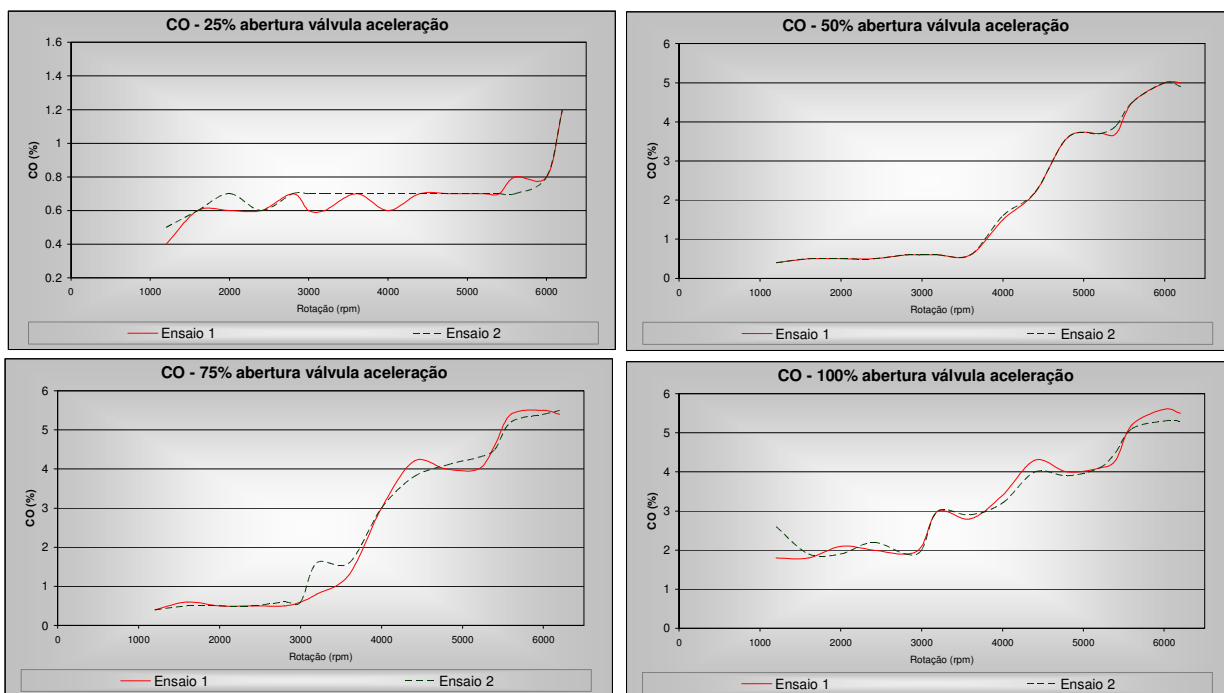


Gráfico 4.6: Monóxido de carbono (CO) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

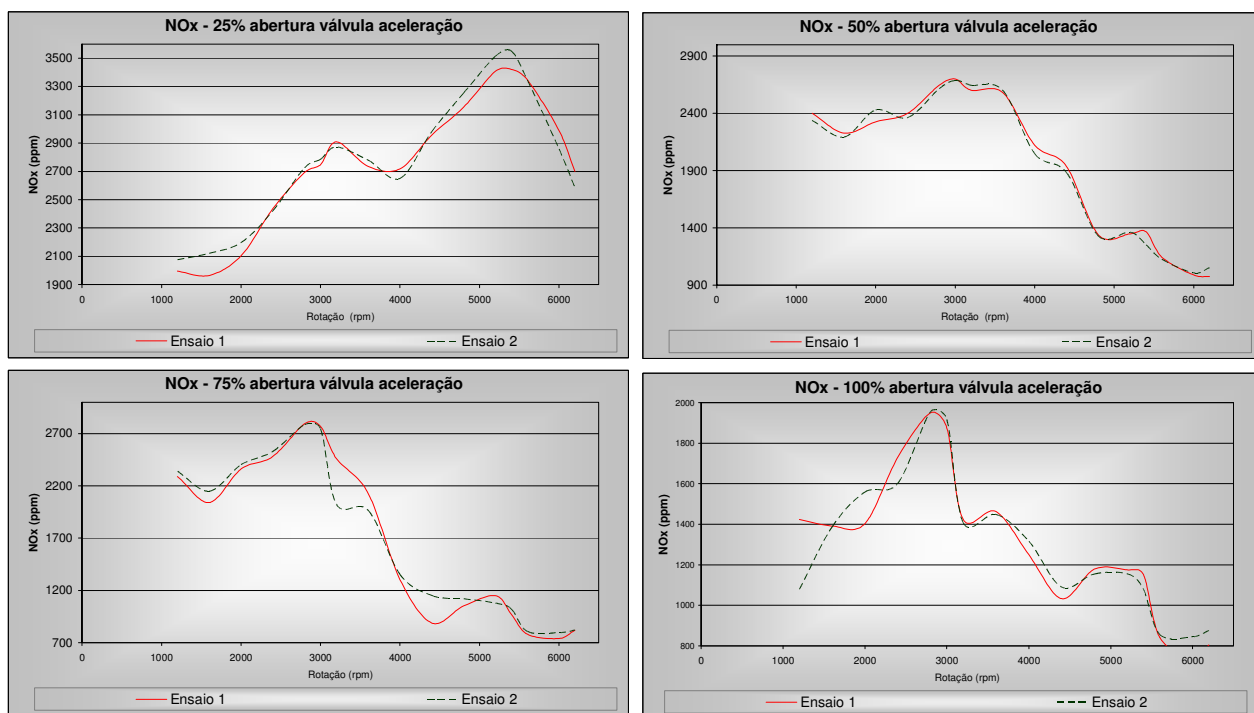


Gráfico 4.7: Óxido de nitrogênio (NO_x) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

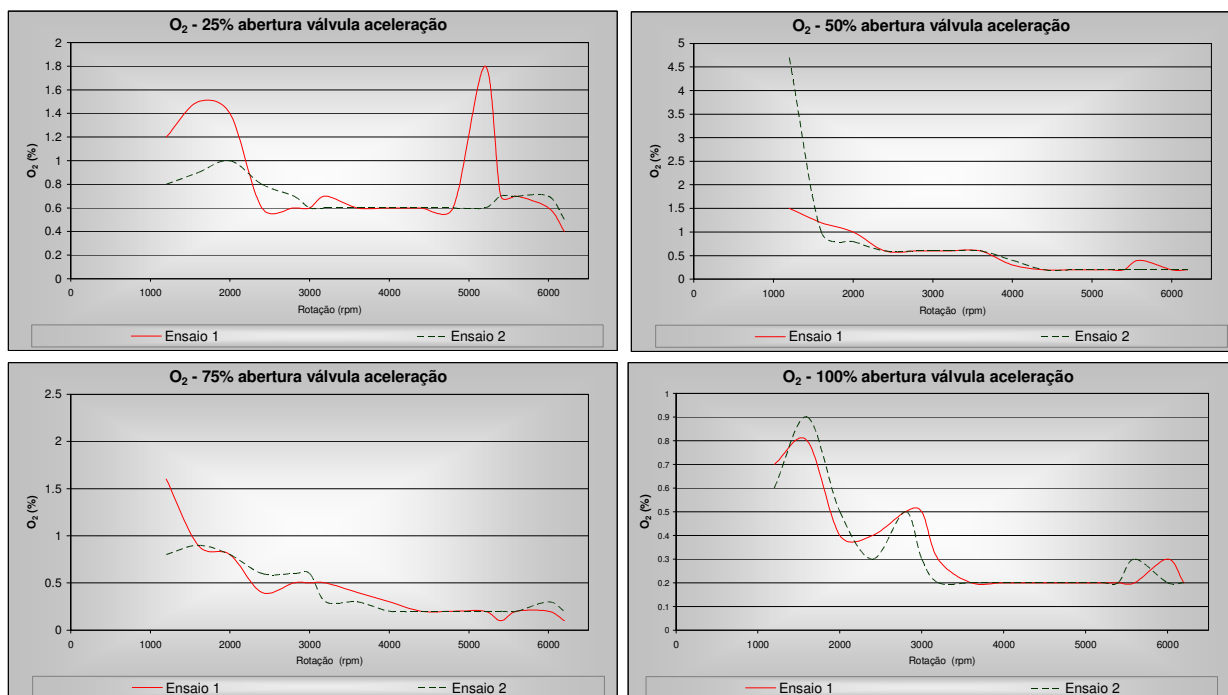


Gráfico 4.8: Oxigênio (O_2) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

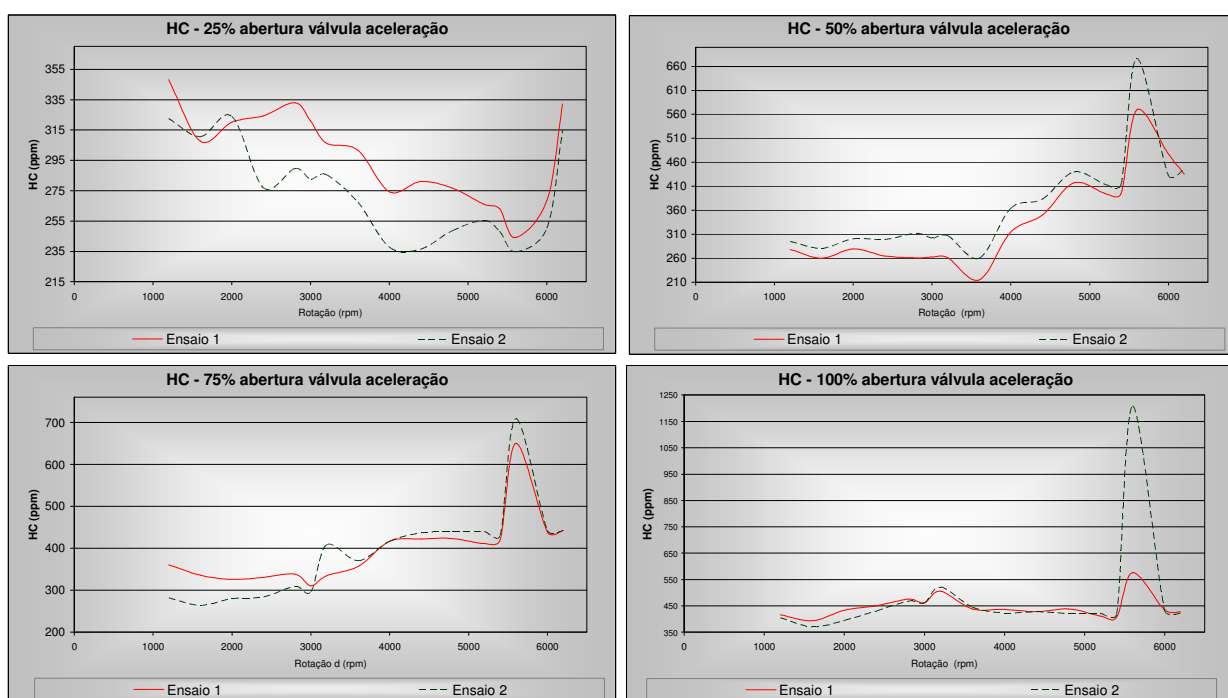


Gráfico 4.9: Hidrocarboneto(HC) medido durante os ensaios 1 e 2 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

Exceto para aberturas menores da borboleta da válvula de aceleração, os gráficos correspondentes revelam pequenas diferenças nos valores das concentrações de gases poluentes entre os ensaios 1 e 2.

As diferenças mais significativas de dióxido de carbono (CO_2) obtidas a 25% de abertura da válvula de aceleração sugere um consumo maior de combustível no ensaio 2 até cerca de 2200 rpm e menor após esta rotação. A potência, o consumo específico e a eficiência volumétrica, entretanto, mantiveram-se bastante próximas das obtidas no ensaio 1. Esse resultado aparentemente conflitante deve-se provavelmente, ao fato do motor operar com baixas temperaturas de água do sistema de arrefecimento. Desta forma, o sistema eletrônico de injeção de combustível deve ter buscado enriquecer a relação combustível-ar; trata-se de uma estratégia de controle corriqueira utilizada para condições de baixas rotações e cargas.

Medições de oxigênio (O_2) também incorporam algum erro para a mesma faixa de operação do motor, conforme pode ser visto no gráfico 4.8. Os dois resultados anteriores sugerem que o ensaio 1 tenha sido feito com o motor menos aquecido do que no ensaio 2.

As demais concentrações medidas em ppms não indicam grandes variações exceto a de hidrocarboneto (HC) também nessas mesmas condições de carga e rotação, corroborando a condição de funcionamento mais fria do motor durante o ensaio 1.

4.3. Resultados e análises comparativos entre os ensaios 1 e 3, 4 e 5:

A diferença entre os ensaios 1 e 3, 4 e 5, que diz respeito ao sistema de admissão de ar do motor de combustão interna, está na adição de um reservatório (plenum) a montante da válvula de aceleração.

Para o ensaio 3 o plenum foi montado na vertical com entrada de ar pelo lado superior deste, conforme ilustrado na figura 3.4.

Para o ensaio 4 o plenum foi montado na vertical com entrada de ar pela lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.5.

Para o ensaio 5 o plenum foi montado na horizontal com entrada de ar pela lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.6.

4.3.1. Análise comparativa de parâmetros de desempenho:

Para o cálculo da eficiência volumétrica dos ensaios 3, 4 e 5 foi utilizada a equação 2.5. Os valores foram calculados para quatro diferentes posições de abertura da válvula de aceleração (100% (plena carga), 75%, 50% e 25%) e estão indicados na tabela 4.2 e no gráfico 4.10.

Curvas de torque, potência e consumo específico em função da rotação estão mostradas nos gráficos 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente, a seguir. Em todos estes gráficos são apresentadas também as curvas obtidas no ensaio 1 (*baseline*).

Rotação (rpm)	Eficiência Volumétrica calculada											
	25%			50%			75%			100%		
	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1200	57.28	58.76	59.93	71.84	73.26	72.62	70.51	70.63	74.01	72.09	72.65	72.10
1600	49.05	50.41	51.66	72.04	73.40	72.62	72.41	72.51	74.20	72.33	73.76	73.14
2000	40.94	42.96	43.95	70.59	70.93	71.42	74.71	74.78	75.48	76.29	75.83	75.49
2400	61.51	62.89	63.52	74.41	76.10	76.43	76.00	75.85	78.35	75.04	78.68	78.48
2800	60.03	61.53	61.93	76.07	77.70	77.46	76.66	76.88	78.88	76.09	79.52	78.93
3000	58.24	59.78	60.29	76.14	77.48	77.25	77.41	77.58	78.68	77.03	79.21	78.63
3200	56.56	58.18	58.36	76.72	77.49	77.25	78.89	79.07	79.01	78.81	79.57	79.19
3600	53.53	54.76	55.21	76.40	77.21	77.22	80.79	80.92	80.16	80.88	80.56	80.10
4000	50.79	52.21	52.64	75.67	76.66	76.52	81.50	81.63	81.76	83.36	83.16	82.81
4400	47.87	49.23	49.61	75.51	76.82	76.31	80.05	80.13	81.12	82.11	82.88	82.60
4800	44.80	46.05	46.49	73.55	75.13	74.83	77.12	77.23	78.32	77.78	78.87	78.83
5200	41.93	43.08	43.47	71.12	72.74	72.51	74.99	74.97	75.80	75.11	75.71	75.86
5400	40.52	41.64	41.95	70.01	71.06	70.84	73.42	73.47	74.22	73.83	74.49	74.54
5600	39.14	40.20	40.52	67.92	68.62	68.39	71.40	71.51	71.55	72.34	72.48	72.41
6000	36.41	35.81	37.64	64.02	64.96	64.75	67.86	67.88	68.59	68.75	69.35	69.20
6200	35.23	35.98	36.25	61.66	62.74	62.32	65.41	65.43	66.15	66.17	66.89	66.77

Tabela 4.2: Valores calculados de eficiência volumétrica (E.V.) para ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

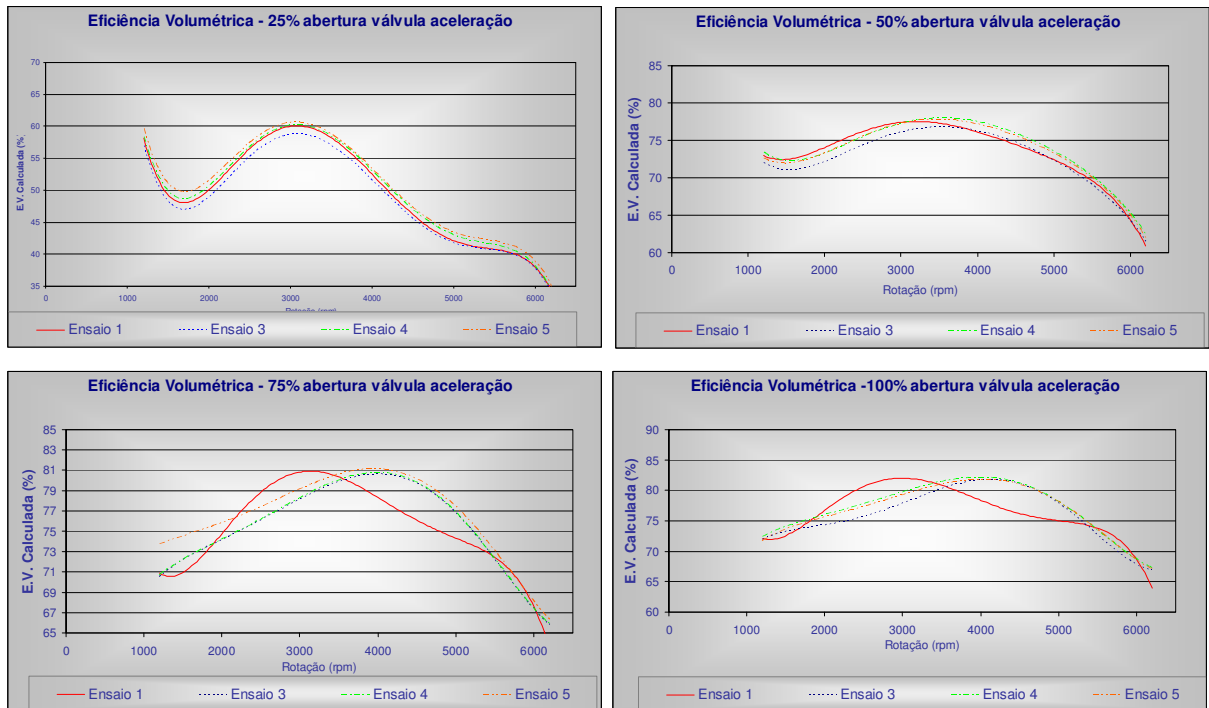


Gráfico 4.10: Comparação entre eficiências volumétricas obtidas nos ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

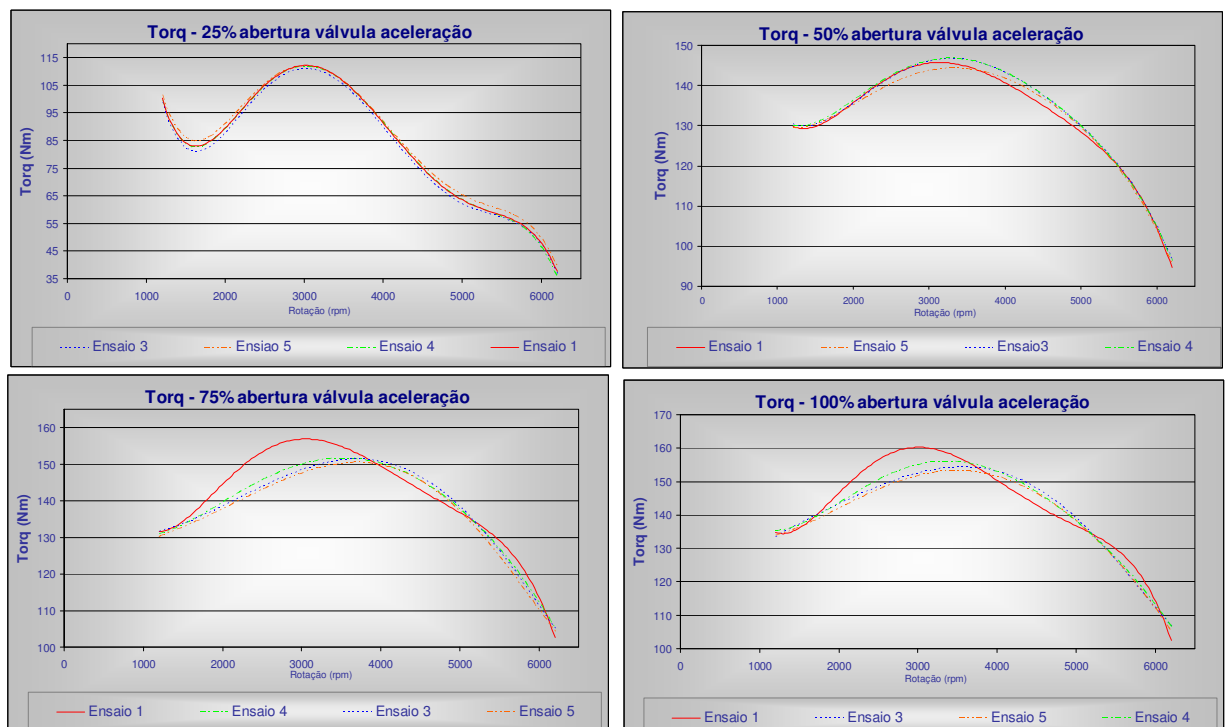


Gráfico 4.11: Torque medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

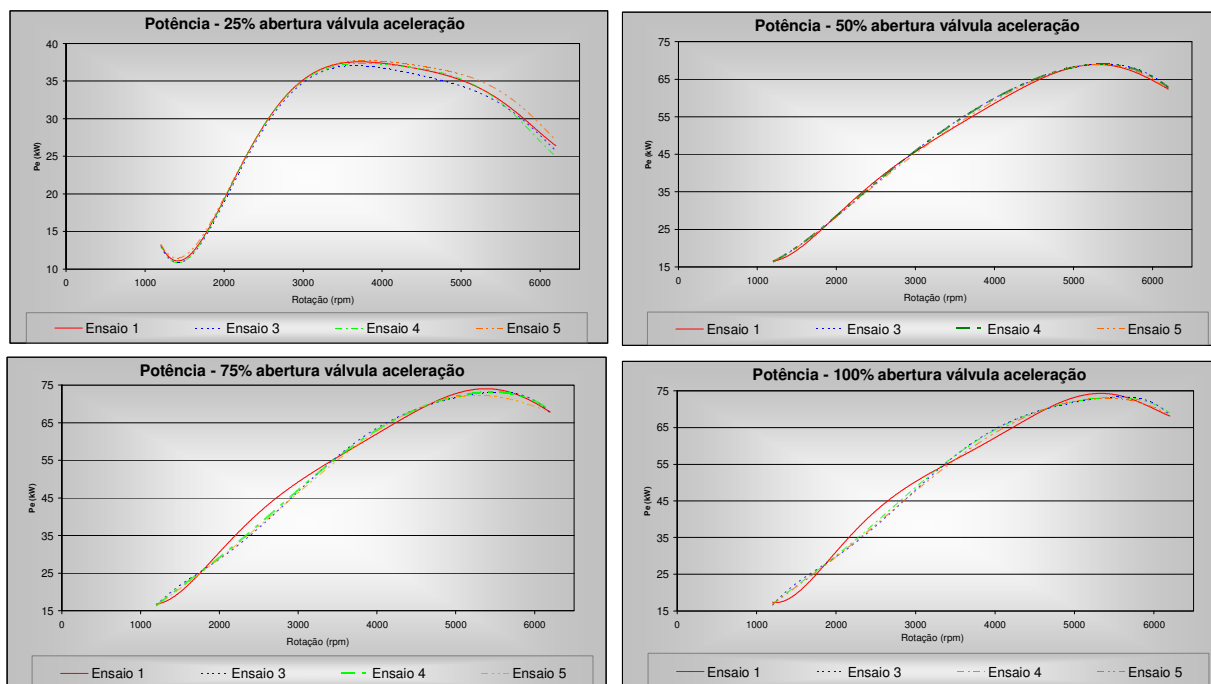


Gráfico 4.12: Potência medida durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

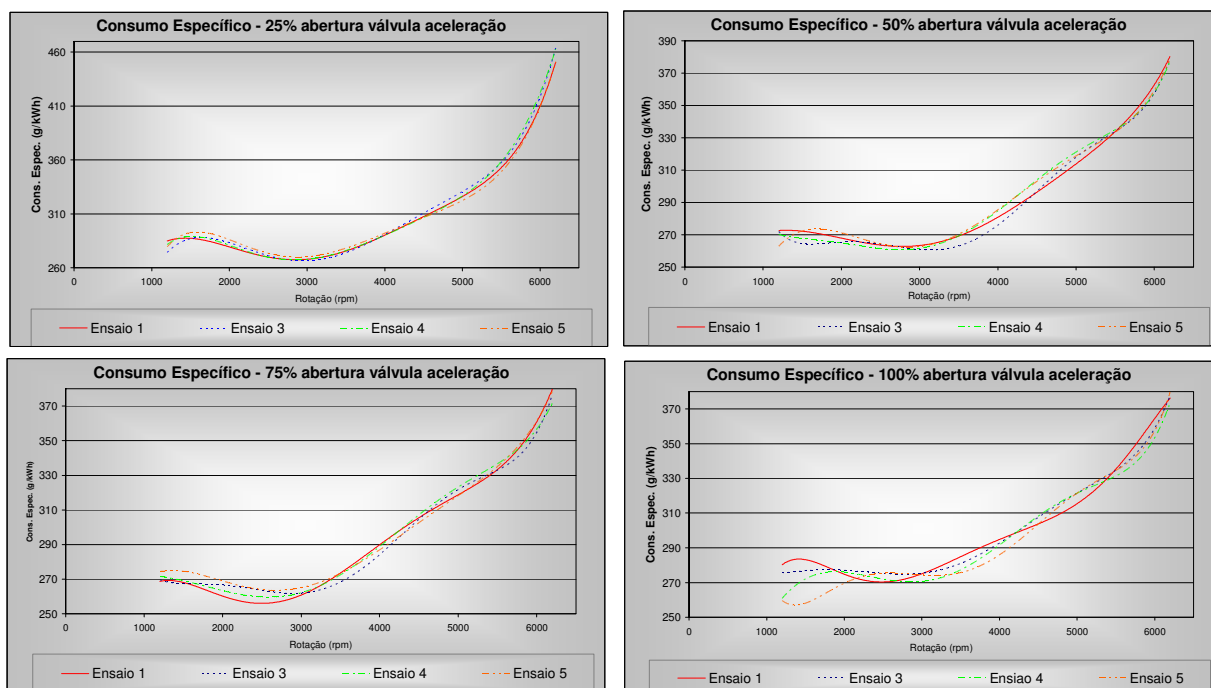


Gráfico 4.13: Consumo específico medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

Conforme pode ser visto no gráfico 4.10, a adição do plenum diminui a eficiência volumétrica do motor para rotações abaixo de 3500 rpm e as aumentou para rotações superiores quando operando com aberturas da borboleta de 75 a 100%. Nas demais condições não houve variação significativa na eficiência volumétrica.

Os gráficos 4.11 e 4.12 mostram efeitos correspondentes na potência e torque. Houve redução de potência onde a eficiência volumétrica foi menor e houve aumento desta onde a eficiência foi maior.

A curva de consumo específico em função da rotação para diversas posições de abertura da borboleta mostra a influência do aumento da eficiência volumétrica neste parâmetro que está relacionada com a eficiência global do motor. Nota-se com uma certa clareza para 75% de abertura da válvula de aceleração a redução do consumo específico com aumento da eficiência volumétrica e vice-versa.

4.3.2. Análise comparativa de emissões:

Os valores de cada um dos gases analisados abaixo, obtidos durante os ensaios 3, 4 e 5 utilizando-se a bancada de emissões do dinamômetro descrito no anexo 1. Foram medidos para quatro diferentes posições de abertura da válvula de aceleração (100% (plena carga), 75%, 50% e 25%) e estão indicados nas tabelas chamadas de “emissões de poluentes” no anexo 3 e nos gráficos abaixo.

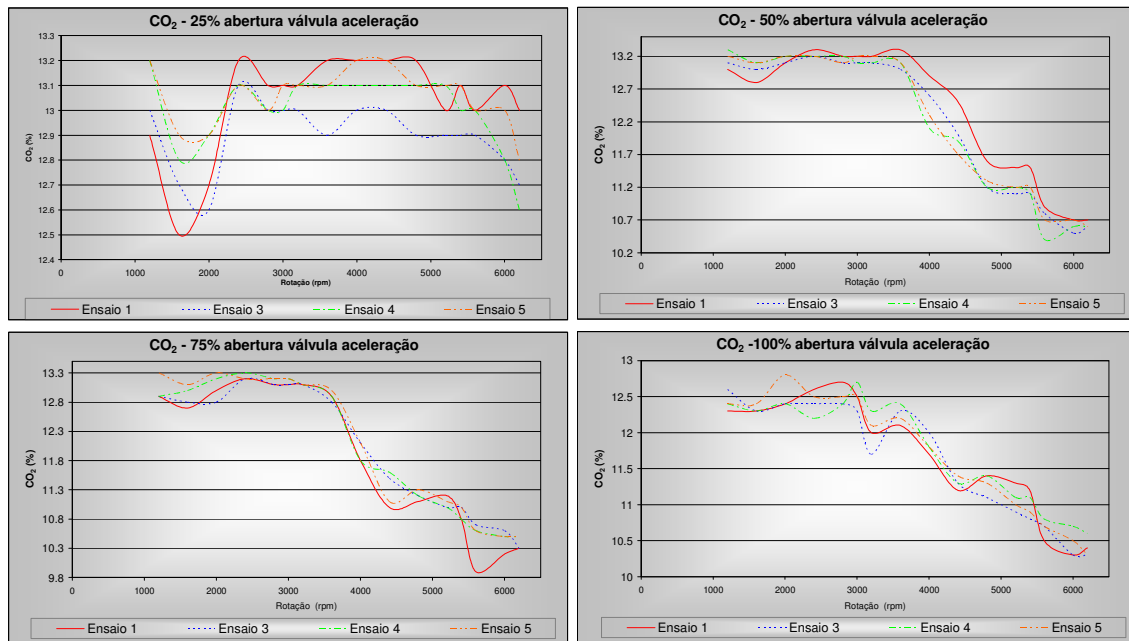


Gráfico 4.14 Dióxido de carbono(CO_2) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

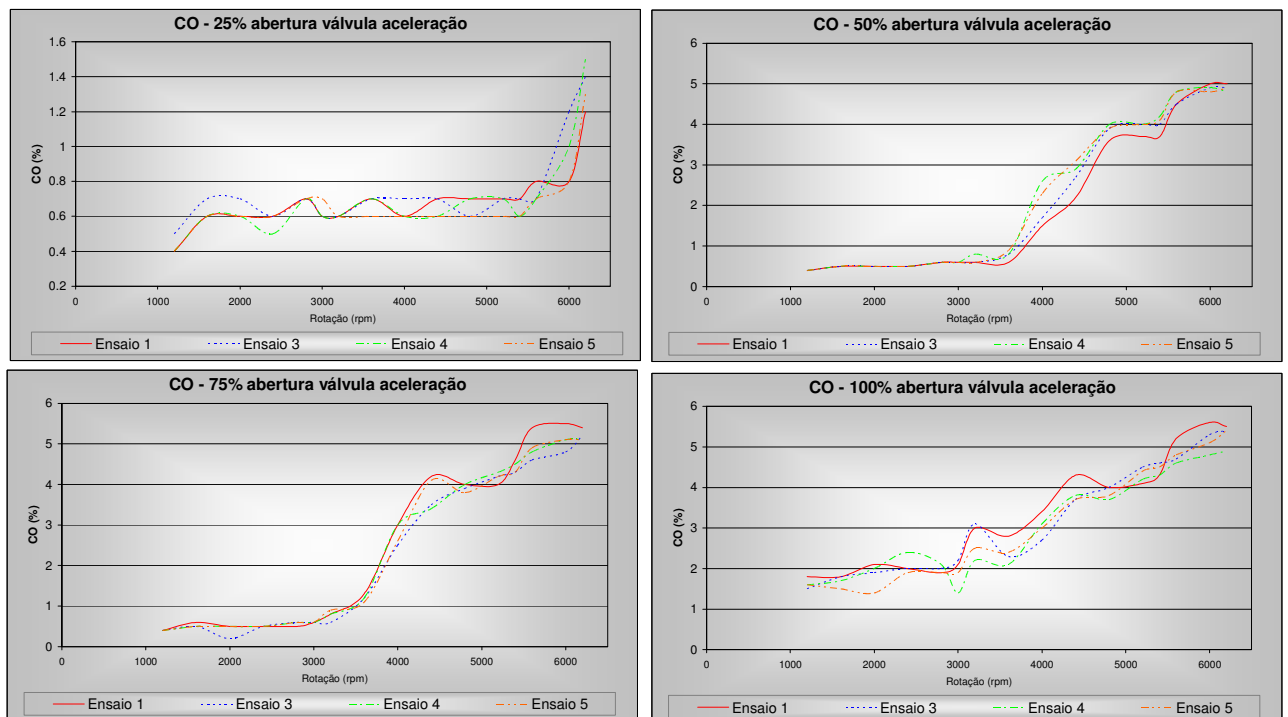


Gráfico 4.15: Monóxido de carbono(CO) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração

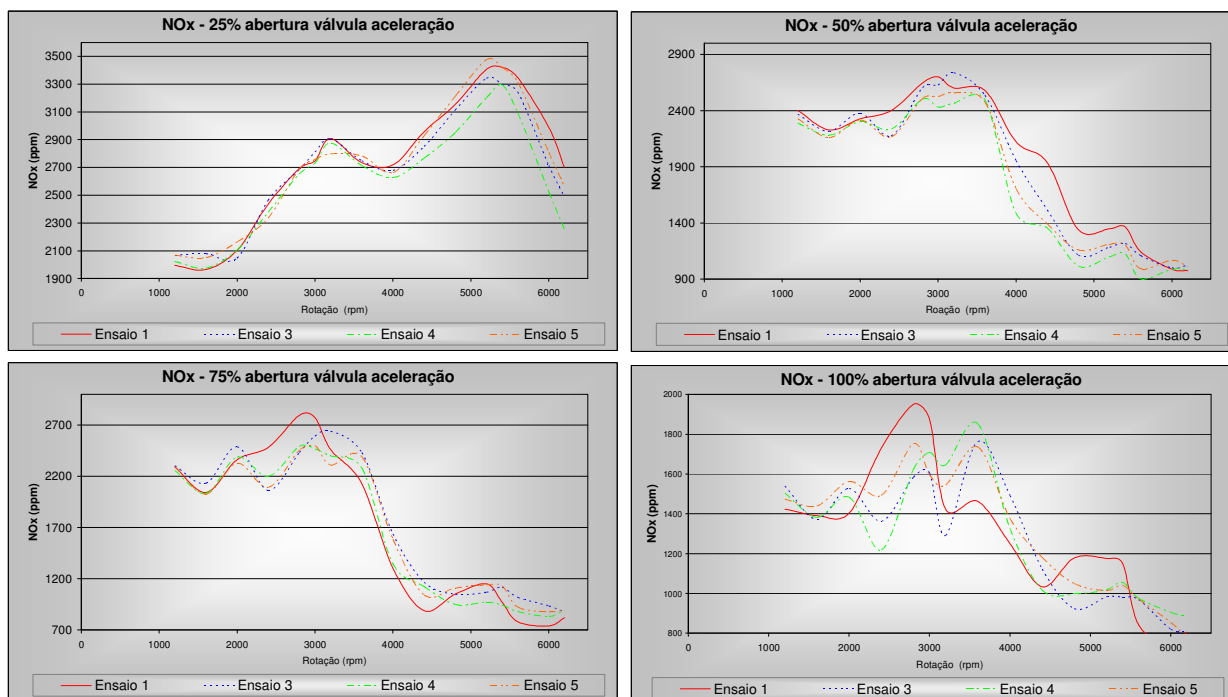


Gráfico 4.16: Óxido de nitrogênio(NO_x) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

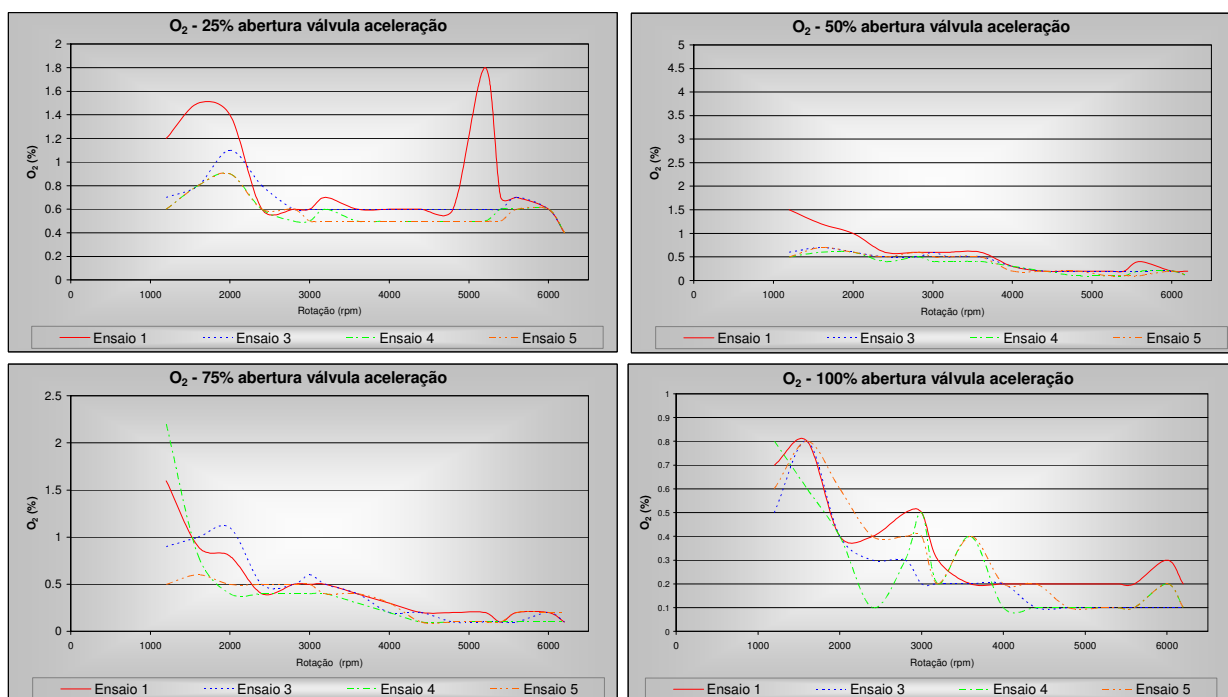


Gráfico 4.17: Oxigênio (O_2) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração.

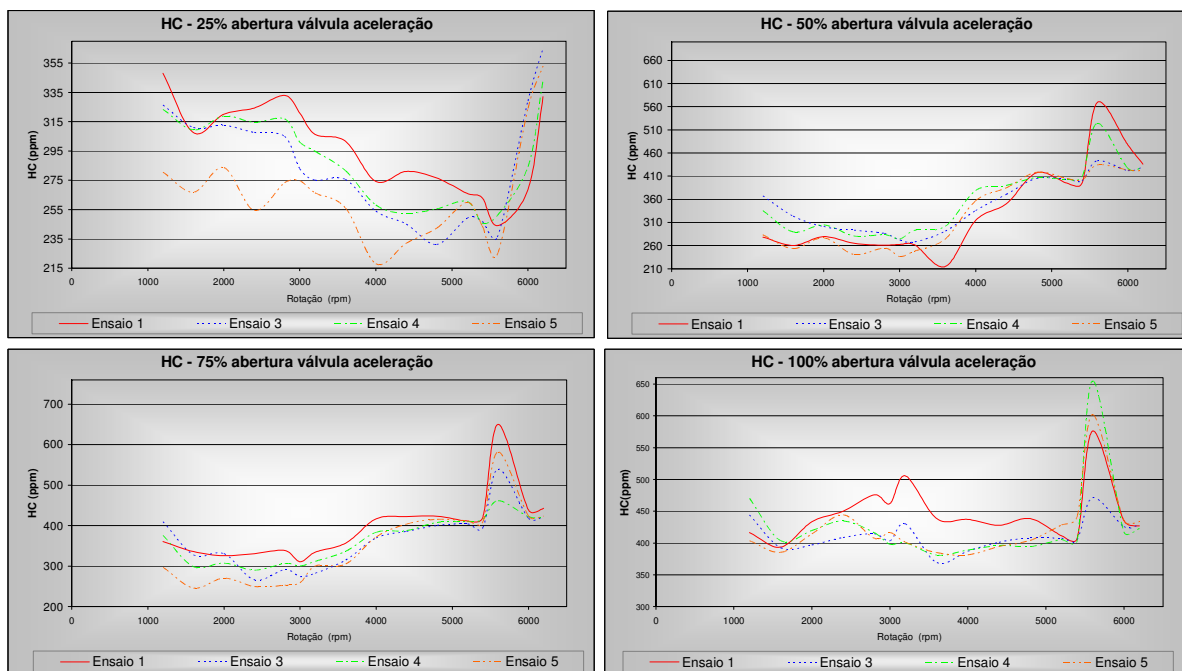


Gráfico 4.18: Hidrocarboneto (HC) medido durante os ensaios 3, 4 e 5 para diferentes posições de abertura da borboleta da válvula de aceleração e comparados com valores medidos durante ensaio 1.

Desconsiderando o ensaio feito com 25% de abertura da válvula de aceleração que incorpora o efeito da temperatura mais baixa da água de arrefecimento nos resultados, observa-se que onde o motor apresenta maiores potências, correspondentemente se tem maiores produções de dióxido de carbono (CO_2). Conseqüentemente a produção de monóxido de carbono (CO) reduz-se com o aumento da produção de (CO_2) mostrando uma melhor condição de queima do combustível. Isto faz com que aumente a produção de óxido de nitrogênio (NO_x) fomentada pelas maiores temperaturas que, nestes casos, deve-se ter dentro da câmara de combustão.

Seguindo o mesmo raciocínio, era de se esperar uma redução nos teores de oxigênio (O_2) e de hidrocarbonetos (HC) no escapamento, o que de fato ocorreu.

Nos gráficos correspondentes a 100% de abertura da válvula de aceleração, no trecho onde se observa maiores eficiências volumétricas verifica-se, coerentemente, aumento na produção de dióxido de carbono (CO_2) (devido ao consumo majorado) e aumento da produção de óxidos de nitrogênio (NO_x). A redução na produção de CO e HC sugerem um aumento de eficiência térmica provavelmente devido ao aumento do nível de pressão máxima atingida na câmara de combustão nas condições de operação acima.

4.3.3. Análise utilizando os grupos adimensionais número de Reynolds e coeficiente de perda de carga:

Como descrito no item “Considerações Iniciais” deste capítulo, os gráficos de coeficiente de perda de carga (K) em função do número de Reynolds (Re) permitem uma representação gráfica alternativa para o experimento descrito nesta dissertação e incorpora o modelo matemático desenvolvido para o estudo do fenômeno em questão.

Utilizando-se as equações 2.24 e 2.27 é possível calcular os valores de cada um dos adimensionais associados a cada um dos eixos desses gráficos. As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 mostram valores de temperatura, pressão, eficiência volumétrica e vazão em massa de ar utilizados para a obtenção dos números de Reynolds e coeficientes de perda de carga para abertura da válvula de aceleração igual a 100%, para os ensaios 1, 3 e 5.

Considerando que houve distorções nas medições de temperaturas, sobremaneira na temperatura T_3 , algumas destas tiveram seus valores medidos substituídos por valores calculados. Isto foi necessário pois as diferenças entre as medidas das temperaturas T_1 e T_3 geravam resultados equivocados em função da proximidade de seus valores, da acuracidade dos sensores e das incertezas associadas às suas medições.

Nestes casos o cálculo foi feito respeitando a hipótese da incompressibilidade do ar de admissão.

Borb. pos.	Rotação (RPM)	ensaio 1											
		T ₁ (°C)	p ₁ (kPa)	ρ ₁ (kg/m³)	T ₃ (°C)	p ₃ (kPa)	ρ ₃ (kg/m³)	ΔT _{e1}	Efic. Vol. (%)	m _{ar} (g/s)	Re	V (m/s)	K
100	1200	19.24	95.91	1.17	18.56	95.48	1.17	0.68	72.20	14.79	16514.69	15.667	1.555
	1600	19.02	95.80	1.17	18.40	95.38	1.17	0.62	74.17	20.27	22642.72	21.462	0.756
	2000	19.02	95.65	1.17	18.46	95.29	1.17	0.56	73.65	25.12	28086.45	26.634	0.443
	2400	19.00	95.36	1.17	18.44	94.99	1.16	0.56	80.29	32.85	36845.01	34.844	0.258
	2800	19.22	95.21	1.16	18.48	94.89	1.16	0.74	84.96	40.54	45523.95	43.015	0.224
	3000	19.28	95.18	1.16	18.40	94.58	1.16	0.88	84.07	42.96	48386.61	45.604	0.237
	3200	19.25	95.11	1.16	18.30	94.48	1.16	0.95	81.01	44.15	49768.64	46.873	0.242
	3600	19.76	94.96	1.16	18.74	94.18	1.15	1.02	77.39	47.45	53740.11	50.376	0.225
	4000	20.20	94.65	1.15	19.30	94.08	1.15	0.90	75.99	51.77	58801.43	54.957	0.167
	4400	20.94	94.48	1.15	19.98	94.28	1.15	0.96	77.99	58.45	66398.69	62.045	0.140
	4800	21.12	94.14	1.14	20.20	93.98	1.14	0.92	77.35	63.26	72151.15	67.132	0.114
	5200	21.40	93.99	1.14	20.50	93.77	1.14	0.90	75.98	67.27	76969.02	71.439	0.099
	5400	21.70	93.91	1.14	20.78	93.57	1.14	0.92	73.92	67.97	78008.54	72.180	0.099
	5600	21.88	93.80	1.14	21.02	93.67	1.14	0.86	71.46	68.13	78181.38	72.358	0.092
	6001	22.10	93.70	1.13	21.22	93.57	1.14	0.88	67.75	69.17	79508.52	73.509	0.091
	6200	22.20	93.67	1.13	21.28	93.47	1.13	0.92	65.05	68.59	78944.73	72.919	0.097

Tabela 4.3: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 1 com 100% de abertura da válvula de aceleração.

Borb. pos.	Rotação (RPM)	ensaio 3											
		T ₁ (°C)	p ₁ (kPa)	ρ ₁ (kg/m³)	T ₃ (°C)	p ₃ (kPa)	ρ ₃ (kg/m³)	ΔT _{e1}	Efic. Vol. (%)	m _{ar} (g/s)	Re	V (m/s)	K
100	1200	20.78	94.60	1.15	20.22	94.66	1.15	0.56	72.09	14.564	16493.45	15.643	1.284
	1600	20.87	94.50	1.15	20.33	94.51	1.15	0.54	72.33	19.488	22112.94	20.927	0.693
	2000	21.13	94.30	1.15	20.46	94.31	1.15	0.67	76.29	25.711	29245.82	27.590	0.493
	2400	21.18	94.26	1.14	20.39	94.16	1.15	0.79	75.04	30.356	34579.01	32.564	0.417
	2800	21.28	94.10	1.14	20.32	94.02	1.14	0.96	76.09	35.913	40959.37	38.524	0.363
	3000	21.32	94.01	1.14	20.40	93.87	1.14	0.92	77.03	38.940	44495.31	41.787	0.295
	3200	21.42	93.88	1.14	20.50	93.75	1.14	0.92	78.81	42.481	48616.47	45.602	0.248
	3600	21.52	93.61	1.14	20.76	93.27	1.13	0.76	80.88	48.991	56407.43	52.651	0.154
	4000	21.88	93.38	1.13	21.10	92.82	1.13	0.78	83.36	56.063	64938.02	60.291	0.120
	4400	22.42	93.20	1.13	21.52	92.38	1.12	0.90	82.11	60.714	70762.68	65.323	0.118
	4800	23.08	93.05	1.12	22.12	92.20	1.12	0.96	77.78	62.673	73331.47	67.503	0.118
	5200	23.22	92.93	1.12	22.42	92.12	1.11	0.80	75.11	65.612	76917.85	70.626	0.090
	5400	23.40	92.81	1.12	22.58	92.04	1.11	0.82	73.83	66.948	78593.97	72.089	0.089
	5600	23.58	92.72	1.12	22.72	91.99	1.11	0.86	72.34	67.973	79878.80	73.244	0.090
	6001	23.86	92.75	1.12	23.02	91.95	1.11	0.84	68.75	69.190	81427.06	74.591	0.085
	6200	24.12	92.72	1.11	23.22	91.95	1.11	0.90	66.17	68.831	81063.08	74.175	0.092

Tabela 4.4: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 3 com 100% de abertura da válvula de aceleração.

Borb. pos.	Rotação (RPM)	ensaio 5											
		T ₁ (°C)	p ₁ (kPa)	ρ ₁ (kg/m ³)	T ₃ (°C)	p ₃ (kPa)	ρ ₃ (kg/m ³)	ΔT _{e1}	Efic. Vol. (%)	m _{ar} (g/s)	Re	V (m/s)	K
100	1200	19.15	94.80	1.16	18.60	94.74	1.16	0.55	72.10	14.645	16477.79	15.643	1.258
	1600	19.20	94.71	1.16	18.65	94.62	1.16	0.55	73.14	19.814	22327.75	21.162	0.687
	2000	19.23	94.52	1.16	18.46	94.38	1.16	0.77	75.49	25.557	28853.09	27.300	0.580
	2400	19.72	94.20	1.15	18.72	94.01	1.15	1.00	78.48	31.869	36151.07	34.058	0.483
	2800	19.42	94.26	1.15	18.56	94.09	1.15	0.86	78.93	37.378	42340.46	39.959	0.302
	3000	19.42	94.20	1.15	18.66	94.05	1.15	0.76	78.63	39.896	45230.78	42.651	0.234
	3200	19.52	94.08	1.15	18.78	93.95	1.15	0.74	79.19	42.724	48505.10	45.822	0.198
	3600	19.82	93.84	1.14	19.06	93.56	1.14	0.76	80.10	48.628	55491.02	52.137	0.157
	4000	20.56	93.56	1.14	19.819	93.16	1.14	0.74	82.81	55.844	64166.21	59.894	0.116
	4400	21.18	93.35	1.13	20.319	92.75	1.13	0.86	82.60	61.262	70829.18	65.713	0.112
	4800	21.72	93.26	1.13	20.758	92.51	1.12	0.96	78.83	63.785	74044.21	68.413	0.115
	5200	21.98	93.11	1.13	20.978	92.51	1.12	1.00	75.86	66.480	77227.91	71.330	0.110
	5400	22.32	93.01	1.13	21.238	92.41	1.12	1.08	74.54	67.782	78895.89	72.777	0.114
	5600	22.62	92.99	1.12	21.518	92.41	1.12	1.10	72.41	68.278	79549.10	73.316	0.115
	6001	22.92	92.96	1.12	21.837	92.37	1.12	1.08	69.20	69.913	81575.45	75.081	0.107
	6200	23.14	92.93	1.12	22.057	92.34	1.12	1.08	66.77	69.707	81426.22	74.853	0.108

Tabela 4.5: Valores medidos e resultados obtidos no ensaio 5 com 100% de abertura da válvula de aceleração.

Nos cálculos efetuados para a elaboração das tabelas acima, foram utilizados os valores indicados na tabela 4.6.

Item #	Item	Valor	Unidade
1	Constante de gases perfeito do ar (R)	279.8	J/kg.K
2	Cilindrada total do motor (V _t)	0.0018	m ³
3	Diâmetro da mangueira de ar (d)	0.065	m
4	Viscosidade cinemática do ar (ν)	0.000015	m ² /s

Tabela 4.6: Valores utilizados para cálculo do número de Reynolds e coeficiente de perda de carga.

Os gráficos 4.19 e 4.20 a seguir mostram a evolução do coeficiente de perda de carga com o número de Reynolds, numa comparação dos ensaios 1 e 3 e 1 e 5 respectivamente. Em ambos os casos para melhor visualização do efeito da geometria a válvula de aceleração encontrava-se totalmente aberta.

Pode-se observar nestes gráficos:

- maior valor do coeficiente de perda de carga com o uso do plenum (ensaio 3 e 5) na faixa de número de Reynolds entre 25000 e 45000. Esta faixa de número de Reynolds corresponde no ensaio 1 a rotações entre 1800 e 3200 rpm, no ensaio 3 entre 1800 e 3000 rpm e no ensaio 5 entre 2100 e 3300 rpm.

- valores maiores de coeficiente de perda de carga, na faixa de número de Reynolds mencionada acima, no ensaio 5 (plenum montado na horizontal com entrada de ar lateral) relativamente aos observados no ensaio 3 (plenum montado na vertical com entrada de ar na parte superior).

Estes resultados indicam uma maior restrição imposta ao escoamento no caso do ensaio 5, nesta faixa de número de Reynolds. Conseqüentemente, era de se esperar a obtenção de uma melhor eficiência volumétrica com o uso da configuração do ensaio 3 em relação à do ensaio 5. Entretanto isto não se verifica quando os valores constantes nas tabelas são observados. A provável explicação para isso é a não obtenção da temperatura correta, mesmo através de cálculo para o ponto 3 do volume de controle. É importante mencionar que as condições atmosféricas (pressão barométrica e temperatura de bulbo seco) não afetaram o valor da massa específica do ar, as umidades relativas não eram suficientemente diferentes para afetar significativamente a eficiência volumétrica e não houve nenhuma alteração no mecanismo de abertura e fechamento de válvulas bem como na tubulação de escape.

Fora da faixa de número de Reynolds mencionada acima, em ambos os casos os valores menores dos coeficientes de perda de carga observados nos ensaios 3 e 5 relativamente ao ensaio 1 explicam satisfatoriamente o aumento da eficiência volumétrica do motor com o uso do plenum.

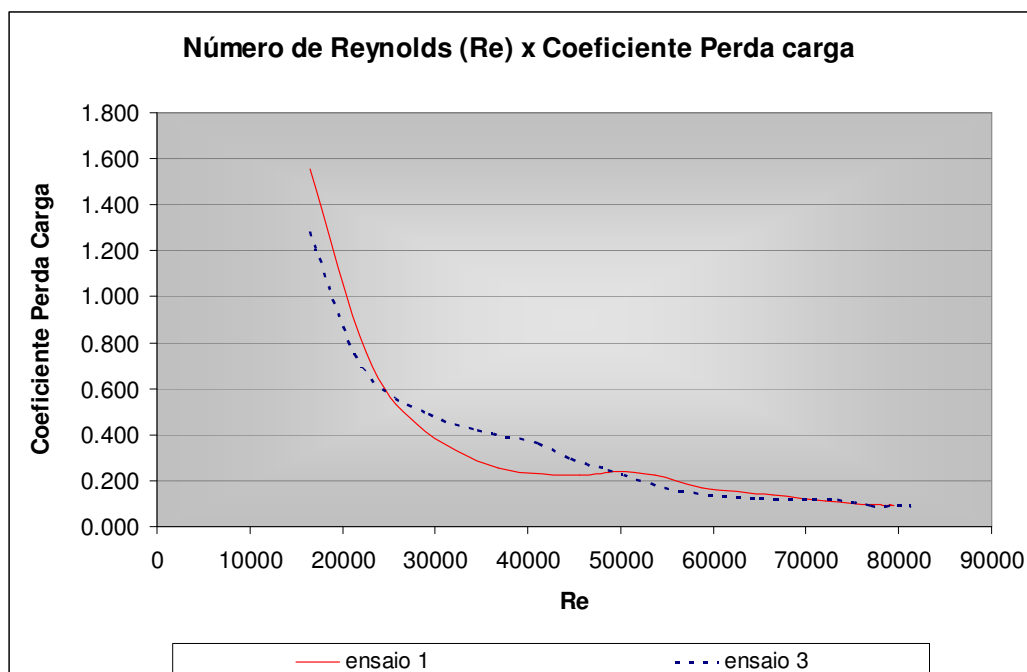


Gráfico 4.19: Comparativo do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds para ensaios 1 e 3.

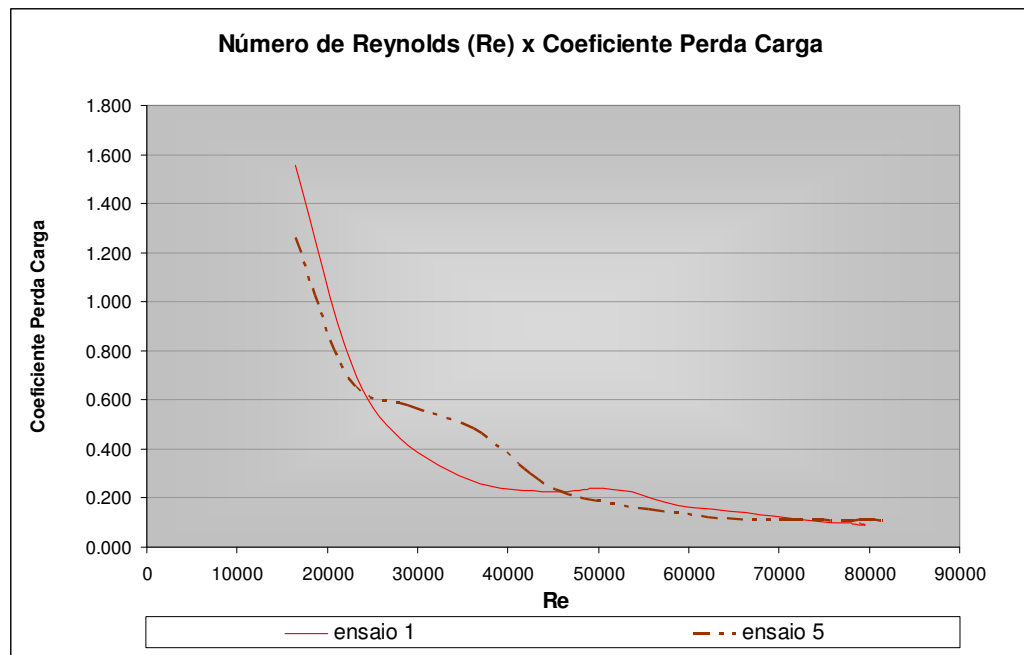


Gráfico 4.20: Comparativo do coeficiente de perda de carga em função do número de Reynolds para ensaios 1 e 5.

A análise feita acima mostra a importância do uso do modelo matemático na definição da geometria do trecho do sistema de admissão estudado, consolidando-se como uma ferramenta importante no desenvolvimento de motores. A eficácia deste modelo pode ser melhorada com a introdução de outros parâmetros que sabidamente interferem no fenômeno e com uma melhor interface que permita fornecer-lhe dados mais confiáveis para processamento.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

A mudança da geometria do sistema de admissão produziu:

- quando da rotação da válvula de aceleração, verificou-se modificações pouco significativas na eficiência volumétrica e conseqüentemente nos parâmetros de desempenho e produções de gases poluentes (ensaio 2 comparado com ensaio 1);

- a utilização do plenum alterou significativamente as condições de escoamento permitindo observar uma perda de eficiência volumétrica numa faixa de operação do motor de rotações mais baixas com substancial ganho em rotações mais elevadas principalmente com aberturas crescentes de borboleta da válvula aceleradora.

Nota-se, como era de se esperar, que, com o aumento da eficiência volumétrica, há um aumento do momento de força (torque) e da potência, fato justificado pela maior massa de mistura dentro da câmara de combustão. A maior quantidade de energia disponibilizada permite o aumento do desempenho do motor de combustão interna.

O consumo específico manteve-se praticamente constante em todos os ensaios, mostrando que houve manutenção da eficiência global do motor; o ganho de potência foi conseguido com um aumento de consumo de combustível.

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) emitidos durante os ensaios com a válvula de aceleração a 100% de abertura comportaram-se de forma coerente com a evolução da eficiência volumétrica. Isto é, a redução da eficiência reduziu a massa de mistura dentro da câmara de combustão reduzindo a temperatura desta que por sua vez reduziu a formação deste gás poluente. As produções de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) não foram significativamente afetadas.

Utilizando-se a curva de eficiência volumétrica mostrada no gráfico 4.1 e 4.10 para a válvula de aceleração a 100% de abertura pode-se definir que:

- o ensaio que apresentou a maior diferença quando comparado com o ensaio referência é o de número 3; nas regiões onde houve uma redução na eficiência volumétrica este ensaio apresentou a maior redução e nas regiões onde houve um ganho de eficiência este apresentou o maior ganho.

- o ensaio que apresentou a menor diferença quando comparado com o ensaio de referência é o de número 2.

- o melhor desempenho do motor de combustão é conseguido quando da mistura das configurações dos ensaios 1 e 3. Para rotações entre 1200 e 1800 rpm sugere-se utilizar a configuração do ensaio 3, para rotações entre 1800 e 3400 rpm aproximadamente utilizar a configuração do ensaio 1 e para rotações entre 3400 e 6200 rpm utilizar configuração do ensaio 3. Para obter o melhor resultado do que foi visto anteriormente sugere-se a utilização de um plenum variável.

Como sugestões para trabalhos futuros, podem-se mencionar:

- Projeto de experimento que permitam obter valores de pressão e temperatura precisas para que modelos matemáticos possam se melhor aproveitados como ferramenta de desenvolvimento de sistemas.

- Estudar condições adequadas de acondicionamento do motor para melhorar a repetitividade e a reprodutibilidade dos ensaios bem como correlacionar resultados corrigidos com reais.

- A continuidade do estudo feito neste trabalho considerando a instalação de uma válvula borboleta internamente ao plenum, a qual permitiria a sintonia desejada, ou seja, evitar a redução da eficiência volumétrica em baixas rotações e mantê-la elevada em rotações maiores.

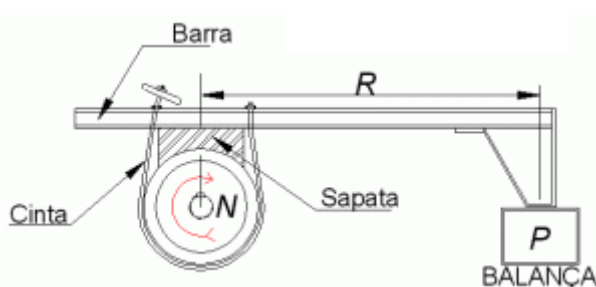
ANEXO 1 – EQUIPAMENTO E COMPONENTES UTILIZADOS:

1 Equipamento utilizado:

Para a realização dos ensaios descritos nesta dissertação (capítulo 3) foi utilizado dinamômetro de motor do tipo assíncrono duplo (motor elétrico / gerador). Normalmente estas máquinas são utilizadas para o desenvolvimento e refinamento de motores modernos de combustão interna.

Dinamômetro é um equipamento capaz de medir torque e velocidade (rotação), de um motor em suas diversas condições de funcionamento. Ele pode ser aplicado apenas para motores, neste caso conhecido como dinamômetro de motor ou ser aplicado para veículo, chamado então de dinamômetro de chassis.

O dinamômetro mais antigo, utilizado até os dias de hoje para medir torque do motor, é constituído por um volante circundado por uma cinta conectada a um braço cuja extremidade se apóia sobre a plataforma de uma balança. O volante acionado pelo motor, tem o seu movimento restringido pela pressão aplicada à cinta, que transmite o esforço ao braço apoiado sobre a balança. A partir das leituras da balança, calcula-se o esforço despendido pelo motor. Esse dispositivo é conhecido como FREIO DE PRONY:



Há, atualmente no mercado vários tipos de dinamômetros, são eles:

- Freio de Prony;
- Água;
- Hidráulico;
- Eletromagnético;
- Ventilação;
- Elétrico / gerador (assíncrono);

Como descrito acima, o dinamômetro de motor utilizado para os ensaios descritos no capítulo 3 é do tipo assíncrono duplo (elétrico / gerador) marca Schenck Pegasus GmbH, modelo Dynas₂ 130. Este está montado em um ambiente chamado célula ou *test cell*. A figura A1.1 ilustra a célula onde os ensaios foram realizados.



Figura A1.1: Ilustração da célula de teste utilizada para os ensaios descritos no capítulo 5.

A operação do dinamômetro é realizada a partir da sala de controle ou *control room*, ilustrada na figura A1.2.



Figura A1.2: Ilustração da sala de controle

O princípio de funcionamento da célula e da sala de controle está descrito no diagrama A1.1, onde o dinamômetro, motor e equipamentos de conexão estão em um quarto, chamado célula, enquanto que o operador, computadores e máquinas para análise dos resultados estão em outro ambiente, chamado sala de controle.

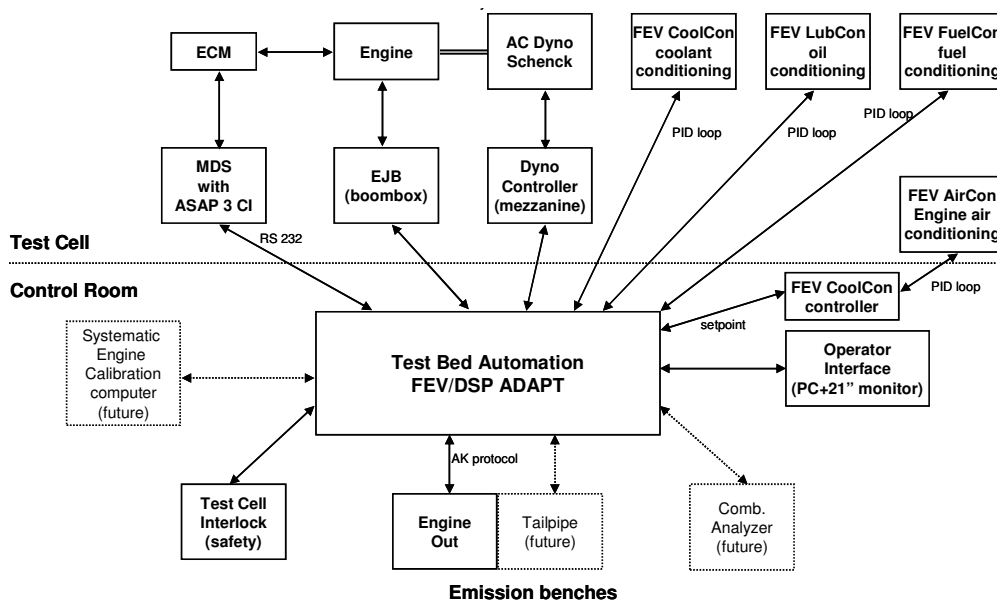


Diagrama A1.1: Princípio de funcionamento da célula e da sala de controle onde os ensaios foram realizados.

As características funcionais do dinamômetro assíncrono duplo utilizado para realização dos ensaios estão descritas na tabela A1.1. Esta máquina mede e registra temperaturas, pressões, rotações, torque, potência, consumo, emissões, condições do ambiente e sinais analógicos e controla a temperatura do óleo do sistema de lubrificação do motor, a temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor, a temperatura do combustível do motor e a temperatura e umidade relativa do ar. Procedimento operacional do dinamômetro define quando medidores do tipo célula de carga, transdutores de temperatura, transdutores de pressão, termopares, entradas e saídas analógicas e bancada de emissões devem ser calibrados. A figura A1.3 ilustra o software de operação e acompanhamento do dinamômetro, este promove integração da bancada de teste (Schenck) com os equipamentos de análise (tipo FEV) ilustrado na figura A1.4, utiliza processador *read line* e está integrado com *Uniplot* para confecção de gráficos. A figura A1.5 ilustra o equipamento conhecido com Boom Box que tem por função condicionar os diversos sinais que estão sendo lidos, convertê-los para RS232 e enviá-los ao computador principal. A figura A1.6 ilustra a balança gravimétrica utilizada para medir massa de combustível consumida e via software calcular consumo específico do motor em teste.

Item #	Característica funcional	Valor	Comentários
1	Potência máxima	130 kW	capacidade de teste transiente max 9000 min ⁻¹ /s
2	Torque máximo	300 Nm	
3	Inércia	0.55 kgm ²	
4	Unidade condicionamento óleo motor	de 60 à 130 °C	LubCon
5	Unidade condicionamento do líquido de arrefecimento motor	de 60 à 120 °C	CoolCon
6	Unidade condicionamento do ar de admissão motor	de 20 à 50 °C / de 40 à 70 %RH / de 90 à 110 kPa	AirCon
7	Unidade condicionamento de combustível	de 20 à 40 °C / pressão max. 500 kPa	FuelCon
8	Bancada emissões	----	brutas (pré catalisador)
9	Bancada de testes com sistema de automação	32 canais de temperatura	termopar tipo K
		12 canias com transdutores de pressão	
		16 canais analógicos BNC	para uso geral
		4 canais de frequência	para uso geral
10	Interfaces	----	analizador de combustão
		----	ferramentas de aplicação da ECM
11	Balança gravimétrica	0 à 150 kg/h (or 0 à 75 kg/h para precisão para menores valores medidos)	AVL 733S Dynamic fuel meter

Tabela A1.1: características funcionais do dinamômetro assíncrono duplo utilizado para realização dos ensaios.

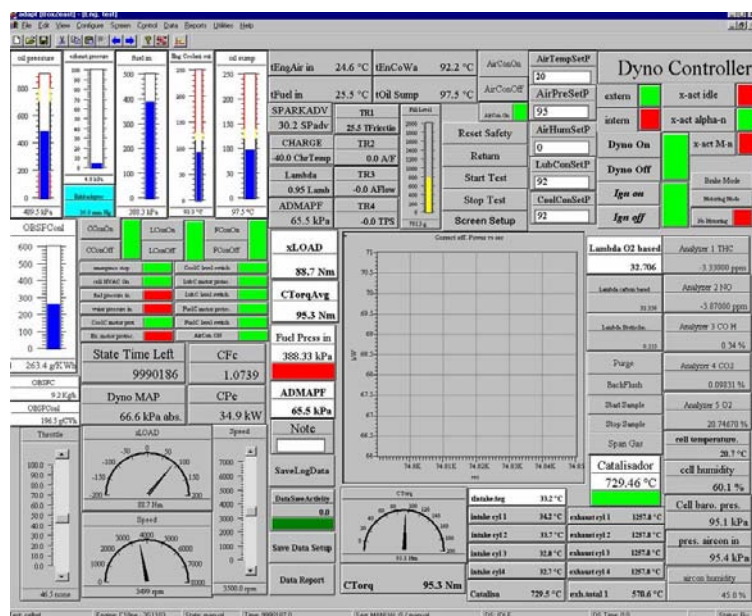


Figura A1.3: software de operação e acompanhamento do dinamômetro. Promove integração da bancada de teste (Schenck) com os equipamentos de análise (tipo FEV).



Figura A1.4: equipamentos de análise tipo FEV.

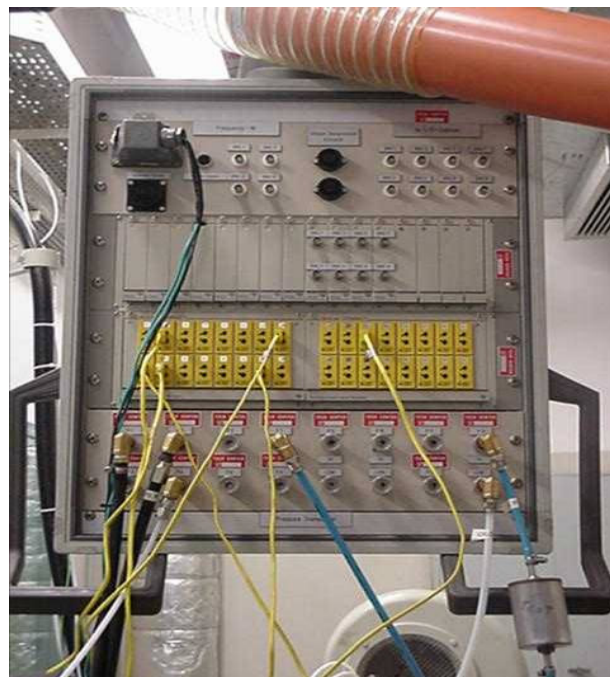


Figura A1.5: equipamento *Boom Box* que tem por função condicionar os diversos sinais que estão sendo lidos, convertê-los para RS232 e enviá-los ao computador principal.

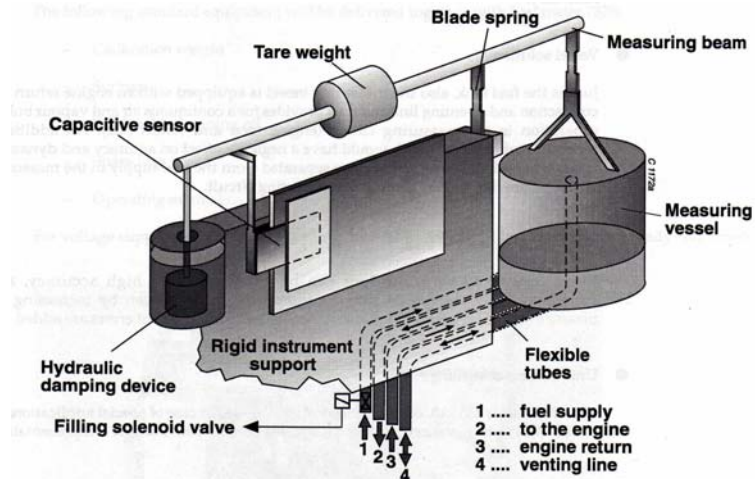


Figura A1.6: balança gravimétrica utilizada para medir massa de combustível consumida.
Marca AVL modelo 733S

2 Componentes utilizados:

2.1. Sensor de pressão absoluta (MAP – Manifold Absolute Pressure):

O sensor é um transdutor de pressão que gera sinal analógico proporcional a variação de pressão. A função de transferência é a equação que relaciona a tensão de saída do sensor com a pressão na região onde este está montado e a tensão de alimentação, e pode ser escrita como demonstrado na equação A1.1.

$$V_{\sum out} = V_{ref} (K_1 * p + K_2) \quad (\text{eq. A1.1})$$

$$V_{out} = V_{ref} (K_1 p + K_2)$$

Onde, V_{out} = tensão saída ;

V_{ref} = tensão de alimentação (ou referência);

K_1 = ganho (ou *slope*);

K_2 = offset;

p = pressão onde o sensor está montado.

Qualquer modificação na tensão de alimentação resultará em mudança proporcional no sinal de saída do sensor.

O erro de medição à 25°C é dado pela equação A1.2, as fontes de incerteza consideradas para a definição da equação são: 1) estabilidade; 2) repetibilidade; 3) histerese; 4) intercambiabilidade.

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} (0.01059 \cdot P - 0.10941) \quad (\text{eq. A1.2})$$

Para uma tensão de referência de 5 ± 0.1 Volts, temperatura de 25 °C e pressões de 20, 40, 94 e 102 kPa o erro permitido para cada pressão, está descrito na tabela A1.2.

Item #	Pressão referência (kPa)	Erro permitido (kPa)
1	20	± 2.4
2	40	± 1.5
3	94	± 1.5
4	102	± 1.7

Tabela A1.2: Erro permitido para diferentes pressões, quando tensão de referência é igual à 5 ± 0.1 Volts e temperatura de 25 °C.

Para temperaturas diferentes de 25 °C o máximo erro na medição de pressão é dado pela multiplicação do erro permitido (tabela A1.2) pelo multiplicador mostrado na tabela A1.3.

Item #	Temperatura (°C)	Multiplicador
1	-40	2
2	10	1
3	85	1
4	105	2

Tabela A1.3: Multiplicador para corrigir erro permitido durante medição de pressão.

A faixa de operação do sensor é de 10 à 110 kPa e seu tempo de resposta, definido como o tempo necessário para modificar o sinal de saída (de um ponto inicial à 90% do novo valor) quando da variação de pressão na região onde esta está sendo medida, não pode exceder 5 ms. Quando submetido a pressão atmosférica o sensor deverá estabilizar em 1% do valor de tensão de saída

A figura A1.7 ilustra as características dimensionais e do conector do sensor utilizado.

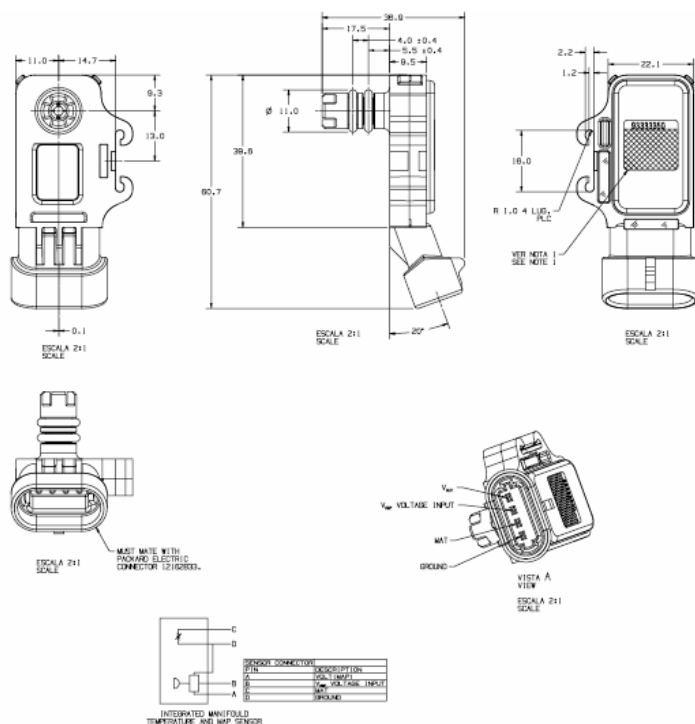


Figura A1.7: ilustra as características dimensionais e do conector do sensor utilizado.

2.2. Medidor de massa de ar:

A massa de ar por unidade de tempo admitida pelo motor de combustão interna com ignição por centelha utilizado durante os ensaios, foi medida utilizando-se sensor de massa de ar do tipo fio aquecido, montado em um sistema composto por um barril a jusante e uma tubulação a montante do sensor.

O barril de grandes dimensões, com capacidade volumétrica de 200 litros, tem como função eliminar todas as perturbações e contra-fluxo existentes no ar a jusante do sensor, devido as dimensões do barril a velocidade do ar dentro deste é baixa. Já a tubulação e o perfil de entrada desta foram dimensionados para manter fluxo laminar na região onde se encontra o sensor. O conjunto das características do sistema, como ausência de perturbações e contra-fluxos e o fluxo laminar do ar diminuem erros do sistema de medição.

As medições de massa de ar utilizando sensor de massa de ar do tipo fio aquecido são medições chamadas “em tempo real”, ou seja, a massa de ar que o motor está admitindo sob determinadas condições é informada a central eletrônica do sistema eletrônico de injeção de combustível no mesmo instante que está sendo executada. Este sensor utiliza um elemento aquecido montado na linha de fluxo do

ar e é mantido à temperatura constante e acima da temperatura do ar que está sendo admitido. A quantidade de energia elétrica necessária para manter o elemento aquecido à temperatura de funcionamento é uma função direta da massa de ar que atravessa o sensor. A medida que aumenta-se a massa de ar que atravessa o sensor, induz-se uma maior troca de calor com este e por conseqüência um aumento na energia elétrica necessária para manter a temperatura de trabalho do mesmo, por sua vez quanto menor a massa de ar atravessando o sensor menor será a energia necessária para manter a temperatura de trabalho deste. A variação na energia necessária para manter a temperatura de operação do sensor é uma indicação direta da massa de ar que atravessou o elemento aquecido e foi admitida pelo motor de combustão interna.

Para melhorar a resolução e precisão do sensor a energia consumida é transformada em frequência por um circuito conversor existente neste, e suas dimensões são definidas de modo a diminuir a queda de pressão através do elemento aquecido.

A tabela A1.4 descreve os valores de conversão de vazão (g/s) para frequência (hz), *slope* e faixa de tolerância total para o valor de frequência correspondente a seis sigma. A figura A1.8 ilustra dimensões importantes do sensor como também informações que identificam o conector deste.

FLOW (g/s)	MEAN FREQUENCY (hz)	SLOPE (hz/g/s)	-3 σ LOWER (hz)	+3 σ UPPER (hz)
3.5	2041	270.72	2019	2064
5.0	2391	204.21	2367	2416
6.5	2671	172.63	2645	2697
9.0	3065	142.11	3036	3094
12.0	3446	113.41	3413	3479
16.0	3850	90.611	3799	3900
20.0	4178	74.983	4115	4240
30.0	4851	58.824	4774	4927
40.0	5381	48.339	5284	5478
55.0	6053	40.33	5938	6169
75.0	6758	30.849	6694	6821
100.0	7448	24.902	7391	7505
135.0	8253	20.921	8191	8315
185.0	9208	17.059	9134	9282
250.0	10176	13.088	10091	10261

Tabela A1.4: Valores de conversão de vazão (g/s) para frequência (hz), *slope* e faixa de tolerância total para o valor de frequência..

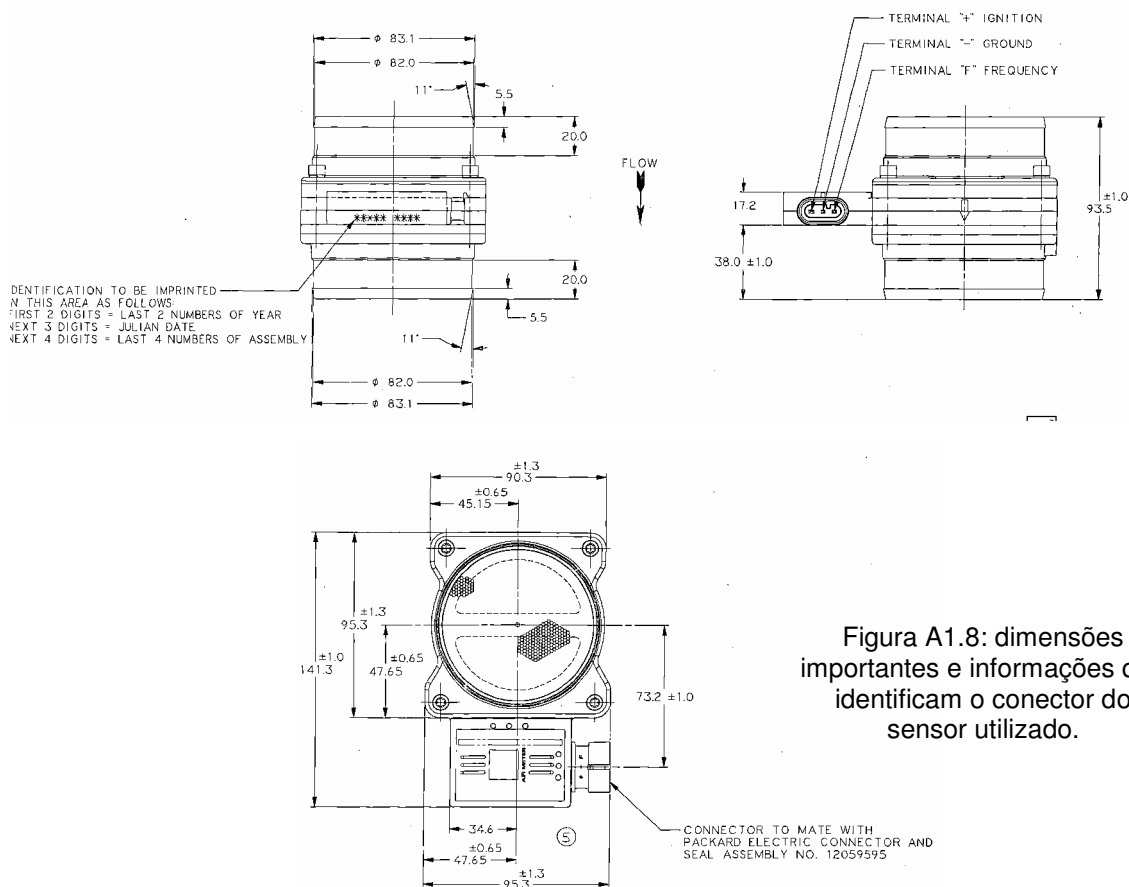


Figura A1.8: dimensões importantes e informações que identificam o conector do sensor utilizado.

2.3. Reservatório de dimensões significantes (plenum):

Algumas vezes chamado de reservatório de dimensões significantes, outras de plenum, ou simplesmente reservatório, foi desenvolvido para ter um volume 2.5 vezes maior que a cilindrada do motor utilizado durante os ensaios.

As características dimensionais do reservatório (ou plenum) estão ilustradas na figura A1.9. Este foi construído com chapas de aço as quais foram soldadas na forma mostrada na mesma figura. Seu volume total é de $4.500.000 \text{ mm}^3$ (ou 4.500 cm^3). Possui 3 bocais utilizados para: 1) entrada de ar filtrado; 2) saída do ar para o motor e 3) permitir montagem do reservatório em diferentes posições (vertical \Rightarrow ver figura 3.4 capítulo 3 ou horizontal \Rightarrow ver figura 3.6 capítulo 3).

A estanquidade do reservatório foi verificada por meio de medições de vazamento injetando-se ar dentro do reservatório à 14.7 kPa e verificando-se a queda de pressão ao longo do tempo. Dois dos bocais foram vedados com borrachas e as borrachas fixadas com fita adesiva, o terceiro foi vedado com

borracha mais rígida e um tubo montado no centro desta permitindo que ar fosse injetado dentro do reservatório.

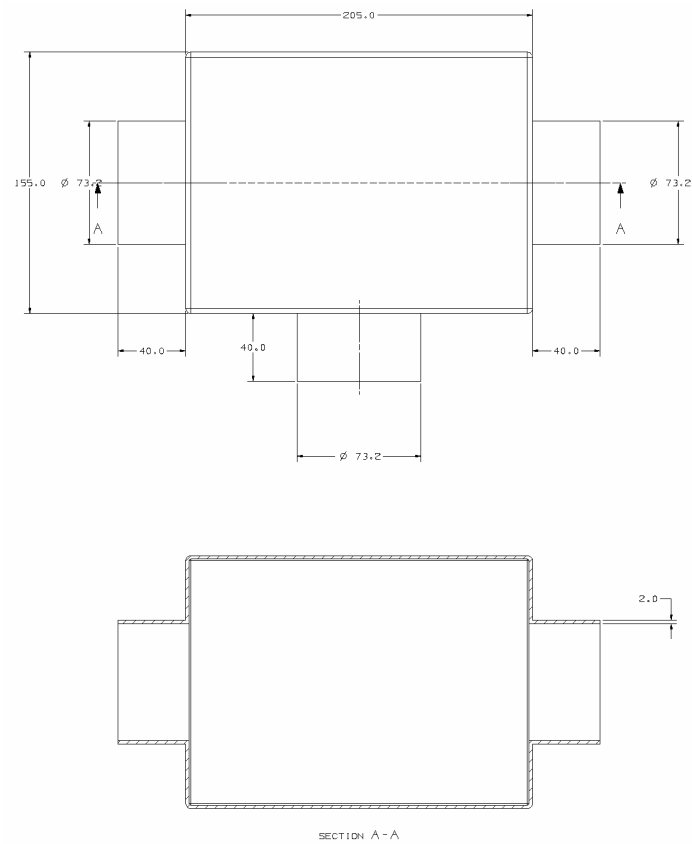


Figura A1.9 características dimensionais do reservatório (ou plenum).

ANEXO 2 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E INCERTEZAS:

1 Procedimento experimental:

Como mencionado no capítulo 3, os ensaios foram executados obedecendo a norma ABNT NBR ISO 1585 e o procedimento interno Delphi TCI-EDL-022.

Os tópicos abaixo listados foram respeitados durante todo o ensaio e aquisição dos valores medidos.

- ✓ Para a determinação da potência efetiva líquida a válvula de aceleração deve estar na posição de máxima abertura (plena carga) onde as condições de regulação para este ensaio estão indicadas na tabela 2 da norma NBR ISO 1585, já para determinar o desempenho do motor (potência, torque e consumo específico) deve-se seguir a seção 9 da norma NBR ISO 1585.
- ✓ Os dados de desempenho devem ser obtidos sob condições estabilizadas de operação, com um fornecimento adequado de massa de ar fresco para o motor.
- ✓ Devem ser obedecidas as recomendações do fabricante quanto ao amaciamento prévio, partida e aquecimento do motor. As câmaras de combustão podem conter depósitos, mas em quantidade limitada. As condições do ensaio, tal como a temperatura do ar de admissão, devem ser selecionadas o mais próximo das condições atmosféricas de referência citadas na seção 6.2.1.1 e 6.2.1.2 da norma ABNT NBR ISO 1585, a fim de minimizar o fator de correção;
- ✓ A temperatura do ar de admissão para o motor (ar ambiente) deve ser medida até 0,15 m a montante do conduto de admissão do ar. O Termômetro ou termopar deve ser isolado do calor radiante e localizado diretamente na corrente de ar. Ele também deve ser isolado dos respingos do refluxo de combustível. Um número suficiente de locais de medição deve ser utilizado para fornecer uma média representativa da temperatura de admissão;
- ✓ A depressão da entrada deve ser medida a jusante dos dutos de entrada, do filtro de ar, do silenciador da entrada, dos dispositivos de limitação da rotação (se montados) ou seus equivalentes;

- ✓ A pressão absoluta no sistema de admissão de ar do motor deve ser medida no coletor de admissão e em qualquer outro ponto onde a pressão tenha que ser medida para calcular os fatores de correção;
- ✓ A contrapressão do escapamento deve ser medida em um ponto a uma distância mínima equivalente a três diâmetros do tubo em relação a(s) flange(s) de saída do(s) coletor(es) de escapamento. A localização deve ser especificada;
- ✓ Nenhum valor medido deve ser registrado até que o torque, a rotação e as temperaturas tenham sido mantidas substancialmente constantes por pelo menos 1 minuto;
- ✓ A rotação do motor durante o funcionamento ou registro dos valores medidos não deve desviar-se da rotação selecionada por mais do que $\pm 1\%$ ou $\pm 10 \text{ min}^{-1}$, aquela que for maior;
- ✓ Os dados observados de carga ao freio, fluxo de combustível e a temperatura do ar de admissão devem ser tomados virtual e simultaneamente e, em cada caso, devem ser a média de duas leituras consecutivas estabilizadas que não variem mais que 2% para a carga ao freio e consumo do combustível. A segunda leitura deve ser determinada sem qualquer ajuste do motor, aproximadamente 1 minuto após a primeira;
- ✓ A temperatura do líquido de arrefecimento na saída do motor deve ser mantida dentro de $\pm 5 \text{ K}$ ($\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) da temperatura mais alta controlada termostaticamente, especificada pelo fabricante. Caso não especificada, a temperatura deve ser de $353 \text{ K} \pm 5 \text{ K}$ ($80 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$);
- ✓ Para motores arrefecidos a ar, a temperatura indicada em um ponto pelo fabricante deve ser mantida dentro de $0 - 20 \text{ K}$ (do valor máximo por ele especificado nas condições padrão de referência);
- ✓ Para motores de ignição por centelha, a temperatura do combustível deve ser medida o mais próximo possível da entrada do carburador ou conjunto de injetores de combustível. A temperatura do combustível deve ser mantida dentro de $\pm 5 \text{ K}$ ($\pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) da temperatura especificada pelo fabricante. Contudo, a temperatura mínima permitida para o combustível no ensaio deve ser a temperatura do ar ambiente.

Caso não especificada pelo fabricante, a temperatura do combustível no ensaio deve ser de $298\text{ K} \pm 5\text{ K}$ ($25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$);

- ✓ A temperatura do lubrificante deve ser medida na entrada da galeria de óleo ou na saída do arrefecedor do óleo, se montado, a menos que alguma outra localização de medição seja específica pelo fabricante. A temperatura deve ser mantida dentro dos limites especificados pelo fabricante;
- ✓ Caso necessário, um sistema auxiliar de regulação pode ser utilizado para manter as temperaturas dentro dos limites especificados anteriormente;
- ✓ Um combustível comercialmente disponível pode ser utilizado, contanto que suas características sejam especificadas no relatório e que ele não contenha qualquer supressor de fumaça ou aditivos suplementares. Porém é recomendado que um combustível de referência seja utilizado, uma relação incompleta de tais combustíveis pode ser encontrada na norma NBR ISO 1585.

2 Incerteza:

A enciclopédia digital wikipedia descreve incerteza como a falta de conhecimento a priori referente ao resultado de uma ação ou ao efeito de uma condição, é um termo utilizado em vasto número de campos, incluindo estatística, economia, engenharia, entre outros, e aplica-se à dificuldade em prever eventuais erros em medidas físicas realizadas.

É expressa por uma faixa de valores que são provavelmente perto do valor real.

O procedimento Delphi TCP-GER-005 define incerteza de medição como sendo o parâmetro associado a um resultado de medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando. Este procedimento descreve também incerteza tipo “A” como sendo a componente da incerteza atribuída a repetitividade de resultados e medições sucessivas efetuadas sob as mesmas condições de medição; Incerteza tipo “B” como sendo a componente da incerteza que leva em conta entre outros fatores, o

certificado de calibração dos instrumentos e materiais de referência, a resolução dos instrumentos, o ajuste de curvas de linearização, etc. A incerteza pode ser combinada (U_c) quando o valor da incerteza é representado por um desvio padrão estimado que é obtido pela raiz quadrada da variância total de determinada variável ou expandida (U_e) quando o valor final de incerteza para uma determinada variável que fornece um intervalo de confiança dentro do qual existe a maior probabilidade de se encontrarem valores que poderão ser atribuídos ao valor verdadeiro. A incerteza expandida é obtida pela multiplicação da incerteza combinada pelo fator de abrangência (k), fator que considera o total de graus de liberdade da variável, e por fim a incerteza padrão (U_i) definida como um desvio padrão.

A célula de dinamômetro utilizada durante os ensaios para levantamento dos valores registrados, tem incertezas conhecidas para torque, potência, rotação, temperatura e consumo. Veja a seguir um detalhamento de cada uma das incertezas para cada uma das características anteriormente descritas:

2.1. Incerteza da medida de momento de força (torque):

Para a definição da incerteza do valor de torque medido durante ensaios, as fontes (de incerteza) consideradas foram: 1) repetitividade; 2) resolução banco; 3) herdada massa; 4) herdada braço; 5) histerese; e 6) aceleração da gravidade.

Foi definido incertezas para torques iguais a 0, 100, 200 e 300 Nm, ilustradas na tabela A2.1.

DELPHI

Automotive Systems

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Característica Controlada: Torque		Equipamento Utilizado: Massa 10 e 5 kg + Braço		Termopar TCP: NA	
Canal: West Side		TCP: 679 Laboratório: EDL2		Frequência: Anual	

Informações referente a Verificação

VERIFICAÇÃO													Repetitivi dade	TEND.	TEND.
Faixa de Medição	Leituras						Médias			Média	DPM				
	Avanço 1	Retorno 1	Avanço 2	Retorno 2	Avanço 3	Retorno 3	Média no Avanço	Média no Retor	Histerese						
0 g	0.10	0.00	0.10	0.10	0.00	0.10	0.07	0.07	0.00	0.07	0.052	0.0211	0.07		
10000 g	100.00	100.00	100.00	100.10	100.10	100.10	100.03	100.07	0.03	100.05	0.055	0.0224	100.05	100.0500	
20000 g	200.00	200.10	200.00	200.10	200.10	200.10	200.03	200.10	0.07	200.07	0.052	0.0211	200.07	100.0333	
30000 g	300.00	300.00	300.00	300.00	300.10	300.10	300.03	300.03	0.00	300.03	0.052	0.0211	300.03	100.0111	
Somatoria															

Cálculo de Incerteza: 0 Nm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza Relativa	GL
Repetitividade	0.0211	A	N	1	0.07	0.3162	5
Resolução Banco	0.10	B	Retangular	3.4641	0.07	0.4330	
Herdada Massa	0.00	B	N	2	0.00	0.0000	
Herdada Braço	0.007	B	N	2.2	509.85	0.000006	
Histerese	0.00	B	Retangular	3.4641	0.07	0.0000	
Aceleração da Gravidade	0.04	B	Retangular	3.4641	9.77	0.0012	
Incerteza Combinada - Uc						0.04	
Grau de liberdade efetivo						41.33	
Fator de abrangência						2.02	
Incerteza Expandida - Ue						0.0722	

Cálculo de Incerteza: 100 Nm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza Relativa	GL
Repetitividade (Nm)	0.0224	A	N	1	100.05	0.0002	5
Resolução Banco (Nm)	0.10	B	Retangular	3.4641	100.05	0.0003	infinito
Herdada Massa	0.1949	B	N	2	10000	0.00001	infinito
Herdada Braço (mm)	0.007	B	N	2.2	509.85	0.000006	infinito
Histerese (Nm)	0.03	B	Retangular	3.4641	100.05	0.0001	infinito
Aceleração da Gravidade	0.04	B	Retangular	3.4641	9.77	0.0012	
Incerteza Combinada - Uc						0.12	Nm
Grau de liberdade efetivo						4749.20	
Fator de abrangência						1.96	
Incerteza Expandida - Ue						0.2434	Nm

Cálculo de Incerteza: 200 Nm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza Relativa	GL
Repetitividade (Nm)	0.0211	A	N	1	200.07	0.0001	5
Resolução Banco (Nm)	0.10	B	Retangular	3.4641	200.07	0.0001	infinito
Herdada Massa	0.1949	B	N	2	20000	0.000005	infinito
Herdada Braço (mm)	0.007	B	N	2.2	509.85	0.000006	infinito
Histerese (Nm)	0.07	B	Retangular	3.4641	200.07	0.000096	infinito
Aceleração da Gravidade	0.04	B	Retangular	3.4641	9.77	0.0012	
Incerteza Combinada - Uc						0.24	Nm
Grau de liberdade efetivo						83869.71	
Fator de abrangência						1.96	
Incerteza Expandida - Ue						0.4702	Nm

Cálculo de Incerteza: 300 Nm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza Relativa	GL
Repetitividade (Nm)	0.0211	A	N	1	300.03	0.0001	5
Resolução Banco (Nm)	0.10	B	Retangular	3.4641	300.03	0.0001	infinito
Herdada Massa	0.1949	B	N	2	30000	0.000003	infinito
Herdada Braço (mm)	0.007	B	N	2.2	509.85	0.000006	infinito
Histerese (Nm)	0.00	B	Retangular	3.4641	300.03	0.000000	infinito
Aceleração da Gravidade	0.04	B	Retangular	3.4641	9.77	0.0012	
Incerteza Combinada - Uc						0.36	Nm
Grau de liberdade efetivo						408436.51	
Fator de abrangência						1.96	
Incerteza Expandida - Ue						0.6985	Nm

Tabela A2.1: Planilha de cálculo de incerteza de medida de torque

2.2. Incerteza da medida de potência:

Para a definição da incerteza do valor de potência medido durante ensaios, as fontes (de incerteza) consideradas foram: 1) potência líquida efetiva; 2) retabilidade; 3) resolução; 4) torque; 5) rotação; 6) incerteza torque; e 7) incerteza rotação.

Foi definido incerteza para potências iguais a 75 e 100 kW, ilustrada na tabela A2.2.

<div>DELPHI</div> <div>Automotive Systems</div>		PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIDA					
Característica Controlada: Potencia Corrigida		Equipamento Utilizado: Celula de carga East - TCP 0679		Termopar TCP:	NA		
Canal: NA		TCP: NA		Laboratório:	EDL2		
				Frequência:	Anual		
Informações referente a Calibração							
CALIBRAÇÃO							
Faixa de Medição	Leituras			Media	Desvio Padrão	TEND.	TEND. (%)
	L1 - Automação	L2 - Automação	L3 - Automação				
74,0000	74,2000	74,4000	74,1000	74,2333	0,1528	74,2333	100,3153
Fontes de Incerteza							
Potencia Liquida efetiva kW	74,2333	Tipo	Distribuição				
Retibilidade kW	0,0882	A	Normal				
Resolução kW	0,1000	B	Retangular	0,0577			
Torque Corrigido Nm	131,1000						
Rotação rpm	5400						
Incerteza Torque Corrigido	1,1800						
Incerteza Rotação rpm	1,3400						
Incerteza Potência A	0,6684	kW					
Incerteza Potência B	0,1054						
Incerteza Potência Total	0,6767	kW					
Incerteza Expandida - U _e	1,3533	kW					
CALIBRAÇÃO							
Faixa de Medição	Leituras			Media	Desvio Padrão	TEND.	TEND. (%)
	L1 - Automação	L2 - Automação	L3 - Automação				
100,0000	100,1000	100,0000	100,1000	100,0667	0,0577	100,0667	100,0667
Fontes de Incerteza							
Potencia Liquida efetiva kW	100,0667	Tipo	Distribuição				
Retibilidade kW	0,0333	A	Normal				
Resolução kW	0,1000	B	Retangular	0,0577			
Torque Nm	100,0000						
Rotação rpm	6500						
Incerteza Torque Nm	0,4702						
Incerteza Rotação rpm	0,6864						
Incerteza Potência A	0,4706	kW					
Incerteza Potência B	0,0667						
Incerteza Potência Total	0,4753	kW					
Incerteza Expandida - U _e	0,9507	kW					

Tabela A2.2: Planilha de cálculo de incerteza de medida de potência

2.3. Incerteza da medida de rotação:

Para a definição da incerteza do valor de rotação medido durante ensaios, as fontes (de incerteza) consideradas foram: 1) repetitividade; 2) resolução tacômetro; 3) resolução da automação; e 4) herdada tacômetro.

Foi definido incerteza para rotações iguais à 1400, 2800, 4200, 5600 e 6500 RPMs, ilustrada na tabela A2.3.

DELPHI Automotive Systems	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIDA		
-------------------------------------	---	--	--

Característica Controlada: Rotação	Equipamento Utilizado: Tacômetro TCP 0471	Termopar TCP: NA
Canal: NA	TCP: 0326	Laboratório: EDL2
	Frequência: Anual	

Informações referente a Calibração

CALIBRAÇÃO													TEND.	TEND.
Faixa de Medição (rpm)	Leituras						Leituras Diferença			Média	Desvio Padrão			
	L1 - Automação	L1 - Tacometro	L2 - Automação	L2 - Tocometro	L3 - Automação	L3 - Tacometro	L1	L2	L3					
1400	1400.00	1400.00	1401.00	1400.00	1401.00	1400.00	0.0000	-1.0000	-1.0000	-0.6667	0.5774	-0.6667		
2800	2800.00	2800.00	2800.00	2801.00	2800.00	2800.00	0.0000	1.0000	0.0000	0.3333	0.5774	0.3333	0.0	
4200	4200.00	4200.00	4200.00	4201.00	4202.00	4201.00	0.0000	1.0000	-1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0	
5600	5600.00	5600.00	5600.00	5602.00	5601.00	5601.00	0.0000	2.0000	0.0000	0.6667	1.1547	0.6667	0.0	
6500	6500.00	6500.00	6499.00	6499.00	6500.00	6501.00	0.0000	0.0000	1.0000	0.3333	0.5774	0.3333	0.0	

Cálculo de Incerteza: 1400 rpm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (rpm)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,3333	A	N	1,0000	0,3333	
Resolução Tacômetro	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Tacômetro	0,0010	B	N	2,0000	0,0005	
Incerteza Combinada - U _c					0,3432	
Incerteza Expandida - U _e					0,6864	

Cálculo de Incerteza: 2800 rpm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (rpm)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,3333	A	N	1,0000	0,3333	
Resolução Tacômetro	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Tacômetro	0,0010	B	N	2,0000	0,0005	
Incerteza Combinada - U _c					0,3432	0,0123
Incerteza Expandida - U _e					0,6864	0,0245

Cálculo de Incerteza: 4200 rpm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (rpm)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,5774	A	N	1,0000	0,5774	
Resolução Tacômetro	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Tacômetro	0,0010	B	N	2,0000	0,0005	
Incerteza Combinada - U _c					0,5831	0,0139
Incerteza Expandida - U _e					1,1662	0,0278

Cálculo de Incerteza: 5600 rpm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (rpm)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,6667	A	N	1,0000	0,6667	
Resolução Tacômetro	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Tacômetro	0,0010	B	N	2,0000	0,0005	
Incerteza Combinada - U _c					0,6716	0,0120
Incerteza Expandida - U _e					1,3433	0,0240

Cálculo de Incerteza: 6500 rpm

Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (rpm)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,3333	A	N	1,0000	0,3333	
Resolução Tacômetro	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Tacômetro	0,0010	B	N	2,0000	0,0005	
Incerteza Combinada - U _c					0,3432	0,0061
Incerteza Expandida - U _e					0,6864	0,0123

Tabela A2.3: Planilha de cálculo de incerteza de medida de rotação

2.4. Incerteza da medida de temperatura:

Como descrito no anexo 1 tabela A1.1 item 9, o sistema de automação do dinamômetro de motores da Delphi utilizado para realização dos ensaios conta com 32 canais para medição de temperatura.

Os seis primeiros canais dos 32 acima informados são utilizados para medição de temperatura: 1) do ar admitido pelo motor antes do filtro de ar; 2) da água do sistema de arrefecimento na região da válvula termostática; 3) do óleo do

sistema de lubrificação no Carter; 4) do combustível na entrada do tubo distribuidor; 5) do conversor catalítico; e 6) do escapamento (total). Para estas seis temperaturas indicadas anteriormente a incerteza dos valores medidos durante ensaios, considera as seguintes fontes: 1) repetitividade; 2) resolução do cappa 10; 3) resolução da automação; 4) herdada cappa 10; e 5) herdada termopar tipo K.

Para estes seis termopares foi definido incerteza para temperaturas iguais à 0, 50, 100, 150 e 200 °C, ilustrada na tabela A2.4.

Os demais termopares utilizados durante os ensaios não foram calibrados e suas incertezas não foram calculadas. Supõe-se que devido ao tipo de termopar utilizado, posição onde estes foram montados e por consequência onde as temperaturas foram medidas e ao fato de não conhecer suas incertezas os valores indicados por estes termopares apresentam incertezas muito maiores do que a indicada na tabela A2.4.

DELPHI Automotive Systems	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIDA
-------------------------------------	---

Característica Controlada: Temperatura da entrada d'água	Equipamento Utilizado: Cappel 10 - TCP 0404	Termopar TCP: NA
Canal: 1	TCP: 881 Laboratório: EDL2	Frequência: Anual

Informações referente a Calibração

Faixa de Medição (°C)	Leituras						Leituras Diferença			Média	Desvio Padrão	TEND.	TEND. (%)
	L1 - Cappel	L1 - Automação	L2 - Cappel	L2 - Automação	L3 - Cappel	L3 - Automação	L1	L2	L3				
0,00	0,00	0,1	0,00	0,10	0,00	0,10	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,0000	0,1000	
50,00	50,00	50,1	50,00	50,20	50,00	50,10	0,1000	0,2000	0,1000	0,1333	0,0577	0,1333	0,2667
100,00	100,00	100,1	100,00	100,30	100,00	100,20	0,1000	0,3000	0,2000	0,2000	0,1000	0,2000	0,2000
150,00	150,00	150,2	150,00	150,30	150,00	150,30	0,2000	0,3000	0,3000	0,2667	0,0577	0,2667	0,1778
200,00	200,00	200,1	200,00	200,30	200,00	200,40	0,1000	0,3000	0,4000	0,2667	0,1528	0,2667	0,1333

Cálculo de Incerteza: 0 °C						
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (°C)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,0000	A	N	1,0000	0,0000	
Resolução do Cappel 10	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Cappel 10	0,1000	B	N	2,0000	0,0500	
Herdada Termopar Tipo K	0,3000	B	N	2,0000	0,1500	
Incerteza Combinada - U _c					0,18	
Incerteza Expandida - U _e					0,36	

Cálculo de Incerteza: 50 °C						
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (°C)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,0333	A	N	1,0000	0,0333	
Resolução do Cappel 10	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Cappel 10	0,1000	B	N	2,0000	0,0500	
Herdada Termopar Tipo K	0,3000	B	N	2,0000	0,1500	
Incerteza Combinada - U _c					0,18	0,3621
Incerteza Expandida - U _e					0,36	0,7242

Cálculo de Incerteza: 100 °C						
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (°C)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,0577	A	N	1,0000	0,0577	
Resolução do Cappel 10	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Cappel 10	0,1000	B	N	2,0000	0,0500	
Herdada Termopar Tipo K	0,3000	B	N	2,0000	0,1500	
Incerteza Combinada - U _c					0,19	0,1871
Incerteza Expandida - U _e					0,37	0,3742

Cálculo de Incerteza: 150 °C						
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (°C)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,0333	A	N	1,0000	0,0333	
Resolução do Cappel 10	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Cappel 10	0,1000	B	N	2,0000	0,0500	
Herdada Termopar Tipo K	0,3000	B	N	2,0000	0,1500	
Incerteza Combinada - U _c					0,18	0,1207
Incerteza Expandida - U _e					0,36	0,2414

Cálculo de Incerteza: 200 °C						
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (°C)	Incerteza (%)
Repetitividade	0,0882	A	N	1,0000	0,0882	
Resolução do Cappel 10	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Resolução da Automação	0,1000	B	Retangular	1,7321	0,0577	
Herdada Cappel 10	0,1000	B	N	2,0000	0,0500	
Herdada Termopar Tipo K	0,3000	B	N	2,0000	0,1500	
Incerteza Combinada - U _c					0,20	0,1324
Incerteza Expandida - U _e					0,40	0,2648

Tabela A2.4: Planilha de cálculo de incerteza de medida de temperatura

Note no exemplo acima ilustrado pela tabela A2.4 que para o cálculo da incerteza da temperatura, o termopar é considerado como fonte de incerteza. Seu valor de incerteza é obtido durante calibração do termopar por órgão certificado pelo INMETRO. A figura A2.1 ilustra um certificado de calibração de um termopar. Estas calibrações são feitas para os termopares que serão utilizados em uma das seis

funções acima descritas. Para as demais leituras de temperatura não foi utilizado termopar calibrado.

CONSISTEC
Controles e Sistemas de Automação Ltda.

LABORATÓRIO DE TERMOMETRIA DA CONSISTEC
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre/Inmetro sob o nº 128
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Número: CR-1052/07 Rev - 00

Nome do Contratante: DELPHI AUTOMOTIVE SYSTEMS DO BRASIL LTDA - CENTRO TECNOLÓGICO
Endereço: Anel Viário Municipal, s/nº 195 - Piracicaba - SP
Nome do Solicitante: O mesmo
Pedido Número: DEP 25012

IDENTIFICAÇÕES E CARACTERÍSTICAS DO INSTRUMENTO
Tipo: TERMOPAR TIPO "K"
Modelo: Termopar mineral simples, com bainha metálica, Classe Especial
Fabricante: Consistec
Escala: N/A
Valor de uma divisão: N/A
Tipo de isolamento: mineral
Diâmetro da haste: 3,0 mm
Comprimento da haste: 200 mm
Número de Série: N/C
Norma de Referência: NBR-12771
Identificação: PEÇA N.º 01
Condições de Calibração: Calibração por comparação.
Observações: N/C

INFORMAÇÕES ADMINISTRATIVAS
Número da OSC: 0318/07
Data da Calibração: 26 DE FEVEREIRO DE 2007
Data da Emissão: 26 DE FEVEREIRO DE 2007

PROCEDIMENTO/MÉTODO DE CALIBRAÇÃO
A calibração foi feita por comparação contra sensor padrão de temperatura, em meio termoponto homogêneo, segundo Instrução de Trabalho ITL 001 REV/09

CONDIÇÕES AMBIENTAIS:
Temperatura: (23 ± 3) °C
Umidade Relativa: (50 ± 20) %

APPROVADO PARA UTILIZAÇÃO
Data: 02/03/07
Nome: Marcia Barch
Assinatura: [Assinatura]

CELSON LOPES JUNIOR
Assistente Técnico

Este certificado atende aos requisitos de acreditação do INMETRO e atesta a competência do laboratório e conformidade das medições e padrões nacionais de medida.
Os resultados aqui apresentados foram obtidos sob condições controladas e calibração, nos padrões especificados, sob condições controladas e calibração.
Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral. Reprodução parcial constitui violação das leis de propriedade intelectual.

(Fig. 1/2)

Consistec Controles e Sistemas de Automação Ltda.
R. Junipari, 434 - Jabaquara - 04348-070 - São Paulo - SP - Fone: (11) 5031-6200 - Fax: 5031-6262
www.consistec.com.br - consistec@consistec.com.br

CONSISTEC
Controles e Sistemas de Automação Ltda.

LABORATÓRIO DE TERMOMETRIA DA CONSISTEC
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre/Inmetro sob o nº 128
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO
Número: CR-1052/07 Rev - 00

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Temperatura VVC (°C)	Força Eletromotriz MLR (mV)	Temperatura Medida (°C)	Desvio (°C)	Incerteza de Medição (°C)	Padrão Utilizado	Profund. de Inserção (mm)
9,9	0,3937	9,9	0,0	± 0,3	03.114-0	100
49,7	2,0189	49,9	0,2	± 0,3	03.114-0	100
200,1	8,1176	199,5	-0,6	± 0,3	03.114-0	100

NOTAS:
- VVC - Valor Verdadeiro Convencional
- MLR - Média das Leituras Realizadas
- As temperaturas estão referidas à Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90)
- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada pelo fator de abrangência k=2, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

IDENTIFICAÇÃO E RASTREABILIDADE DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Identificação	Instrumento	Modelo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
03.039-0	Termômetro Digital	1522	CL-0031/05	Set-2007	INMETRO
03.114-0	Termômetro de Resistência	5627	CL-0034/06	Nov-2007	INMETRO
03.116-0	Multímetro Digital Keithley	182	1255/06	Jan-2008	INMETRO

Assinatura: [Assinatura]

Este certificado atende aos requisitos de acreditação do INMETRO e atesta a competência do laboratório e conformidade das medições e padrões nacionais de medida.
Os resultados aqui apresentados foram obtidos sob condições controladas e calibração, nos padrões especificados, sob condições controladas e calibração.
Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido em sua forma integral. Reprodução parcial constitui violação das leis de propriedade intelectual.

(Fig. 2/2)

Consistec Controles e Sistemas de Automação Ltda.
R. Junipari, 434 - Jabaquara - 04348-070 - São Paulo - SP - Fone: (11) 5031-6200 - Fax: 5031-6262
www.consistec.com.br - consistec@consistec.com.br

Figura A2.1: Certificado de calibração termopar

2.5. Incerteza da medida de consumo:

Para a definição da incerteza do valor de consumo medido durante ensaios, as fontes (de incerteza) consideradas foram: 1) repetitividade; 2) resolução do cronômetro; 3) resolução da balança; 4) herdada cronômetro; e 5) herdada massa.

Foi definido incerteza para vazões iguais à 0.40, 1.00, 2.50, 5.50, 8.80 e 10.90 g/s, ilustrada na tabela A2.5.

DELPHI
Automotive Systems

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIDA

Característica Controlada: Consumo de Combustível (g/s)	Equipamento Utilizado:	Termopar TCP: NA
Canal: NA	TCP: 320	Laboratório: EDL2
		Frequência: Anual

Informações referente a Calibração

Faixa de Medição (rpm)	Leituras						Leituras Diferença			Média	Desvio Padrão	TEND.	TEND. (%)
	L1 - Automação	L1 - Artefato	L2 - Automação	L2 - Artefato	L3 - Automação	L3 - Artefato	L1	L2	L3				
0,40	0,38	0,39	0,34	0,34	0,37	0,37	-0,0060	-0,0017	0,0000	-0,0026	0,0031	0,3646	0,0960
1,00	1,02	1,03	0,92	0,92	0,90	0,90	-0,0050	0,0006	0,0028	-0,0005	0,0040	0,9469	0,0928
2,50	2,47	2,48	2,36	2,36	2,32	2,33	-0,0133	-0,0039	-0,0078	-0,0083	0,0047	2,3875	0,0967
5,50	5,41	5,46	5,39	5,44	5,41	5,46	-0,0456	-0,0517	-0,0511	-0,0494	0,0034	5,4281	0,1003
8,80	8,77	8,84	8,73	8,79	8,72	8,79	0,0661	0,0644	0,0689	0,0665	0,0022	8,7701	0,0993
10,90	10,87	10,98	10,88	10,99	10,84	10,95	-0,1078	-0,1061	-0,1072	-0,1070	0,0008	10,9169	0,1004

Cálculo de Incerteza: 0,40							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Grais de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0018	A	N	1,0000	0,40	0,0045	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0018	
Grau de liberdade efetivo						5,3566	
Fator de abrangência						2,5706	
Incerteza Expandida - U _e						0,0047	
Incerteza Expandida - U _e						1,2288	

[g/s] 0,017 kg/h

Cálculo de Incerteza: 1,00							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Grais de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0023	A	N	1,0000	1,00	0,0023	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0025	
Grau de liberdade efetivo						6,3790	
Fator de abrangência						2,4469	
Incerteza Expandida - U _e						0,0060	
Incerteza Expandida - U _e						0,5920	

[g/s] 0,022 kg/h

Cálculo de Incerteza: 2,50							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Grais de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0027	A	N	1,0000	2,50	0,0011	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0034	
Grau de liberdade efetivo						12,4986	
Fator de abrangência						2,1788	
Incerteza Expandida - U _e						0,0075	
Incerteza Expandida - U _e						0,3040	

[g/s] 0,027 kg/h

Tabela A2.5: Planilha de cálculo de incerteza de medida de consumo

DELPHI Automotive Systems	PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIDA
-------------------------------------	---

Característica Controlada: Consumo de Combustível [g/s]	Equipamento Utilizado:	Termopar TCP: NA
Canal: NA	TCP: 320 Laboratório: EDL2	Frequência: Anual

Informações referente a Calibração

CALIBRAÇÃO													
Faixa de Medição (rpm)	Leituras						Leituras Diferença			Média	Desvio Padrão	TEND.	TEND. (%)
	L1 - Automação	L1 - Artefato	L2 - Automação	L2 - Artefato	L3 - Automação	L3 - Artefato	L1	L2	L3				
0,40	0,38	0,39	0,34	0,34	0,37	0,37	-0,0060	-0,0017	0,0000	-0,0026	0,0031	0,3646	0,0960
1,00	1,02	1,03	0,92	0,92	0,90	0,90	-0,0050	0,0006	0,0028	-0,0005	0,0040	0,9469	0,0928
2,50	2,47	2,48	2,36	2,36	2,32	2,33	-0,0133	-0,0039	-0,0078	-0,0083	0,0047	2,3875	0,0967
5,50	5,41	5,46	5,39	5,44	5,41	5,46	-0,0456	-0,0517	-0,0511	-0,0494	0,0034	5,4281	0,1003
8,80	8,77	8,84	8,73	8,79	8,72	8,79	0,0661	0,0644	0,0689	0,0665	0,0022	8,7701	0,0993
10,90	10,87	10,98	10,88	10,99	10,84	10,95	-0,1078	-0,1061	-0,1072	-0,1070	0,0008	10,9169	0,1004

Cálculo de Incerteza: 5,50							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Graus de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0020	A	N	1,0000	5,50	0,0004	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0050	
Grau de liberdade efetivo						214,4199	
Fator de abrangência						1,9711	
Incerteza Expandida - Ue						0,0098	
Incerteza Expandida - Ue						0,1819	%

[g/s] 0,035 kg/h

Cálculo de Incerteza: 8,80							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Graus de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0013	A	N	1,0000	8,80	0,0001	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0075	
Grau de liberdade efetivo						5503,6556	
Fator de abrangência						1,9604	
Incerteza Expandida - Ue						0,0146	
Incerteza Expandida - Ue						0,1669	%

[g/s] 0,053 kg/h

Cálculo de Incerteza: 10,90							
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Valor da Unidade	Incerteza relativa	Graus de liberdade
Repetitividade (g/s)	0,0005	A	N	1,0000	10,90	0,0000	5
Resolução da Cronometro (s)	0,0100	B	Retangular	1,7321	10,00	0,0006	infinitos
Resolução da Balança (g)	0,0100	B	Retangular	1,7321	90,00	0,000064	infinitos
Herdada Cronometro (s)	0,0120	B	N	2,0000	10,00	0,0006	infinitos
Herdada massa (g)	0,0050	B	N	2,0000	90,00	0,0000	infinitos
Incerteza Combinada - Uc						0,0091	
Grau de liberdade efetivo						600550,597	
Fator de abrangência						1,9600	
Incerteza Expandida - Ue						0,0179	
Incerteza Expandida - Ue							%

[g/s] 0,064 kg/h

Tabela A2.5 (continuação): Planilha de cálculo de incerteza de medida de consumo

2.6. Incerteza da medida de pressão:

Para a definição da incerteza do valor de pressão medido durante ensaios, as fontes (de incerteza) consideradas foram: 1) repetitividade; 2) resolução do barômetro; 3) resolução da automação e 4) própria do barômetro.

Foi definido incerteza para pressões iguais à 95.2, 94.8, 94.3, 95.7 e 96.3 kPa, ilustrada na tabela A2.6.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Característica Controlada: Pressão Barométrica	Eq. Utilizado: Cappel P - TCP 0435 - Barômetro - TCP 0171	Termopar TC: NA
Canal: P14	TCP: 309 Laboratório: EDL2	Frequência: Anual

Informações referente a Calibração

CALIBRAÇÃO													
Faixa de Medição	Leituras						Leituras Diferença			Media	Desvio Padrão	TEND.	TEND. %
	L1 - Referência	L1 - Automação	L2 - Referência	L2 - Automação	L3 - Referência	L3 - Automação	L1	L2	L3				
105.1	105.1	105.1	105.1	105.2	105.1	105.3	0.0000	0.1000	0.2000	0.1000	0.1000	0.1000	
100.1	100.1	100.1	100.1	100.2	100.1	100.4	0.0000	0.1000	0.3000	0.1333	0.1528	0.1333	0.1332
95.1	95.1	95.1	95.1	95.1	95.1	95.3	0.0000	0.0000	0.2000	0.0667	0.1155	0.0667	0.0701
90.1	90.1	90.1	90.1	90.3	90.1	90.2	0.0000	0.2000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1110
85.1	85.1	85.1	85.1	85.2	85.1	85.1	0.0000	0.1000	0.0000	0.0333	0.0577	0.0333	0.0392
Cálculo de Incerteza: 95,2 kPa													
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (KPA)	Incerteza (%)							
Repetitividade	0.0577	A	N	1.0000	0.0577								
Resolução do Cappel P	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução do Barômetro	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução da Automação	0.1000	B	Retangular	1.7321	0.0577								
Herdada Barômetro	0.2100	B	Retangular	2.0000	0.1050								
Herdada Cappel P	0.2000	B	N	2.0000	0.1000								
Incerteza Combinada - U _c					0.18	0.1760							
Incerteza Expandida - U _e					0.35	0.3519							
Cálculo de Incerteza: 94,8 kPa													
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (KPA)	Incerteza (%)							
Repetitividade	0.0882	A	N	1.0000	0.0882								
Resolução do Cappel P	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução do Barômetro	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução da Automação	0.1000	B	Retangular	1.7321	0.0577								
Herdada Barômetro	0.2100	B	Retangular	2.0000	0.1050								
Herdada Cappel P	0.2000	B	N	2.0000	0.1000								
Incerteza Combinada - U _c					0.19	0.1881							
Incerteza Expandida - U _e					0.38	0.3763							
Cálculo de Incerteza: 94,3 kPa													
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (KPA)	Incerteza (%)							
Repetitividade	0.0667	A	N	1.0000	0.0667								
Resolução do Cappel P	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução do Barômetro	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução da Automação	0.1000	B	Retangular	1.7321	0.0577								
Herdada Barômetro	0.2100	B	Retangular	2.0000	0.1050								
Herdada Cappel P	0.2000	B	N	2.0000	0.1000								
Incerteza Combinada - U _c					0.18	0.1791							
Incerteza Expandida - U _e					0.36	0.3582							
Cálculo de Incerteza: 95,7 kPa													
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (KPA)	Incerteza (%)							
Repetitividade	0.0577	A	N	1.0000	0.0577								
Resolução do Cappel P	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução do Barômetro	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução da Automação	0.1000	B	Retangular	1.7321	0.0577								
Herdada Barômetro	0.2100	B	Retangular	2.0000	0.1050								
Herdada Cappel P	0.2000	B	N	2.0000	0.1000								
Incerteza Combinada - U _c					0.18	0.1760							
Incerteza Expandida - U _e					0.35	0.3519							
Cálculo de Incerteza: 96,3 kPa													
Fontes de Incerteza	Incerteza Padrão	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza (KPA)	Incerteza (%)							
Repetitividade	0.0333	A	N	1.0000	0.0333								
Resolução do Cappel P	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução do Barômetro	0.1000	B	Triangular	2.4495	0.0408								
Resolução da Automação	0.1000	B	Retangular	1.7321	0.0577								
Herdada Barômetro	0.2100	B	Retangular	2.0000	0.1050								
Herdada Cappel P	0.2000	B	N	2.0000	0.1000								
Incerteza Combinada - U _c					0.17	0.1695							
Incerteza Expandida - U _e					0.34	0.3391							

Tabela A2.6: Planilha de cálculo de incerteza de medida de pressão

ANEXO 3 – VALORES MEDIDOS E REGISTRADOS:

1 Ensaio 1:

Como descrito no capítulo 3 a nomenclatura ensaio 1 foi escolhida e utilizada para simplificar a descrição da configuração do motor utilizado durante esta primeira etapa do experimento. A configuração é descrita detalhadamente na tabela 5.3 como sendo:

Referência (*baseline*) – motor 1.8L com comando simples de válvula original de fábrica, conforme ilustrado na figura 3.2.

Os valores lidos e registrados durante este ensaio, para cada uma das diferentes posições da borboleta da válvula de aceleração, estão descritos nas tabelas abaixo.

1.1. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 100% de abertura:

1.1.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 1 (100%)	1200	135,4	17	67,2	280,76	14,79	0,95	13,9	9,5
ensaio 1 (100%)	1600	138,4	23,2	68,5	280,33	20,27	0,95	13,9	11,3
ensaio 1 (100%)	2000	140,6	29,5	69,3	275,8	25,12	0,94	13,7	13,1
ensaio 1 (100%)	2400	156,9	39,4	67,8	271,92	32,85	0,95	13,7	13,0
ensaio 1 (100%)	2800	165,8	48,6	66,5	272,21	40,54	0,95	13,7	17,0
ensaio 1 (100%)	3000	164,3	51,6	64,6	271,83	42,96	0,94	13,6	18,9
ensaio 1 (100%)	3200	157,5	52,8	63,7	282,44	44,15	0,92	13,6	19,3
ensaio 1 (100%)	3600	148,8	56,1	63,3	283,91	47,45	0,92	13,6	20,7
ensaio 1 (100%)	4000	146,9	61,5	63	293,18	51,77	0,90	13,1	19,7
ensaio 1 (100%)	4400	147,7	68,1	62,8	306,73	58,45	0,88	12,9	20,4
ensaio 1 (100%)	4800	142,4	71,6	62,5	311,18	63,26	0,89	12,7	21,6
ensaio 1 (100%)	5200	136,6	74,4	62,1	319,62	67,27	0,88	12,7	23,6
ensaio 1 (100%)	5400	131,9	74,6	62,1	324,93	67,97	0,87	12,6	25,2
ensaio 1 (100%)	5600	123,9	72,7	62,1	345,25	68,13	0,85	12,4	26,9
ensaio 1 (100%)	6001	112,1	70,4	61,9	366,2	69,17	0,84	12,2	27,7
ensaio 1 (100%)	6200	104,9	68,1	61,9	374,8	68,59	0,85	12,2	28,4

1.1.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 1 (100%)	1200	15,6	92,2	17,8	29,2	104,6	711,7	25,3
ensaio 1 (100%)	1600	15,6	92,4	17,7	28,2	106,7	794,5	25,3
ensaio 1 (100%)	2000	16,4	92,2	18,2	28,8	107,4	822,8	26,0
ensaio 1 (100%)	2400	16,6	92,4	18,3	28,2	110,5	864,6	26,0
ensaio 1 (100%)	2800	16,8	92,3	18,4	27,6	110,4	906,6	26,0
ensaio 1 (100%)	3000	17,1	92,1	18,5	27,8	113,5	907,9	25,3
ensaio 1 (100%)	3200	17,2	92,1	18,5	27,8	114,9	906,3	25,3
ensaio 1 (100%)	3600	17,2	92,3	18,5	27,7	115,9	907,3	25,3
ensaio 1 (100%)	4000	17,3	92,6	18,5	27,4	117	915,7	24,5
ensaio 1 (100%)	4400	17,4	92,3	18,5	26,9	116,6	920,8	24,5
ensaio 1 (100%)	4800	17,4	92,4	18,4	26,6	117,9	942,2	24,5
ensaio 1 (100%)	5200	17,6	91,2	18,6	26,4	124,8	957,1	25,3
ensaio 1 (100%)	5400	17,6	93,1	18,6	26,5	124,8	954,5	25,3
ensaio 1 (100%)	5600	17,7	90,4	18,6	26,5	124,4	947,5	26,0
ensaio 1 (100%)	6001	17,8	91	18,8	26,5	123,7	952,9	26,4
ensaio 1 (100%)	6200	17,9	94	18,9	26,5	123,5	953,4	27,3

1.1.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 1 (100%)	1200	95,378	3,35	377,7	359,2	94,0
ensaio 1 (100%)	1600	95,382	6,59	382,3	358,3	93,5
ensaio 1 (100%)	2000	95,388	8,47	394,7	357,1	93,0
ensaio 1 (100%)	2400	95,388	14,39	407,2	356,1	93,2
ensaio 1 (100%)	2800	95,385	20,82	403	354,3	92,9
ensaio 1 (100%)	3000	95,38	22,99	408,3	354,2	92,2
ensaio 1 (100%)	3200	95,378	24,21	411,5	353,6	91,9
ensaio 1 (100%)	3600	95,377	26,8	425,3	352,8	91,5
ensaio 1 (100%)	4000	95,376	32,3	437,9	351,6	91,5
ensaio 1 (100%)	4400	95,377	39,48	453,9	350,1	91,5
ensaio 1 (100%)	4800	95,376	45,23	464,7	349	91,4
ensaio 1 (100%)	5200	95,374	50,64	456,3	348,1	91,2
ensaio 1 (100%)	5400	95,374	51,94	456,3	348	91,1
ensaio 1 (100%)	5600	95,372	52,73	457,1	347,9	91,1
ensaio 1 (100%)	6001	95,371	54,56	464,1	347,4	91,4
ensaio 1 (100%)	6200	95,37	54	465	347,7	91,4

1.1.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 1 (100%)	1200	12,3	1,8	1423	0,7	416,6
ensaio 1 (100%)	1600	12,3	1,8	1390,8	0,8	393,7
ensaio 1 (100%)	2000	12,4	2,1	1403,3	0,4	433,5
ensaio 1 (100%)	2400	12,6	2	1730,5	0,4	450,2
ensaio 1 (100%)	2800	12,7	1,9	1949,8	0,5	475,8
ensaio 1 (100%)	3000	12,5	2,1	1875,7	0,5	462,2
ensaio 1 (100%)	3200	12	3	1423	0,3	505,6
ensaio 1 (100%)	3600	12,1	2,8	1462,1	0,2	438,4
ensaio 1 (100%)	4000	11,7	3,4	1249,2	0,2	437,1
ensaio 1 (100%)	4400	11,2	4,3	1033	0,2	428,1
ensaio 1 (100%)	4800	11,4	4	1177,9	0,2	438,5
ensaio 1 (100%)	5200	11,3	4,1	1174,8	0,2	411,5
ensaio 1 (100%)	5400	11,2	4,3	1151,6	0,2	407,2
ensaio 1 (100%)	5600	10,5	5,2	841,4	0,2	576,2
ensaio 1 (100%)	6001	10,3	5,6	736,1	0,3	435,3
ensaio 1 (100%)	6200	10,4	5,5	804,7	0,2	426,9

1.2. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 75% de abertura:

1.2.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido(N m)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 1 (75%)	1200	131.7	16.5	64.4	270.02	14.4	1.01	14.6	9.5
ensaio 1 (75%)	1600	137.2	23	67.1	263.54	19.4	1.01	14.6	11.6
ensaio 1 (75%)	2000	141.1	29.6	66.8	259.72	24.6	1.01	14.6	14.4
ensaio 1 (75%)	2400	151.1	38	66.4	262.7	31.8	1.01	14.6	13.4
ensaio 1 (75%)	2800	161.4	47.3	66	258.36	39.1	1.01	14.6	17.9
ensaio 1 (75%)	3000	159.8	50.2	65.3	258.24	41.6	1.01	14.6	19.3
ensaio 1 (75%)	3200	155.5	52.1	64.3	263.65	43.5	0.99	14.4	19.5
ensaio 1 (75%)	3600	149.3	56.3	63.6	270.92	47.1	0.97	14.2	20.6
ensaio 1 (75%)	4000	147.3	61.8	62.9	291.7	51.6	0.91	13.3	19.5
ensaio 1 (75%)	4400	144.9	66.7	62.5	311.46	57.6	0.89	13.0	20.4
ensaio 1 (75%)	4800	142.2	71.5	62	313.53	62.2	0.89	12.8	21.5
ensaio 1 (75%)	5200	136.3	74.3	61.4	319.06	65.4	0.88	12.7	23.4
ensaio 1 (75%)	5400	131.4	74.3	60.9	322.48	66.2	0.87	12.6	25.2
ensaio 1 (75%)	5600	123.8	72.7	60.6	342.46	66.4	0.86	12.6	26.7
ensaio 1 (75%)	6001	111.9	70.4	60.3	367.2	67.8	0.85	12.2	28.0
ensaio 1 (75%)	6200	104.6	67.9	60.1	375.82	67.4	0.85	12.3	28.9

1.2.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação(r pm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 1 (75%)	1200	17.7	92.2	19.7	32	103.9	753.4	28.3
ensaio 1 (75%)	1600	16.9	92.2	18.5	28.4	108.3	821.3	26.8
ensaio 1 (75%)	2000	17.1	92.4	18.6	28.4	107.1	841.6	26.8
ensaio 1 (75%)	2400	17.4	92.1	18.7	27.2	110.9	895.7	26.8
ensaio 1 (75%)	2800	17.5	92.5	18.9	26.9	111.9	917.2	26.8
ensaio 1 (75%)	3000	17.7	92.3	18.9	26.9	111.8	930.2	26.0
ensaio 1 (75%)	3200	18	92.2	19.1	27.2	116.2	939.7	26.0
ensaio 1 (75%)	3600	18.2	92.1	19.1	27.5	116.7	936.3	26.0
ensaio 1 (75%)	4000	18.4	92.2	19.2	27.2	116.7	927.8	26.0
ensaio 1 (75%)	4400	18.5	92.3	19.1	26.9	117.9	938.4	26.0
ensaio 1 (75%)	4800	18.7	92.4	19.2	26.6	122.3	943.8	26.0
ensaio 1 (75%)	5200	18.8	92.3	19.2	26.4	122.5	950.3	26.8
ensaio 1 (75%)	5400	19	92.1	19.3	26.4	124.8	947.7	26.8
ensaio 1 (75%)	5600	19.1	92.2	19.4	26.4	124.7	942.3	26.8
ensaio 1 (75%)	6001	19.1	92.2	19.3	26.5	124.4	947.2	27.5
ensaio 1 (75%)	6200	19.2	92.1	19.3	26.6	126	946.9	28.3

1.2.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 1 (75%)	1200	94,727	3,23	377,4	357,3	93,0
ensaio 1 (75%)	1600	94,713	6,31	379,4	356,8	92,0
ensaio 1 (75%)	2000	94,711	9,21	393,9	356,2	90,5
ensaio 1 (75%)	2400	94,711	14,32	404,3	355,8	92,0
ensaio 1 (75%)	2800	94,709	20	402,1	355	91,6
ensaio 1 (75%)	3000	94,71	22,41	406,5	354,9	91,1
ensaio 1 (75%)	3200	94,707	24,37	407,4	354,7	91,0
ensaio 1 (75%)	3600	94,705	27,82	419,8	354,1	90,5
ensaio 1 (75%)	4000	94,703	33,3	432	353	90,5
ensaio 1 (75%)	4400	94,705	40,27	440,6	352,5	90,5
ensaio 1 (75%)	4800	94,704	45,82	442,9	352	90,1
ensaio 1 (75%)	5200	94,703	50,4	436,1	351,8	89,9
ensaio 1 (75%)	5400	94,701	51,93	434,2	351,5	89,8
ensaio 1 (75%)	5600	94,701	52,61	439,4	351,6	89,9
ensaio 1 (75%)	6001	94,7	54,53	446	351,2	90,0
ensaio 1 (75%)	6200	94,698	54,1	439,2	351,6	90,1

1.2.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 1 (75%)	1200	12.9	0.4	2289.5	1.6	360.6
ensaio 1 (75%)	1600	12.7	0.6	2041.5	0.9	335.9
ensaio 1 (75%)	2000	13	0.5	2361.1	0.8	325.7
ensaio 1 (75%)	2400	13.2	0.5	2481.4	0.4	331.1
ensaio 1 (75%)	2800	13.1	0.5	2794.2	0.5	338.5
ensaio 1 (75%)	3000	13.1	0.6	2769.8	0.5	311
ensaio 1 (75%)	3200	13.1	0.8	2460.3	0.5	334.6
ensaio 1 (75%)	3600	12.9	1.3	2128.4	0.4	357.1
ensaio 1 (75%)	4000	11.8	3	1304.6	0.3	416.9
ensaio 1 (75%)	4400	11	4.2	887.4	0.2	422.2
ensaio 1 (75%)	4800	11.1	4	1050.5	0.2	423.5
ensaio 1 (75%)	5200	11.2	4	1149.2	0.2	411.3
ensaio 1 (75%)	5400	10.8	4.6	972.3	0.1	420.3
ensaio 1 (75%)	5600	9.9	5.4	781	0.2	650.1
ensaio 1 (75%)	6001	10.2	5.5	739.5	0.2	438.6
ensaio 1 (75%)	6200	10.3	5.4	818.8	0.1	442.5

1.3. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 50% de abertura:

1.3.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido(N m)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 1 (50%)	1200	129.8	16.3	66.5	272.86	14.9	1.01	14.6	9.8
ensaio 1 (50%)	1600	132.5	22.2	66.6	271.24	20.0	1.01	14.6	12.2
ensaio 1 (50%)	2000	130.5	27.4	66.4	266.58	24.2	1.01	14.6	15.1
ensaio 1 (50%)	2400	142.8	35.9	65.9	267.36	31.5	1.01	14.6	13.7
ensaio 1 (50%)	2800	148.9	43.6	65.7	262.7	37.5	1.01	14.6	18.6
ensaio 1 (50%)	3000	147.6	46.4	65.3	261.7	39.6	1.01	14.6	19.9
ensaio 1 (50%)	3200	145	48.6	65.2	264.7	42.0	1.00	14.6	20.6
ensaio 1 (50%)	3600	138.9	52.4	64.7	270.11	46.3	1.01	14.4	21.3
ensaio 1 (50%)	4000	139.3	58.4	63.8	282.99	51.1	0.96	13.6	19.8
ensaio 1 (50%)	4400	138.2	63.7	63.4	290.74	56.5	0.94	13.4	20.7
ensaio 1 (50%)	4800	132.9	66.9	63	311.44	60.5	0.90	12.9	21.8
ensaio 1 (50%)	5200	126.4	68.9	62.3	319.57	63.3	0.89	12.8	24.4
ensaio 1 (50%)	5400	122.3	69.2	62.2	322.65	64.3	0.89	12.7	26.3
ensaio 1 (50%)	5600	115	67.5	61.8	343.95	64.6	0.87	12.6	28.2
ensaio 1 (50%)	6001	103.3	64.9	61.4	363.48	65.2	0.86	12.4	29.4
ensaio 1 (50%)	6200	95.9	62.3	61.2	379.38	64.5	0.86	12.4	30.3

1.3.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 1 (50%)	1200	17,5	92,1	19,4	33,3	92,8	747,5	28,3
ensaio 1 (50%)	1600	17,4	92,3	19,2	32,3	92,4	804,8	27,5
ensaio 1 (50%)	2000	17,4	92,5	19	31,5	92,4	830,5	26,8
ensaio 1 (50%)	2400	17,4	92,5	19	30	96,9	895,7	26,0
ensaio 1 (50%)	2800	17,5	92,2	18,9	29,4	103,4	913,5	26,0
ensaio 1 (50%)	3000	17,6	92,6	18,9	29,2	106,9	919,8	26,0
ensaio 1 (50%)	3200	17,7	92,6	18,9	29,2	109,2	929,8	26,0
ensaio 1 (50%)	3600	17,8	92,2	18,9	29	111,8	953,3	25,6
ensaio 1 (50%)	4000	18	92,2	19,1	29	116,2	952,2	25,9
ensaio 1 (50%)	4400	18,2	92,3	19,2	28,4	118,6	954,7	26,0
ensaio 1 (50%)	4800	18,4	92,3	19,3	28,1	119,2	945,8	26,0
ensaio 1 (50%)	5200	18,6	92,4	19,3	27,7	121,2	955,5	26,2
ensaio 1 (50%)	5400	18,6	92	19,4	27,7	121,4	958,6	26,8
ensaio 1 (50%)	5600	18,7	92,1	19,5	27,7	121,6	947,8	26,8
ensaio 1 (50%)	6001	18,8	92,3	19,5	27,7	122,5	951,1	27,5
ensaio 1 (50%)	6200	18,8	92,2	19,4	27,7	123,5	949,8	28,1

1.3.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 1 (50%)	1200	95,326	3,03	371,7	358,6	91,0
ensaio 1 (50%)	1600	95,326	5,92	392,7	357,6	88,9
ensaio 1 (50%)	2000	95,326	7,69	406,2	357,2	86,3
ensaio 1 (50%)	2400	95,328	12,72	405,6	355,9	90,9
ensaio 1 (50%)	2800	95,328	17,45	406,3	354,8	90,5
ensaio 1 (50%)	3000	95,327	19,4	407,9	354,5	90,0
ensaio 1 (50%)	3200	95,328	21,44	414,7	353,7	89,5
ensaio 1 (50%)	3600	95,327	25,64	429,8	353,1	88,9
ensaio 1 (50%)	4000	95,327	30,88	433,8	352,3	88,0
ensaio 1 (50%)	4400	95,326	36,46	449,8	351,6	87,1
ensaio 1 (50%)	4800	95,323	41,34	464	349,9	86,3
ensaio 1 (50%)	5200	95,322	45,39	456,6	349,2	85,7
ensaio 1 (50%)	5400	95,321	46,6	453,1	348,4	85,5
ensaio 1 (50%)	5600	95,318	47,2	454,8	348,2	85,5
ensaio 1 (50%)	6001	95,318	48,23	459,3	348,1	85,4
ensaio 1 (50%)	6200	95,316	47,97	456,4	347,3	85,6

1.3.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 1 (50%)	1200	13	0,4	2401,8	1,5	278,4
ensaio 1 (50%)	1600	12,8	0,5	2228	1,2	260,2
ensaio 1 (50%)	2000	13,1	0,5	2326,6	1	279,4
ensaio 1 (50%)	2400	13,3	0,5	2400,4	0,6	264,9
ensaio 1 (50%)	2800	13,2	0,6	2647,5	0,6	260,7
ensaio 1 (50%)	3000	13,2	0,6	2701,2	0,6	262,6
ensaio 1 (50%)	3200	13,2	0,6	2602,1	0,6	261,4
ensaio 1 (50%)	3600	13,3	0,6	2580,6	0,6	215,1
ensaio 1 (50%)	4000	12,9	1,5	2122,3	0,3	314,6
ensaio 1 (50%)	4400	12,5	2,2	1938,2	0,2	350,2
ensaio 1 (50%)	4800	11,6	3,6	1339,6	0,2	417,1
ensaio 1 (50%)	5200	11,5	3,7	1347,6	0,2	395
ensaio 1 (50%)	5400	11,5	3,7	1364,5	0,2	395,3
ensaio 1 (50%)	5600	10,9	4,5	1143,7	0,4	569,3
ensaio 1 (50%)	6001	10,7	5	988	0,2	477,5
ensaio 1 (50%)	6200	10,7	5	974,9	0,2	435,8

1.4. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 25% de abertura:

1.4.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido(N m)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 1 (25%)	1200	100.6	12.7	67.1	286.16	11.8	1.01	14.6	12.0
ensaio 1 (25%)	1600	87.5	14.7	67.3	280.63	13.7	1.01	14.6	19.1
ensaio 1 (25%)	2000	72	15.1	67.2	289.72	14.2	1.00	14.6	25.6
ensaio 1 (25%)	2400	117.4	29.5	66.8	265.27	25.5	1.01	14.6	19.7
ensaio 1 (25%)	2800	116.9	34.3	66.6	266.21	29.0	1.00	14.6	25.7
ensaio 1 (25%)	3000	111.9	35.2	66.3	267.64	30.3	1.01	14.6	27.5
ensaio 1 (25%)	3200	106.8	35.8	65.1	270.75	31.5	1.01	14.6	29.2
ensaio 1 (25%)	3600	97.5	36.7	64.1	281.14	33.5	1.00	14.6	29.1
ensaio 1 (25%)	4000	88.9	37.3	63.9	289.52	35.3	1.01	14.6	27.4
ensaio 1 (25%)	4400	80.9	37.3	63.9	302.47	35.9	1.00	14.6	29.5
ensaio 1 (25%)	4800	71.9	36.1	63.6	318.4	37.0	1.00	14.6	32.7
ensaio 1 (25%)	5200	62.5	34	66.2	339.21	37.0	1.01	14.6	37.1
ensaio 1 (25%)	5400	58.3	33	66.2	337.67	37.3	1.01	14.6	38.9
ensaio 1 (25%)	5600	53.6	31.5	65.6	367.1	37.6	1.01	14.6	39.9
ensaio 1 (25%)	6001	45.2	28.4	65.1	408.01	37.5	0.99	14.3	38.0
ensaio 1 (25%)	6200	40.5	26.3	64.7	451.34	37.4	0.97	13.9	38.3

1.4.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 1 (25%)	1200	17,5	92,1	19,4	31,7	104	699,3	27,5
ensaio 1 (25%)	1600	17,5	92,2	19,4	31,3	103,8	713,8	27,5
ensaio 1 (25%)	2000	17,5	92,3	19,3	31,4	104,7	707,4	27,5
ensaio 1 (25%)	2400	17,5	92,5	19,2	30,5	106,3	824,7	26,7
ensaio 1 (25%)	2800	17,5	92,2	19,1	29,8	107,4	842,3	26,0
ensaio 1 (25%)	3000	17,6	92,4	19,1	29,5	109,9	850,3	26,0
ensaio 1 (25%)	3200	17,7	92,4	19,1	29,6	112	859	26,0
ensaio 1 (25%)	3600	17,8	92,3	19,1	29,6	113,4	881,2	26,0
ensaio 1 (25%)	4000	17,8	92,4	19,1	29,7	115,7	898,3	26,8
ensaio 1 (25%)	4400	18,1	92,3	19,3	30,5	112,9	896,1	27,5
ensaio 1 (25%)	4800	18,1	92,2	19,4	30	116,7	908,4	28,3
ensaio 1 (25%)	5200	17,2	93,6	18,6	29,3	113,8	907,9	26,8
ensaio 1 (25%)	5400	17,2	91,8	18,7	28,9	116,8	920,7	26,8
ensaio 1 (25%)	5600	17,4	92,4	18,7	29,2	120,5	929	27,5
ensaio 1 (25%)	6001	17,5	92,9	18,9	29,6	123,7	942	28,3
ensaio 1 (25%)	6200	17,5	90,6	18,9	29,9	125,3	937,1	29,0

1.4.3. Pressões:

ENSAIO	Speed (rpm)	p0 (kPa)	pExhBackPre (kPa)	pOil (kPa)	pFuel_IN (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 1 (25%)	1200	95.24	2.11	379.9	358.9	72.6
ensaio 1 (25%)	1600	95.238	3.2	382.2	358.5	62.1
ensaio 1 (25%)	2000	95.237	2.84	396.2	358.2	54.0
ensaio 1 (25%)	2400	95.234	8.22	403.8	355.9	75.9
ensaio 1 (25%)	2800	95.235	10.8	405.4	355.9	74.0
ensaio 1 (25%)	3000	95.234	11.6	407.2	355.5	72.0
ensaio 1 (25%)	3200	95.236	12.53	415.3	355.4	70.1
ensaio 1 (25%)	3600	95.233	14.25	424.1	355.5	66.0
ensaio 1 (25%)	4000	95.232	15.75	436.9	355.4	61.4
ensaio 1 (25%)	4400	95.225	16.51	456.7	354.7	57.3
ensaio 1 (25%)	4800	95.224	17.5	460.9	354.9	54.3
ensaio 1 (25%)	5200	95.22	17.43	473.6	354.3	51.7
ensaio 1 (25%)	5400	95.218	18.01	456.3	354.4	51.1
ensaio 1 (25%)	5600	95.214	18.33	447.5	354.8	50.9
ensaio 1 (25%)	6001	95.212	18.32	449.2	355.2	50.7
ensaio 1 (25%)	6200	95.21	18.22	446.4	355	50.9

1.4.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 1 (25%)	1200	12,9	0,4	1994,6	1,2	348,1
ensaio 1 (25%)	1600	12,5	0,6	1965	1,5	307,6
ensaio 1 (25%)	2000	12,7	0,6	2103,8	1,4	320,2
ensaio 1 (25%)	2400	13,2	0,6	2436,6	0,6	324,4
ensaio 1 (25%)	2800	13,1	0,7	2693,2	0,6	333
ensaio 1 (25%)	3000	13,1	0,6	2747,6	0,6	321
ensaio 1 (25%)	3200	13,1	0,6	2908,5	0,7	306,4
ensaio 1 (25%)	3600	13,2	0,7	2735,6	0,6	301,7
ensaio 1 (25%)	4000	13,2	0,6	2717,9	0,6	274,3
ensaio 1 (25%)	4400	13,2	0,7	2957,3	0,6	281,1
ensaio 1 (25%)	4800	13,2	0,7	3153,9	0,6	276,7
ensaio 1 (25%)	5200	13	0,7	3406,5	1,8	266,1
ensaio 1 (25%)	5400	13,1	0,7	3421,5	0,7	263,1
ensaio 1 (25%)	5600	13	0,8	3348,1	0,7	244,1
ensaio 1 (25%)	6001	13,1	0,8	2989,5	0,6	268,6
ensaio 1 (25%)	6200	13	1,2	2699,5	0,4	332,1

2 Ensaio 2:

Como descrito no capítulo 3 a nomenclatura ensaio 2 foi escolhida e utilizada para simplificar a descrição da configuração do motor utilizado durante esta segunda etapa do experimento. A configuração descrita na tabela detalhadamente como sendo:

Motor original com válvula de aceleração do sistema eletrônico de injeção de combustível rotacionada 90° sentido horário, conforme ilustrado na figura 3.3.

Os valores lidos e registrados durante este ensaio, para cada uma das diferentes posições da borboleta da válvula de aceleração, estão descritos nas tabelas abaixo.

2.1. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 100% de abertura:

2.1.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 2 (100%)	1200	133.8	16.8	67.3	288.02	14.9	0.93	13.9	9.1
ensaio 2 (100%)	1600	137.4	23.1	67.2	281.61	20.2	0.95	13.9	11.3
ensaio 2 (100%)	2000	140.5	29.4	67.1	273.88	25.0	0.95	13.7	13.7
ensaio 2 (100%)	2400	155.5	39.1	65.4	275.83	32.9	0.94	13.7	13.0
ensaio 2 (100%)	2800	164.7	48.3	64.2	271.45	40.5	0.95	13.7	17.0
ensaio 2 (100%)	3000	163.2	51.3	63.9	270.87	43.2	0.95	13.6	18.7
ensaio 2 (100%)	3200	156.1	52.3	63.6	284.86	44.7	0.92	13.6	19.2
ensaio 2 (100%)	3600	148.5	56	63.3	284.42	47.5	0.92	13.6	20.8
ensaio 2 (100%)	4000	145.9	61.1	63.4	295.8	52.6	0.90	13.2	19.8
ensaio 2 (100%)	4400	146.3	67.5	62.8	306.6	59.2	0.88	13.0	20.4
ensaio 2 (100%)	4800	141.1	71	62.3	313.05	63.5	0.89	12.7	21.3
ensaio 2 (100%)	5200	136	74.1	62.2	321.24	67.2	0.88	12.7	23.2
ensaio 2 (100%)	5400	130.3	73.7	61.6	331.44	67.9	0.87	12.5	25.0
ensaio 2 (100%)	5600	120.4	70.3	61.4	356.64	68.3	0.85	12.5	26.6
ensaio 2 (100%)	6001	111.9	70.3	61.1	364.62	69.4	0.85	12.3	27.6
ensaio 2 (100%)	6200	104.6	68	60.8	374.49	68.8	0.85	12.3	28.7

2.1.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 2 (100%)	1200	17,1	92,1	18,7	30,7	105,8	710,3	26,0
ensaio 2 (100%)	1600	17	92,2	18,5	30,1	103,8	793,2	26,0
ensaio 2 (100%)	2000	17,1	92,4	18,5	29,6	106,8	812,2	26,8
ensaio 2 (100%)	2400	17,4	92,3	18,8	29,3	110,7	865,2	26,0
ensaio 2 (100%)	2800	17,7	92,4	18,8	28,7	111,8	906,5	26,0
ensaio 2 (100%)	3000	17,9	92,5	18,9	28,8	113	910,5	26,0
ensaio 2 (100%)	3200	18	92,2	19,1	28,6	112,8	907,2	26,0
ensaio 2 (100%)	3600	18,1	92,4	19	28,5	116,4	905,5	25,3
ensaio 2 (100%)	4000	18,5	92,2	19,4	28,3	116,8	921,6	25,3
ensaio 2 (100%)	4400	18,7	92,1	19,3	28	120,7	927,8	25,3
ensaio 2 (100%)	4800	18,8	92,5	19,4	27,9	120,8	949,3	26,0
ensaio 2 (100%)	5200	18,9	92	19,5	27,8	120,9	952,3	26,0
ensaio 2 (100%)	5400	19	92,4	19,7	27,8	121,1	954,6	26,8
ensaio 2 (100%)	5600	19,1	92,3	19,7	27,8	121,2	951,4	26,8
ensaio 2 (100%)	6001	19,1	91,1	19,7	27,8	122,9	957,5	27,5
ensaio 2 (100%)	6200	19,2	91,7	19,8	27,9	124,5	956,7	28,3

2.1.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 2 (100%)	1200	95,187	3,08	376,3	360,1	93,5
ensaio 2 (100%)	1600	95,18	6,08	382,8	358,3	93,5
ensaio 2 (100%)	2000	95,174	8,43	393,6	357,2	92,9
ensaio 2 (100%)	2400	95,171	14,14	400,3	356	93,0
ensaio 2 (100%)	2800	95,166	20,54	401,7	355	92,6
ensaio 2 (100%)	3000	95,162	22,61	407,4	353,9	92,0
ensaio 2 (100%)	3200	95,16	23,9	411,8	353,9	91,5
ensaio 2 (100%)	3600	95,159	26,61	421,8	352,7	91,4
ensaio 2 (100%)	4000	95,146	32,32	431,5	352,6	91,5
ensaio 2 (100%)	4400	95,137	39,48	446,7	350,7	91,4
ensaio 2 (100%)	4800	95,133	45,19	458,5	349,2	91,1
ensaio 2 (100%)	5200	95,128	49,93	455,2	348,5	91,0
ensaio 2 (100%)	5400	95,124	51,58	450,4	348,1	90,9
ensaio 2 (100%)	5600	95,122	52,18	452,9	347,9	90,9
ensaio 2 (100%)	6001	95,122	54,24	456,9	347,7	91,1
ensaio 2 (100%)	6200	95,122	53,77	452,3	347,8	91,2

2.1.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Speed (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 2 (100%)	1200	11.8	2.6	1078.7	0.6	405.1
ensaio 2 (100%)	1600	12.2	1.9	1386.7	0.9	370.3
ensaio 2 (100%)	2000	12.4	1.9	1558.5	0.5	395.1
ensaio 2 (100%)	2400	12.4	2.2	1601.6	0.3	430.7
ensaio 2 (100%)	2800	12.6	1.9	1954.7	0.5	467.9
ensaio 2 (100%)	3000	12.5	2	1916.4	0.3	461.6
ensaio 2 (100%)	3200	11.9	3	1406.8	0.2	521.8
ensaio 2 (100%)	3600	12	2.9	1448.5	0.2	445.1
ensaio 2 (100%)	4000	11.8	3.2	1316.1	0.2	423.5
ensaio 2 (100%)	4400	11.3	4	1090	0.2	428.1
ensaio 2 (100%)	4800	11.3	3.9	1154.2	0.2	421.4
ensaio 2 (100%)	5200	11.2	4.1	1155.4	0.2	421.4
ensaio 2 (100%)	5400	11	4.5	1078	0.2	418
ensaio 2 (100%)	5600	10.4	5.1	855.2	0.3	1208
ensaio 2 (100%)	6001	10.5	5.3	844.6	0.2	432.7
ensaio 2 (100%)	6200	10.5	5.3	874.8	0.2	423.1

2.2. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 75% de abertura:

2.2.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido(N m)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 2 (75%)	1200	129.8	16.3	59.9	270.25	14.5	1.01	14.6	9.5
ensaio 2 (75%)	1600	135	22.6	62.3	271.64	20.1	1.01	14.6	11.6
ensaio 2 (75%)	2000	139.6	29.3	63.4	263.69	24.9	1.01	14.6	14.4
ensaio 2 (75%)	2400	150.3	37.8	63.5	265.7	32.1	1.00	14.6	13.4
ensaio 2 (75%)	2800	158.2	46.4	63.1	261.19	39.2	1.01	14.6	17.8
ensaio 2 (75%)	3000	157.1	49.4	62.8	260.49	42.2	1.01	14.6	19.2
ensaio 2 (75%)	3200	154.5	51.8	62.5	273.71	44.0	0.96	14.4	19.3
ensaio 2 (75%)	3600	145.8	55	62.6	277.56	47.5	0.96	14.2	20.4
ensaio 2 (75%)	4000	145.5	60.9	62.4	293.24	52.0	0.91	13.2	19.5
ensaio 2 (75%)	4400	144.7	66.7	61.8	304.56	58.4	0.89	13.1	20.1
ensaio 2 (75%)	4800	140.4	70.6	61.5	312.45	62.8	0.89	12.7	21.5
ensaio 2 (75%)	5200	134.5	73.3	60.3	322.87	66.4	0.87	12.6	23.6
ensaio 2 (75%)	5400	129.5	73.3	60.3	330.38	67.4	0.87	12.5	25.2
ensaio 2 (75%)	5600	118.8	69.8	60.1	356.3	67.3	0.85	12.4	27.2
ensaio 2 (75%)	6001	111.2	69.8	59.9	363.25	68.5	0.85	12.3	27.8
ensaio 2 (75%)	6200	103.1	67	59.9	378.01	68.1	0.84	12.2	29.0

2.2.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 2 (75%)	1200	18,9	92,3	19,3	29,1	103,1	750,9	28,3
ensaio 2 (75%)	1600	18,8	92,4	19,1	28,6	103,3	810,2	27,6
ensaio 2 (75%)	2000	18,8	92,5	19	28	102,7	823	26,8
ensaio 2 (75%)	2400	20,1	91,8	19,8	27,9	113,6	922,6	26,9
ensaio 2 (75%)	2800	20,2	92,3	19,7	27,9	113,3	913,3	26,8
ensaio 2 (75%)	3000	20,2	92,2	19,7	27,6	114,2	917	26,8
ensaio 2 (75%)	3200	20,2	92,2	19,6	27,4	114	923,3	26,8
ensaio 2 (75%)	3600	20,3	92,2	19,7	26,7	114,1	939,7	27,5
ensaio 2 (75%)	4000	20,5	92,2	19,7	26,5	117,4	949,9	27,5
ensaio 2 (75%)	4400	20,6	92,3	19,8	26,3	119,2	958,4	28,2
ensaio 2 (75%)	4800	20,7	92,2	19,7	26,2	119,5	951,2	28,3
ensaio 2 (75%)	5200	20,8	92,1	20	26	120,5	945	28,3
ensaio 2 (75%)	5400	20,9	92,3	19,8	25,9	121,2	947,2	28,3
ensaio 2 (75%)	5600	20,9	92,1	19,7	25,8	121,3	946,2	28,3
ensaio 2 (75%)	6001	21	92	19,9	25,8	121,3	949,1	28,3
ensaio 2 (75%)	6200	21,1	92,1	19,9	25,7	124,7	952,5	29,0

2.2.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 2 (75%)	1200	95,117	3,25	374,3	358,5	93,0
ensaio 2 (75%)	1600	95,111	6,28	381	357,8	92,4
ensaio 2 (75%)	2000	95,104	8,54	393,5	357,6	90,9
ensaio 2 (75%)	2400	95,103	13,38	406,6	356	92,5
ensaio 2 (75%)	2800	95,101	19,29	403,2	354,4	91,9
ensaio 2 (75%)	3000	95,101	21,98	406,1	354	91,5
ensaio 2 (75%)	3200	95,1	23,62	414,4	353,2	91,2
ensaio 2 (75%)	3600	95,099	26,62	424,3	352,3	90,9
ensaio 2 (75%)	4000	95,093	32,25	433,8	351	90,8
ensaio 2 (75%)	4400	95,088	39,09	449,7	349,8	90,7
ensaio 2 (75%)	4800	95,084	44,53	452,6	348,4	90,4
ensaio 2 (75%)	5200	95,07	49,08	451,9	347,5	90,2
ensaio 2 (75%)	5400	95,068	50,75	444,3	347	90,0
ensaio 2 (75%)	5600	95,067	51,21	446,5	346,9	90,0
ensaio 2 (75%)	6001	95,065	53,21	451,4	346	90,1
ensaio 2 (75%)	6200	95,062	52,72	446,7	346,2	90,4

2.2.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
ensaio 2 (75%)	1200	13,2	0,4	2339,5	0,8
ensaio 2 (75%)	1600	13	0,5	2149,2	0,9
ensaio 2 (75%)	2000	13,1	0,5	2402,4	0,8
ensaio 2 (75%)	2400	13,3	0,5	2529,3	0,6
ensaio 2 (75%)	2800	13,2	0,6	2785,6	0,6
ensaio 2 (75%)	3000	13,2	0,6	2745,6	0,6
ensaio 2 (75%)	3200	12,7	1,6	2022,4	0,3
ensaio 2 (75%)	3600	12,8	1,6	1966,3	0,3
ensaio 2 (75%)	4000	11,9	3	1352	0,2
ensaio 2 (75%)	4400	11,4	3,8	1150,3	0,2
ensaio 2 (75%)	4800	11,2	4,1	1119,8	0,2
ensaio 2 (75%)	5200	11,1	4,3	1079	0,2
ensaio 2 (75%)	5400	10,9	4,5	1021,4	0,2
ensaio 2 (75%)	5600	10,3	5,2	806,5	0,2
ensaio 2 (75%)	6001	10,4	5,4	796,3	0,3
ensaio 2 (75%)	6200	10,3	5,5	819,9	0,2

2.3. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 50% de abertura:

2.3.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 2 (50%)	1200	129.4	16.3	59.8	272.49	14.5	1.01	14.6	9.5
ensaio 2 (50%)	1600	132.6	22.2	61.1	269.74	19.6	1.01	14.6	12.3
ensaio 2 (50%)	2000	132.1	27.7	61.4	263.15	23.7	1.01	14.6	15.6
ensaio 2 (50%)	2400	142.5	35.8	61.7	268.03	30.8	1.01	14.6	14.1
ensaio 2 (50%)	2800	148.5	43.6	61.6	262.08	36.9	1.01	14.6	18.6
ensaio 2 (50%)	3000	147.4	46.3	61.6	261.02	39.2	1.00	14.6	20.0
ensaio 2 (50%)	3200	145	48.6	61.2	265.03	41.6	1.01	14.6	20.8
ensaio 2 (50%)	3600	138.8	52.4	60.9	270.22	45.8	1.00	14.4	21.4
ensaio 2 (50%)	4000	138.6	58.1	61	283.59	50.9	0.96	13.6	19.8
ensaio 2 (50%)	4400	137.7	63.5	60.9	291.76	56.2	0.94	13.4	21.0
ensaio 2 (50%)	4800	132.1	66.5	60.6	313.35	60.0	0.90	12.9	22.0
ensaio 2 (50%)	5200	126.3	68.8	60.4	318.93	63.1	0.89	12.9	24.3
ensaio 2 (50%)	5400	121.5	68.7	60.2	325.42	63.8	0.89	12.7	26.4
ensaio 2 (50%)	5600	111.3	65.4	60.2	351.96	63.9	0.87	12.5	28.3
ensaio 2 (50%)	6001	103.2	64.9	60.1	359.89	64.7	0.86	12.4	29.6
ensaio 2 (50%)	6200	95.9	62.3	60	374.02	64.3	0.86	12.4	30.4

2.3.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 2 (50%)	1200	19,5	92,1	20,8	35,3	107,4	766,2	29,9
ensaio 2 (50%)	1600	19	92,1	20,3	34,2	105,3	822,5	29,0
ensaio 2 (50%)	2000	18,8	92,3	20,1	33,6	106,5	832,7	28,3
ensaio 2 (50%)	2400	18,7	92,3	20	32,7	108	888,8	27,5
ensaio 2 (50%)	2800	18,6	92,2	19,9	31,2	109	915,9	26,8
ensaio 2 (50%)	3000	18,5	92,5	19,7	31,1	111,3	922	26,8
ensaio 2 (50%)	3200	18,6	92,3	19,7	30,9	113,2	932,9	26,8
ensaio 2 (50%)	3600	18,8	92,3	19,7	30,7	113,7	951,7	26,8
ensaio 2 (50%)	4000	19	92,1	19,8	30,3	116,8	951,9	26,8
ensaio 2 (50%)	4400	19	92,5	19,8	29,8	117,3	954,9	26,7
ensaio 2 (50%)	4800	19,1	92,1	19,8	29,4	117,5	942	26,8
ensaio 2 (50%)	5200	19,2	92,1	19,7	29	119,8	949,4	27,5
ensaio 2 (50%)	5400	19,2	92,2	19,9	28,7	123,9	957,5	27,5
ensaio 2 (50%)	5600	19,2	93	19,9	28,7	123,3	946,6	27,5
ensaio 2 (50%)	6001	19,3	92,8	20	28,7	125	948,8	28,3

2.3.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 2 (50%)	1200	95,052	3,22	374,7	357,9	90,6
ensaio 2 (50%)	1600	95,049	6	382	358,1	88,5
ensaio 2 (50%)	2000	95,047	7,93	392,7	356,9	86,0
ensaio 2 (50%)	2400	95,045	12,57	406	355,6	90,5
ensaio 2 (50%)	2800	95,042	17,66	403,7	354,6	90,2
ensaio 2 (50%)	3000	95,041	19,59	404,7	354,1	89,7
ensaio 2 (50%)	3200	95,04	21,68	412,2	354	89,4
ensaio 2 (50%)	3600	95,039	25,64	422,4	352,9	88,5
ensaio 2 (50%)	4000	95,037	30,72	434,8	351,6	87,7
ensaio 2 (50%)	4400	95,037	36,25	451,5	350,2	86,8
ensaio 2 (50%)	4800	95,036	40,89	459,6	349,5	86,1
ensaio 2 (50%)	5200	95,035	44,7	445,2	348,9	85,5
ensaio 2 (50%)	5400	95,034	46,23	438,7	348,2	85,1
ensaio 2 (50%)	5600	95,032	46,52	442,5	347,6	85,2
ensaio 2 (50%)	6001	95,031	47,69	449,1	347,2	85,0
ensaio 2 (50%)	6200	95,03	47,4	443,5	347,4	85,2

2.3.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 2 (50%)	1200	12,9	0,4	2338,1	4,7	295,1
ensaio 2 (50%)	1600	13	0,5	2193,4	1	280,8
ensaio 2 (50%)	2000	13,1	0,5	2429,6	0,8	300,7
ensaio 2 (50%)	2400	13,2	0,5	2362,1	0,6	299
ensaio 2 (50%)	2800	13,2	0,6	2616,5	0,6	312
ensaio 2 (50%)	3000	13,2	0,6	2687,8	0,6	302,1
ensaio 2 (50%)	3200	13,2	0,6	2645,9	0,6	306,9
ensaio 2 (50%)	3600	13,2	0,6	2599,9	0,6	260,3
ensaio 2 (50%)	4000	12,8	1,6	2047,9	0,4	363,9
ensaio 2 (50%)	4400	12,4	2,2	1883,2	0,2	383,2
ensaio 2 (50%)	4800	11,5	3,6	1328,9	0,2	439,7
ensaio 2 (50%)	5200	11,5	3,7	1361,5	0,2	414
ensaio 2 (50%)	5400	11,3	3,9	1252,8	0,2	413,6
ensaio 2 (50%)	5600	11	4,5	1124,6	0,2	676,6
ensaio 2 (50%)	6001	10,6	5	1005,6	0,2	432,7
ensaio 2 (50%)	6200	10,7	4,9	1051,1	0,2	445

2.4. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 25% de abertura:

2.4.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido(Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/kWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 2 (25%)	1200	99,4	12,5	59,5	278,23	11,7	1,01	14,6	12,3
ensaio 2 (25%)	1600	86,6	14,5	59,5	286,31	13,5	1,01	14,6	19,3
ensaio 2 (25%)	2000	70,9	14,9	59,5	294,75	14,3	1,00	14,6	25,7
ensaio 2 (25%)	2400	115,4	29	59,9	267,42	25,4	1,01	14,6	20,0
ensaio 2 (25%)	2800	114,7	33,6	60,4	268,59	28,9	1,00	14,6	25,7
ensaio 2 (25%)	3000	109,8	34,5	61,1	269,39	30,1	1,01	14,6	27,5
ensaio 2 (25%)	3200	105,1	35,2	60,8	272,87	30,9	1,00	14,6	29,2
ensaio 2 (25%)	3600	95,9	36,2	61,4	282,57	33,0	1,01	14,6	29,2
ensaio 2 (25%)	4000	87,2	36,5	61,4	294,09	34,8	1,00	14,6	27,4
ensaio 2 (25%)	4400	79,3	36,6	61,5	304,19	36,1	1,01	14,6	29,5
ensaio 2 (25%)	4800	70,7	35,6	61,6	319,09	36,7	1,01	14,6	32,7
ensaio 2 (25%)	5200	62,2	33,9	61,5	337,28	37,2	1,00	14,6	37,3
ensaio 2 (25%)	5400	57,8	32,7	61,6	350,93	37,3	1,01	14,6	39,0
ensaio 2 (25%)	5600	53,1	31,1	61,6	368,39	37,2	1,01	14,6	40,1
ensaio 2 (25%)	6001	44,9	28,2	61,6	412,24	37,2	0,99	14,3	38,0
ensaio 2 (25%)	6200	39,9	25,9	61,5	453,97	37,2	0,97	13,9	38,3

2.4.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 2 (25%)	1200	19,7	92,1	20,9	34,4	108,9	757,1	29,8
ensaio 2 (25%)	1600	19,7	92,3	20,9	35	107,4	742,7	29,8
ensaio 2 (25%)	2000	19,6	92,3	20,9	35,2	107	731,6	29,8
ensaio 2 (25%)	2400	19,5	92,6	20,4	34,7	108,8	822,5	29,0
ensaio 2 (25%)	2800	19,4	92,3	20,4	34,3	109,9	843,3	28,3
ensaio 2 (25%)	3000	19,2	92,4	20,2	33	110,1	858,2	28,3
ensaio 2 (25%)	3200	19,2	92,2	20,2	33,7	109,6	852,2	28,3
ensaio 2 (25%)	3600	19	92,3	20,2	32,1	113,1	882,7	28,3
ensaio 2 (25%)	4000	19	92,4	20,2	32	114,5	897	28,3
ensaio 2 (25%)	4400	19	92,2	20	32	115	900,3	28,3
ensaio 2 (25%)	4800	19	92,2	20,1	32	116,3	907,5	29,0
ensaio 2 (25%)	5200	19	92,5	20,1	31,9	116,1	916,1	29,0
ensaio 2 (25%)	5400	19	92	20	32	117,5	922,8	29,3
ensaio 2 (25%)	5600	18,9	92	20,1	31,9	119,2	928,9	29,8
ensaio 2 (25%)	6001	18,9	92,2	20	32,3	121,9	939,2	30,5
ensaio 2 (25%)	6200	18,9	92,4	20	32,5	124,9	941,9	31,3

2.4.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 2 (25%)	1200	95,022	2,4	376,7	358,8	72,9
ensaio 2 (25%)	1600	95,022	3,41	381,5	358,4	62,1
ensaio 2 (25%)	2000	95,022	3,25	394,5	358,5	54,0
ensaio 2 (25%)	2400	95,022	8,56	405,1	356,6	76,0
ensaio 2 (25%)	2800	95,022	10,97	403,6	355,4	74,0
ensaio 2 (25%)	3000	95,022	11,88	408,8	355,6	72,0
ensaio 2 (25%)	3200	95,022	12,28	415,6	355,7	70,1
ensaio 2 (25%)	3600	95,021	14,03	422,8	354,9	66,1
ensaio 2 (25%)	4000	95,021	15,51	436,1	354,5	61,6
ensaio 2 (25%)	4400	95,02	16,63	453,4	354,7	57,4
ensaio 2 (25%)	4800	95,018	17,4	466,3	354,1	54,2
ensaio 2 (25%)	5200	95,017	17,91	460,5	354,1	51,7
ensaio 2 (25%)	5400	95,016	18,12	451,6	353,9	51,1
ensaio 2 (25%)	5600	95,015	18,19	448	354,1	50,7
ensaio 2 (25%)	6001	95,014	18,29	444,9	354	50,4
ensaio 2 (25%)	6200	95,013	18,23	435,4	354,4	50,5

2.4.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)
ensaio 2 (25%)	1200	13,1	0,5	2074,6	0,8
ensaio 2 (25%)	1600	12,9	0,6	2122,2	0,9
ensaio 2 (25%)	2000	12,8	0,7	2196,6	1
ensaio 2 (25%)	2400	13,1	0,6	2420,6	0,8
ensaio 2 (25%)	2800	13,1	0,7	2726,1	0,7
ensaio 2 (25%)	3000	13,1	0,7	2785,1	0,6
ensaio 2 (25%)	3200	13	0,7	2872,6	0,6
ensaio 2 (25%)	3600	13,1	0,7	2778,5	0,6
ensaio 2 (25%)	4000	13,1	0,7	2650,6	0,6
ensaio 2 (25%)	4400	13,1	0,7	2981,5	0,6
ensaio 2 (25%)	4800	13,1	0,7	3252,2	0,6
ensaio 2 (25%)	5200	13,1	0,7	3513,5	0,6
ensaio 2 (25%)	5400	13,1	0,7	3550,6	0,7
ensaio 2 (25%)	5600	13	0,7	3346,1	0,7
ensaio 2 (25%)	6001	13	0,8	2857,7	0,7
ensaio 2 (25%)	6200	12,9	1,2	2585,9	0,5

3 Ensaio 3:

Como descrito no capítulo 3 a nomenclatura ensaio 3 foi escolhida e utilizada para simplificar a descrição da configuração do motor utilizado durante esta terceira etapa do experimento. A configuração é descrita detalhadamente como sendo:

Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significativas (plenum) na posição vertical, com entrada do ar filtrado pelo bocal superior deste, conforme ilustrado na figura 3.4.

Os valores lidos e registrados durante este ensaio, para cada uma das diferentes posições da borboleta da válvula de aceleração, estão descritos nas tabelas abaixo.

3.1. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 100% de abertura:

3.1.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 3 (100%)	1200	133,3	16,8	58	275,33	14,6	0,96	13,9	9,5
ensaio 3 (100%)	1600	137,3	23	57,6	278,91	19,5	0,95	13,9	11,1
ensaio 3 (100%)	2000	148,4	31,1	57,8	272,99	25,7	0,95	13,7	14,0
ensaio 3 (100%)	2400	143,9	36,2	57,9	279,8	30,4	0,94	13,7	13,4
ensaio 3 (100%)	2800	149	43,7	57,8	274,03	35,9	0,94	13,7	17,2
ensaio 3 (100%)	3000	151,4	47,6	56,1	273,33	38,9	0,94	13,6	18,6
ensaio 3 (100%)	3200	154,6	51,8	55,4	280,72	42,5	0,91	13,6	19,0
ensaio 3 (100%)	3600	155,3	58,6	54,8	279,67	49,0	0,94	13,6	20,7
ensaio 3 (100%)	4000	157,1	65,8	52,5	291	56,1	0,92	13,3	19,5
ensaio 3 (100%)	4400	149,4	68,9	52,2	306,26	60,7	0,90	13,2	20,3
ensaio 3 (100%)	4800	137,7	69,2	51,3	320,82	62,7	0,88	12,8	21,4
ensaio 3 (100%)	5200	134,1	73,1	50,9	323,21	65,6	0,87	12,8	23,4
ensaio 3 (100%)	5400	130	73,5	50,7	329,09	66,9	0,87	12,7	25,0
ensaio 3 (100%)	5600	125,6	73,7	50,7	338,1	68,0	0,86	12,6	26,8
ensaio 3 (100%)	6001	113,1	71,1	50,7	362,75	69,2	0,85	12,3	27,8
ensaio 3 (100%)	6200	105,6	68,6	50,6	375,76	68,8	0,85	12,3	28,8

3.1.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 3 (100%)	1200	19,3	91,7	19,7	28,4	101,2	778,2	26,8
ensaio 3 (100%)	1600	19,4	92,2	19,6	29,2	103,5	803,3	27,5
ensaio 3 (100%)	2000	19,3	92,3	19,4	27,6	104,2	823,7	27,5
ensaio 3 (100%)	2400	19,3	92,3	19,3	26,6	108,7	864,8	26,1
ensaio 3 (100%)	2800	19,3	92,2	19,3	26,2	109,2	874,4	26,0
ensaio 3 (100%)	3000	19,6	92,2	19,4	26,2	113,7	878,8	26,0
ensaio 3 (100%)	3200	19,8	92,1	19,5	26,3	114,8	874,6	26,0
ensaio 3 (100%)	3600	20,1	92,2	19,8	26,1	115,9	920,7	26,8
ensaio 3 (100%)	4000	20,7	92,2	20	26,1	119,7	944,6	27,5
ensaio 3 (100%)	4400	20,9	92,2	20,1	26	119,7	958,3	28,3
ensaio 3 (100%)	4800	21,4	92,2	20,4	26,3	122,6	962,6	29,0
ensaio 3 (100%)	5200	21,5	92,2	20,2	26	123,2	943,6	28,8
ensaio 3 (100%)	5400	21,5	92,3	20,3	26	122,8	945,7	29,0
ensaio 3 (100%)	5600	21,6	92,3	20,5	26,1	122,7	944,9	28,3
ensaio 3 (100%)	6001	21,6	92,4	20,6	26,1	123,1	949,7	29,0
ensaio 3 (100%)	6200	21,6	92,3	20,5	26	124,4	948	29,2

3.1.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 3 (100%)	1200	94,666	3,68	378,9	357,9	93,1
ensaio 3 (100%)	1600	94,657	6,36	381,9	357,1	93,0
ensaio 3 (100%)	2000	94,65	9,74	393,5	356,8	91,6
ensaio 3 (100%)	2400	94,65	12,94	405,4	355,8	92,1
ensaio 3 (100%)	2800	94,651	17,11	404,1	355,2	92,0
ensaio 3 (100%)	3000	94,649	19,65	404,1	355,4	92,1
ensaio 3 (100%)	3200	94,644	22,75	407	354,6	92,0
ensaio 3 (100%)	3600	94,635	29,47	417,6	353,9	91,6
ensaio 3 (100%)	4000	94,63	37,42	426,4	353	90,9
ensaio 3 (100%)	4400	94,623	43,16	443,3	352,1	90,1
ensaio 3 (100%)	4800	94,615	45,87	445,1	352	89,5
ensaio 3 (100%)	5200	94,612	49,4	441,8	351,4	89,5
ensaio 3 (100%)	5400	94,609	51,29	439,7	351,4	89,6
ensaio 3 (100%)	5600	94,607	52,95	443,1	350,9	89,9
ensaio 3 (100%)	6001	94,607	54,96	445,1	350,6	89,9
ensaio 3 (100%)	6200	94,605	54,72	440,2	351	90,0

3.1.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 3 (100%)	1200	12,6	1,5	1539,1	0,5	444,2
ensaio 3 (100%)	1600	12,3	1,8	1371,3	0,8	392,6
ensaio 3 (100%)	2000	12,4	1,9	1526,3	0,4	397,1
ensaio 3 (100%)	2400	12,4	2	1361,7	0,3	408,8
ensaio 3 (100%)	2800	12,4	2	1583,8	0,3	414,6
ensaio 3 (100%)	3000	12,3	2,2	1605	0,2	403,4
ensaio 3 (100%)	3200	11,7	3,1	1291,2	0,2	430,1
ensaio 3 (100%)	3600	12,3	2,3	1762	0,2	369,2
ensaio 3 (100%)	4000	12	2,7	1491,6	0,2	387,2
ensaio 3 (100%)	4400	11,3	3,7	1122,3	0,1	401,3
ensaio 3 (100%)	4800	11,1	4	923,4	0,1	408,1
ensaio 3 (100%)	5200	10,9	4,5	982,1	0,1	407,5
ensaio 3 (100%)	5400	10,8	4,6	980,2	0,1	405,3
ensaio 3 (100%)	5600	10,7	4,7	968,3	0,1	471,4
ensaio 3 (100%)	6001	10,3	5,3	819,1	0,1	425,9
ensaio 3 (100%)	6200	10,3	5,4	808,4	0,1	428,5

3.2. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 75% de abertura:

3.2.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 3 (75%)	1200	130,8	16,5	58,3	269,77	14,3	1,01	14,6	9,5
ensaio 3 (75%)	1600	135,3	22,7	58,4	268,91	19,5	1,01	14,6	11,6
ensaio 3 (75%)	2000	141,9	29,7	58,4	260,09	25,2	1,01	14,6	14,4
ensaio 3 (75%)	2400	138,3	34,7	54,9	271,67	30,7	1,01	14,6	13,4
ensaio 3 (75%)	2800	145,5	42,7	54,5	263,32	36,1	1,01	14,6	17,8
ensaio 3 (75%)	3000	147,9	46,5	54,4	261,99	39,1	1,01	14,6	19,1
ensaio 3 (75%)	3200	151	50,6	54,2	262,21	42,5	1,00	14,4	19,3
ensaio 3 (75%)	3600	153,8	58	53,8	261,71	48,9	0,97	14,2	20,7
ensaio 3 (75%)	4000	153	64,2	53,4	288,74	54,8	0,93	13,5	19,7
ensaio 3 (75%)	4400	145,8	67,2	52,9	306,19	59,2	0,90	13,3	20,3
ensaio 3 (75%)	4800	139	69,9	52,8	316,47	62,3	0,89	12,8	21,8
ensaio 3 (75%)	5200	134,4	73,2	52,4	321,98	65,5	0,88	12,8	23,7
ensaio 3 (75%)	5400	130	73,5	52,2	326,66	66,6	0,88	12,8	25,3
ensaio 3 (75%)	5600	124	72,7	51,9	338,37	67,2	0,86	12,7	27,1
ensaio 3 (75%)	6001	112,2	70,6	51,7	359,59	68,4	0,85	12,4	28,4
ensaio 3 (75%)	6200	104,2	67,7	51,4	373,76	68,2	0,85	12,3	29,1

3.2.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 3 (75%)	1200	18,9	92,3	19,3	29,1	103,1	750,9	28,3
ensaio 3 (75%)	1600	18,8	92,4	19,1	28,6	103,3	810,2	27,6
ensaio 3 (75%)	2000	18,8	92,5	19	28	102,7	823	26,8
ensaio 3 (75%)	2400	20,1	91,8	19,8	27,9	113,6	922,6	26,9
ensaio 3 (75%)	2800	20,2	92,3	19,7	27,9	113,3	913,3	26,8
ensaio 3 (75%)	3000	20,2	92,2	19,7	27,6	114,2	917	26,8
ensaio 3 (75%)	3200	20,2	92,2	19,6	27,4	114	923,3	26,8
ensaio 3 (75%)	3600	20,3	92,2	19,7	26,7	114,1	939,7	27,5
ensaio 3 (75%)	4000	20,5	92,2	19,7	26,5	117,4	949,9	27,5
ensaio 3 (75%)	4400	20,6	92,3	19,8	26,3	119,2	958,4	28,2
ensaio 3 (75%)	4800	20,7	92,2	19,7	26,2	119,5	951,2	28,3
ensaio 3 (75%)	5200	20,8	92,1	20	26	120,5	945	28,3
ensaio 3 (75%)	5400	20,9	92,3	19,8	25,9	121,2	947,2	28,3
ensaio 3 (75%)	5600	20,9	92,1	19,7	25,8	121,3	946,2	28,3
ensaio 3 (75%)	6001	21	92	19,9	25,8	121,3	949,1	28,3
ensaio 3 (75%)	6200	21,1	92,1	19,9	25,7	124,7	952,5	29,0

3.2.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 3 (75%)	1200	94,593	3,24	375	357,4	92,9
ensaio 3 (75%)	1600	94,591	6,18	382	357,1	91,9
ensaio 3 (75%)	2000	94,589	8,94	395,5	356,2	90,5
ensaio 3 (75%)	2400	94,576	13,99	398,5	355,9	92,0
ensaio 3 (75%)	2800	94,573	17,77	399,8	355,6	91,9
ensaio 3 (75%)	3000	94,567	20,15	403	355,3	91,8
ensaio 3 (75%)	3200	94,571	22,98	409,4	354,6	91,5
ensaio 3 (75%)	3600	94,571	29,44	420,9	353,9	90,8
ensaio 3 (75%)	4000	94,565	36,22	427,9	352,9	90,0
ensaio 3 (75%)	4400	94,562	41,66	442,9	352,4	89,3
ensaio 3 (75%)	4800	94,562	45,38	453,4	351,7	88,9
ensaio 3 (75%)	5200	94,558	49,43	449,1	351,3	89,0
ensaio 3 (75%)	5400	94,558	51,08	442,3	350,9	89,1
ensaio 3 (75%)	5600	94,558	52,24	444,9	351	89,2
ensaio 3 (75%)	6001	94,558	54,09	448,7	350,4	89,4
ensaio 3 (75%)	6200	94,556	54,1	438,6	350,6	89,4

3.2.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 3 (75%)	1200	12,9	0,4	2301,3	0,9	409,5
ensaio 3 (75%)	1600	12,8	0,5	2132,3	1	327,8
ensaio 3 (75%)	2000	12,8	0,2	2486,9	1,1	330,6
ensaio 3 (75%)	2400	13,2	0,5	2062,6	0,5	266,2
ensaio 3 (75%)	2800	13,1	0,6	2430,6	0,5	291,1
ensaio 3 (75%)	3000	13,1	0,6	2591,9	0,6	274,3
ensaio 3 (75%)	3200	13,1	0,6	2639,4	0,5	282,4
ensaio 3 (75%)	3600	12,8	1,2	2430	0,4	315
ensaio 3 (75%)	4000	12,1	2,5	1636,5	0,2	369,6
ensaio 3 (75%)	4400	11,5	3,5	1167,7	0,2	385,8
ensaio 3 (75%)	4800	11,2	3,9	1049,1	0,1	400,6
ensaio 3 (75%)	5200	11	4,2	1068,9	0,1	404,2
ensaio 3 (75%)	5400	11	4,3	1116,3	0,1	393,8
ensaio 3 (75%)	5600	10,7	4,6	1018	0,1	539,9
ensaio 3 (75%)	6001	10,6	4,8	934,7	0,2	417,8
ensaio 3 (75%)	6200	10,3	5,2	875,4	0,1	422

3.3. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 50% de abertura:

3.3.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/kWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 3 (50%)	1200	129,8	16,3	51,3	271,69	14,4	1,01	14,6	9,5
ensaio 3 (50%)	1600	133,7	22,4	51,4	265,99	19,3	1,01	14,6	12,6
ensaio 3 (50%)	2000	132,9	27,9	52,3	260,72	23,7	1,00	14,6	15,8
ensaio 3 (50%)	2400	139,4	35	53,7	269,74	30,0	1,01	14,6	13,7
ensaio 3 (50%)	2800	146,8	43,1	53,7	260,08	35,8	1,00	14,6	18,6
ensaio 3 (50%)	3000	147,3	46,3	53,9	260,73	38,4	1,01	14,6	20,2
ensaio 3 (50%)	3200	147,1	49,3	53,7	261,03	41,2	1,01	14,6	21,0
ensaio 3 (50%)	3600	144,5	54,5	53,5	268,05	46,2	0,99	14,4	21,6
ensaio 3 (50%)	4000	142,6	59,8	53,3	266,18	50,9	0,95	13,7	20,0
ensaio 3 (50%)	4400	139,1	64,1	53,1	297,92	55,8	0,92	13,4	21,1
ensaio 3 (50%)	4800	133	66,9	53	316,09	59,3	0,89	12,9	22,1
ensaio 3 (50%)	5200	126,5	68,9	52,8	321,28	62,1	0,89	12,9	24,6
ensaio 3 (50%)	5400	123	69,6	52,7	325,77	63,5	0,89	12,8	26,4
ensaio 3 (50%)	5600	116,6	68,4	52,5	338,14	63,9	0,87	12,7	28,8
ensaio 3 (50%)	6001	104,2	65,5	52,3	362,7	64,5	0,86	12,5	30,0
ensaio 3 (50%)	6200	96,8	62,8	52,2	376,06	64,2	0,86	12,5	30,5

3.3.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 3 (50%)	1200	21,2	91,9	21,1	31,9	112,2	800,8	29,8
ensaio 3 (50%)	1600	21,1	92,3	20,8	31,8	110,1	803,9	29,8
ensaio 3 (50%)	2000	20,9	92,5	20,6	31,6	110,4	837,5	29,8
ensaio 3 (50%)	2400	20,4	92,3	20,2	29,1	107,6	887,7	29,0
ensaio 3 (50%)	2800	20,3	92,4	20	27,9	108,6	897,9	28,3
ensaio 3 (50%)	3000	20,3	92,2	20,1	27,4	111,8	908,7	28,3
ensaio 3 (50%)	3200	20,3	92,3	19,9	27,2	113,3	917,8	28,3
ensaio 3 (50%)	3600	20,3	92,2	19,9	26,9	113,7	936,5	27,7
ensaio 3 (50%)	4000	20,4	92,4	19,9	26,8	113,8	943,7	27,5
ensaio 3 (50%)	4400	20,5	92,6	19,9	26,5	115	950,8	27,5
ensaio 3 (50%)	4800	20,6	92,4	19,8	26,2	118,8	939,5	27,5
ensaio 3 (50%)	5200	20,6	92,4	19,9	26,2	119,3	941,1	27,5
ensaio 3 (50%)	5400	20,7	92,5	19,8	26,2	121,2	944,4	27,8
ensaio 3 (50%)	5600	20,8	92,3	20	26,2	122,5	940,5	28,3
ensaio 3 (50%)	6001	20,9	91,8	20,1	26,3	123,3	941,6	28,3
ensaio 3 (50%)	6200	21	91,9	20	26,3	125	943,3	29,0

3.3.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 3 (50%)	1200	94,549	3,72	373,5	358	90,0
ensaio 3 (50%)	1600	94,548	6,43	379,6	357,3	88,0
ensaio 3 (50%)	2000	94,547	8,63	390,4	356,8	85,5
ensaio 3 (50%)	2400	94,543	12,88	406,7	356,3	90,1
ensaio 3 (50%)	2800	94,542	17,11	401,7	355,5	90,0
ensaio 3 (50%)	3000	94,541	19,34	402,9	355,6	89,5
ensaio 3 (50%)	3200	94,538	21,73	409,4	354,8	89,0
ensaio 3 (50%)	3600	94,535	26,49	422,4	354,1	87,9
ensaio 3 (50%)	4000	94,533	31,72	434,1	353,2	87,0
ensaio 3 (50%)	4400	94,531	37,29	442,9	352,5	86,0
ensaio 3 (50%)	4800	94,53	41,54	446,7	351,7	85,0
ensaio 3 (50%)	5200	94,529	44,86	437,8	351,4	84,2
ensaio 3 (50%)	5400	94,527	46,67	436,6	351,1	84,4
ensaio 3 (50%)	5600	94,526	47,42	440,1	351	84,4
ensaio 3 (50%)	6001	94,525	48,5	441,9	350,9	84,3
ensaio 3 (50%)	6200	94,524	48,27	436,3	350,8	84,4

3.3.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 3 (50%)	1200	13,1	0,4	2367,6	0,6	367,3
ensaio 3 (50%)	1600	13	0,5	2216,6	0,7	323,4
ensaio 3 (50%)	2000	13,1	0,5	2376,2	0,6	301,1
ensaio 3 (50%)	2400	13,2	0,5	2175,7	0,5	293,3
ensaio 3 (50%)	2800	13,1	0,6	2605,1	0,5	286,2
ensaio 3 (50%)	3000	13,1	0,6	2628,3	0,6	272
ensaio 3 (50%)	3200	13,1	0,6	2736,7	0,5	268
ensaio 3 (50%)	3600	13	0,8	2536,6	0,5	291,1
ensaio 3 (50%)	4000	12,6	1,7	1954,9	0,3	335,7
ensaio 3 (50%)	4400	12	2,7	1516,6	0,2	370,4
ensaio 3 (50%)	4800	11,2	3,9	1113,5	0,2	404,9
ensaio 3 (50%)	5200	11,1	4	1184	0,2	403
ensaio 3 (50%)	5400	11,1	4	1216,7	0,2	400,3
ensaio 3 (50%)	5600	10,8	4,5	1108,4	0,2	443,3
ensaio 3 (50%)	6001	10,5	4,9	999,4	0,2	422,3
ensaio 3 (50%)	6200	10,6	4,9	1023	0,1	429,2

3.4. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 25% de abertura:

3.4.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 3 (25%)	1200	99,3	12,5	51,5	275,69	11,5	1,01	14,6	12,7
ensaio 3 (25%)	1600	85,7	14,4	51,5	281,69	13,1	1,00	14,6	20,0
ensaio 3 (25%)	2000	69,8	14,6	52,6	294,23	13,7	1,00	14,6	26,2
ensaio 3 (25%)	2400	116,4	29,3	53,2	266,91	24,8	1,01	14,6	20,4
ensaio 3 (25%)	2800	115,4	33,9	53,5	267,07	28,2	1,00	14,6	26,0
ensaio 3 (25%)	3000	110,3	34,7	53,8	268,26	29,3	1,01	14,6	27,8
ensaio 3 (25%)	3200	105,6	35,4	54	263,21	30,4	1,01	14,6	29,5
ensaio 3 (25%)	3600	96,2	36,3	54	281,82	32,4	1,00	14,6	29,7
ensaio 3 (25%)	4000	87,6	36,7	54,1	293,01	34,1	1,00	14,6	27,8
ensaio 3 (25%)	4400	79,3	36,6	54,1	302,86	35,4	1,00	14,6	30,3
ensaio 3 (25%)	4800	69,9	35,1	54,1	321,59	36,1	1,01	14,6	33,1
ensaio 3 (25%)	5200	61,4	33,4	53,8	340,64	36,6	1,01	14,6	37,8
ensaio 3 (25%)	5400	57,4	32,5	53,5	351,84	36,8	1,00	14,6	39,2
ensaio 3 (25%)	5600	52,9	31,1	53,3	366,11	36,8	1,00	14,6	40,1
ensaio 3 (25%)	6001	44,7	28,1	53,3	416,99	36,7	0,97	14,3	38,0
ensaio 3 (25%)	6200	39,4	25,6	53,3	464,54	36,7	0,96	13,9	38,3

3.4.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 3 (25%)	1200	21,2	91,4	21,2	32,1	117,1	772,5	30,5
ensaio 3 (25%)	1600	21,2	91,7	21,1	31,6	113,2	751,2	30,5
ensaio 3 (25%)	2000	20,7	92,1	20,7	32,7	109,7	714,8	30,5
ensaio 3 (25%)	2400	20,5	92,7	20,4	31,5	109,3	796,4	30,1
ensaio 3 (25%)	2800	20,4	92,4	20,1	29,9	108,4	830,8	29,0
ensaio 3 (25%)	3000	20,2	92,3	20	28,5	108,6	842,9	29,0
ensaio 3 (25%)	3200	20,1	92,3	19,9	27,9	109,9	851,8	28,3
ensaio 3 (25%)	3600	20,1	92,3	19,9	27,6	112	867,4	28,3
ensaio 3 (25%)	4000	20	92,3	19,8	27,4	113,5	884,1	29,0
ensaio 3 (25%)	4400	20	92,4	19,9	27,3	114,4	896,8	29,0
ensaio 3 (25%)	4800	20	92,2	19,9	27,3	115,8	904,1	29,0
ensaio 3 (25%)	5200	20	92,3	19,8	27,3	116,5	912,8	29,5
ensaio 3 (25%)	5400	20,1	92,1	19,8	27,4	119,2	924	29,6
ensaio 3 (25%)	5600	20,1	92,1	19,8	27,4	120,6	927,7	29,8
ensaio 3 (25%)	6001	20,1	92,1	19,9	27,5	123,1	932,4	30,5
ensaio 3 (25%)	6200	20,1	92,3	19,7	27,6	124,8	930,1	30,5

3.4.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 3 (25%)	1200	94,521	2,63	372,6	357,6	71,6
ensaio 3 (25%)	1600	94,519	3,55	379,9	357,5	60,9
ensaio 3 (25%)	2000	94,515	3,17	392	357,4	52,5
ensaio 3 (25%)	2400	94,514	8,41	399,6	356,1	75,1
ensaio 3 (25%)	2800	94,515	10,88	403,7	355,7	73,0
ensaio 3 (25%)	3000	94,514	11,75	406,6	355,5	71,2
ensaio 3 (25%)	3200	94,513	12,55	410,6	355,5	69,1
ensaio 3 (25%)	3600	94,513	13,89	420,6	355,6	65,2
ensaio 3 (25%)	4000	94,513	15,36	433,7	355,2	60,4
ensaio 3 (25%)	4400	94,513	16,56	449,2	355,4	56,3
ensaio 3 (25%)	4800	94,512	17,28	458,8	355	53,3
ensaio 3 (25%)	5200	94,511	17,93	449,7	354,9	51,2
ensaio 3 (25%)	5400	94,51	18,2	438,3	355,3	50,5
ensaio 3 (25%)	5600	94,509	18,3	438,5	355,2	50,3
ensaio 3 (25%)	6001	94,511	18,26	438	355,3	50,1
ensaio 3 (25%)	6200	94,509	18,2	429,9	355,1	50,3

3.4.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 3 (25%)	1200	13	0,5	2066,8	0,7	326,4
ensaio 3 (25%)	1600	12,7	0,7	2079	0,8	311,1
ensaio 3 (25%)	2000	12,6	0,7	2047,2	1,1	312,7
ensaio 3 (25%)	2400	13,1	0,6	2462,8	0,8	307,7
ensaio 3 (25%)	2800	13	0,7	2685,5	0,6	305
ensaio 3 (25%)	3000	13	0,6	2811	0,6	283
ensaio 3 (25%)	3200	13	0,6	2905	0,6	275,2
ensaio 3 (25%)	3600	12,9	0,7	2748,4	0,6	275,6
ensaio 3 (25%)	4000	13	0,7	2678,7	0,6	254
ensaio 3 (25%)	4400	13	0,7	2851	0,6	245,1
ensaio 3 (25%)	4800	12,9	0,6	3112,7	0,6	231,2
ensaio 3 (25%)	5200	12,9	0,7	3342,1	0,6	249,1
ensaio 3 (25%)	5400	12,9	0,7	3299,7	0,6	247,1
ensaio 3 (25%)	5600	12,9	0,7	3244,3	0,7	236,3
ensaio 3 (25%)	6001	12,8	1,2	2712,9	0,6	329,2
ensaio 3 (25%)	6200	12,7	1,4	2488,7	0,4	365,5

4 Ensaio 4:

Como descrito no capítulo 3 a nomenclatura ensaio 4 foi escolhida e utilizada para simplificar a descrição da configuração do motor utilizado durante esta quarta etapa do experimento. A configuração é descrita detalhadamente como sendo:

Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significativas (plenum) na posição vertical, com entrada do ar filtrado pelo bocal lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.5.

Os valores lidos e registrados durante este ensaio, para cada uma das diferentes posições da borboleta da válvula de aceleração, estão descritos nas tabelas abaixo.

4.1. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 100% de abertura:

4.1.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 4 (100%)	1200	135.5	17	62.7	260.97	14.8	0.96	13.9	9.8
ensaio 4 (100%)	1600	137	23	63.4	275.15	20.0	0.95	13.9	10.9
ensaio 4 (100%)	2000	144.6	30.3	63.8	271.15	25.7	0.94	13.7	13.4
ensaio 4 (100%)	2400	149.3	37.6	63	279.28	31.9	0.93	13.7	13.4
ensaio 4 (100%)	2800	155.4	45.6	62.3	268.83	37.6	0.94	13.7	17.4
ensaio 4 (100%)	3000	153.4	48.2	61.9	270.69	40.2	0.94	13.6	18.7
ensaio 4 (100%)	3200	153.7	51.5	61.7	272.43	43.0	0.94	13.6	19.0
ensaio 4 (100%)	3600	154.8	58.4	60.8	275.63	49.0	0.94	13.6	20.5
ensaio 4 (100%)	4000	156.4	65.6	59	291.07	56.0	0.91	13.2	19.6
ensaio 4 (100%)	4400	149.5	69	57.2	310.77	61.4	0.89	13.1	19.7
ensaio 4 (100%)	4800	138.3	69.5	56.8	317.89	63.7	0.89	12.8	21.3
ensaio 4 (100%)	5200	134.2	73.1	56.7	321.1	66.2	0.88	12.8	23.3
ensaio 4 (100%)	5400	130.7	74	56.4	324.45	67.7	0.88	12.7	24.9
ensaio 4 (100%)	5600	123.9	72.5	56.2	339.05	68.4	0.87	12.7	26.4
ensaio 4 (100%)	6001	114.2	71.7	56	355.01	70.0	0.86	12.4	27.8
ensaio 4 (100%)	6200	105.9	68.8	55.9	372.3	69.8	0.85	12.3	28.5

4.1.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 4 (100%)	1200	17,6	92,3	19,1	29,1	106,5	737,5	26,7
ensaio 4 (100%)	1600	17,4	92,5	18,8	27,9	106,5	790,2	26,8
ensaio 4 (100%)	2000	17,4	92,2	18,8	26,8	108,7	813,8	26,8
ensaio 4 (100%)	2400	18,4	92,2	19,2	26,2	112,6	864,8	26,0
ensaio 4 (100%)	2800	18,6	92,1	19,2	25,9	112,8	874,6	26,0
ensaio 4 (100%)	3000	18,6	92,3	19,3	25,9	113,8	898,8	26,0
ensaio 4 (100%)	3200	18,7	92,1	19,3	26	116,1	889,8	26,8
ensaio 4 (100%)	3600	18,8	92,2	19,3	26,1	116,3	913,8	26,8
ensaio 4 (100%)	4000	20,1	92,1	20,1	26,5	117,5	931,6	27,5
ensaio 4 (100%)	4400	20,6	92,1	20,3	26,7	119,3	956,4	28,3
ensaio 4 (100%)	4800	20,6	92,4	20,2	26,6	119,8	972	28,5
ensaio 4 (100%)	5200	20,7	92,4	20,4	26,4	121	952,6	28,3
ensaio 4 (100%)	5400	20,7	92	20,3	26,3	122,7	950,7	28,3
ensaio 4 (100%)	5600	20,7	92	20,1	26,3	123,8	950,7	28,3
ensaio 4 (100%)	6001	20,8	92,7	20,3	26,1	125	957,5	28,7
ensaio 4 (100%)	6200	20,8	92,5	20,2	26,1	126,2	957	29,0

4.1.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 4 (100%)	1200	94,929	3,37	371,8	358,6	93,4
ensaio 4 (100%)	1600	94,93	6,2	380,6	357,9	93,0
ensaio 4 (100%)	2000	94,929	9,15	390,2	357,2	92,6
ensaio 4 (100%)	2400	94,907	13,71	402,1	356,4	92,5
ensaio 4 (100%)	2800	94,902	17,97	401,8	355,6	92,0
ensaio 4 (100%)	3000	94,896	20,16	401,6	355,8	92,0
ensaio 4 (100%)	3200	94,896	22,38	406,4	355,3	92,0
ensaio 4 (100%)	3600	94,891	28,73	419,7	354,6	91,9
ensaio 4 (100%)	4000	94,857	36,84	427,8	353,1	91,4
ensaio 4 (100%)	4400	94,841	43,6	444,4	352,3	90,7
ensaio 4 (100%)	4800	94,839	46,54	449,5	352,3	89,8
ensaio 4 (100%)	5200	94,838	49,8	434,3	351,6	89,9
ensaio 4 (100%)	5400	94,837	51,53	433,3	350,8	90,0
ensaio 4 (100%)	5600	94,834	52,79	436,4	351,1	90,3
ensaio 4 (100%)	6001	94,831	55,41	439,9	350,4	90,4
ensaio 4 (100%)	6200	94,83	55,31	433,8	350,6	90,4

4.1.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 4 (100%)	1200	12,4	1,6	1502,6	0,8	470,1
ensaio 4 (100%)	1600	12,3	1,7	1382,4	0,6	403,7
ensaio 4 (100%)	2000	12,4	2	1482,6	0,4	419,5
ensaio 4 (100%)	2400	12,2	2,4	1217,8	0,1	434,6
ensaio 4 (100%)	2800	12,4	2,1	1623,6	0,3	416,1
ensaio 4 (100%)	3000	12,7	1,4	1708,1	0,5	398
ensaio 4 (100%)	3200	12,3	2,2	1645,4	0,2	400,4
ensaio 4 (100%)	3600	12,4	2,1	1852,4	0,4	381,1
ensaio 4 (100%)	4000	11,8	3,1	1324,8	0,1	388,9
ensaio 4 (100%)	4400	11,3	3,8	1016,4	0,1	396,2
ensaio 4 (100%)	4800	11,4	3,7	996,3	0,1	394,3
ensaio 4 (100%)	5200	11,1	4,2	1018,7	0,1	405,5
ensaio 4 (100%)	5400	11,1	4,3	1054,8	0,1	403,2
ensaio 4 (100%)	5600	10,8	4,6	974,5	0,1	654,9
ensaio 4 (100%)	6001	10,7	4,8	904,7	0,2	417,7
ensaio 4 (100%)	6200	10,6	4,9	884,4	0,1	422,9

4.2. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 75% de abertura:

4.2.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (N m)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 4 (75%)	1200	131,1	16,5	62,3	272,1	14,3	1,01	14,6	9,5
ensaio 4 (75%)	1600	133,6	22,4	62,1	267,61	19,5	1,01	14,6	11,6
ensaio 4 (75%)	2000	140,9	29,5	62	260,8	25,2	1,01	14,6	14,4
ensaio 4 (75%)	2400	144,1	36,2	61,3	265,63	30,7	1,01	14,6	13,4
ensaio 4 (75%)	2800	150,2	44	56,5	259,28	36,1	1,01	14,6	17,8
ensaio 4 (75%)	3000	148,1	46,5	56,5	260,38	39,1	1,01	14,6	19,1
ensaio 4 (75%)	3200	149,7	50,2	56,1	267,09	42,5	1,00	14,4	19,3
ensaio 4 (75%)	3600	151,6	57,2	56,6	269,99	48,9	0,97	14,2	20,7
ensaio 4 (75%)	4000	153,3	64,2	56,4	291,03	54,8	0,93	13,5	19,7
ensaio 4 (75%)	4400	146,2	67,4	56,4	307,96	59,2	0,90	13,3	20,3
ensaio 4 (75%)	4800	139,1	70	56,3	317,97	62,3	0,89	12,8	21,8
ensaio 4 (75%)	5200	134,2	73,1	56,6	322,87	65,5	0,88	12,8	23,7
ensaio 4 (75%)	5400	129,8	73,4	56,3	334,42	66,6	0,88	12,8	25,3
ensaio 4 (75%)	5600	124,3	72,9	56,7	340,48	67,2	0,86	12,7	27,1
ensaio 4 (75%)	6001	112,5	70,7	56	359,92	68,4	0,85	12,4	28,4
ensaio 4 (75%)	6200	105	68,2	55,9	369,52	68,2	0,85	12,3	29,1

4.2.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 4 (75%)	1200	18,4	92,4	20,3	29,2	102,1	755,8	92,9
ensaio 4 (75%)	1600	18,4	92,4	20	28,6	104,8	818	91,9
ensaio 4 (75%)	2000	18,6	92,4	19,7	27,7	108,6	853	90,5
ensaio 4 (75%)	2400	18,6	92,3	19,7	26,8	108,2	903,8	92,0
ensaio 4 (75%)	2800	20,8	92,1	21	27,8	120,8	928,3	91,9
ensaio 4 (75%)	3000	20,8	91,9	20,8	27,53	113,95	929,6	91,8
ensaio 4 (75%)	3200	20,7	92	20,7	28	114,1	927	91,5
ensaio 4 (75%)	3600	20,6	92,2	20,6	27,4	117,2	939	90,8
ensaio 4 (75%)	4000	20,5	92,4	20,6	27	117,4	940,3	90,0
ensaio 4 (75%)	4400	20,6	92,2	20,5	26,7	117,5	961,8	89,3
ensaio 4 (75%)	4800	20,6	92,5	20,5	26,6	120,2	954,2	88,9
ensaio 4 (75%)	5200	20,6	92,5	20,3	26,4	120,8	945,3	89,0
ensaio 4 (75%)	5400	20,8	92,3	20,4	26,2	125,1	947,3	89,1
ensaio 4 (75%)	5600	20,7	92,3	20,5	26,3	123,3	943,6	89,2
ensaio 4 (75%)	6001	20,8	92,8	20,4	26,1	125	950,2	89,4
ensaio 4 (75%)	6200	20,9	92,5	20,4	26,2	125,6	953	89,4

4.2.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 4 (75%)	1200	94,747	3,41	375,2	360,1	92,9
ensaio 4 (75%)	1600	94,745	6,27	380,6	359,7	91,9
ensaio 4 (75%)	2000	94,741	9,47	392	358,8	90,5
ensaio 4 (75%)	2400	94,74	13,81	405,1	358,2	92,0
ensaio 4 (75%)	2800	94,707	19,09	399,7	358,2	91,9
ensaio 4 (75%)	3000	94,709	21,08	404,7	357,8	91,8
ensaio 4 (75%)	3200	94,705	22,94	409,8	357,5	91,5
ensaio 4 (75%)	3600	94,701	28,77	414,9	356,7	90,8
ensaio 4 (75%)	4000	94,696	36,05	430,2	355,1	90,0
ensaio 4 (75%)	4400	94,69	42,08	440,1	354,3	89,3
ensaio 4 (75%)	4800	94,689	45,72	443,8	353,9	88,9
ensaio 4 (75%)	5200	94,688	49,51	432,7	353,6	89,0
ensaio 4 (75%)	5400	94,684	51,32	432,3	353,4	89,1
ensaio 4 (75%)	5600	94,686	52,33	435,6	352,9	89,2
ensaio 4 (75%)	6001	94,684	54,4	441,2	352,9	89,4
ensaio 4 (75%)	6200	94,683	54,24	435,4	352,8	89,4

4.2.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 4 (75%)	1200	12,9	0,4	2255,7	2,2	375,8
ensaio 4 (75%)	1600	13	0,5	2034,1	0,8	298,7
ensaio 4 (75%)	2000	13,2	0,5	2385,2	0,4	307,6
ensaio 4 (75%)	2400	13,3	0,5	2199,4	0,4	290
ensaio 4 (75%)	2800	13,2	0,6	2492,2	0,4	306,7
ensaio 4 (75%)	3000	13,2	0,6	2465,9	0,4	300,5
ensaio 4 (75%)	3200	13,1	0,8	2399	0,4	311,9
ensaio 4 (75%)	3600	12,9	1,2	2279,2	0,3	336,8
ensaio 4 (75%)	4000	11,8	3	1344,5	0,2	383,7
ensaio 4 (75%)	4400	11,6	3,4	1122,4	0,1	387,7
ensaio 4 (75%)	4800	11,2	4	948,5	0,1	407,9
ensaio 4 (75%)	5200	11	4,3	970,8	0,1	409,8
ensaio 4 (75%)	5400	10,8	4,5	943,4	0,1	415,6
ensaio 4 (75%)	5600	10,6	4,8	880	0,1	461,5
ensaio 4 (75%)	6001	10,5	5,1	833	0,1	422,2
ensaio 4 (75%)	6200	10,5	5,1	893,6	0,1	421,2

4.3. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 50% de abertura:

4.3.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 4 (50%)	1200	129.5	16.3	55.2	270.66	14.7	1.01	14.6	9.5
ensaio 4 (50%)	1600	133.6	22.4	55.5	266.6	19.7	1.01	14.6	12.5
ensaio 4 (50%)	2000	133.1	27.9	56.1	262.25	23.8	1.01	14.6	15.8
ensaio 4 (50%)	2400	141.7	35.6	56.8	267.65	30.6	1.01	14.6	14.1
ensaio 4 (50%)	2800	147.7	43.3	57.6	261.11	36.5	1.00	14.6	18.3
ensaio 4 (50%)	3000	145.6	45.7	56.4	260.35	39.0	1.00	14.6	19.8
ensaio 4 (50%)	3200	146.9	49.2	57.8	262.41	41.7	0.99	14.6	20.7
ensaio 4 (50%)	3600	144.6	54.5	58.1	266.7	46.7	0.99	14.4	21.3
ensaio 4 (50%)	4000	143	59.9	58	290.08	51.5	0.93	13.6	19.7
ensaio 4 (50%)	4400	139.1	64.1	58	300.49	56.8	0.92	13.4	21.0
ensaio 4 (50%)	4800	133	66.8	57.6	317.94	60.6	0.89	12.9	21.8
ensaio 4 (50%)	5200	127.1	69.3	57.4	322.26	63.6	0.88	12.9	24.0
ensaio 4 (50%)	5400	122.6	69.4	57.3	326.83	64.5	0.88	12.8	26.4
ensaio 4 (50%)	5600	115.4	67.9	57.1	343.48	64.6	0.86	12.6	28.7
ensaio 4 (50%)	6001	104.5	65.7	57	359.93	65.5	0.86	12.5	30.0
ensaio 4 (50%)	6200	96.6	62.8	56.8	375.42	65.4	0.86	12.5	30.6

4.3.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 4 (50%)	1200	20,9	92	21,6	32,5	114,1	800,9	90,5
ensaio 4 (50%)	1600	20,7	92,4	21,3	32,8	108,1	820,7	88,2
ensaio 4 (50%)	2000	20,5	92,6	21	32,1	108,1	827,2	85,8
ensaio 4 (50%)	2400	20,2	92,3	20,7	29,6	109,5	892,2	90,2
ensaio 4 (50%)	2800	20	92,2	20,4	27,8	109,1	905,7	90,0
ensaio 4 (50%)	3000	20,7	92,1	20,9	28	118,8	927,6	89,5
ensaio 4 (50%)	3200	19,9	92,4	20,4	27,4	112,8	918,8	89,4
ensaio 4 (50%)	3600	19,9	92,2	20,3	27,1	115,4	939,6	88,1
ensaio 4 (50%)	4000	20	92,3	20,2	26,8	114,8	937,5	87,3
ensaio 4 (50%)	4400	20,1	92,2	20,2	26,6	115,9	951,6	86,4
ensaio 4 (50%)	4800	20,3	92,2	20,2	26,4	120,5	943,6	85,6
ensaio 4 (50%)	5200	20,3	92,6	20,1	26,3	121,3	941,1	85,0
ensaio 4 (50%)	5400	20,4	92,2	20	26,2	123	944,8	84,8
ensaio 4 (50%)	5600	20,5	92,2	20,1	26,1	123,7	937,2	84,8
ensaio 4 (50%)	6001	20,5	91,9	20,2	26,1	124,7	941,5	84,6
ensaio 4 (50%)	6200	20,5	91,8	20,2	26,2	125,4	943,7	84,7

4.3.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 4 (50%)	1200	94,682	3,79	374,2	359,9	90,5
ensaio 4 (50%)	1600	94,68	6,45	379,6	359,2	88,2
ensaio 4 (50%)	2000	94,679	8,55	390,9	358,8	85,8
ensaio 4 (50%)	2400	94,677	13,13	405,4	358,1	90,2
ensaio 4 (50%)	2800	94,678	17,48	402,2	357,5	90,0
ensaio 4 (50%)	3000	94,666	20,2	402,9	357,5	89,5
ensaio 4 (50%)	3200	94,676	21,52	407,1	356,7	89,4
ensaio 4 (50%)	3600	94,677	26,34	418,2	356,1	88,1
ensaio 4 (50%)	4000	94,675	32,03	431,9	355,4	87,3
ensaio 4 (50%)	4400	94,673	37,74	441,6	354,4	86,4
ensaio 4 (50%)	4800	94,672	42,19	441,9	353,7	85,6
ensaio 4 (50%)	5200	94,671	45,67	434,4	353,5	85,0
ensaio 4 (50%)	5400	94,67	47,01	432,9	353,6	84,8
ensaio 4 (50%)	5600	94,668	47,72	437,5	353	84,8
ensaio 4 (50%)	6001	94,667	48,78	441,3	352,8	84,6
ensaio 4 (50%)	6200	94,667	48,63	434,8	352,9	84,7

4.3.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 4 (50%)	1200	13,3	0,4	2286,9	0,5	335,5
ensaio 4 (50%)	1600	13,1	0,5	2180,8	0,6	289,6
ensaio 4 (50%)	2000	13,2	0,5	2300,7	0,6	304,8
ensaio 4 (50%)	2400	13,2	0,5	2236,1	0,4	280,9
ensaio 4 (50%)	2800	13,2	0,6	2503,1	0,5	283,5
ensaio 4 (50%)	3000	13,1	0,6	2431,9	0,4	274,4
ensaio 4 (50%)	3200	13,1	0,8	2465,6	0,4	292,8
ensaio 4 (50%)	3600	13,1	0,8	2497,6	0,4	301,5
ensaio 4 (50%)	4000	12,1	2,6	1485,3	0,3	379
ensaio 4 (50%)	4400	11,9	2,9	1355,5	0,2	389,8
ensaio 4 (50%)	4800	11,2	4	1015,7	0,1	406,9
ensaio 4 (50%)	5200	11,2	4	1098,8	0,1	403,1
ensaio 4 (50%)	5400	11,1	4,2	1122,8	0,1	409,1
ensaio 4 (50%)	5600	10,4	4,8	902,5	0,2	524,1
ensaio 4 (50%)	6001	10,6	4,9	986,7	0,2	426,8
ensaio 4 (50%)	6200	10,6	4,8	984,7	0,1	428,8

4.4. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 25% de abertura:

4.4.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 4 (25%)	1200	100,2	12,6	56	283,46	11,8	1,01	14,6	12,3
ensaio 4 (25%)	1600	86,5	14,5	56,8	280,91	13,5	1,01	14,6	19,7
ensaio 4 (25%)	2000	72,2	15,1	57,2	292,07	14,4	1,00	14,6	25,7
ensaio 4 (25%)	2400	116,9	29,4	57,9	267,6	25,3	1,01	14,6	20,2
ensaio 4 (25%)	2800	116,4	34,1	58,3	266,57	28,9	1,00	14,6	26,0
ensaio 4 (25%)	3000	111,4	35	58,6	265,86	30,1	1,01	14,6	27,8
ensaio 4 (25%)	3200	106,7	35,8	58,5	269,77	31,3	1,01	14,6	29,5
ensaio 4 (25%)	3600	97,3	36,7	58,6	280,65	33,1	1,00	14,6	29,6
ensaio 4 (25%)	4000	88,9	37,3	58,7	291	35,1	1,00	14,6	27,8
ensaio 4 (25%)	4400	80,5	37,1	58,8	302,05	36,4	1,00	14,6	29,9
ensaio 4 (25%)	4800	71,4	35,9	59	319,17	37,1	1,00	14,6	32,9
ensaio 4 (25%)	5200	62,8	34,2	59,2	337,74	37,6	1,00	14,6	37,3
ensaio 4 (25%)	5400	58,4	33	59,3	349,67	37,8	1,00	14,6	39,2
ensaio 4 (25%)	5600	53,8	31,6	59,4	363,77	37,8	1,00	14,6	40,1
ensaio 4 (25%)	6001	41,9	26,4	59,3	428,5	36,1	0,97	14,4	38,5
ensaio 4 (25%)	6200	39	25,3	59,1	459,92	37,5	0,97	13,9	38,4

4.4.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 4 (25%)	1200	20,7	91,7	21,4	33,4	111,9	755,9	72,5
ensaio 4 (25%)	1600	20,4	92,7	21,1	33	109,2	729,3	62,0
ensaio 4 (25%)	2000	20,3	92,4	21,2	33,2	108,6	719,5	53,9
ensaio 4 (25%)	2400	20,1	92,5	20,7	32,2	108,5	804,3	75,6
ensaio 4 (25%)	2800	20	92,5	20,6	30,8	107,6	828,4	73,7
ensaio 4 (25%)	3000	19,9	92,5	20,5	29,6	108	842,1	71,8
ensaio 4 (25%)	3200	19,9	92,2	20,5	28,7	109,7	849,9	69,7
ensaio 4 (25%)	3600	19,8	92,3	20,3	28	111,9	866,9	65,7
ensaio 4 (25%)	4000	19,8	92,4	20,4	27,8	113,5	884,1	61,2
ensaio 4 (25%)	4400	19,8	92,4	20,3	27,6	114,2	896	57,1
ensaio 4 (25%)	4800	19,8	92,2	20,3	27,5	115,7	906,6	54,1
ensaio 4 (25%)	5200	19,7	92,3	20,2	27,5	115,8	912,5	51,7
ensaio 4 (25%)	5400	19,7	92,4	20,3	27,5	116,4	922,2	51,1
ensaio 4 (25%)	5600	19,7	92,5	20,4	27,6	117,8	928,5	50,9
ensaio 4 (25%)	6001	19,7	92	20,3	27,8	121	933,2	48,5
ensaio 4 (25%)	6200	19,8	92,2	20,3	28,1	124,4	931,6	50,4

4.4.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 4 (25%)	1200	94,665	2,64	373,1	360	72,5
ensaio 4 (25%)	1600	94,661	3,53	379,8	360	62,0
ensaio 4 (25%)	2000	94,66	3,44	393,4	359,7	53,9
ensaio 4 (25%)	2400	94,66	8,63	406,5	358,6	75,6
ensaio 4 (25%)	2800	94,657	11,01	404,1	358,1	73,7
ensaio 4 (25%)	3000	94,659	11,84	406,1	358	71,8
ensaio 4 (25%)	3200	94,66	12,66	410,5	357,5	69,7
ensaio 4 (25%)	3600	94,659	14,07	420,1	357,4	65,7
ensaio 4 (25%)	4000	94,659	15,56	432,8	357,5	61,2
ensaio 4 (25%)	4400	94,658	16,79	448,2	357	57,1
ensaio 4 (25%)	4800	94,658	17,61	457,1	357,2	54,1
ensaio 4 (25%)	5200	94,658	18,13	452,2	356,9	51,7
ensaio 4 (25%)	5400	94,659	18,39	449,3	357	51,1
ensaio 4 (25%)	5600	94,659	18,52	446,2	357	50,9
ensaio 4 (25%)	6001	94,659	17,47	440,3	357,2	48,5
ensaio 4 (25%)	6200	94,659	18,06	426,9	357,2	50,4

4.4.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 4 (25%)	1200	13,2	0,4	2023,4	0,6	323,4
ensaio 4 (25%)	1600	12,8	0,6	1975,9	0,8	309,4
ensaio 4 (25%)	2000	12,9	0,6	2104,5	0,9	318,8
ensaio 4 (25%)	2400	13,1	0,5	2378,7	0,6	314,7
ensaio 4 (25%)	2800	13	0,7	2654,2	0,5	316,9
ensaio 4 (25%)	3000	13	0,6	2731,9	0,5	301,1
ensaio 4 (25%)	3200	13,1	0,6	2875	0,6	294,8
ensaio 4 (25%)	3600	13,1	0,7	2713,7	0,5	281,7
ensaio 4 (25%)	4000	13,1	0,6	2627	0,5	258,1
ensaio 4 (25%)	4400	13,1	0,6	2766,7	0,5	252,6
ensaio 4 (25%)	4800	13,1	0,7	2951,2	0,5	255,6
ensaio 4 (25%)	5200	13,1	0,7	3201,2	0,5	260,6
ensaio 4 (25%)	5400	13	0,6	3294,1	0,6	245,8
ensaio 4 (25%)	5600	13	0,7	3094,1	0,6	251,1
ensaio 4 (25%)	6001	12,8	1	2524,1	0,6	284,3
ensaio 4 (25%)	6200	12,6	1,5	2252,1	0,4	343,3

5 Ensaio 5:

Como descrito no capítulo 3 a nomenclatura ensaio 5 foi escolhida e utilizada para simplificar a descrição da configuração do motor utilizado durante esta quinta e última etapa do experimento. A configuração é descrita detalhadamente na tabela como sendo:

Motor original com válvula de aceleração eletrônica montada na posição original e reservatório de dimensões significativas (plenum) na posição vertical, com entrada do ar filtrado pelo bocal lateral deste, conforme ilustrado na figura 3.5.

Os valores lidos e registrados durante este ensaio, para cada uma das diferentes posições da borboleta da válvula de aceleração, estão descritos nas tabelas abaixo.

5.1. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração à 100% de abertura:

5.1.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 5 (100%)	1200	134,3	16,9	64,9	260,61	14,6	0,96	13,9	9,8
ensaio 5 (100%)	1600	135,9	22,8	66,1	257,11	19,8	0,96	13,9	11,3
ensaio 5 (100%)	2000	143,3	30	65,8	268,94	25,6	0,95	13,7	13,7
ensaio 5 (100%)	2400	146,2	36,8	64,9	282,72	31,9	0,95	13,7	13,4
ensaio 5 (100%)	2800	151,6	44,5	64	273,74	37,4	0,95	13,7	17,3
ensaio 5 (100%)	3000	151,2	47,5	63,2	270,72	39,9	0,93	13,6	18,7
ensaio 5 (100%)	3200	151,2	50,7	59,9	269,22	42,7	0,93	13,6	19,2
ensaio 5 (100%)	3600	151,9	57,3	59,1	281,49	48,6	0,93	13,6	20,7
ensaio 5 (100%)	4000	153,8	64,4	57,9	285,86	55,8	0,91	13,2	19,6
ensaio 5 (100%)	4400	149,3	68,8	57,5	301,14	61,3	0,90	13,1	20,1
ensaio 5 (100%)	4800	138,9	69,8	57,4	317,66	63,8	0,89	12,8	21,4
ensaio 5 (100%)	5200	134	73	57,2	322,46	66,5	0,87	12,8	23,6
ensaio 5 (100%)	5400	130,2	73,6	57	327,24	67,8	0,87	12,7	25,2
ensaio 5 (100%)	5600	123,2	72,3	56,8	342,57	68,3	0,85	12,6	26,7
ensaio 5 (100%)	6001	112,6	70,7	56,8	359,32	69,9	0,84	12,3	27,8
ensaio 5 (100%)	6200	104,9	68,1	56,9	377,96	69,7	0,84	12,3	28,5

5.1.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 5 (100%)	1200	17,2	92,2	18,5	26,7	106,3	720,7	26,7
ensaio 5 (100%)	1600	17,4	92,2	18,4	25,8	104,6	806,3	26,8
ensaio 5 (100%)	2000	17,6	92,4	18,5	25,5	107,9	837,8	26,8
ensaio 5 (100%)	2400	17,7	92,2	18,6	24,8	108,5	886,8	26,0
ensaio 5 (100%)	2800	18	92,1	18,7	24,7	111,2	885,9	26,0
ensaio 5 (100%)	3000	18,1	92,3	18,7	24,7	114	897,3	26,0
ensaio 5 (100%)	3200	19,1	92,1	19,6	25,4	116,1	892,3	26,8
ensaio 5 (100%)	3600	19,2	92,3	19,5	25,5	115,5	921,1	26,8
ensaio 5 (100%)	4000	19,5	92,2	19,6	25,2	118,5	941,8	27,5
ensaio 5 (100%)	4400	19,6	92,3	19,6	25,1	118,7	953	28,3
ensaio 5 (100%)	4800	19,7	92,4	19,6	25	119,7	961,4	28,5
ensaio 5 (100%)	5200	19,7	92,4	19,7	24,8	121,6	948,3	28,3
ensaio 5 (100%)	5400	19,8	92,4	19,9	24,7	123,3	945,5	28,3
ensaio 5 (100%)	5600	19,9	92,6	19,9	24,7	124,4	944,1	28,3
ensaio 5 (100%)	6001	19,9	92,5	19,9	24,7	125,5	948,5	28,7
ensaio 5 (100%)	6200	20	91,7	19,9	24,6	126,3	951,8	29,0

5.1.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 5 (100%)	1200	94,781	3,19	374,1	359,2	93,0
ensaio 5 (100%)	1600	94,78	6,03	379,8	358,5	93,0
ensaio 5 (100%)	2000	94,779	9,17	391,3	357,6	92,5
ensaio 5 (100%)	2400	94,779	13,5	405,6	357	92,2
ensaio 5 (100%)	2800	94,778	17,63	399,3	356,4	92,0
ensaio 5 (100%)	3000	94,776	19,73	402,5	355,7	92,0
ensaio 5 (100%)	3200	94,761	22,4	407,4	355,9	92,0
ensaio 5 (100%)	3600	94,762	28,58	416,6	355	91,6
ensaio 5 (100%)	4000	94,759	36,51	429,2	354,3	91,2
ensaio 5 (100%)	4400	94,755	42,9	440,5	353,5	90,5
ensaio 5 (100%)	4800	94,755	46,11	445,9	353	89,6
ensaio 5 (100%)	5200	94,755	49,51	431,9	352,5	89,7
ensaio 5 (100%)	5400	94,754	51,23	430,1	352,3	89,8
ensaio 5 (100%)	5600	94,753	52,45	433,2	352,2	90,0
ensaio 5 (100%)	6001	94,753	54,94	437,4	351,7	90,2
ensaio 5 (100%)	6200	94,752	54,86	432,5	351,7	90,3

5.1.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 5 (100%)	1200	12,4	1,6	1473,1	0,6	403,5
ensaio 5 (100%)	1600	12,4	1,5	1439,3	0,8	385,4
ensaio 5 (100%)	2000	12,8	1,4	1561,5	0,6	414,3
ensaio 5 (100%)	2400	12,5	1,9	1492,8	0,4	444,3
ensaio 5 (100%)	2800	12,5	1,9	1751,4	0,4	407,4
ensaio 5 (100%)	3000	12,5	1,9	1596,5	0,4	416,5
ensaio 5 (100%)	3200	12,1	2,5	1545,2	0,2	401,3
ensaio 5 (100%)	3600	12,2	2,4	1735,7	0,4	384,9
ensaio 5 (100%)	4000	11,8	3	1375,5	0,2	381,4
ensaio 5 (100%)	4400	11,4	3,7	1181,1	0,2	394,6
ensaio 5 (100%)	4800	11,3	3,8	1049,1	0,1	404,2
ensaio 5 (100%)	5200	11	4,4	1014,6	0,1	428,4
ensaio 5 (100%)	5400	10,9	4,5	1039,7	0,1	441,1
ensaio 5 (100%)	5600	10,7	4,8	970,6	0,1	601,7
ensaio 5 (100%)	6001	10,5	5,1	853,9	0,2	435,6
ensaio 5 (100%)	6200	10,3	5,4	774,5	0,1	433,3

5.2. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 75% de abertura:

5.2.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 5 (75%)	1200	130,6	16,4	56,3	274,59	14,9	1,01	14,6	9,8
ensaio 5 (75%)	1600	132,4	22,2	57,1	274,66	20,0	1,01	14,6	11,3
ensaio 5 (75%)	2000	139,1	29,2	57,6	263,6	25,4	1,01	14,6	14,4
ensaio 5 (75%)	2400	141,5	35,6	58	272,67	31,6	1,00	14,6	13,4
ensaio 5 (75%)	2800	147,2	43,2	58	262,81	37,2	1,01	14,6	17,6
ensaio 5 (75%)	3000	146,7	46,1	57,9	265,16	39,8	1,00	14,6	19,3
ensaio 5 (75%)	3200	148,3	49,7	57,6	263,52	42,6	0,98	14,4	19,3
ensaio 5 (75%)	3600	149,1	56,2	57,2	275,83	48,6	0,98	14,2	20,7
ensaio 5 (75%)	4000	151,8	63,7	56,6	285,29	55,1	0,93	13,4	19,7
ensaio 5 (75%)	4400	146,9	67,7	56,1	304,69	60,1	0,89	13,2	20,3
ensaio 5 (75%)	4800	139,3	70	55,9	315,49	63,3	0,89	12,8	21,8
ensaio 5 (75%)	5200	133,7	72,9	55,9	315,19	66,4	0,88	12,8	23,6
ensaio 5 (75%)	5400	129	73	55,6	328,57	67,5	0,87	12,7	25,4
ensaio 5 (75%)	5600	119,2	70,1	55,5	346,58	67,5	0,85	12,6	27,1
ensaio 5 (75%)	6001	111,7	70,2	55,5	361,58	69,3	0,86	12,4	28,4
ensaio 5 (75%)	6200	103,8	67,4	55,4	377,43	69,1	0,85	12,3	29,0

5.2.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 5 (75%)	1200	20,3	91,6	20,9	30,1	116,5	815,1	29,8
ensaio 5 (75%)	1600	19,9	92,4	20,5	31,1	105,8	819,4	30,5
ensaio 5 (75%)	2000	19,7	92,4	20,3	29,9	107,6	848,3	30,5
ensaio 5 (75%)	2400	19,5	92,1	20,1	27,6	108,8	909,3	29,7
ensaio 5 (75%)	2800	19,3	92,4	19,9	26,4	109,2	914,6	28,9
ensaio 5 (75%)	3000	19,3	92,2	19,8	26,1	111,9	922,8	28,2
ensaio 5 (75%)	3200	19,3	92,4	19,8	26	114	928,4	27,5
ensaio 5 (75%)	3600	19,3	92,3	19,7	25,7	114,1	948,4	28,0
ensaio 5 (75%)	4000	19,4	92,2	19,6	25,4	118	947,7	28,3
ensaio 5 (75%)	4400	19,5	92,4	19,7	25	119,2	940,7	28,3
ensaio 5 (75%)	4800	19,6	92,6	19,7	24,9	119,3	951,1	28,3
ensaio 5 (75%)	5200	19,6	92,4	19,6	24,8	119,2	947,3	28,3
ensaio 5 (75%)	5400	19,7	92,2	19,7	24,7	120,5	952,3	28,3
ensaio 5 (75%)	5600	19,8	92,2	19,7	24,6	121,2	947,3	28,3
ensaio 5 (75%)	6001	19,8	91,8	19,7	24,7	122,2	951,5	28,3
ensaio 5 (75%)	6200	19,8	92,4	19,7	24,6	123,5	954	29,0

5.2.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 5 (75%)	1200	94,748	3,86	374	359	93,0
ensaio 5 (75%)	1600	94,747	6,41	380,3	358,2	92,0
ensaio 5 (75%)	2000	94,747	9,3	391	357,7	90,5
ensaio 5 (75%)	2400	94,746	13,57	405,2	356,8	92,0
ensaio 5 (75%)	2800	94,745	17,78	402,8	356,3	91,5
ensaio 5 (75%)	3000	94,745	19,96	402,3	355,7	91,5
ensaio 5 (75%)	3200	94,745	22,39	408,4	355,5	91,5
ensaio 5 (75%)	3600	94,744	28,46	419,9	354,4	91,0
ensaio 5 (75%)	4000	94,742	35,77	426,3	353,6	90,4
ensaio 5 (75%)	4400	94,741	41,36	440,5	353,1	89,6
ensaio 5 (75%)	4800	94,741	45,16	450,9	352,8	89,1
ensaio 5 (75%)	5200	94,739	49,16	442,7	352,3	89,2
ensaio 5 (75%)	5400	94,738	51,01	439,3	352	89,3
ensaio 5 (75%)	5600	94,738	51,76	441,9	351,9	89,5
ensaio 5 (75%)	6001	94,738	54,1	446	351,2	89,4
ensaio 5 (75%)	6200	94,737	54,12	439,2	351,3	89,6

5.2.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 5 (75%)	1200	13,3	0,4	2292,1	0,5	297,1
ensaio 5 (75%)	1600	13,1	0,5	2025,8	0,6	246,1
ensaio 5 (75%)	2000	13,3	0,5	2327,8	0,5	270,3
ensaio 5 (75%)	2400	13,2	0,5	2091,5	0,5	249,7
ensaio 5 (75%)	2800	13,2	0,6	2452,4	0,5	252,9
ensaio 5 (75%)	3000	13,2	0,6	2495,9	0,5	259,1
ensaio 5 (75%)	3200	13,1	0,9	2309,7	0,4	300,4
ensaio 5 (75%)	3600	13	1,1	2389,2	0,4	305,2
ensaio 5 (75%)	4000	12,1	2,6	1584,4	0,3	372,1
ensaio 5 (75%)	4400	11,1	4,1	1043,3	0,1	403,9
ensaio 5 (75%)	4800	11,3	3,8	1109,7	0,1	415,6
ensaio 5 (75%)	5200	11,1	4,2	1140,2	0,1	411,3
ensaio 5 (75%)	5400	11	4,3	1128	0,1	407,9
ensaio 5 (75%)	5600	10,6	4,9	924,3	0,2	581,9
ensaio 5 (75%)	6001	10,5	5,1	877,1	0,2	423,7
ensaio 5 (75%)	6200	10,5	5,1	896,5	0,2	423,5

5.3. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 50% de abertura:

5.3.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 5 (50%)	1200	129,3	16,3	55,5	262,46	14,6	1,01	14,6	9,5
ensaio 5 (50%)	1600	132,5	22,2	56,8	276,73	19,5	1,01	14,6	12,4
ensaio 5 (50%)	2000	132,7	27,8	57,5	263,21	24,0	1,01	14,6	15,8
ensaio 5 (50%)	2400	139,3	35	57,8	272,43	30,9	1,01	14,6	13,7
ensaio 5 (50%)	2800	145,4	42,7	58	264,78	36,5	1,00	14,6	18,6
ensaio 5 (50%)	3000	144,3	45,4	58,8	260,81	39,0	1,00	14,6	20,1
ensaio 5 (50%)	3200	143,7	48,2	59	262,67	41,6	1,00	14,6	20,8
ensaio 5 (50%)	3600	141,8	53,5	59,5	269,92	46,8	0,99	14,4	21,4
ensaio 5 (50%)	4000	141,3	59,2	57,6	287,92	51,5	0,94	13,7	20,0
ensaio 5 (50%)	4400	139	64,1	56,9	300,67	56,5	0,91	13,4	21,1
ensaio 5 (50%)	4800	132,7	66,8	56,6	314,96	60,4	0,89	12,9	22,1
ensaio 5 (50%)	5200	126,5	69	56,4	321,26	63,4	0,89	12,9	24,3
ensaio 5 (50%)	5400	122,1	69,1	56,2	325,85	64,4	0,88	12,8	26,4
ensaio 5 (50%)	5600	115,1	68	56	342,03	64,4	0,86	12,6	28,5
ensaio 5 (50%)	6001	103,7	65,2	55,6	359,39	65,4	0,87	12,5	30,0
ensaio 5 (50%)	6200	95,6	62,1	55,2	378,14	65,0	0,86	12,5	30,5

5.3.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 5 (50%)	1200	19,9	92,1	20,6	31,4	110,8	789,4	30,5
ensaio 5 (50%)	1600	19,8	92,6	20,2	31,1	107,7	820,7	30,5
ensaio 5 (50%)	2000	19,6	92,5	20,1	30,2	109,6	832,2	29,8
ensaio 5 (50%)	2400	19,5	92,5	20	28,7	108,9	882,1	29,3
ensaio 5 (50%)	2800	19,4	92,3	19,8	26,8	109	903,4	28,3
ensaio 5 (50%)	3000	19,7	92	20,1	26,3	114,8	930,4	28,3
ensaio 5 (50%)	3200	19,4	92,2	20	26	114,4	930,9	28,3
ensaio 5 (50%)	3600	19,6	92,2	20,1	25,9	114	947	28,3
ensaio 5 (50%)	4000	20,1	92,2	20,2	26	117	944,2	28,3
ensaio 5 (50%)	4400	20,3	92,1	20,2	25,6	118	940,8	28,3
ensaio 5 (50%)	4800	20,3	92,4	20,1	25,3	120,2	938,7	28,3
ensaio 5 (50%)	5200	20,3	92,4	20,1	25,1	121,3	945,7	28,3
ensaio 5 (50%)	5400	20,4	92,4	20,1	25	122,6	948,1	28,3
ensaio 5 (50%)	5600	20,4	92,3	20,3	25	123,3	940,7	28,3
ensaio 5 (50%)	6001	20,5	92	20,2	25,1	124,6	948,5	29,0
ensaio 5 (50%)	6200	20,5	92,1	20,2	25,1	125,2	948,5	29,8

5.3.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 5 (50%)	1200	94,739	3,68	373,6	358,4	90,5
ensaio 5 (50%)	1600	94,74	6,38	378,7	357,7	88,5
ensaio 5 (50%)	2000	94,742	8,5	391,4	357,6	86,0
ensaio 5 (50%)	2400	94,743	12,83	405,2	356,8	90,4
ensaio 5 (50%)	2800	94,745	17,11	403,1	356,1	90,0
ensaio 5 (50%)	3000	94,744	19,92	401,4	355,5	89,6
ensaio 5 (50%)	3200	94,745	21,67	407,9	355,7	89,5
ensaio 5 (50%)	3600	94,744	26,44	420,7	354,7	88,3
ensaio 5 (50%)	4000	94,743	32,15	431,2	353,6	87,4
ensaio 5 (50%)	4400	94,743	37,42	438,7	352,9	86,4
ensaio 5 (50%)	4800	94,742	41,84	441,9	352,1	85,6
ensaio 5 (50%)	5200	94,743	45,58	433,6	352	85,1
ensaio 5 (50%)	5400	94,743	46,92	433,8	351,6	84,8
ensaio 5 (50%)	5600	94,743	47,65	437,5	351,6	84,9
ensaio 5 (50%)	6001	94,743	48,75	441,5	351,3	84,7
ensaio 5 (50%)	6200	94,743	48,55	435,2	351,8	84,8

5.3.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 5 (50%)	1200	13,2	0,4	2328,3	0,5	283,4
ensaio 5 (50%)	1600	13,1	0,5	2159,8	0,7	253,5
ensaio 5 (50%)	2000	13,2	0,5	2316,5	0,6	276,8
ensaio 5 (50%)	2400	13,2	0,5	2166,5	0,5	240,8
ensaio 5 (50%)	2800	13,1	0,6	2508,1	0,6	254,6
ensaio 5 (50%)	3000	13,2	0,6	2525	0,5	236,5
ensaio 5 (50%)	3200	13,2	0,6	2559,6	0,5	248
ensaio 5 (50%)	3600	13,1	0,9	2478	0,5	274,4
ensaio 5 (50%)	4000	12,3	2,3	1704,6	0,2	356,9
ensaio 5 (50%)	4400	11,7	3,1	1392,6	0,2	384,5
ensaio 5 (50%)	4800	11,3	3,9	1159,9	0,2	418,3
ensaio 5 (50%)	5200	11,2	4	1210,8	0,1	405
ensaio 5 (50%)	5400	11,2	4,1	1201,5	0,1	401,3
ensaio 5 (50%)	5600	10,7	4,8	992,6	0,1	434,3
ensaio 5 (50%)	6001	10,7	4,8	1067	0,2	423,4
ensaio 5 (50%)	6200	10,6	4,9	1010,4	0,1	421,3

5.4. Valores lidos e registrados com borboleta da válvula de aceleração a 25% de abertura:

5.4.1. Gerais:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Torque Corrigido (Nm)	Potência Corrigida (kW)	Umidade Célula (%)	Consumo Específico (g/KWh)	Vazão Massa de Ar (g/s)	LAMBDA	Relação Comb.-Ar	AVANÇO (°)
ensaio 5 (25%)	1200	101,9	12,8	54,2	280,3	12,1	1,01	14,6	12,0
ensaio 5 (25%)	1600	89,2	15	55	289,16	13,9	1,00	14,6	18,7
ensaio 5 (25%)	2000	74,7	15,6	55,2	292,59	14,8	1,00	14,6	25,0
ensaio 5 (25%)	2400	116,5	29,3	55,9	273,56	25,7	1,01	14,6	19,8
ensaio 5 (25%)	2800	116,3	34,1	56,5	264,14	29,2	1,00	14,6	25,7
ensaio 5 (25%)	3000	111,8	35,2	56,8	271,95	30,5	1,00	14,6	27,4
ensaio 5 (25%)	3200	107	35,9	57	278,36	31,5	1,00	14,6	29,2
ensaio 5 (25%)	3600	98	37	57,3	277,4	33,5	1,00	14,6	28,9
ensaio 5 (25%)	4000	89,2	37,4	57,1	292,86	35,5	1,00	14,6	27,1
ensaio 5 (25%)	4400	81,5	37,6	57,3	303,17	36,8	1,00	14,6	29,2
ensaio 5 (25%)	4800	73	36,7	57,5	316,17	37,6	1,00	14,6	32,3
ensaio 5 (25%)	5200	64,6	35,2	57,2	336,44	38,1	1,00	14,6	36,5
ensaio 5 (25%)	5400	60,3	34,1	57,2	331,06	38,2	1,00	14,6	38,5
ensaio 5 (25%)	5600	55,5	32,6	57,2	362,32	38,3	1,01	14,6	39,7
ensaio 5 (25%)	6001	47	29,6	57,3	410,33	38,1	0,97	14,2	37,7
ensaio 5 (25%)	6200	41,7	27	57,4	450,2	37,9	0,96	13,8	38,1

5.4.2. Temperaturas:

ENSAIO	Rotação (rpm)	Temperatura Célula (° C)	Temperatura Água Arrefecimento (° C)	T0 (° C)	Temperatura Entrada Combustível (° C)	Temperatura Óleo (° C)	Temperatura Catalisador (° C)	T4 (° C)
ensaio 5 (25%)	1200	20,5	91,7	20,9	31,7	113,8	761,9	30,9
ensaio 5 (25%)	1600	20,1	92,5	20,9	31,4	107,2	741	31,3
ensaio 5 (25%)	2000	20	92,2	20,6	31,8	106,2	730,2	31,3
ensaio 5 (25%)	2400	19,7	92,6	20	30,4	107,5	830,7	30,5
ensaio 5 (25%)	2800	19,5	92,2	19,9	28,5	109,4	846,5	29,1
ensaio 5 (25%)	3000	19,3	92,2	19,8	27,5	109,3	854,7	29,0
ensaio 5 (25%)	3200	19,2	92,4	19,7	26,9	109,4	863,3	29,0
ensaio 5 (25%)	3600	19,1	92,4	19,7	26,6	110,8	879,8	29,0
ensaio 5 (25%)	4000	19,1	92,5	19,6	26,3	115,2	905,3	29,0
ensaio 5 (25%)	4400	19	92,7	19,7	26,3	115,4	908,2	29,0
ensaio 5 (25%)	4800	19	92,2	19,6	26,2	115,7	913,8	29,0
ensaio 5 (25%)	5200	19,1	92,4	19,5	26,2	116	917,6	29,0
ensaio 5 (25%)	5400	19	92,4	19,5	26,2	117	924,9	29,0
ensaio 5 (25%)	5600	19	92,4	19,5	26,2	118,5	930,2	29,2
ensaio 5 (25%)	6001	19,1	92,6	19,6	26,3	121,3	935,7	30,3
ensaio 5 (25%)	6200	19,1	92,5	19,7	26,5	124,2	935,7	30,5

5.4.3. Pressões:

ENSAIO	Rotação (rpm)	p0 (kPa)	Contra-pressão Escape (kPa)	Pressão Óleo (kPa)	Pressão Entrada Combustível (kPa)	p4 (kPa)
ensaio 5 (25%)	1200	94,742	2,72	375,6	357,8	73,9
ensaio 5 (25%)	1600	94,739	3,72	380,5	357,8	63,7
ensaio 5 (25%)	2000	94,739	3,63	393,1	357,4	55,5
ensaio 5 (25%)	2400	94,738	9	404,6	356,4	76,4
ensaio 5 (25%)	2800	94,739	11,43	402,5	355,7	74,5
ensaio 5 (25%)	3000	94,741	12,25	406,9	355,6	72,6
ensaio 5 (25%)	3200	94,742	13,05	412,5	355,6	70,9
ensaio 5 (25%)	3600	94,743	14,51	421,9	355,8	66,8
ensaio 5 (25%)	4000	94,746	16,31	432	355,5	62,3
ensaio 5 (25%)	4400	94,746	17,5	447,5	355,3	58,3
ensaio 5 (25%)	4800	94,747	18,32	458,2	355,4	55,1
ensaio 5 (25%)	5200	94,747	18,89	450,3	355,4	52,7
ensaio 5 (25%)	5400	94,748	19,14	445,3	355,5	52,1
ensaio 5 (25%)	5600	94,748	19,24	444,1	355,6	51,8
ensaio 5 (25%)	6001	94,749	19,21	438,4	355,3	51,4
ensaio 5 (25%)	6200	94,749	19,07	425,8	355	51,6

5.4.4. Emissões de Poluentes:

ENSAIO	Rotação (rpm)	CO ₂ (%)	CO (%)	NOx (ppm)	O ₂ (%)	HC (ppm)
ensaio 5 (25%)	1200	13,2	0,4	2066,9	0,6	280,6
ensaio 5 (25%)	1600	12,9	0,6	2051,9	0,8	266,9
ensaio 5 (25%)	2000	12,9	0,6	2163,6	0,9	283,7
ensaio 5 (25%)	2400	13,1	0,6	2337,1	0,6	254,5
ensaio 5 (25%)	2800	13	0,7	2689,7	0,6	273,4
ensaio 5 (25%)	3000	13,1	0,7	2758,2	0,5	274,6
ensaio 5 (25%)	3200	13,1	0,6	2798	0,5	266,5
ensaio 5 (25%)	3600	13,1	0,6	2782,9	0,5	256,2
ensaio 5 (25%)	4000	13,2	0,6	2662,3	0,5	218,1
ensaio 5 (25%)	4400	13,2	0,6	2928,6	0,5	232,1
ensaio 5 (25%)	4800	13,1	0,6	3211,4	0,5	242,4
ensaio 5 (25%)	5200	13,1	0,6	3475,3	0,5	259,9
ensaio 5 (25%)	5400	13,1	0,6	3419,5	0,5	243,9
ensaio 5 (25%)	5600	13	0,7	3314,8	0,6	224,5
ensaio 5 (25%)	6001	13	0,8	2808,9	0,6	324,1
ensaio 5 (25%)	6200	12,8	1,3	2561,7	0,4	353

ANEXO 4 – TEORIA DA SEMELHANÇA APLICADA AO ESCOAMENTO EM CONDUTOS:

Munson et al. (2004) descreve que ainda não existe uma teoria geral e rigorosa que explique completamente os escoamentos turbulentos devido as suas complexidades. Desta forma a maioria dos escoamentos turbulentos é analisada a partir de procedimentos baseados em resultados experimentais e em formulações semi-empíricas. Existe uma grande variedade de informações, normalmente adimensionais, relacionadas a escoamentos turbulentos em condutos, conexões, válvulas e outros componentes de um sistema por onde escoa um fluido.

Existe também vários estudos teóricos que tentam modelar matematicamente os experimentos que são executados para provar ou explicar fenômenos reais, como exemplo o trabalho apresentado por Bianchi et al (2002) no congresso da SAE com o título *On the applications of low-Reynolds cubic k-ε turbulence models in 3D simulations of ICE intake flows*.

1. O diagrama de Moody:

A perda de carga devido a queda de pressão num conduto depende da tensão de cisalhamento na parede (τ_p), para o escoamento turbulento a tensão de cisalhamento é função da massa específica do fluido (ρ), enquanto que para o escoamento laminar a viscosidade do fluido torna-se a única propriedade relevante. Desta forma a queda de pressão Δp , para um escoamento incompressível, turbulento e que ocorre em regime permanente num tubo horizontal com diâmetro D , pode ser escrita como,

$$\Delta P = F(V, D, l, \varepsilon, \mu, \rho) \quad (\text{eq.A4.1})$$

Onde: V = velocidade média do fluido;

l = comprimento do tubo;

ε = média de rugosidade da parede do duto;

ρ = massa específica do fluido;

μ = viscosidade do fluido

A figura A4.1 reproduzida de Munson et al. (2004) demonstra a sub-camada viscosa para escoamento turbulento e a não existência desta no escoamento laminar. Em muitas circunstâncias esta sub-camada é muito fina ($\delta_s / D \ll 1$, onde δ_s representa a espessura da sub-camada viscosa), mesmo assim a queda de pressão nos escoamentos turbulentos é uma função da rugosidade da parede.

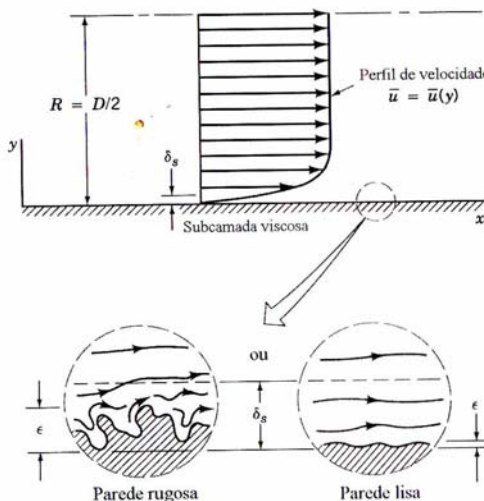


Figura A4.1: Escoamento na sub-camada viscosa

Munson et al. (2004) descreve que muitos parâmetros como tensão superficial, pressão de vapor, entre outros não afetam a queda de pressão para escoamento em regime permanente, incompressível em tubos horizontais. Um modo de escrever a equação A4.1 na forma adimensional em função de 4 grupos adimensionais é,

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \tilde{\phi} \left(\frac{\rho V D}{\mu}, \frac{l}{D}, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (\text{eq. A4.2})$$

A equação A4.2 adimensional, para escoamento turbulento possui duas diferenças se comparada com uma equação com a mesma função para escoamento laminar, a primeira é a utilização da pressão dinâmica ($\rho V^2/2$) para adimensionalizar a queda de pressão do escoamento e não a tensão de cisalhamento característica ($\mu V/D$), e a segunda é a introdução de dois parâmetros adimensionais, o número de Reynolds ($Re = \rho V D / \mu$) e a rugosidade relativa (ϵ / D).

Admitindo-se que a queda de pressão é proporcional ao comprimento do duto, como feito para escoamento laminar, a equação A4.2 pode ser reescrita como,

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{1}{D} \phi\left(\frac{\rho V D}{\nu}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (\text{eq. A4.3})$$

Munson et al. (2004) descreve o fator de atrito (f) como sendo a quantidade de $\Delta p D / (l \rho V^2 / 2)$, para o escoamento num tubo horizontal e pode ser escrita como,

$$\Delta P = f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{eq. A4.4})$$

Onde

$$f = \phi\left(\frac{\rho V D}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (\text{eq. A4.5})$$

Munson et al. (2004) utilizou a equação da energia para um escoamento incompressível em regime permanente,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (\text{eq. A4.6})$$

onde h_L representa a perda de carga no escoamento entre as seções (1) e (2) e adotando a hipótese de que o tubo apresenta diâmetro constante ($D_1 = D_2 \Rightarrow V_1 = V_2$), é horizontal ($z_1 = z_2$) e que o escoamento é plenamente desenvolvido ($\alpha_1 = \alpha_2$) a equação A4.6 fica reduzida a,

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma h_L \quad (\text{eq. A4.7})$$

Combinando a equação A4.7 com a equação A4.4 obtém-se, a equação conhecida como Darcy-Weisbach, sendo que esta equação é válida para qualquer

escoamento incompressível, em regime permanente e plenamente desenvolvido, independente da orientação (horizontal, vertical ou inclinado) do tubo.

$$h_L = f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{eq. A4.8})$$

Se utilizarmos a hipótese de $V_1 = V_2$, e aplicarmos a equação de energia esta fica reduzida a,

$$P_1 - P_2 = \gamma(z_2 - z_1) + \gamma h_L = (z_2 - z_1) + f \frac{l}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad (\text{eq. A4.9})$$

onde uma parte da diferença de pressão é devida a variação de elevação e a outra é devida aos efeitos de atrito

O diagrama de Moody, mostrado na figura A4.2 reproduzida de Munson et al. (2004), mostra a dependência funcional entre f , Re e ϵ / D e mostra o comportamento adequado para a relação $f = \Phi(Re, \epsilon / D)$, é válido para escoamento incompressível, em regime permanente e plenamente desenvolvido em tubos.

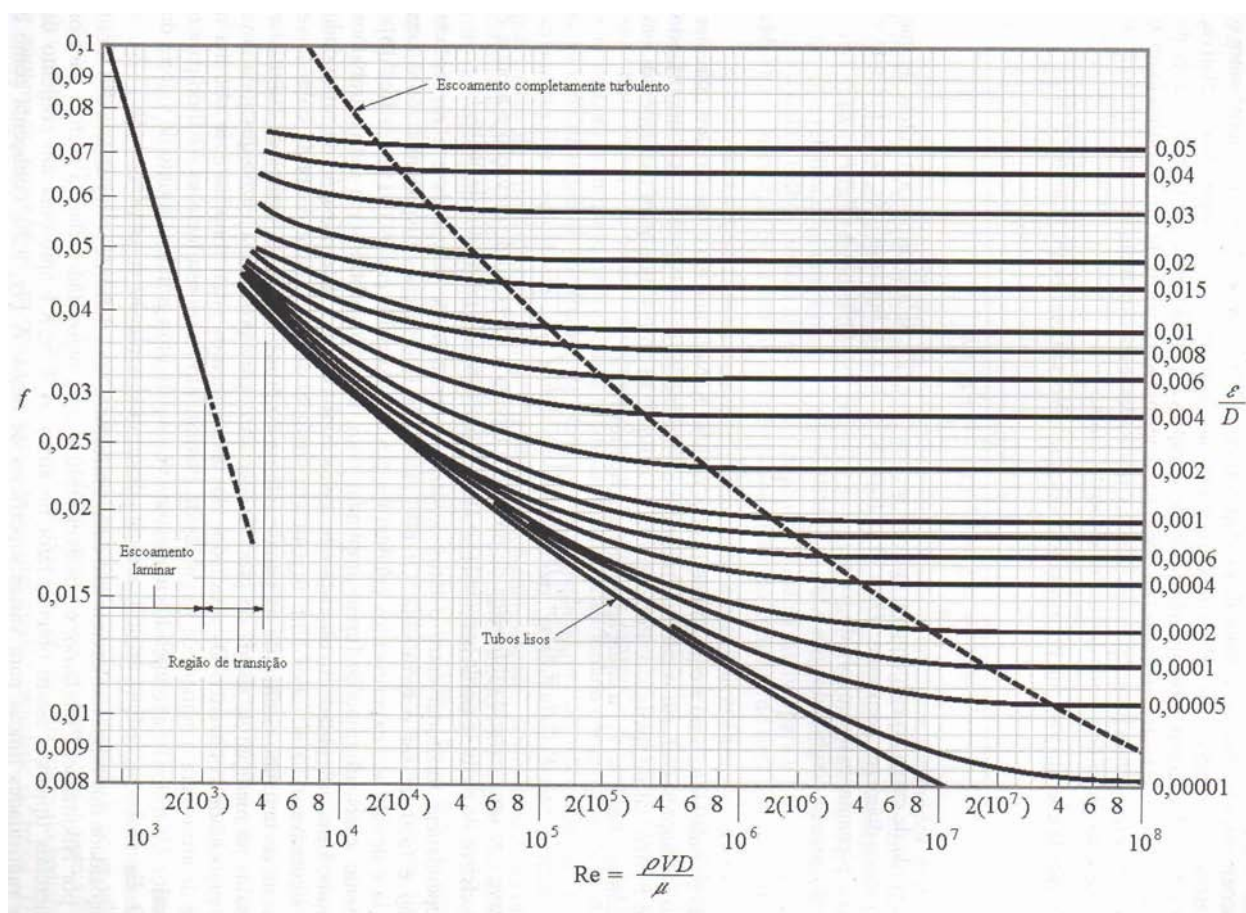


Figura A4.2: Diagrama de Moody (reproduzido de Munson et al. (2004))

Analisando a figura A4.2 conclui-se que para escoamentos laminares o fator de atrito $f = 64/Re$ e f independe da rugosidade relativa. Para escoamentos turbulentos que apresentam número de Reynolds muito grande $f = \varnothing (\varepsilon / D)$ e f é independente do número de Reynolds. Para esta condição (número de Reynolds muito alto) e sabendo que a sub-camada limite decresce com o aumento do número de Reynolds a rugosidade superficial domina completamente a natureza do escoamento na região próxima a parede. Para escoamentos com valores moderados de Reynolds (Re), o coeficiente de atrito depende tanto do número de Re como da rugosidade relativa. Para a faixa de número de Reynolds entre 2100 e 4000, ou seja, escoamento transitório entre laminar e turbulento não há valores para f .

Por não existir uma superfície sem rugosidade, sempre existirá um valor para o valor de atrito.

A fórmula de Colebrook, representada pela equação A4.10 reproduzida de Munson et al. (2004) foi obtida a partir do ajuste dos resultados experimentais da queda de pressão em escoamentos em tubos e utilizada para construir o gráfico mostrado na figura A4.2.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (\text{eq. 4.10})$$

2. Perdas localizadas:

As perdas de carga, ou resistência ao escoamento, acontecem em todo o sistema de transporte de fluídos. As perdas de carga em trechos com condutos retos e longos pode ser calculada utilizando o fator de atrito obtido tanto da fórmula de Colebrook quanto do diagrama de Moody. Já para os demais componentes do sistema como por exemplo válvulas, cotovelos, tês, e outros calcula-se a perda de carga localizada ou singular.

Não existe ainda nos dias de hoje uma análise teórica que indique os detalhes de um escoamento por uma válvula típica, como a mostrada na figura A4.3 reproduzida de Munson et al. (2004).

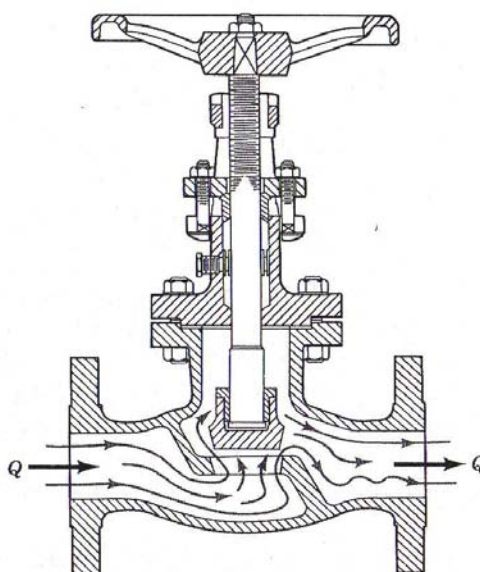


Figura A4.3: Escoamento através de uma válvula.

Por esta razão a perda de carga é normalmente determinada experimentalmente, e para a maioria dos componentes do sistema de transporte de fluído, são fornecidas na forma adimensional. O coeficiente de perda de carga K_L é o método mais comum para determinar perdas de cargas, varia muito com a geometria do componente considerado e também pode ser influenciado pelas propriedades do fluído, ou seja, $K_L = \mathcal{O}(\text{geometria}, Re)$, e é definido por,

$$K_L = \frac{h_L}{(V^2/2g)} = \frac{\Delta P}{(\rho V^2/2)}$$

Ou

$$\Delta P = K_L \frac{1}{2} \rho V^2$$

e

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (\text{eqA4.11})$$

Normalmente a perda de carga correlaciona muito bem com a pressão dinâmica nos escoamentos dominados pelos efeitos de inércia, explicando a razão para o fator de atrito ser independente do número de Reynolds para os escoamentos

plenamente desenvolvidos em tubos com número de Reynolds alto. Para os demais componentes do sistema de transporte esta mesma condição é encontrada, deste modo a maioria dos casos práticos apresentam a perda de carga em função do número de Reynolds, ou seja, $K_L = \emptyset$ (geometria).

As perdas singulares são também calculadas em termos de comprimento equivalente l_{eq} , neste caso a perda de carga gerada pelo comprimento do conduto corresponderá a perda de carga do componente. O comprimento equivalente pode ser escrito como,

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} = f \frac{l_{eq}}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{eq. A4.12})$$

ou

$$l_{eq} = \frac{K_L D}{f}$$

Sabe-se que qualquer mudança na área de escoamento do fluído, perdas de carga são introduzidas e estas não são contabilizadas no cálculo das perdas para escoamento plenamente desenvolvido. As mudanças na área podem ocorrer abruptamente ou suavemente, onde os casos extremos de transição são o escoamento de um grande tanque para um conduto e de um conduto para um grande reservatório.

A figura A4.4 reproduzida de Munson et al. (2004) ilustra fluído escoando de um reservatório para um tubo através de diferentes tipos de região de entrada.

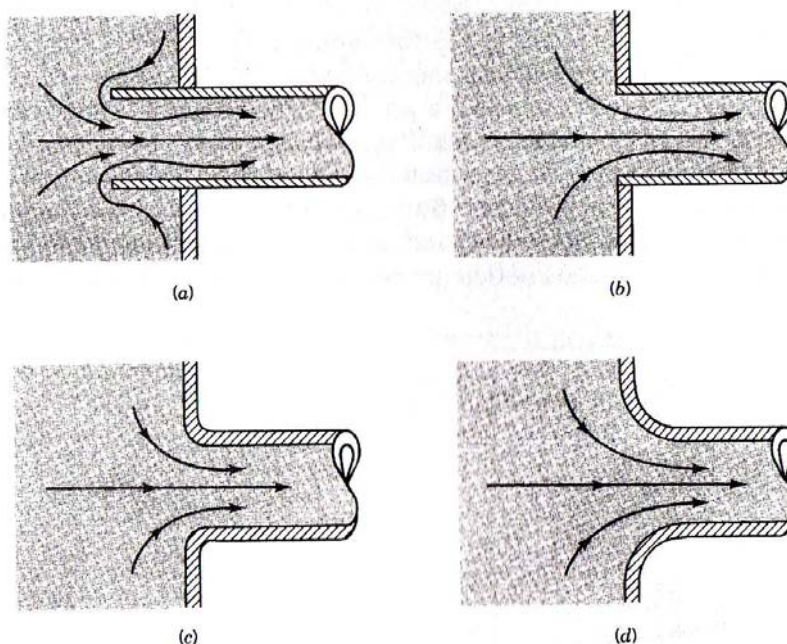


Figura A4.4: Escoamentos e coeficientes de perda para diversos tipos de alimentação. (a) reentrante, $K_L = 0,8$; (b) canto vivo, $K_L = 0,5$; (c) ligeiramente arredondado, $K_L = 0,2$ (d) bem arredondado, $K_L = 0,04$.

Cada geometria apresenta um coeficiente de perda associado. Para uma entrada tipo canto vivo, como ilustrado na figura A4.4 (a) reproduzida de Munson et al. (2004) há a possibilidade de encontrarmos uma área onde o escoamento separe-se da parede também conhecida como vena contracta, isto acontece pois o fluido não segue trajetórias com pequenos raios de curvatura. Na região de separação (seção 2 da figura A4.5 (a)) a pressão diminui ao passo que a velocidade aumenta atingindo mínimo e máximo respectivamente na região de menor área da seção transversal, de forma inversa a pressão aumenta e a velocidade diminui na seção (3). Se o fluido que escoar com alta velocidade pudesse desacelerar eficientemente, a energia cinética poderia ser totalmente convertida em pressão o que implicaria em uma perda de carga nula. Isto não acontece pois uma parte da energia cinética do fluido na seção (2) é parcialmente perdida pela dissipação viscosa. A figura A4.5 (b) ilustra a perda de carga na região de saída de um reservatório e entrada de uma tubulação, sendo que uma parte significativa da perda de carga é devida aos efeitos de inércia e uma pequena porção desta perda é provocada pela tensão de cisalhamento na parede. O resultado da configuração deste sistema é que o coeficiente de perda para uma entrada canto vivo é aproximadamente igual a 0,5.

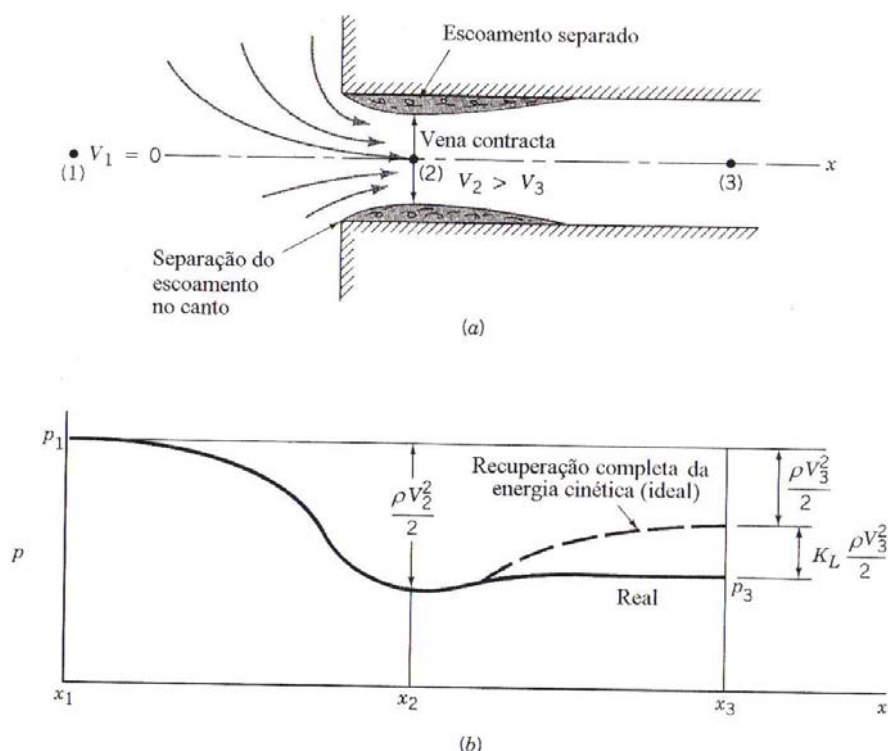


Figura A4.5: Escoamento e distribuição de pressão numa região de alimentação com canto vivo.

Munson et al (2004) demonstra, como mostrado na figura A4.6, valores típicos para o coeficiente de perda de carga para regiões de entrada em função do raio de arredondamento da borda.

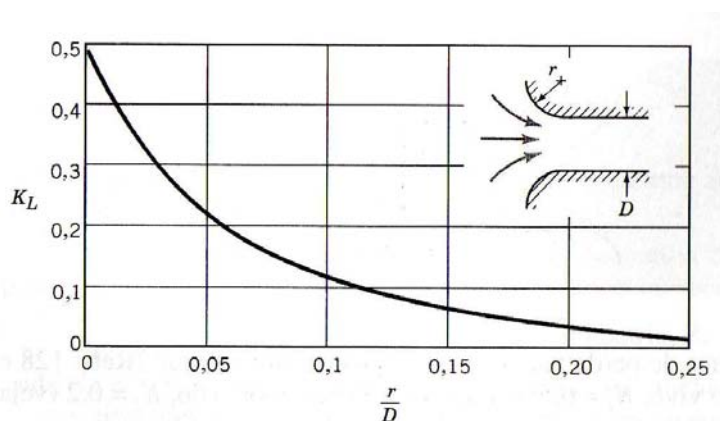


Figura A4.6: Coeficiente de perda na entrada em função do arredondamento.

Quando um fluido está se movendo de um conduto para um reservatório de grandes proporções diz-se que este passa por uma expansão brusca. Já a figura A4.7 reproduzida de Munson et al (2004) ilustra correntes de fluido em expansão brusca, onde toda a energia cinética do fluido é dissipada por efeitos viscosos quando a corrente de fluido se mistura com o fluido em repouso no tanque.

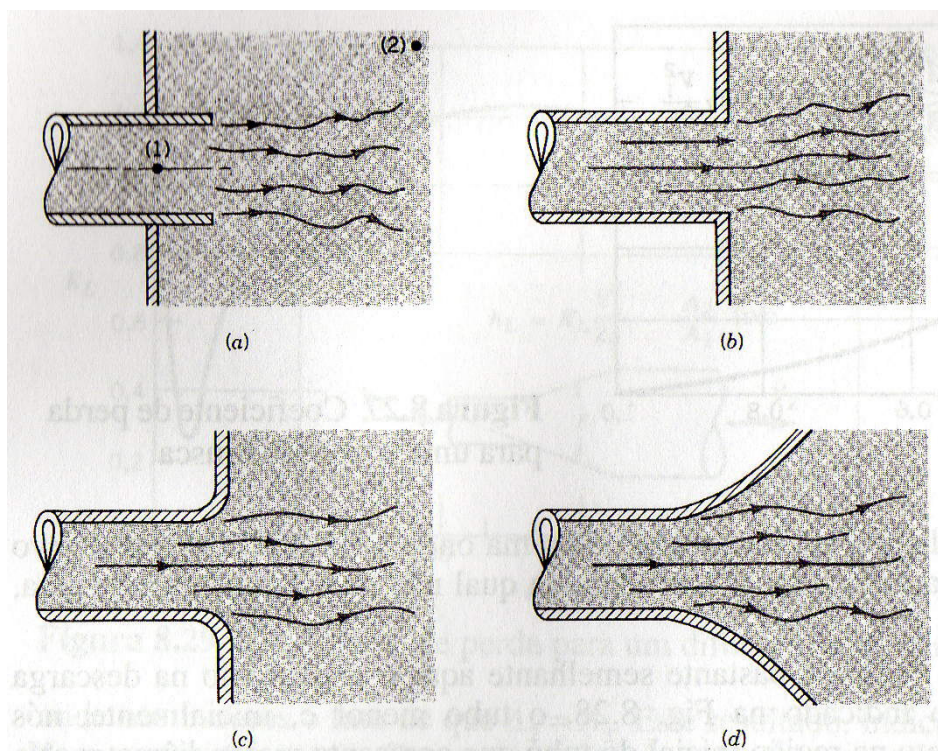


Figura A4.7: Escoamento e coeficiente de perda em diversos tipos de descarga. (a) reentrante, $K_L = 1,0$; (b) canto vivo, $K_L = 1,0$; (c) ligeiramente arredondado, $K_L = 1,0$; (d) bem arredondado, $K_L = 1,0$.

A partir de uma análise simples é possível obter o coeficiente de perda de carga, quando o fluido passa por uma expansão brusca. Para a análise considere as equações da continuidade, e da conservação da quantidade de movimento para o volume de controle mostrado na figura A4.8 e a equação da energia entre as seções (2) e (3). Admitindo-se que o escoamento é uniforme nas seções (1), (2) e (3) e que a pressão é constante ao longo do lado esquerdo do volume de controle ilustrado na figura A4.8, isto é $p_a = p_b = p_c = p_1$, as equações que descrevem o escoamento são,

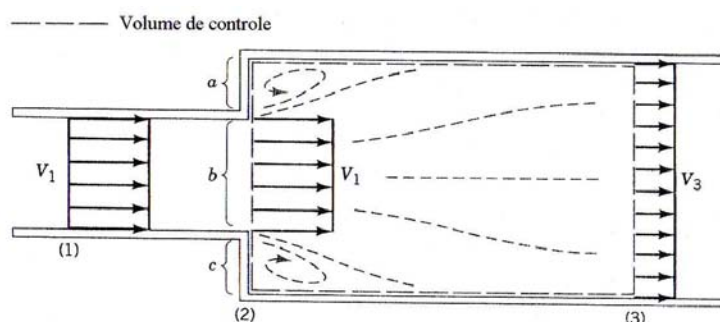


Figura A4.8: Volume de controle utilizado para calcular o coeficiente de perda numa expansão assimétrica brusca.

$$K_L = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (\text{eq A4.13})$$

Para contrações ou expansões graduais tem-se uma variação grande das perdas, a figura A4.10 produzida de Munson et al. (2004) mostra resultado típico para um difusor cônico com razão de áreas A_2/A_1 . Para ângulos muito pequenos, o difusor é longo e a maior parte da perda de carga é devida à tensão de cisalhamento na parede, porém se o ângulo é moderado pode haver separação do fluido das paredes e a perda de carga passa a ser provocada pela dissipação de energia cinética do jato que deixa o duto que apresenta menor diâmetro. Para valores relativamente altos de θ , o difusor cônico é menos eficiente do que uma expansão de bordas retas que apresenta $K_L = 1$. Há um valor ótimo para θ , para o qual o coeficiente de perda é mínimo. Se K_L é mínimo e θ é pequeno isto indica que é difícil desacelerar eficientemente um fluido.

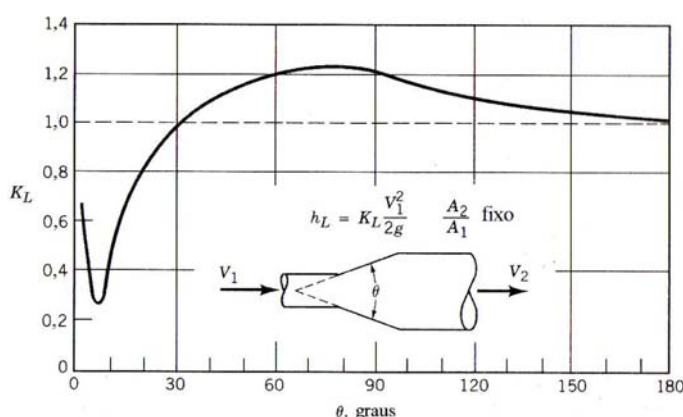


Figura A4.10: Coeficiente de perda para um difusor cônico típico.

A prova de que é relativamente fácil acelerar um fluido eficientemente em uma contração cônica, está no fato dos coeficientes de perda de carga serem pequenos, por exemplo $K_L = 0,02$ para $\theta = 30^\circ$ e $K_L = 0,07$ para $\theta = 60^\circ$.

Sabe-se que as perdas de carga de um fluido escoando em curva é maior que as de um fluido escoando em uma tubulação reta, isto ocorre pois há a separação do escoamento que ocorre na parte interna da curva e a presença de um escoamento rotativo secundário provocado por um desbalanceamento das forças centrípetas. A figura A4.11, reproduzida de Munson et al (2004) ilustra as perdas de carga K_L para escoamentos em curvas de 90° e altos números de Reynolds, porém

as perdas por atrito, relativas ao comprimento axial da curva, deve ser calculada e adicionada aquela calculada com o coeficiente de perda fornecido na figura A4.10

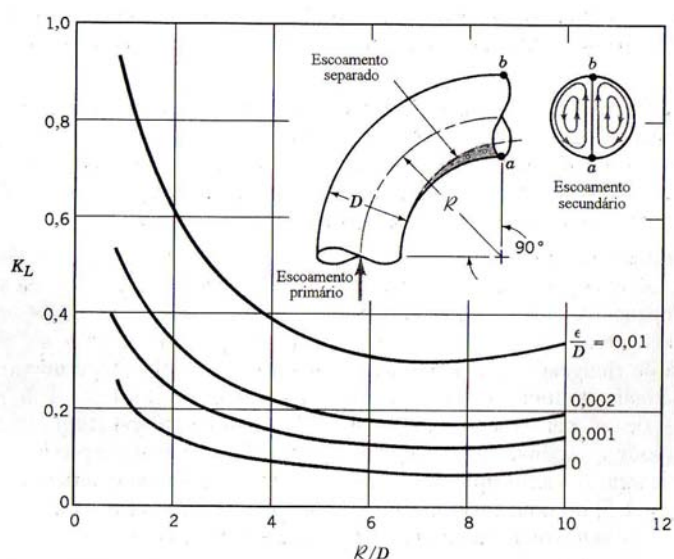


Figura A4.11 Características do escoamento numa curva de 90° e o coeficiente de perda neste tipo de escoamento.

Para sistemas onde espaço é um fator importantíssimo e a utilização de cotovelos com 90° de curvatura é imprescindível sabe-se que a perda de carga será alta, para reduzi-la pode-se utilizar pás direcionadoras ilustradas na figura A4.12

reproduzida de Munson et al (2004), é perceptível que as pás direcionadoras reduzem o escoamento secundário e as perturbações encontradas na configuração original.

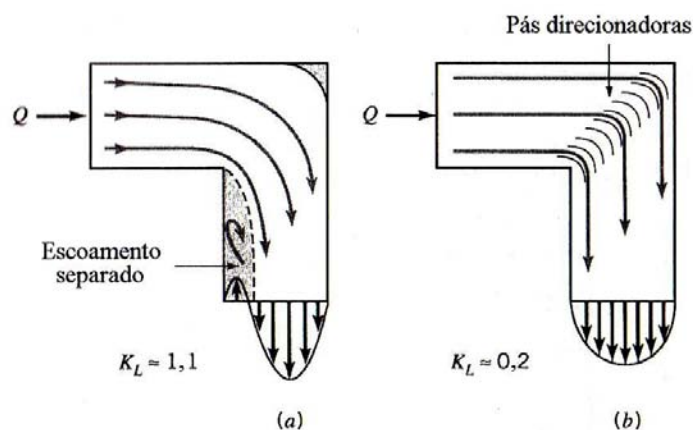


Figura A4.12: Características do escoamento em uma "curva" típica de 90° e os coeficientes de perda associados: (a) sem pás direcionadoras, (b) com pás direcionadoras. .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ÁSSI, G. R. da S. **Estudo experimental do efeito de interferência no escoamento ao redor de cilindros alinhados**. 2005.276 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- AUTOMOTIVE handbook. 3 ed. edition Bosch.1993
- BARBOSA, C. R. F. **Desempenho de um motor ciclo Otto com injeção direta de gás natural**. 1997.197 p. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- BELLA, G.; DE MAIO, A.; GRIMALDI, C. N . Flow Characterization of a High Performance S.I. Engine Intake System – Part 2: Numerical Analysis. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2003, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 2003. University of Rome “Tor Vergata”, University of Perugia. 2003-01-0632
- BIANCHI, G. M.; CANTORE, G.; FONTANESI, S. Turbulence modelling in CFD simulation of ICE intake flows: The discharge coefficient prediction.In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2002, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 2002. University of Bologna, University of Modena .2002-01-1118
- BIANCHI, G.M.; FONTANESI, S. On the Applications of Low-Reynolds Cubic k- ϵ Turbulence Models in 3D Simulations of ICE Intake Flows. New York: **SAE transactions**, v. 112, n.3, p. 29-44, 2003.
- BIBLIOTECA de Engenharia digital .Disponível em :<<http://www.digitalengineeringlibrary.com>> Acesso em :
- BOMBACK, M. **Treinamento**. Laboratório de dinamômetro de motores. 2005 [Treinamento].
- Cauoha, Marilou - Manifold design guidelines: Delphi Automotive System.2002
- FERGUSON, C. R.**Internal combustion engines** : applied thermosciences. Singapore. New York: Wiley & Sons. 1986
- FONTANA, G. et al. Development of a New Intake System for a Small Spark-Ignition Engine. Modeling the Flow Through the Inlet Valve. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2002, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 2003. Department of Industrial Engineering, University of Cassino; ELASIS Research Center. 2003-01-0369
- GRIMALDI, C. N.; BATTISTONI, M.; POSTRIOTI, L. Flow Characterization of a High Performance S.I. Engine Intake System - Part 1: Experimental Analysis. In:

WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2003, Detroit.
Proceedings... Detroit, 2003. – University of Perugia. 2003 – 01-0623

- HARDENBERG, H. O. **The Middle Ages of the Internal combustion Engine**. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers Society of Automotive (SAE), 1999.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- Induction system application manual – Air Measurements and Controls - Delphi Automotive System.1996
- JAWAD, B. A.; HOSTE, J. P.; JOHNSON, B. E. Intake system design for a formula SAE application Lawrence Technological University SAE show. In: FUTURE TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONFERENCE & EXPOSITION , 2001, Costa Mesa, USA. **Proceedings...** Costa Mesa, USA , 2001. 001-01-2553
- KOWALEWICZ, A. **Combustion system**: of high-speed piston I.C. engines. Warszawa. Elsevier, 366p.1984
- LAUBER, J.; GUERRA, T.M ; PERRUQUETTI, W .IC Engine: Tracking Control for an Inlet Manifold with EGR. In: INTERNATIONAL BODY ENGINEERING CONFERENCE & EXHIBITION AND AUTOMOTIVE & TRANSPORTATION TECHNOLOGY CONGRESS TECHNICAL PAPERS LAMIH, 2002, Paris. **Proceedings...** Paris, 2002.University of Valenciennes, LAIL, Ecole Centrale de Lille, Cité Scientifique BP48. 2002-01-2156
- MILHOR, C. E. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. 2002.79 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- MODULAR air meter application manual . Technical Center Flint – Delphi Automotive System.2004
- MORAN, M. J. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. Shapiro Wiley & Sons, Inc. 2004.
- MORO, D.; PONTI, F. Evaluation of wide open throttle torque production based on engine acoustic emission. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2002, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 2002. University of Bologna . 2002-01-0456
- MUNSON, B. R. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4 . ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

- NAITOH, K; et al. Cycle-resolved Computations of Compressible Flow in Engine.– Yamagata University; Nissan Motor Co., Ltd; Institute of Space and Astronautical Science; Aerodynamisches Institute der RWTH Aachen. – paper presented at SAE show. 2002-01-2694
- OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Porto Alegre: Globo, 618p. 1971
- PANTON, R. L. **Incompressible flow**. 2. ed. Wiley-Interscience , 1996. 836 p.
- RADWAN,A.; SOLIMAN, A.; RIZZONI, G. Model-Based Component Fault Detection and Isolation in the Air-Intake System of an SI Engine Using the Statistical Local Approach. In: WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2003, Detroit. **Proceedings...** Detroit, 2003. Center for Automotive Research, The Ohio State University. 2003-01-1057
- SANTOS, A M. dos. **Ensaaios dinamométricos**.São Paulo: Epusp, apostila da aula 6.
- SCHENCK Pegasus GmbH .Asynchronous Machine – DYNAS2 dynamometer operation manual Technical documentation. 1998.
- SINGER, C. J.; RAPER, R. **A history of technology** : the Internal Combustion Engine, Clarendon Press, 1954-1978. p.157-176
- SPRINGER, K. J. Personal transportation and sustainable development. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, 5.,1996, São Paulo,., **Anais...** São Paulo: SAE, 1996. 9p.
- STOCKEL, M. W.**Auto Fundamentals**: how and why of the design, construction, and operation of automobiles : applicable to all makes of and models .3 ed. Goodheart-Wilcox Publisher, 1999. 607 p.
- TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blucher. 1971 - 1976
- WIKIPEDIA encyclopedia digital .Disponível em :<<http://www.wikipedia.com.br>> Acesso em :
- WYSZYNSKI, L. P.; STONE, R.; KALGHATGi, G.T. The volumetric efficiency of direct and port injection gasoline engines with different fuels In : WORLD CONGRESS & EXHIBITION TECHNICAL PAPERS, 2002, Detroit. **Proceedings...** Detroit, University of Oxford and Shell Global Solution 2002. 2002-01-0839