

3

Aparato e Procedimento Experimental

3.1.

Aparato experimental

A Figura 1 ilustra esquematicamente o arranjo experimental montado para a realização dos ensaios. Nesta figura também estão representados, além das grandezas básicas de desempenho medidas pelo dinamômetro (torque e rotação), os pontos onde se tomaram as demais medidas necessárias à redução de dados.

Na bancada de ensaios do motor Diesel foram adaptados dois sistemas de injeção de combustível alternativo, um para o etanol hidratado e outro para o gás natural. A montagem do dispositivo de injeção do etanol utilizou uma linha de ar seco comprimido para pressurizar o tanque de combustível, que possuía um visor de nível, regulador de pressão e válvulas. O etanol pressurizado (até $0,3\text{ MPa}$) foi injetado no coletor de admissão através de um bico automotivo e o consumo registrado pelo medidor de vazão tipo Coriolis. O gás natural comprimido (até $0,3\text{ MPa}$) foi injetado na linha de admissão, entre o filtro e o turbo-compressor, por meio de dois bicos automotivos. O consumo de gás natural também foi determinado pelo equipamento do tipo Coriolis. Para regular o tempo de abertura dos bicos de etanol e gás foram utilizados controladores desenvolvidos no LEV/PUC-Rio.

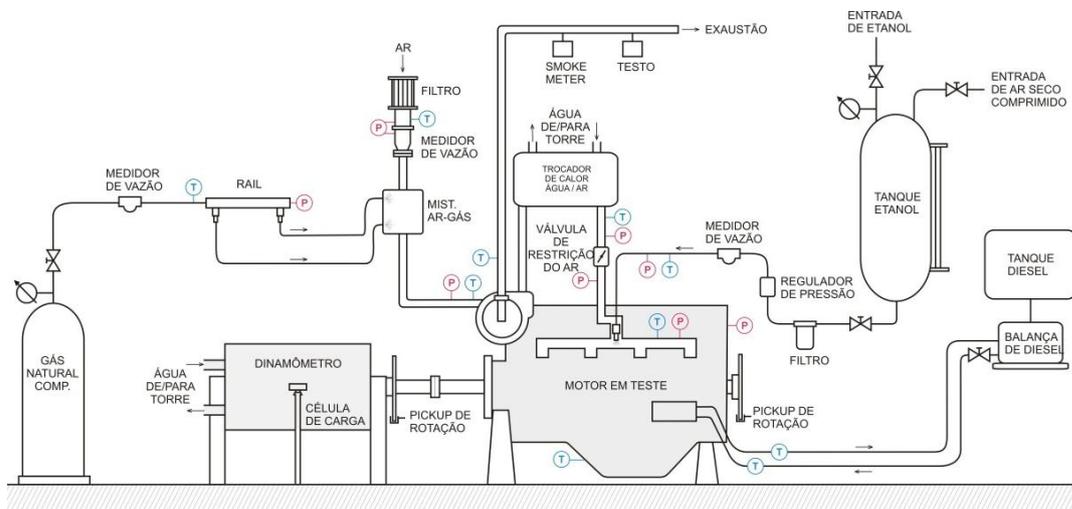


Figura 1 – Esquema do aparato experimental.

Mais adiante serão tratados, desta vez com mais detalhes, os equipamentos utilizados para mensurar as vazões dos diferentes combustíveis utilizados.

Na tese foi utilizado um motor Diesel de quatro tempos com quatro cilindros em linha, de fabricação MWM, modelo 4.10 TCA, com potência máxima de 107 kW a 2.600 rpm e torque máximo verificado de 430 Nm a 1.800 rpm. Este motor é comumente empregado na propulsão de caminhões leves e veículos comerciais. Trata-se de um modelo com turbo-alimentação e arrefecimento do ar de admissão. A Figura 2 ilustra algumas vistas do motor testado e a Tabela 1 apresenta suas principais características técnicas.

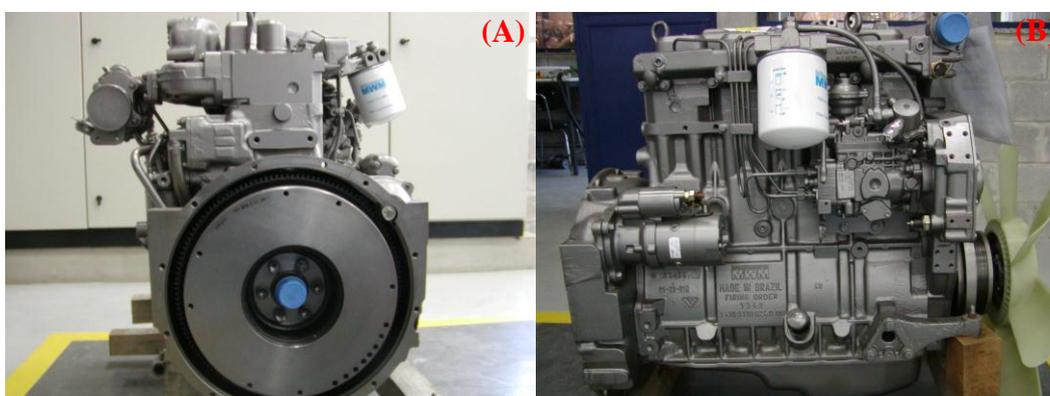


Figura 2 – Vistas do motor ensaiado – modelo MWM 4.10 TCA.

Tabela 1 – Principais características técnicas do motor MWM 4.10 TCA.

| | |
|---|------------------------|
| Número de cilindros e disposição | 4 em linha |
| Válvulas por cilindro | 2 |
| Diâmetro x curso | 103 mm x 129 mm |
| Cilindrada total | 4,3 litros |
| Razão de compressão | 15,8 : 1 |
| Aspiração | turbo / pós arrefecido |
| Máxima rotação de trabalho | 2.600 rpm |
| Máximo torque verificado (após reparação) | 430 Nm a 1.800 rpm |
| Máxima potência | 107 kW a 2.600 rpm |
| Início da injeção (APMS) | 9° |
| Abertura da válvula admissão (APMS) | 3° |
| Fechamento da válvula admissão (DPMI) | 23° |
| Abertura da válvula escape (APMI) | 33° |
| Fechamento da válvula escape (APMS) | 1° |

A bomba injetora do motor ensaiado é do tipo rotativa, especificação VE, fabricada pela BOSCH (ver Figura 3). A recomendação fornecida pelo fabricante do motor para ajuste do avanço de injeção é que quando o pistão número 1 encontrar-se no PMS, o pistão distribuidor da bomba já deve ter cumprido $1,04\text{ mm}$ do seu curso total, definido pela altura do came do distribuidor. Para que isso possa ser executado, a retirada do parafuso de acesso permite a instalação de um dispositivo rosqueável para fixação de um relógio comparador, cujo apalpador deve tocar a extremidade do pistão distribuidor no interior da bomba injetora.

Assim, ao girar-se o eixo do motor manualmente, quando o pistão número 1 atingir o PMS (determinado pela marca original de referência no volante), o relógio comparador deve indicar um valor de $1,04\text{ mm}$ (ver Figura 4). Valores inferiores a $1,04\text{ mm}$ indicam que a injeção encontra-se atrasada em relação ao ponto de avanço original, enquanto valores superiores indicam uma injeção mais avançada.

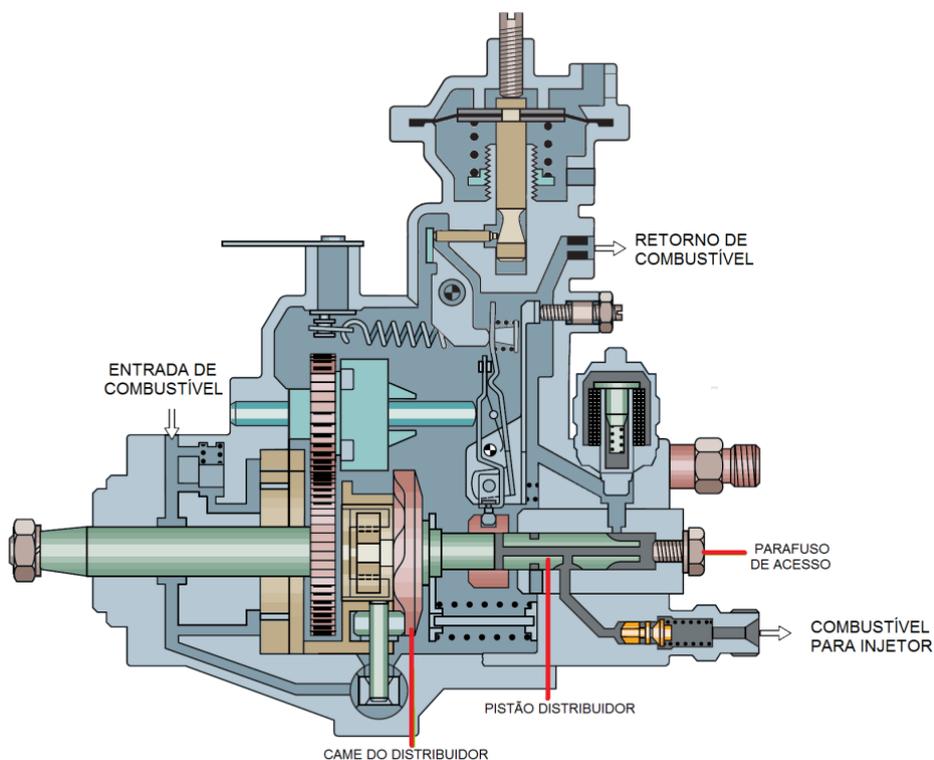


Figura 3 – Esquema da bomba distribuidora BOSCH VE utilizada pelo motor ensaiado (Bosch, 2003).

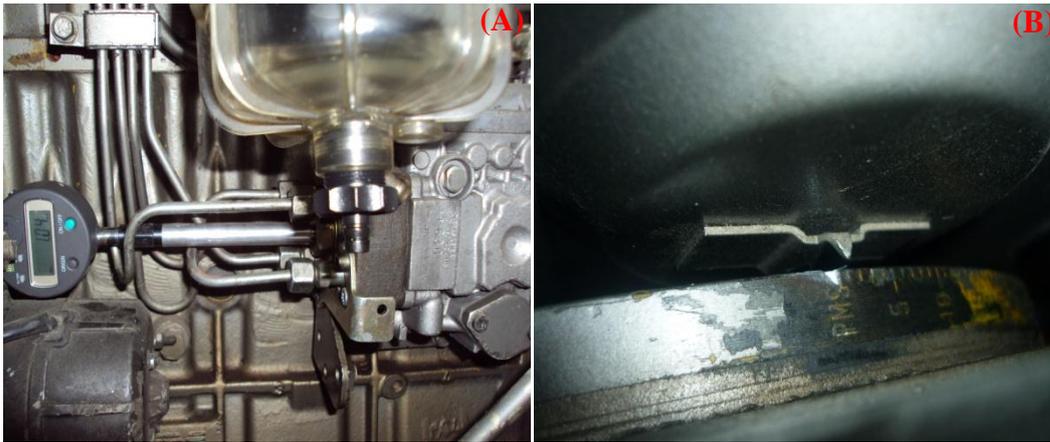


Figura 4 – Ajuste do avanço “estático” da injeção do óleo diesel no motor ensaiado.

O valor de $1,04\text{ mm}$ representa um ajuste “estático” do início da injeção do diesel, equivalente a um avanço de 9° APMS. Desta forma, no presente trabalho, além desse ponto, foram avaliados mais três pontos de início da injeção, correspondentes a 1, 2 e 4 graus em relação ao avanço original (ver Tabela 2).

Tabela 2 – Valores de avanço da injeção utilizados nos ensaios (MWM, 2008).

| Avanço | Deslocamento do pistão distribuidor (mm) | Correspondência angular no virabrequim (graus) | Diferença em relação ao avanço original (graus) |
|---------------|--|--|---|
| P0 (original) | 1,04 | 9° APMS | 0° |
| P1 | 1,28 | 10° APMS | 1° |
| P2 | 1,55 | 11° APMS | 2° |
| P4 | 2,14 (interpolado) | 13° APMS (interpolado) | 4° (interpolado) |

Apesar de não ter sido possível, no presente trabalho, medir o ponto de injeção “dinâmico” (motor funcionando), menciona-se que esse ponto é comumente inferido a partir de medição do perfil da pressão de injeção do combustível e do movimento da agulha do injetor.

Os ensaios do motor foram realizados em um dinamômetro de fabricação AVL, modelo START. Este conta com freio elétrico do modelo ALPHA 240 e pode testar motores com torque máximo de até 550 Nm . Os limites máximos de rotação e potência permitida são de 7.500 rpm e 240 kW ($\sim 320\text{ cv}$), respectivamente. A Figura 5 mostra o equipamento.



Figura 5 – Vistas do dinamômetro de bancada e motor em montagem para testes.

Na parte inferior da Figura 5-A se vê o trocador de calor água/água, do tipo casco-tubo, responsável por transferir o calor da água do sistema de arrefecimento para a água de uma torre. O dinamômetro conta com um controlador que regula a vazão da água da torre para o trocador de calor, de modo a manter uma temperatura estável da água do bloco, sempre no valor nominal especificado pelo fabricante. Para permitir esse modo de controle da temperatura, a válvula termostática do motor foi retirada, de forma que a água de arrefecimento circulasse livremente pelo trocador.

O arrefecimento do ar de combustão do motor foi realizado através de um trocador de calor água/ar, instalado entre o compressor e coletor de admissão. Por esse trocador também passa água da torre de resfriamento, mas, neste caso, sem sistema para controle de vazão (ver Figura 7).

Com relação à temperatura de óleo lubrificante não foi feito nenhum controle da mesma, embora o banco de ensaios disponha de um trocador de calor água/óleo para esse fim. Neste trabalho os ensaios sempre foram realizados garantindo um valor representativo da temperatura nominal. Além de monitorada, a temperatura do óleo foi também registrada para os diferentes pontos ensaiados.

A Figura 6 ilustra o medidor de vazão de tipo laminar da marca MERIAM, modelo 50MC2-4, utilizado na determinação do consumo de ar de combustão. Tal equipamento é constituído internamente por uma matriz de tubos capilares, que possuem diâmetro muito inferior ao comprimento, os quais têm a missão de induzir o ar de admissão para o regime laminar. Dessa forma, a vazão do fluido apresenta uma relação quase linear com a diferença de pressão medida entre a

entrada e a saída do equipamento. As tomadas de pressão do medidor aparecem na parte superior esquerda desta figura.

Para garantir o funcionamento adequado do medidor de vazão laminar, são instalados tubos retos a montante e a jusante do equipamento, cujos comprimentos correspondem, respectivamente, a 10 e 5 vezes do valor do diâmetro de entrada/saída do medidor.

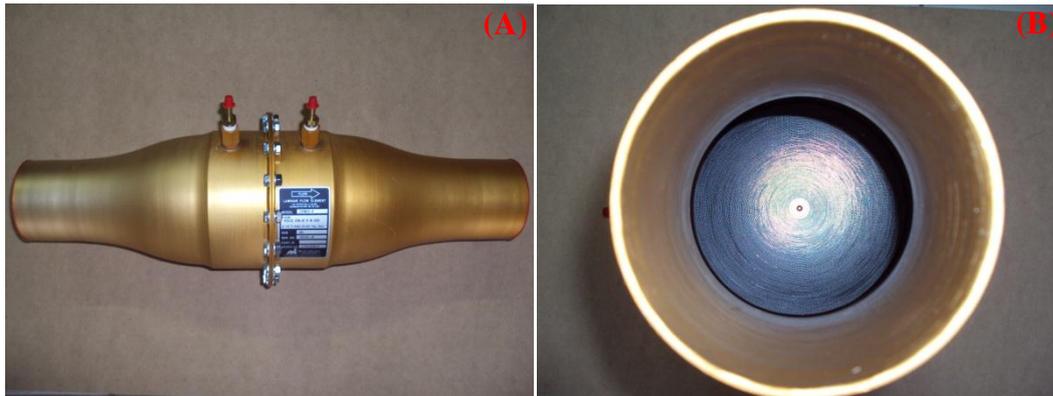


Figura 6 – Medidor de tipo laminar utilizado nas medidas do consumo de ar.

Para efeitos da restrição parcial do ar foi utilizada uma válvula do tipo gaveta, instalada entre o coletor de admissão e o trocador de calor água/ar (ver Figura 7). Adicionalmente, foi instalado um transdutor de pressão absoluta no coletor, com o intuito de monitorar a pressão do ar após restrição.



Figura 7 – Instalação da válvula manual usada na restrição do ar.

O consumo de óleo diesel foi medido usando uma balança AVL, modelo 733S (Figura 15-A). Nesta existe um reservatório de combustível (Figura 15-B), suspenso por célula de carga que constantemente monitora sua massa. As linhas de fornecimento e retorno de combustível são conectadas ao reservatório, de modo que sua célula de carga registra apenas o consumo mássico efetivo do motor em teste. A balança opera em conjunto com o software de controle e aquisição de dados da bancada dinamométrica, enviando a este os valores médios do consumo a cada 0,25 segundos, aproximadamente. Quando o reservatório de combustível encontra-se quase vazio, o controle da balança interrompe a medida e enche seu reservatório com um novo volume de combustível armazenado nos tanques do laboratório.



Figura 8 - Balança de combustível utilizada na medição do consumo de óleo diesel.

A Figura 9 mostra o medidor de vazão de tipo Coriolis da marca MICRO MOTION, modelo CMF010, utilizado nas medições de consumo instantâneo de etanol hidratado e do gás natural. Basicamente, esse equipamento possui dois componentes: o sensor (composto por um ou dois tubos vibrantes em forma de U) e o transmissor eletrônico. Quando o combustível passa pelo tubo, o efeito Coriolis ocorre, causando uma inclinação no tubo durante sua vibração. Esta inclinação é medida através de detectores de posição, que enviam sinais elétricos não padronizados para o transmissor, onde é gerado um sinal elétrico padrão, proporcional à vazão mássica instantânea que circula pelo tubo. Nas linhas de fornecimento dos combustíveis alternativos, as conexões dos medidores de

Coriolis foram feitas através de mangueiras flexíveis, já que, normalmente, não há imposições acerca de trechos retos a montante e a jusante desse equipamento.

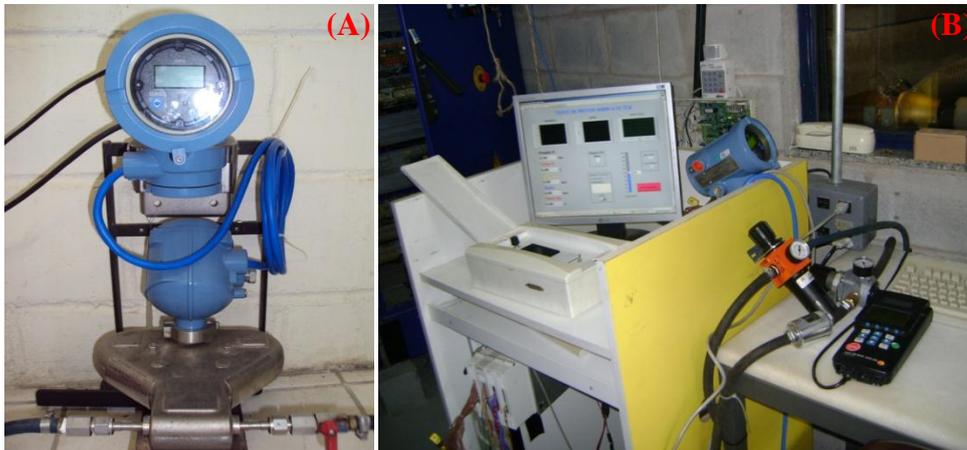


Figura 9 – Medidores de vazão tipo Coriolis e reguladores de pressão (lado B) utilizados no controle e medição da vazão de etanol e gás natural.

A Figura 10 mostra algumas vistas do *Smoke Meter* de fabricação AVL, modelo 415S, usado nas medidas da concentração de particulados nos gases de escape. Este equipamento possui uma bomba de diafragma que faz passar, através de um filtro de papel (Figura 17-B), uma amostra (de volume variável padronizado) de gases coletados na linha de escape. Através da quantidade de luz refletida no filtro escurecido o equipamento fornece uma leitura, indireta, da concentração de material particulado nos gases de escape.



Figura 10 – *Smoke Meter* e ponto de amostragem no escapamento.

As concentrações dos poluentes gasosos no escape do motor (HC, CO e NO e NO₂) foram determinadas por meio de um sistema portátil fabricado pela TESTO, modelo 350 XL (ver Figura 11). Este equipamento possui uma bomba de deslocamento positivo que faz passar, através de um sistema de condicionamento (câmara de refrigeração do tipo *peltier*), uma amostra de gases colhidos no escapamento. A súbita diminuição da temperatura leva a água presente na amostra a condensar imediatamente. Esse condensado, com baixa absorção de NO₂ e SO₂, é constantemente removido do interior do resfriador por uma bomba peristáltica. Após esse período de resfriamento, a mistura gasosa passa através de dois filtros de particulados dispostos em série e, em seguida, é conduzido aos sensores eletroquímicos que medem CO, NO e NO₂ (onde se originam reações espontâneas de oxidação e redução) e ao sensor catalítico que mede HC (onde se originam oxidações forçadas), das quais resulta uma corrente elétrica proporcional à concentração dos respectivos gases em base seca (Figura 18-B).

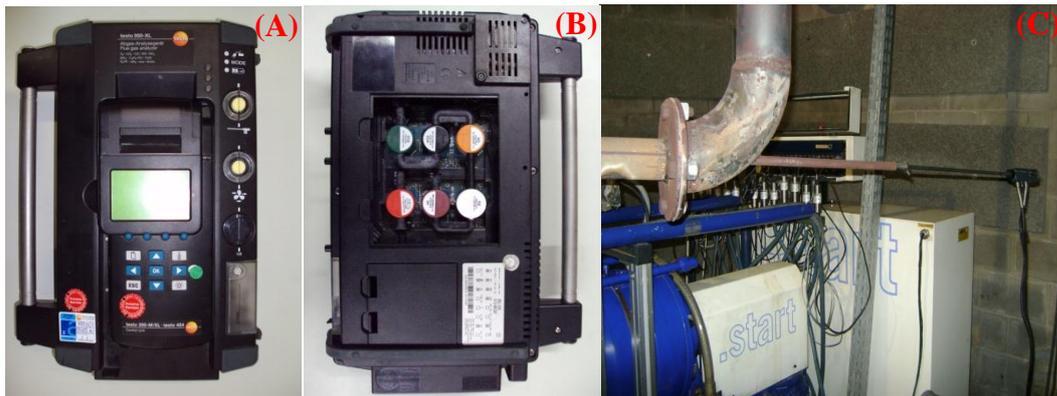


Figura 11 – Equipamento portátil Testo e ponto de amostragem no escapamento.

Um transdutor de pressão piezoelétrico da AVL, modelo GU13P, com capacidade para medir pressões dinâmicas de até 200 *bar* foi instalado no cabeçote do cilindro número 4 do motor sob teste. Como a saída do transdutor piezoelétrico é uma carga elétrica, é necessário que o sinal passe por um amplificador, onde é convertido em um sinal de tensão amplificada. Depois, o sinal é digitalizado e coletado no INDIMETER 619 da AVL, conforme mostrado nas Figuras 19 e 20.

O transdutor de posição angular utilizado na montagem experimental é um *pick-up* do tipo indutivo que gera um pulso de tensão para cada dente da roda

dentada, instalada no eixo do motor. A roda possui 60 dentes, sendo que 2 são vagos para efeitos de sincronização. O transdutor é ligado no INDIMETER 619, para que o mesmo tenha uma referência de posição na leitura de pressão. Esse equipamento, por sua vez, multiplica o número de pulsos de modo a se ter uma resolução de 1 *grau* do eixo do virabrequim.

Para cada condição analisada, o sistema de aquisição foi programado para adquirir 200 ciclos do motor e calcular o valor médio representativo da pressão em cada grau da rotação do virabrequim.

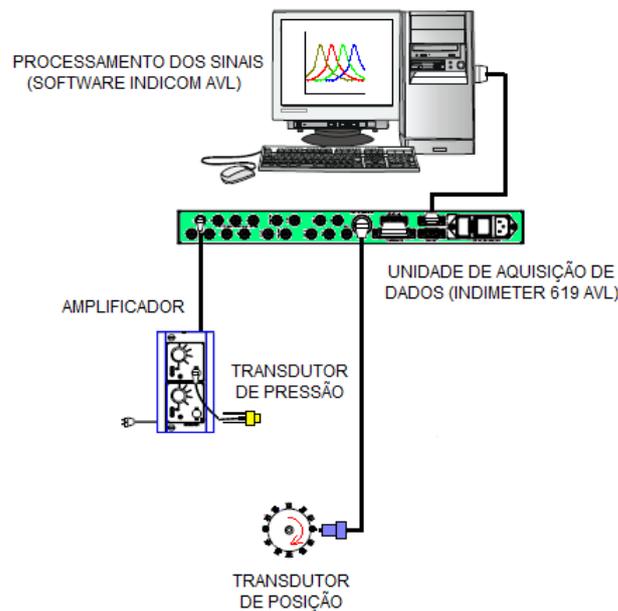


Figura 12 – Esquema experimental para medição da pressão no cilindro.

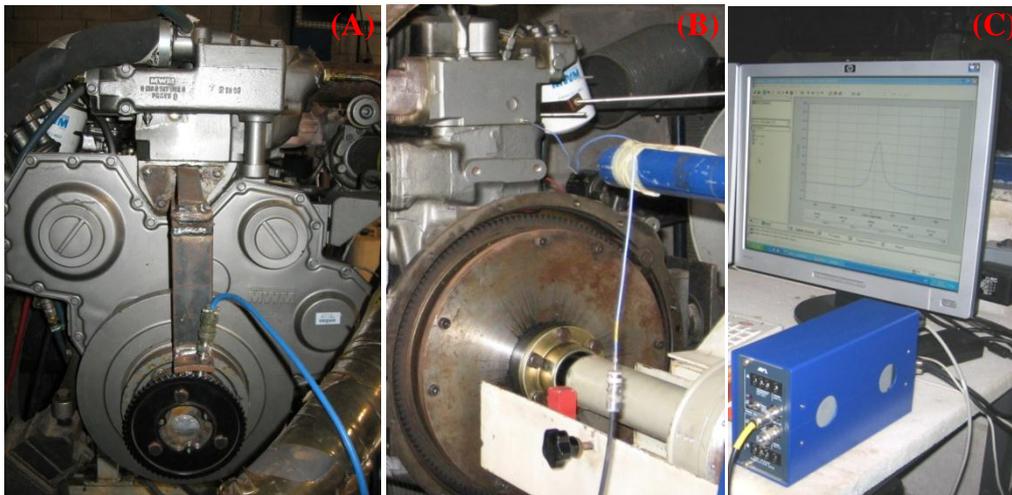


Figura 13 – Instrumentação usada para medição da pressão no cilindro.

É importante frisar que, para efeito de análise termodinâmica, as leituras do transdutor piezoelétrico foram referenciadas para pressão absoluta, utilizando-se um transdutor piezoresistivo instalado no coletor de admissão do motor. Para isso, o procedimento utilizado considerou que a pressão no cilindro correspondente à posição do *PMI* (no final do curso de admissão) foi igual ao valor médio da pressão absoluta no coletor. Isso se justifica porque nesse instante do ciclo o pistão encontra-se praticamente parado, a válvula de escapamento fechada e a válvula de admissão aberta (ver Tabela 1). Por essa razão, nesse instante, a pressão média do coletor de admissão é uma estimativa precisa da pressão absoluta no cilindro. Contudo, o fator de ajuste da pressão foi calculado considerando-se um intervalo de medição igual a 5° (iniciando no *PMI*), a fim de reduzir os possíveis efeitos do ruído na medição. Definido o fator de ajuste da pressão, nesse intervalo angular, o mesmo foi usado para estimar as pressões absolutas em cada grau do ciclo representativo, a partir das respectivas pressões dinâmicas.

Todos os transdutores piezoresistivos instalados em diversos pontos do motor eram de fabricação SENSOTEC (série FP 2000). Já os termopares e o transdutor de umidade atmosférica foram fabricados pela OMEGA. Todos os termopares empregados eram do tipo K.

3.2. Procedimento experimental

Para execução dos ensaios não se adotou nenhum critério rígido na definição dos pares torque x rotação a serem avaliados no modo bicomcombustível. Procurou-se selecionar apenas rotações intermediárias cujo máximo torque estivesse entre 90 e 100% do máximo verificado no motor (430 Nm), para facilitar a análise comparativa entre as cargas semelhantes (em termos de pressão média efetiva) das diferentes rotações. Sendo assim, foram definidos 12 pontos experimentais, constituídos por três rotações (1.600, 1.800 e 2.200 rpm) e quatro condições de torque correspondentes a 30, 50, 75 e 100% do máximo verificado em uma dada rotação, no funcionamento Diesel original. Em cada ponto de operação eram avaliadas diferentes percentagens de substituição de óleo diesel pelo etanol (ou gás natural), vários níveis de restrição parcial do ar de admissão e até quatro posições do avanço da injeção de óleo diesel. Por conseguinte, foram levantadas, do motor testado em dinamômetro de bancada, aproximadamente 30.000 valores médios das variáveis de interesse, sem considerar os dados correspondentes à pressão no interior do cilindro.

Com o motor aquecido, ou seja, com as temperaturas da água de arrefecimento e do óleo lubrificante estabilizadas em torno de seus valores nominais (85 e 100 °C, respectivamente) dava-se início aos ensaios. Durante uma série típica de medidas ajustava-se o dinamômetro para operar o motor, consumindo apenas óleo diesel, sob um dado par torque x rotação. Aguardava-se algum tempo de modo a obter uma operação em regime permanente e, então, efetuava-se o registro dos parâmetros de interesse, correspondentes ao modo Diesel original. Passava-se, então, à operação no modo bicomcombustível, com o motor consumindo simultaneamente óleo diesel e etanol (ou gás natural).

Aumentando lentamente a vazão do combustível alternativo, sobre o qual o controle do dinamômetro não atuava, o motor em teste tendia a ter seu torque (e/ou rotação) aumentado. Assim, o sistema de controle, ao retornar o motor para o par torque x rotação programado, reduzia a vazão de óleo diesel por meio da atuação no acelerador. A vazão do combustível alternativo era lentamente aumentada, sempre dando tempo suficiente ao controlador do freio para reduzir o débito de óleo diesel sem que o motor, neste processo, se afastasse drasticamente

do ponto de operação ajustado. Seguiu-se aumentado, sempre gradualmente, a substituição de óleo diesel até que se notasse alguma anomalia no funcionamento do motor. Em baixas cargas, normalmente se verificava falha na combustão, com fortes flutuações do torque, rotação e pressão no interior do cilindro. Em cargas elevadas, interrompia-se o fornecimento do combustível alternativo ao notar um elevado aumento no pico da pressão de combustão, e verificar, por vezes, a presença da detonação. Cabe mencionar também que, devido a problemas no sistema de refrigeração do dinamômetro, limitou-se, por vezes, a máxima taxa de substituição Diesel/gás. Sendo assim, registravam-se, pouco antes dessas condições limite, todos os parâmetros necessários à redução de dados.

Tendo determinado a máxima vazão de combustível alternativo admissível para um dado par torque x rotação, prosseguiram-se os ensaios, ainda no mesmo ponto de operação, diminuindo-se a injeção de etanol (ou gás natural) para frações da máxima vazão. Com esse procedimento buscava-se registrar as características operacionais do motor utilizando substituições intermediárias de óleo diesel, i.e., entre o modo Diesel original e o modo bicomcombustível com máxima substituição.

Na última fase dos ensaios, relativo ao par torque x rotação pré-estabelecido, o motor voltava a operar no modo bicomcombustível, tentando manter a máxima substituição previamente atingida. Nessas condições, a restrição do ar era efetuada pausadamente até se notar um funcionamento anormal do motor. Nas distintas cargas avaliadas, comumente se notava falhas na ignição (identificadas através das curvas da pressão no cilindro), diminuição do torque, maior emissão de particulados e vibração excessiva do motor. Dessa forma, pouco antes de alcançar esse limite operacional, a aquisição de dados era realizada. Determinado o ajuste da máxima restrição parcial do ar tolerada pelo motor, registravam-se ainda as variáveis de interesse utilizando os diferentes percentuais da substituição de óleo diesel. Seguidamente, diminuía-se o ajuste da máxima restrição, a fim de se efetuar a coleta de dados no modo bicomcombustível operando com diferentes restrições intermediárias do ar de admissão.

Essa sequência de ensaios, descrita anteriormente, era realizada para os diferentes pares torque x rotação. No modo bicomcombustível, o etanol era inicialmente utilizado na fase do mapeamento, posteriormente o gás natural. Cabe aqui mencionar que a restrição parcial do ar avaliou-se amplamente no modo Diesel/gás, enquanto no modo Diesel/etanol essa técnica somente era efetuada em

determinados pontos de operação, conforme será detalhado mais adiante, no capítulo de resultados e discussões.

Terminada a etapa do mapeamento bicombustível, empregando etanol e gás natural, passava-se para um novo ajuste do início da injeção do diesel (avanço da injeção) e, imediatamente, repetia-se o procedimento anterior.