

4

Procedimento Experimental e Redução de Dados

O objetivo deste capítulo é descrever o equacionamento utilizado para obtenção dos parâmetros de desempenho. A finalidade é gerar os resultados conforme mencionados no objetivo do Capítulo 1. Ressaltam-se, também, os dados técnicos do motor utilizado e os equipamentos relevantes para captura dos dados. Algumas definições são retratadas no que diz respeito ao equacionamento da geometria do conjunto cilindro-pistão.

Cabe destacar que os ensaios do motor foram realizados na bancada dinamométrica localizada no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (ver Figura 5).



Figura 5: Bancada dinamométrica PUC-Rio

4.1.Motor Diesel

Os testes foram realizados em um motor do ciclo Diesel de quatro tempos, da marca MWM, modelo 4.10 TCA. Como mencionado anteriormente o motor possui turbocompressor e *intercooler*. Vale destacar, como observado na Figura 6, que o motor foi instrumentado para medição de vários outros parâmetros. No entanto, o destaque será dado para com o objetivo do trabalho, conforme item detalhado mais adiante no subcapítulo 4.3.



Figura 6: Motor Diesel MWM

Abaixo, seguem os dados técnicos do motor.

Tabela 3: Ficha técnica do motor

Dados	
Fabricante / Modelo	MWM 4.10 TCA
Aspiração	Turbo Aftercooler
Ciclo de Funcionamento	4 tempos
Número de cilindros e disposição	4 em linha
Cilindrada Total	4.3 litros
Diâmetro x Curso	103 x 129 mm
Sistema de Injeção	Mecânico
Razão de Compressão	15,8:1
Potência Máxima	107 kW (145 cv)
Rotação de Potência Máxima	2600 rpm
Torque Máximo	500 Nm
Rotação de Torque Máximo	1600 rpm
Peso Seco	380 kg
Início da Injeção	9°
Abertura da Válvula de Admissão	3°
Fechamento da Válvula de Admissão	23°
Abertura da Válvula de Escape	33°
Fechamento da Válvula de Escape	1°

4.2.Pressão no Interior da Câmara

O monitoramento e controle do comportamento da pressão no interior do cilindro foram possibilitados através do transdutor de pressão da marca AVL modelo GU13P instalado no cilindro um do motor. Com este instrumento foi possível observar a curva de pressão dinâmica no interior da câmara de combustão para diversas faixas de operação. O transdutor serviu também como um critério importante de análise na operação anormal do motor quando se aumentava a taxa de substituição.

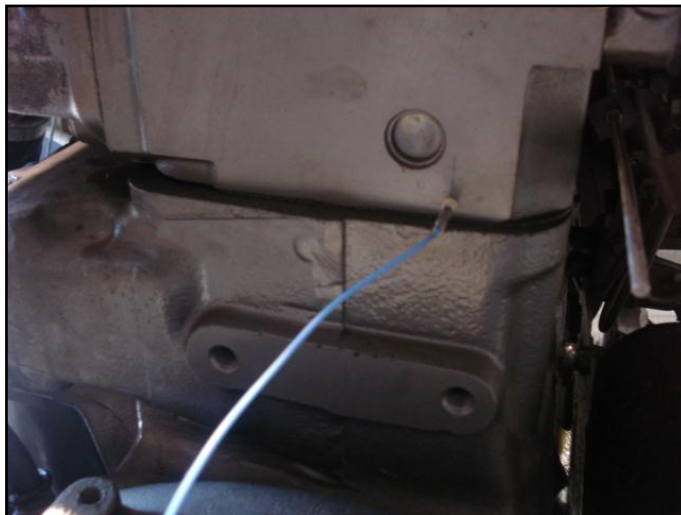


Figura 7: Transdutor de pressão

4.3. Softwares de Controle

Este software, Star da AVL, possui interface com a plataforma *Windows*, instalado no computador dedicado para a operação do dinamômetro. A finalidade do software foi controlar:

- Torque e rotação do motor;
- Consumo de óleo Diesel pelo atuador eletrônico integrado na haste da bomba de injeção;
- Sinais dos sensores instalados (instrumentos de medição de pressão e temperatura);

Ressalta-se, a utilização do software INDICOM para monitorar e gravar os dados de pressão no interior do cilindro. Cabe mencionar que através da curva de pressão obtida pelo software foi possível observar qualquer operação anormal do motor.

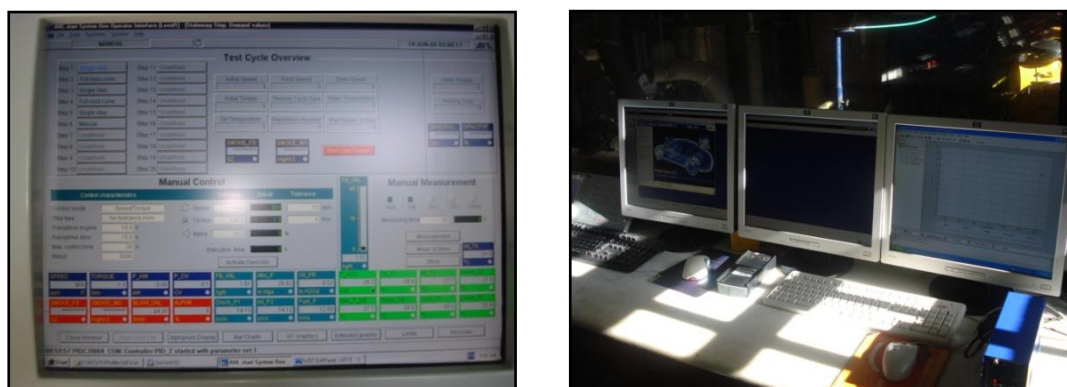


Figura 8: Star da AVL e software de controle PUMA

Para o software INIDICOM foi instalado um sensor de rotação ao volante do motor, sendo também, conectado ao hardware do sistema de aquisição com o objetivo de capturar os dados para análise. Este sensor forneceu a relação pressão na câmara por ângulo do virabrequim.

4.4. Injeção de Álcool

Este sistema opera isoladamente da injeção de diesel, possibilitando assim, a operação do motor nos dois modos de operação propostos para o presente trabalho. Foi utilizado como reservatório de álcool, um tambor com ar comprimido. Com o objetivo de injetar álcool no coletor de admissão do motor, o reservatório foi pressurizado, e o mesmo era comandado por um controlador eletrônico. A pressão era controlada por um regulador de pressão fixo à parede do laboratório.



Figura 9: Controlado Eletrônico

4.5. Smoke Meter

Este instrumento, da marca AVL, modelo 415s foi utilizado com intuito de medir a emissão de material particulado dos gases de escape. O instrumento é capaz através de feixes de luz medir a quantidade de particulado por unidade de volume, após colher amostras contidas nos gases de exaustão. O desvio padrão das medidas em FSN (*filter smoke number*) é: $\sigma \leq \pm (0,005 \text{ FSN} + 3\% \text{ do valor medido})$. Vale destacar que o FSN indica o grau de fumaça que está entre 0 a 10 que “suja (cor preta)” o filtro de papel branco.

4.6. TESTO

O equipamento da marca TESTO, modelo 350 XL (Figura 9) foi utilizado para medir a concentração de poluentes gasosos presentes na exaustão, como óxido de nitrogênio e hidrocarbonetos. Para a medição do óxido de nitrogênio a faixa de medição do equipamento é de 0-3.000 ppm, com resolução mínima de 1 ppm. A incerteza do valor medido é: $\pm 10\%$ ppm (0-99 ppm) e $\pm 5\%$ ppm (100-2.000 ppm). Já para os hidrocarbonetos a faixa de medição está entre 100-40.000 ppm, com resolução mínima de 10 ppm. A incerteza do valor medido é: < 400 ppm (100-4.000 ppm) e $\pm 10\%$ (> 4.000 ppm).



Figura 10: Equipamento de medição de poluentes

4.7. Potência

A expressão abaixo fornece a potência líquida do eixo fornecida pelo motor, conhecida também como potência de freio, absorvida pelo dinamômetro. A expressão baseia-se no produto do torque pela velocidade angular.

$$P = \frac{T \times 2\pi \times N \times 0,001}{60} \quad (29)$$

A potência líquida P é expressa em [kW], o torque T em [N.m] e a velocidade angular N em [rpm].

4.8. Rendimento Térmico

O rendimento térmico visa medir a eficiência do motor, considerando a energia química fornecida pelo(s) combustível (eis) e a potência do eixo.

Modo Diesel

$$\eta_{T,D} = \frac{P}{\dot{m}_D \times PCI_D} \times 100 = \frac{1}{cec_D \times PCI_D} \times 100, \quad (30)$$

onde: o rendimento térmico é expresso em [%] e o consumo de óleo Diesel em [g/h].

Modo Diesel-etanol

Para o modelo Diesel / etanol, o rendimento térmico é ressaltado pela energia equivalente.

$$\eta_{T,Da} = \frac{P}{\left(\dot{m}_D + \frac{PCI_e}{PCI_D} \times \dot{m}_e \right) PCI_D} \times 100 = \frac{P}{\dot{m}_D \times PCI_D + \dot{m}_e \times PCI_e} \times 100, \quad (31)$$

onde o rendimento térmico é expresso em [%] e o consumo de óleo Diesel juntamente com o consumo de etanol em [kg/s].

4.9. Consumo de Etanol

Os percentuais de massa específica e temperatura do etanol determinados a partir do aparelho Coriolis foram de 806 kg/m³ e 23°C, respectivamente em 93° INPM.

A finalidade neste item é corrigir a vazão de álcool obtendo a vazão de etanol através da porcentagem de álcool presente em 70 e 93,3° INPM, respectivamente:

$$\dot{m}_{e_{70}} = 0,700 \times \dot{m}_a \quad (32)$$

$$\dot{m}_{e_{93}} = 0,933 \times \dot{m}_a \quad (33)$$

O consumo de etanol $\dot{m}_e$ é expresso em [kg/h] e o consumo de AEHC $\dot{m}_a$ em [kg/h].

4.10. Consumo Específico de Combustível

Este tópico é destacado com objetivo de se ter uma boa perspectiva de como o motor está aproveitando o combustível para gerar trabalho útil.

Modo Diesel

A expressão abaixo fornece a razão entre o consumo de óleo Diesel e a potência líquida do eixo do motor.

$$cec_D = \frac{\dot{m}_D}{P} , \quad (34)$$

onde o consumo específico no modo Diesel cec_d é expresso em [g/kW.h], o consumo de óleo Diesel $\dot{m}_d$ em [g/h] e a potência líquida P em [kW].

Modo Diesel-etanol

O consumo específico de combustível é dado para o modo bicomcombustível pela razão entre o poder calorífico inferior de ambos os combustíveis:

$$cec_{De} = \frac{\dot{m}_D + \left(\frac{PCI_e}{PCI_D} \right) \times \dot{m}_e}{P} \quad (35)$$

O consumo é expresso em [g/kW. h], o poder calorífico inferior do etanol, PCI_e é dado (26865 kJ/kg), o poder calorífico do óleo Diesel PCI_D também é conhecido (42450 kJ/kg) e o consumo de etanol em [g/h].

4.11. Taxa de Substituição

Este parâmetro fornece o quanto de massa de óleo Diesel foi substituído pela de etanol.

$$TS_{De} = \left(1 - \frac{\dot{m}_D}{\dot{m}_{Dp}} \right) \times 100 \quad (36)$$

A taxa de substituição de óleo Diesel por álcool TS_{De} é expressa em [%] e o consumo de óleo Diesel puro $\dot{m}_{Dp}$, em [kg/h].

4.12. Trabalho Indicado

Este item tem por finalidade apresentar o procedimento da determinação do trabalho útil produzido pelo gás sobre o pistão. Este será realizado através dos dados de pressão no interior da câmara de combustão e o volume em determinada posição do ângulo virabrequim. Este trabalho é calculado pela área do gráfico (pressão por volume) gerada pelo método de integração.

$$W = \int P dV = \int P(\theta) dV(\theta) \approx \sum p_i(\theta) \left(\frac{V_{i+1}(\theta) + V_i}{2} \right) \quad (37)$$

4.13. Equações Geométricas

O objetivo é modelar a câmara de combustão através da sua geometria para aplicação na modelagem proposta no Capítulo 3. Deste modo, apresentam-se a seguir os parâmetros relevantes para tal:

Razão de Compressão

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad , \quad (38)$$

onde r_c é a razão de compressão do motor, V_d representa o volume de deslocamento do pistão e o V_c é o volume da câmara de combustão (espaço morto) do pistão. Ressalta-se que pela figura abaixo L é igual $2a$, representando o curso do pistão.

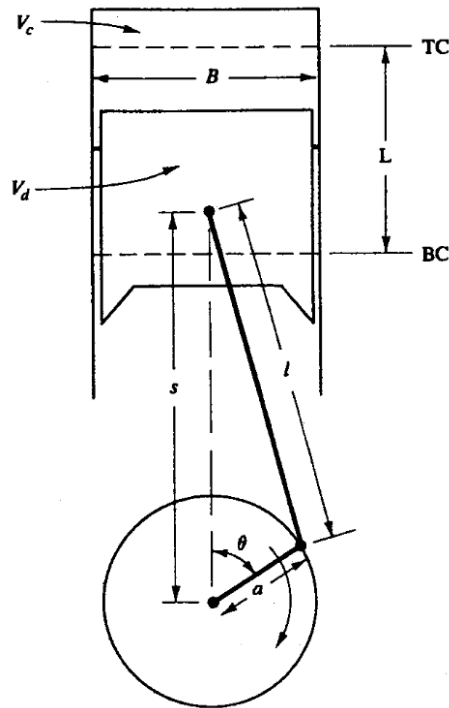


Figura 11: Conjunto cilindro-pistão (Heywood, 1988)

Distância entre o Eixo do Virabrequim e o Pino do Pistão

$$s = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (39)$$

onde a representa o raio do pistão, l o comprimento da biela e θ o ângulo em que o virabrequim se encontra.

Volume Instantâneo

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s), \quad (40)$$

onde $V(\theta)$ é o volume do pistão em uma determinada posição do ângulo virabrequim, V_c é o volume de folga (espaço morto) do pistão e B é o diâmetro do pistão.

Área de Troca de Calor pelas Paredes do Cilindro

$$A(\theta) = 2A_p + \frac{\pi BL}{4} \left(R + 1 - \cos \theta - \left(R^2 - \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (41)$$

onde $A(\theta)$ é área do cilindro para um determinado ângulo do virabrequim. Por desconhecimento da área superficial da parte superior do cilindro, esta foi aproximada como sendo a do pistão A_p , tendo $2\pi B^2/4$. R é definido como l/a .