

Motores Térmicos

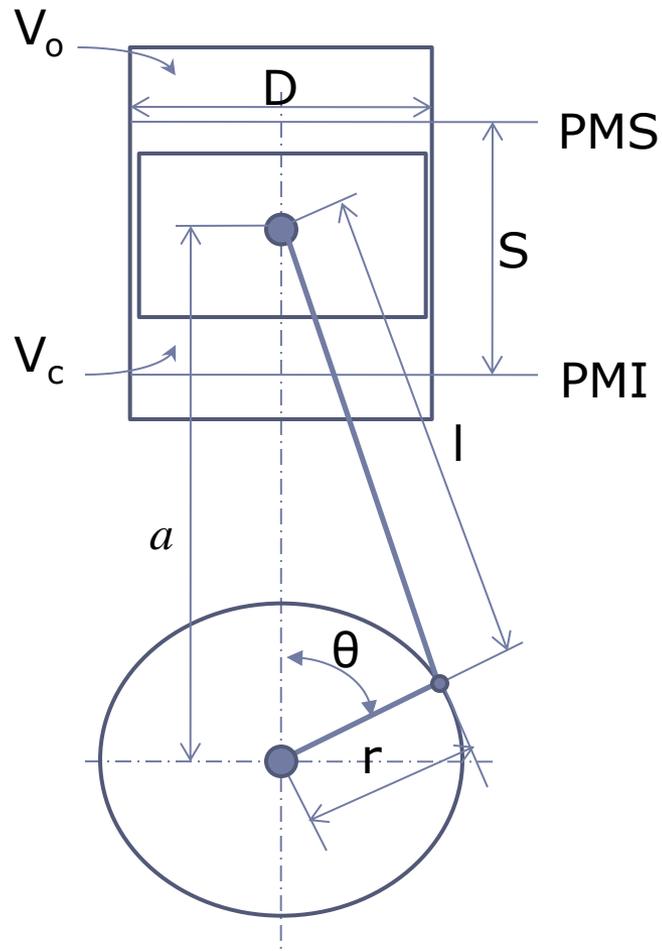
8° Semestre

4° ano

Aula 8 – Índices Característicos dos Motores de Combustão Interna

- ▶ Parâmetros Geométricos dos Motores;
- ▶ Momento Torsor e Potência;
- ▶ Trabalho Indicado por Ciclo;
- ▶ Rendimento Mecânico;
- ▶ Potência em Estrada;
- ▶ Pressão Média Efectiva;
- ▶ Consumo Específico de Combustível;
- ▶ Rendimento Térmico;
- ▶ Relações Ar/Combustível e Combustível/Ar;
- ▶ Rendimento Volumétrico;
- ▶ Peso e Volume Específicos do Motor;
- ▶ Factores de Correção Para a Potência e Rendimento Volumétrico;
- ▶ Emissões específicas e Índice de Emissões;
- ▶ Relação entre os Parâmetros de Desempenho.

8.1 Parâmetros Geométricas dos Motores



- D - Diâmetro do cilindro
- V_o - Volume do espaço morto
- V_d - Volume deslocado
- S - Curso do êmbolo
- l - Comprimento da biela
- r - Raio da cambota
- PMS - Ponto morto superior
- PMI - Ponto morto inferior
- a - Distância entre a cavilha do pistão e o eixo da cambota
- θ - Ângulo de rotação da cambota

8.1 Parâmetros Geométricas dos Motores

Taxa de Compressão

$$\varepsilon = \frac{\text{volume máximo do cilindro}}{\text{volume mínimo do cilindro}} = \frac{V_d + V_o}{V_o} = 1 + \frac{V_c}{V_o} \quad (8.1)$$

Relação entre o Diâmetro e o Curso

$$R_{dc} = \frac{D}{S} \quad (8.2)$$

Relação entre a Distância da Cavilha ao eixo da Cambota sobre o raio da cambota

$$R = \frac{a}{r} \quad (8.3)$$

8.1 Parâmetros Geométricas dos Motores

O curso e o raio da cambota estão relacionados por

$$S = 2 \cdot r \quad (8.4)$$

O Volume do Cilindro para qualquer ângulo da cambota é dado por

$$V = V_o + \frac{\pi D^2}{4} (l + r - a) \quad [\text{cm}^3] \quad (8.5)$$

O comprimento a calcula-se de:

$$a = r \cos \theta + (l^2 - r^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (8.6)$$

A Equação 8.5 pode ser rescrita como:

$$\frac{V}{V_o} = 1 + \frac{1}{2} (\varepsilon - 1) \left[R + 1 - \cos \theta - (R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right] \quad (8.7)$$

8.1 Parâmetros Geométricas dos Motores

A superfície da câmara de combustão para qualquer posição da cambota é dada por:

$$A = A_{cc} + A_p + \pi D(l + r - a) \quad [\text{m}^2] \quad (8.8)$$

Onde A_{cc} é a área da cabeça do cilindro e A_p a área do topo do pistão. Usando as Equações 8.6 e 8.8 pode-se escrever:

$$A = A_{cc} + A_p + \frac{\pi DS}{2} \left[R + 1 - \cos \theta - \left(R^2 - \sin^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (8.9)$$

A velocidade média do pistão pode-se obter de:

$$\bar{V}_p = 2SN \quad [\text{m/s}] \quad (8.10)$$

Onde N é a velocidade de rotação da cambota em Rotações Por Segundo

8.1 Parâmetros Geométricas dos Motores

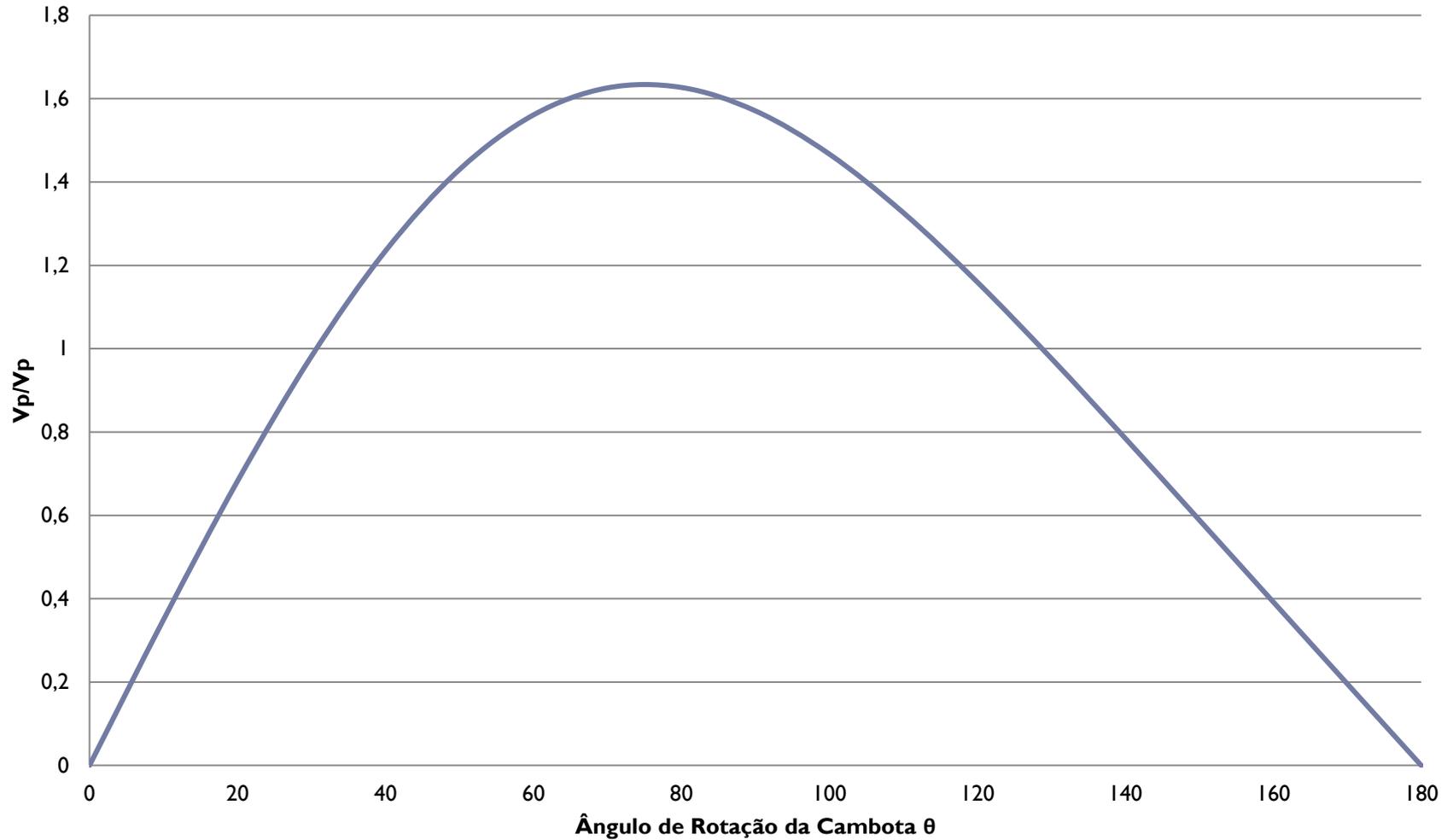
A velocidade instantânea do pistão é dada por

$$V_p = \frac{ds}{dt} \quad [\text{m/s}] \quad (8.11)$$

A velocidade do pistão é zero no início do curso, atinge o seu máximo perto do meio do curso e decresce até zero no fim do curso. Diferenciando a Equação 8.4 obtêm-se:

$$V_p = \frac{\pi}{2} \text{sen}\theta \left[1 + \frac{\cos\theta}{(R^2 - \sin^2\theta)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (8.12)$$

Velocidade média instantânea do Pistão

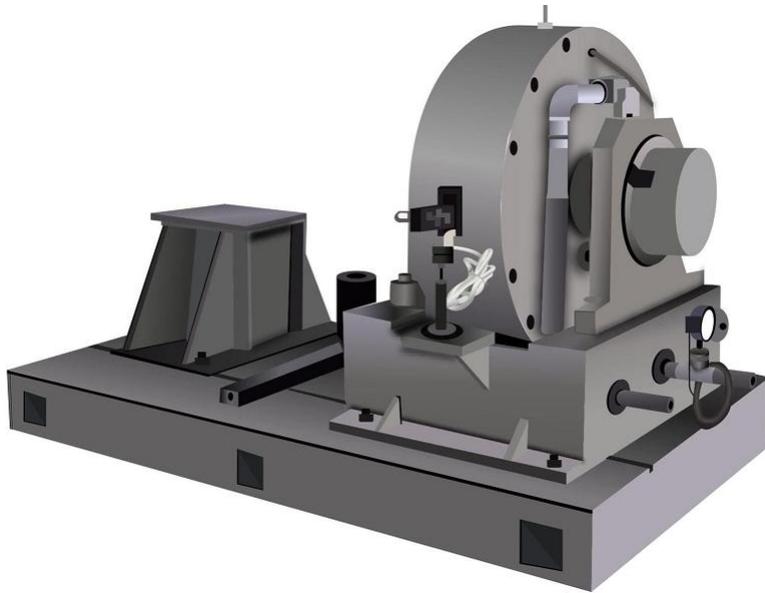


8.2 Momento Torsor e Potência

O momento torsor é normalmente medido por meio de dinamômetros. O motor é colocado na bancada de prova e a cambota é conectada ao rotor do dinamômetro. O rotor é ligado electromagneticamente, hidraulicamente ou por fricção mecanicamente ao estator.

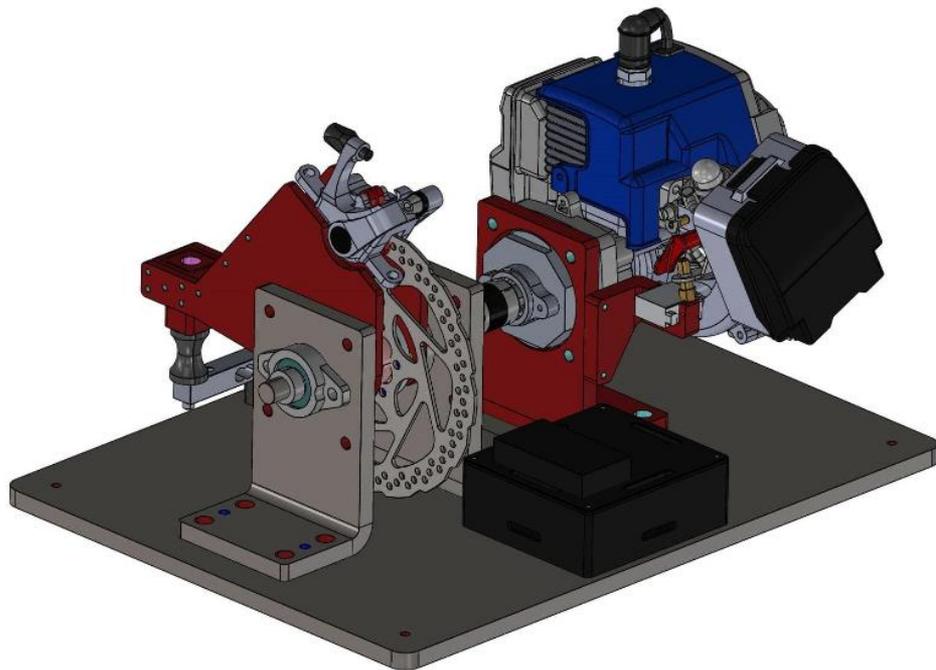


8.2.1 Dinamómetro de Eddy Corrente



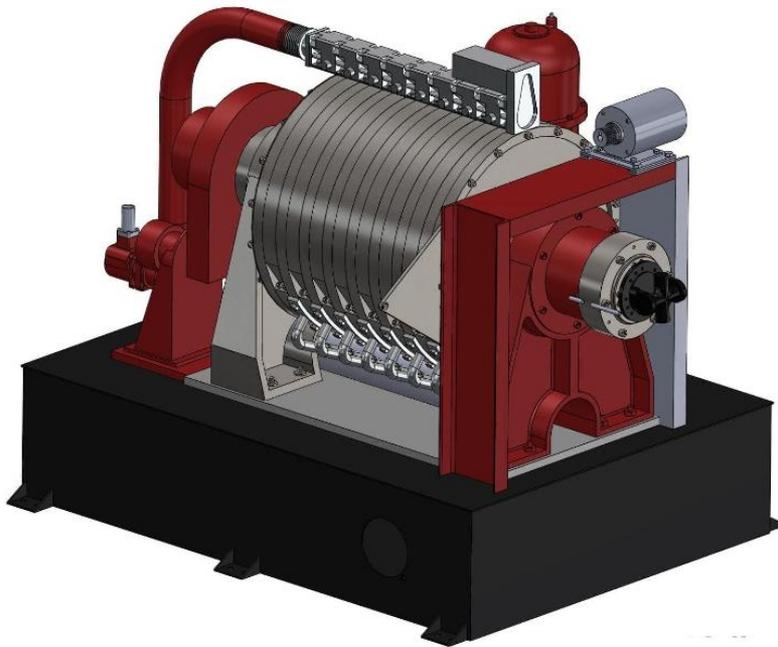
Esses tipos de dinamómetros usam um freio electromagnético para fazer a carga do motor. O dinamómetro a Eddy Corrente induz um campo magnético num disco giratório que cria uma carga. O disco rotativo produz calor, que depois é dissipado por ar ou água.

8.2.2 Dinamómetro de Corrente Alternada



Esses tipos de dinamómetros podem criar uma carga e retornar energia à rede eléctrica por meio de electrónica de potência regenerativa que usa frequências variáveis. O operador de um dinamómetro de corrente alterna pode receber pagamento da concessionária pela energia devolvida, nos casos em que é permitido.

8.2.3 Dinamómetro Hidráulico



Estes dinamómetros contam com um freio hidráulico capaz de converter a energia produzida pelo motor em calor transferido para a água que flui pelo dinamómetro.

Uma carga é criada no motor que está a ser testado usando a transferência de momento para a água com a água aquecendo devido a energia absorvida.

8.2.4 Dinamómetro Chassi

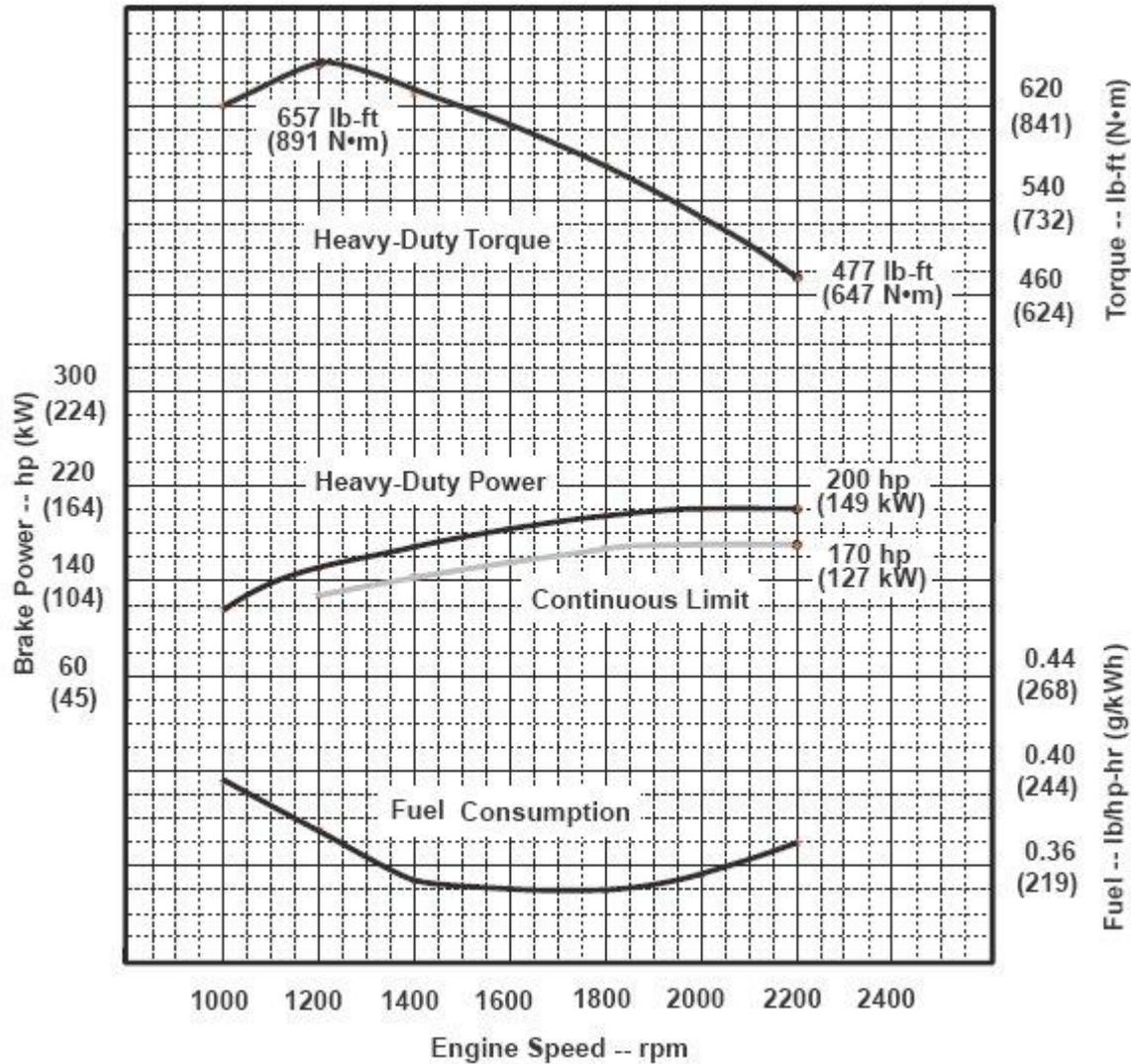


Um dinamómetro de chassi é um equipamento de teste equipado com rolos para as rodas de um veículo, capaz de fornecer como entrada a tracção e saída a medição da potência e torque nas rodas.

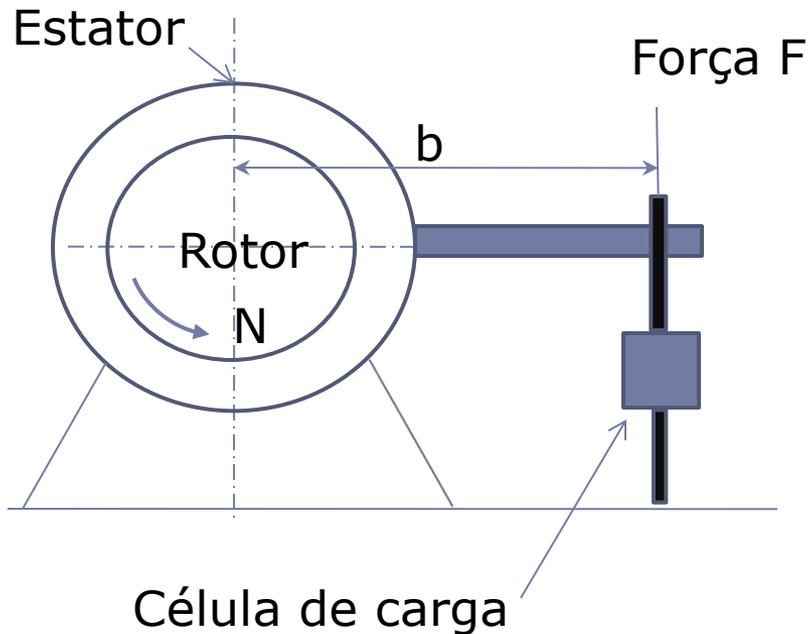
Dinamómetro



Curvas do Dinamômetro



8.2 Momento Torsor e Potência



- ▶ O torque que é exercido no estator com o rodar do rotor e transferido por meio do braço b a uma célula de carga a qual mede a força. Esta força multiplicada pelo braço dá o Momento Torsor.

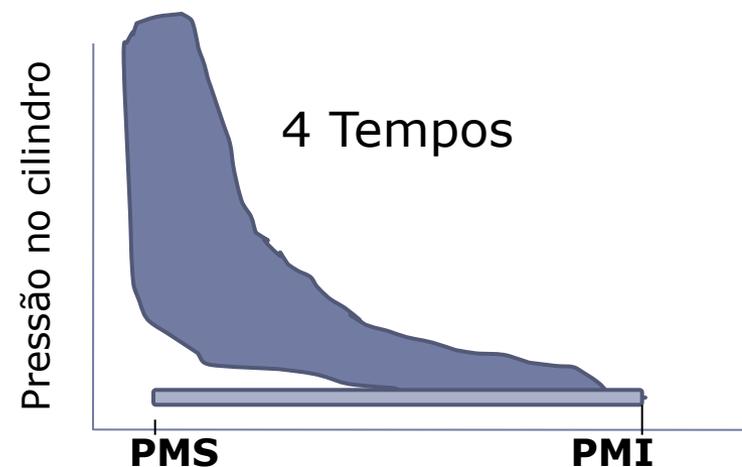
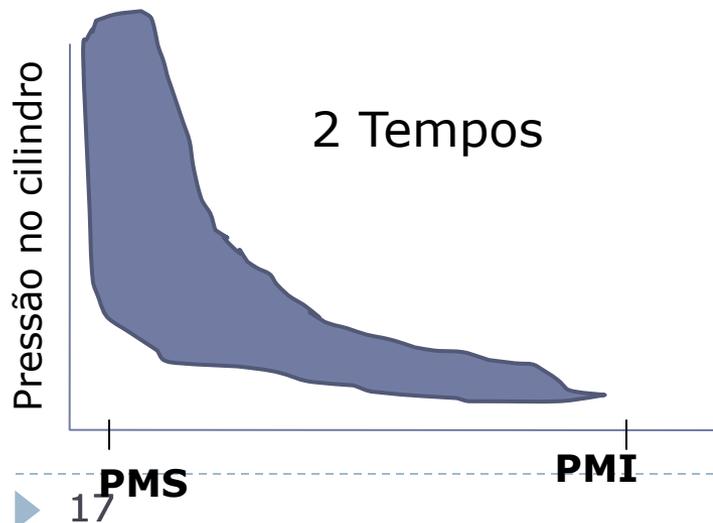
$$T = F \cdot b \quad [N \cdot m] \quad (8.13)$$

A potência é o produto do momento torsor pela velocidade angular do motor

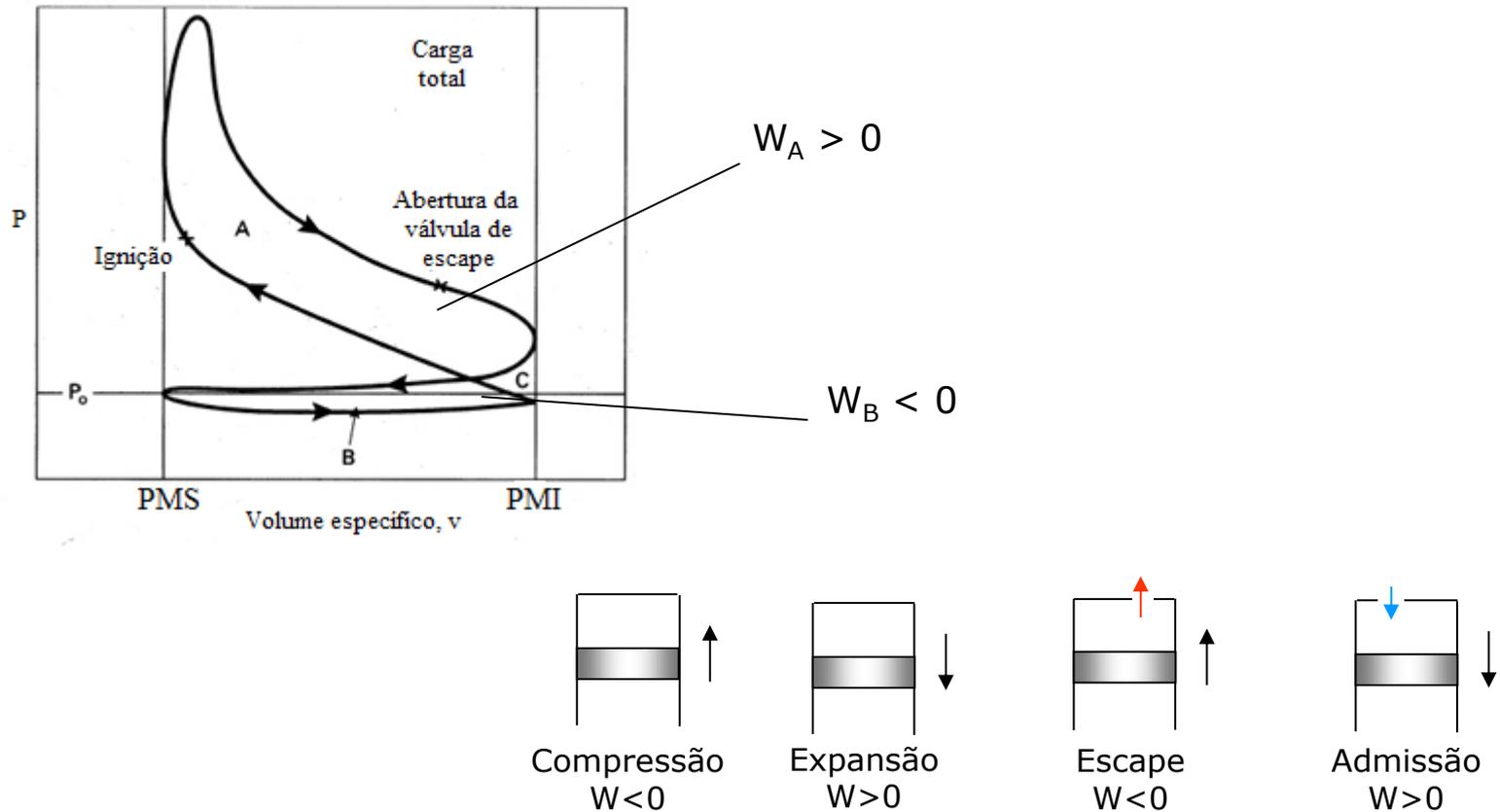
$$P = 2\pi NT \quad [W] \quad (8.14)$$

8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

Os dados de pressão no interior do cilindro durante a operação do motor podem ser usados para determinar o trabalho transferido do gás para o pistão. A pressão no cilindro e o correspondente volume do cilindro por ciclo pode ser *plotado* num diagrama pv. O trabalho indicado por ciclo e por cilindro pode ser determinado por meio de integração ao longo da curva para obter a área no interior do diagrama.



8.3 Trabalho Indicado por Ciclo



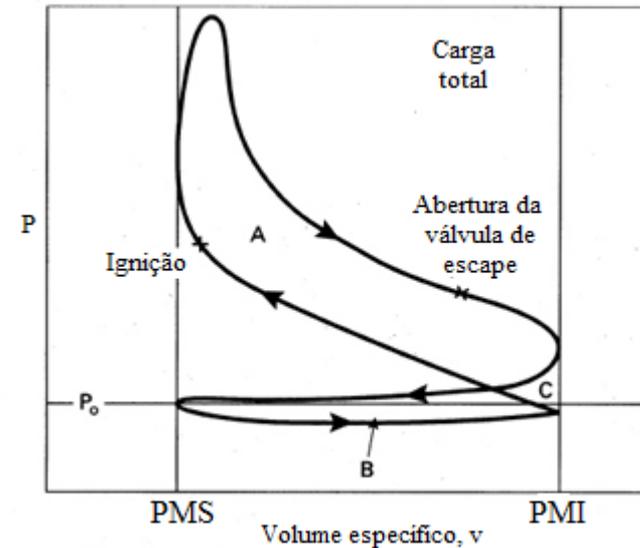
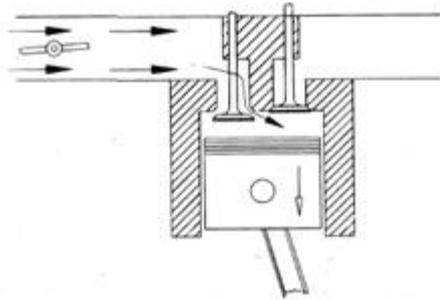
8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

$$W_{i,c} = \oint p dV \quad (8.15)$$

Para os ciclos de motores a dois tempos a fórmula anterior aplica-se directamente, enquanto que para os ciclos de motores a quatro tempos existem algumas ambiguidades que se devem esclarecer:

- O trabalho indicado bruto por ciclo $W_{i,cb}$ que é o trabalho fornecido ao pistão durante somente os tempos de compressão e explosão;
- O trabalho líquido indicado por ciclo $W_{i,c}$ que é o trabalho fornecido ao pistão ao longo dos quatro ciclos;
- Trabalho de bombagem W_{bc} que é o trabalho fornecido ao gás durante os períodos de admissão e escape.

8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

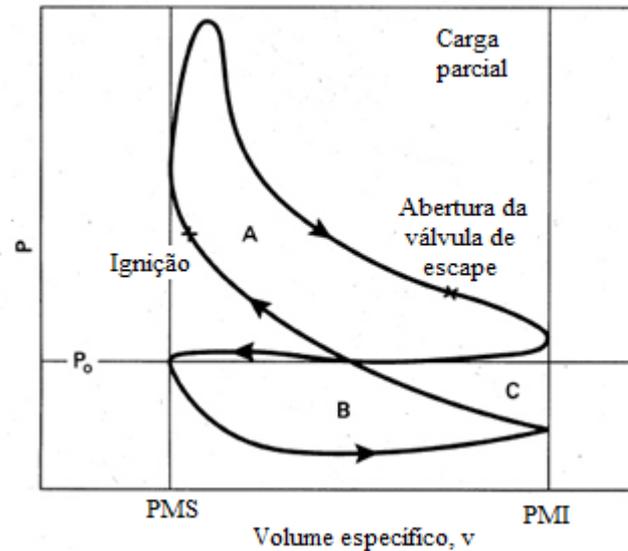
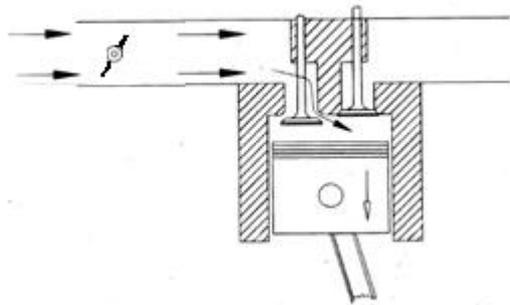


Trabalho indicado em carga total. A pressão junto à válvula de admissão é muito próxima da atmosférica.

O trabalho de bombagem (área B+C) é pequeno comparado com o trabalho indicado bruto por ciclo (área A+C).

$$W_{i,c} = W_{i,cb} - W_{bc} = \text{área A} - \text{área B} \quad (8.16)$$

8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

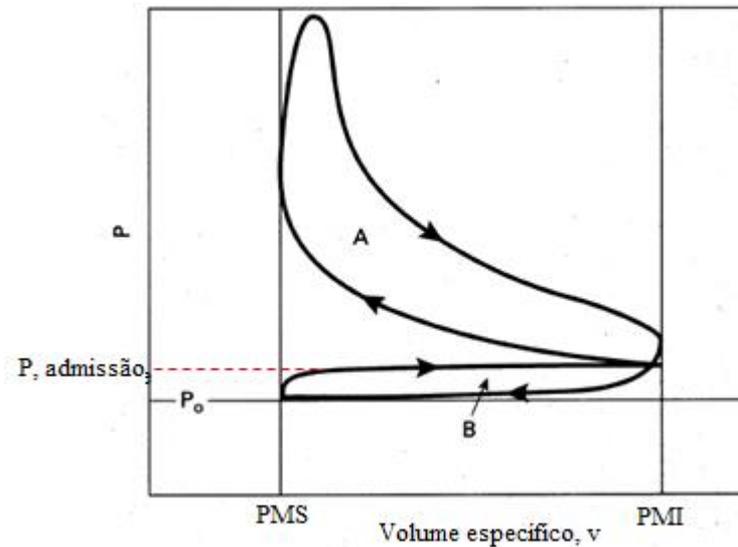
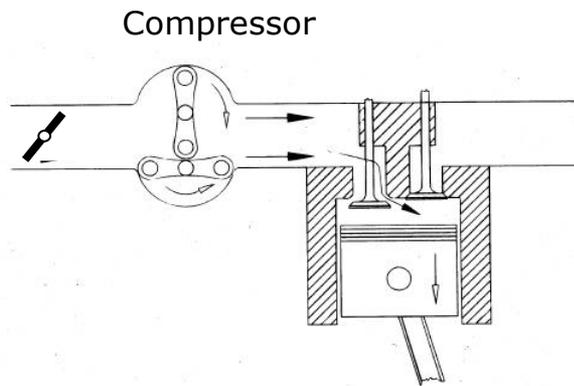


Trabalho indicado em carga parcial. A pressão junto à válvula de admissão é muito mais baixa que a atmosférica.

O trabalho de bombeamento (área B+C) é significativo quando comparado com o trabalho indicado bruto por ciclo (área A+C).

$$W_{i,c} = W_{i,cb} - W_{bc} = \text{área A} - \text{área B} \quad (8.17)$$

8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

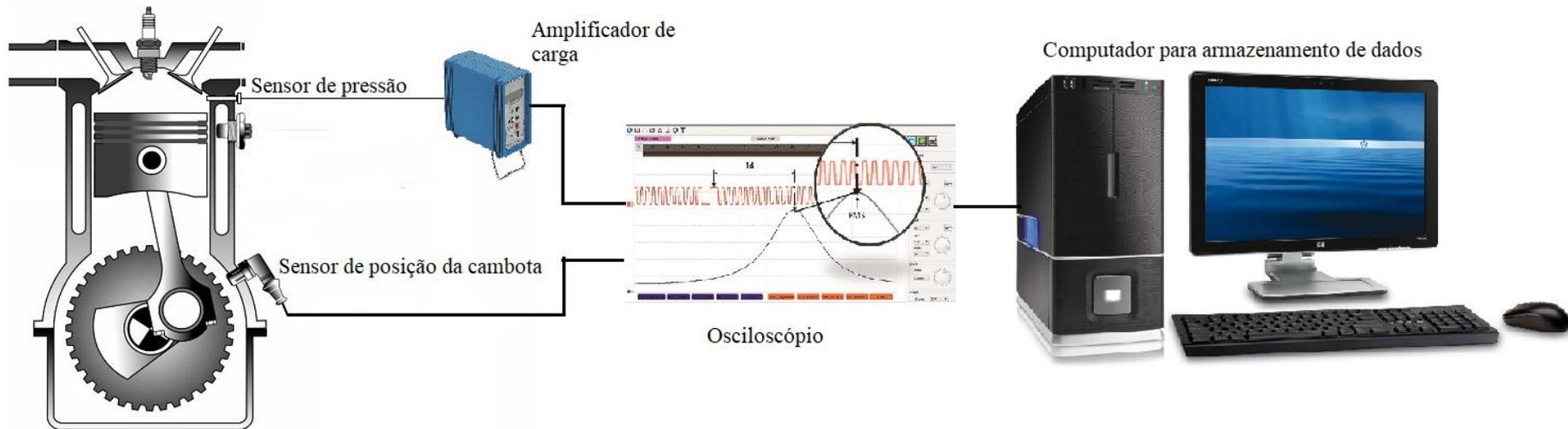


Trabalho indicado com sobrealimentação. Os motores com compressores ou turbocompressores possuem pressão de admissão maior que a de escape, produzindo trabalho de bombeamento positivo.

Os compressores aumentam o trabalho líquido indicado, mas são uma carga parasita se forem acionados pela cambota.

$$W_{i,c} = W_{i,cb} - W_{bc} = \text{área } A - \text{área } B \quad (8.18)$$

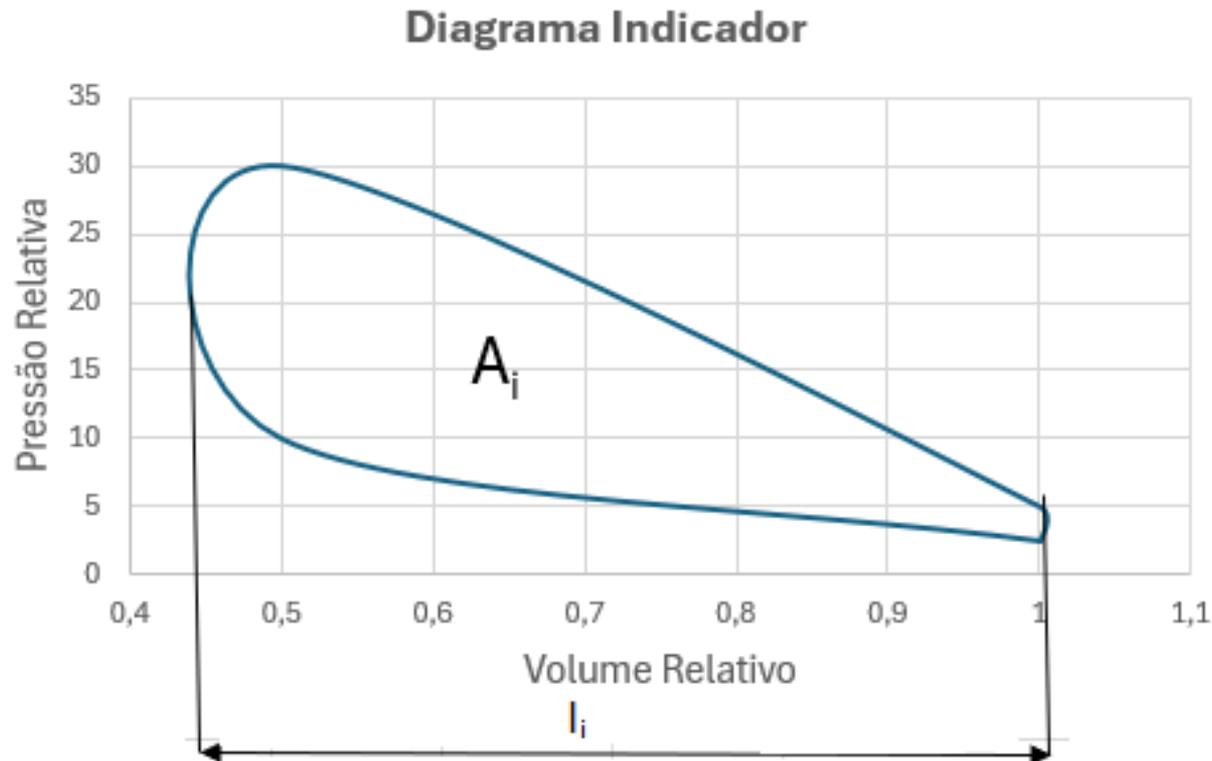
8.3 Trabalho Indicado por Ciclo



Aparato para a medição da Pressão Média Indicada



8.3 Trabalho Indicado por Ciclo



$$P_{mi} = \frac{A_i}{l_i \cdot f_i} [kPa] \quad (8.19)$$

Onde:

f_i – é o coeficiente de escala do instrumento de medição [mm/kPa]

A_i – área do diagrama [mm²]

l_i – comprimento do diagrama [mm]

8.3 Trabalho Indicado por Ciclo

A potência por cilindro relaciona-se com o trabalho indicado por ciclo pela seguinte expressão:

$$P_i = \frac{W_{i,c} \cdot N}{n_R} \quad (8.20)$$

Onde n_R é o número de rotações da cambota por cada curso de trabalho do êmbolo.

Para motor a quatro tempos, $n_R = 2$ enquanto que para o motor a dois tempos $n_R = 1$.

Esta potência indicada é a potência que os gases transmitem ao pistão e difere da potência indicada devido a fricção e a potência necessária para movimentar o equipamento auxiliar.

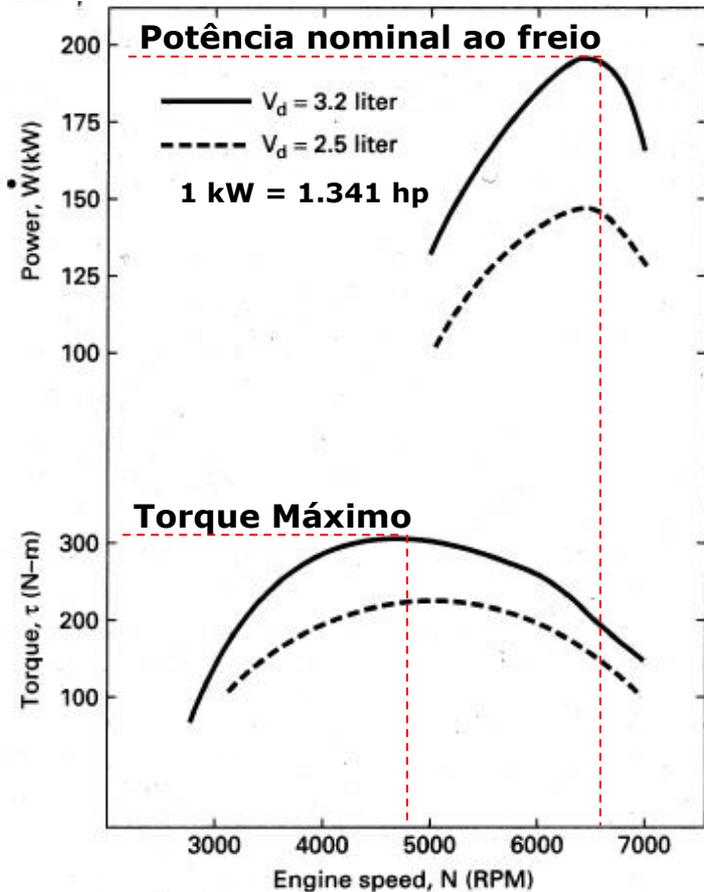
8.4 Rendimento Mecânico

Uma parte da potência bruta indicada por ciclo é usada para expelir e admitir os gases do cilindro, outra para vencer as resistências das paredes dos êmbolos nos cilindros, dos mancais e dos vários dispositivos auxiliares. Toda esta potência é agregada e denominada Potência de Fricção P_f

$$P_{ib} = P_f + P_v \quad (8.21)$$

Onde P_v é a potência no veio (cambota) e P_{ib} é a potência indicada bruta. A potência de fricção, geralmente determina-se fazendo rodar o motor através do dinamómetro sem estar a funcionar, mas a mesma temperatura normal de funcionamento.

8.4 Rendimento Mecânico



Há um limite máximo de potência ao freio em relação à velocidade do motor chamado Potência Nominal ao Freio (PNF).

A alta velocidade a potência ao freio diminui, a medida que a potência de fricção torna-se significativa em comparação com a potência indicada

$$P_v = P_{i,b} - P_f \quad (8.22)$$

Em função da velocidade existe um torque máximo chamado torque máximo ao freio (TMF).

O torque ao freio diminui:

- a baixas velocidades devido às perdas de calor;
- a altas velocidades, por tornar-se mais difícil encher por completo o cilindro.

8.4 Rendimento Mecânico

A razão entre a potência ao veio (potência útil) e a potência indicada é chamada de rendimento mecânico e determina-se da seguinte expressão:

$$\eta_m = \frac{P_v}{P_{ib}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ib}} \quad (8.23)$$

Como a potência de fricção inclui a potência necessária para a introdução e a retirada dos gases do cilindro, então esta potência depende da posição das válvulas que pode ser de um máximo de 90% a potência máxima até um mínimo de zero ao ralenti.

8.5 Potência em Estrada

A potência parcial é uma referencia para testar motores automotivos. É a potência necessária para conduzir um veiculo em estrada a uma velocidade constante. Esta potência chamada Potência em Estrada provem da fricção das rodas na estrada e da resistênci aerodinâmica do ar. A resistênci à rolagem das rodas e o coeficiente de arrasto são designados por C_R e C_D , respectivamente. A fórmula da potência em estrada toma o seguinte aspecto:

$$P_{estr} = \left(C_R \cdot M_v \cdot g + \frac{1}{2} r_a \cdot C_D \cdot A_v \cdot V^2 \right) \cdot V \quad (8.24)$$

8.5 Potência em Estrada

▶ Onde:

- ▶ M_v – é a massa do veículo com os passageiros (kg)
- ▶ g – aceleração da gravidade (m/s)
- ▶ ρ_a – densidade do ar ambiente (kg/m³)
- ▶ C_D – coeficiente de arrasto (para automóveis $0,3 < C_D \leq 0,5$)³
- ▶ C_R – coeficiente de fricção ($0,012 < C_R < 0,015$)³
- ▶ A_v – área frontal do veículo (m²)
- ▶ V – velocidade do veículo (km/h)

▶ Assumindo estas unidades a fórmula transforma-se em:

$$P_{est} = \left[2,73 \cdot C_R \cdot M_v + 0,0126 \cdot C_D \cdot A_v \cdot V^2 \right] V \times 10^{-3} \quad [kW] \quad (8.25)$$

8.6 Pressão Média Efectiva

O torque é um parâmetro disponível para avaliar a capacidade de um motor realizar trabalho, mas depende do tamanho do motor. Um parâmetro mais usado para medir o desempenho de um motor é obtido dividindo o trabalho por ciclo pelo volume do cilindro deslocado por ciclo. O parâmetro assim obtido é designado Pressão Média Efectiva.

► Da Equação 8.20 tem-se:

$$W_{i,c} = \frac{P_i \cdot n_R}{N} \quad (8.26)$$

Onde n_R é o número de rotações da cambota por cada curso de trabalho

$$P_{me} = \frac{P_i \cdot n_R \times 10^{-3}}{V_d \cdot N} \quad [kPa] \quad (8.27)$$

8.6 Pressão Média Efectiva

Onde:

P_i – é a potência em (W)

V_d – é o volume deslocado (m^3)

N – velocidade de rotação da cambota (Rotações por segundo)

A Pressão Média Efectiva pode também ser calculada em termos de Torque:

$$P_{me} = \frac{6,28 \cdot n_R \cdot T}{V_d} \quad [kPa] \quad (8.28)$$

Onde:

T - é o momento torsor em (N·m)

V_d - é o volume deslocado em (dm^3)

8.7 Consumo Específico de Combustível

- ▶ Nos testes de motores, o consumo de combustível é medido como um fluxo mássico por unidade de tempo \dot{B} . O parâmetro mais usado é o consumo específico de combustível (b) que é o fluxo de combustível por unidade de potência produzida e mede com que eficiência o motor utiliza o combustível para produzir trabalho.

$$\dot{b} = \frac{\dot{B}}{P} \quad (8.29)$$

Onde:

- Para b (mg/J)

\dot{B} – fluxo mássico de combustível (g/s)

P – potência em (kW)

- Para b_e (g/kW·h)

\dot{B} – fluxo mássico de combustível (g/h)

P – potência em (kW)

8.8 Rendimento Térmico

Uma característica bastante usada, sem unidades, para avaliar de que forma a quantidade de combustível fornecida por cada ciclo é gasta para realizar trabalho, é o chamado Rendimento Térmico. Esta grandeza é a relação entre o trabalho produzido e o fluxo mássico de combustível, multiplicado pelo poder calorífico inferior do combustível

$$\eta_t = \frac{W_c}{\dot{B} \cdot Q_i} = \frac{(P \cdot n_R / N)}{(\dot{B} \cdot n_R / N) Q_i} = \frac{P}{\dot{B} \cdot Q_i} \quad (8.30)$$

Onde \dot{B} é a massa de combustível introduzida no motor por ciclo. Esta última equação também se pode escrever como:

$$h_t = \frac{1}{\dot{b} \times Q_i} \quad (8.31)$$

8.8 Rendimento Térmico

- ▶ Para:
- ▶ \dot{b} – consumo específico em (mg/J) usa-se Q_i em (MJ/kg)
- ▶ Se:
- ▶ \dot{b} – consumo de combustível estiver em (g/kW·h) e Q_i em (MJ/kg), então a fórmula passa a ter o seguinte aspecto:

$$\eta_t = \frac{3600}{\dot{b} \cdot Q_i} \quad (8.32)$$

8.9 Rendimento volumétrico

O sistema de admissão que vai desde o filtro de ar, passando pelo carburador, borboleta, colector e válvula de admissão restringem a passagem de ar ou mistura que é aspirado para o interior do cilindro. O parâmetro que se usa para determinar com que eficiência se admite o ar ou mistura num motor, chama-se rendimento volumétrico η_v . O rendimento volumétrico somente é usado para motores a quatro tempos, independentemente do tipo de processo de admissão. Este rendimento é a relação entre a massa de ar admitida no cilindro e o volume deslocado pelo pistão.

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_a V_d N} \quad (8.33)$$

8.9 Rendimento volumétrico

Uma fórmula alternativa para a determinação do rendimento volumétrico que é usada é dada pela expressão:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V_d} \quad (8.34)$$

Onde:

\dot{m}_a - é o fluxo de ar admitido no cilindro [kg/s]

m_a - é a massa de ar no cilindro [kg]

ρ_a - é a massa específica do ar [kg/m³]

V_d - é o volume deslocado no cilindro [m³/s]

N - é o número de rotações da cambota [1/s]

8.10 Rendimento indicado ou interno

O rendimento indicado, também conhecido como eficiência indicada ou rendimento interno, de um motor de combustão interna é uma medida da eficiência com que o motor converte a energia libertada pela combustão do combustível em trabalho mecânico dentro do cilindro. Este rendimento é essencialmente teórico, pois considera apenas o trabalho realizado sobre o pistão, ignorando outras perdas mecânicas e térmicas que ocorrem no motor.

$$\eta_i = \frac{P_i}{P_{cal}} = \frac{P_i}{\dot{B} \cdot Q_i} \quad (8.35)$$

Onde:

P_i é a Potência indicada [kW]

\dot{B} – fluxo mássico de combustível (kg/s)

Q_i – é o Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

8.11 Rendimento efectivo

O rendimento efectivo de um motor de combustão interna, também conhecido como eficiência térmica, é uma medida da capacidade do motor de converter a energia contida no combustível em trabalho mecânico útil. Este rendimento não é apenas uma indicação de quão eficientemente um motor pode realizar essa conversão, mas também reflecte a quantidade de energia perdida principalmente devido ao calor, atrito, e outros factores ineficientes durante o processo de combustão.

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i = \frac{P_e}{\dot{B} \cdot Q_i} \quad (8.36)$$

ou

$$\eta_e = 1 - \sum \frac{Perdas}{\dot{B} \cdot Q_i} \quad (8.37)$$

8.12 Rendimento perfeito

O "rendimento perfeito" de um motor de combustão interna é uma noção teórica que se refere à máxima eficiência térmica que um motor poderia teoricamente alcançar, assumindo que não existem perdas de energia de qualquer tipo (como calor desperdiçado, atrito mecânico, entre outros). Este cenário idealizado raramente é alcançado na prática devido às várias ineficiências inerentes aos processos reais de conversão de energia.

$$\eta_{per} = \frac{P_{per}}{\dot{B} \cdot Q_i} \quad (8.38)$$

Onde:

P_{per} = potência do motor perfeito em dependência do processo de comparação escolhido [kW]

\dot{B} – fluxo mássico de combustível (kg/s)

Q_i – é o Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

8.13 Grau de qualidade

O grau de qualidade (ou grau de perfeição) em motores térmicos, incluindo motores de combustão interna como os motores dos ciclos Otto e Diesel, é uma medida de quão próximo o motor está de um ciclo ideal, comparando sua eficiência real com a eficiência teórica máxima. De forma prática, pode-se definir o grau de qualidade como a razão entre o rendimento térmico real do motor e o rendimento térmico do ciclo ideal.

$$\eta_q = \frac{\eta_i}{\eta_p} = \frac{P_i}{P_p} = \frac{P_{mi}}{P_{mp}} \quad (8.39)$$

Onde:

P_{mi} – pressão média indicada [kPa]

P_{mp} – pressão média do motor perfeito [kPa]

8.14 Perdas nos Motores de Combustão Interna

As perdas nos motores de combustão interna são todas as formas pelas quais a energia química contida no combustível não é transformada em trabalho mecânico útil, sendo, portanto, desperdiçada sob diferentes formas durante o funcionamento do motor. Estas perdas são inevitáveis e ocorrem devido a limitações técnicas, físicas e termodinâmicas presentes no funcionamento real dos motores.

As perdas são calculadas da seguinte expressão geral:

$$\text{Perdas de energia} = \text{Energia admitida} (1 - \text{rendimento}) \quad (8.40)$$

Os valores típicos dos rendimentos são:

$\eta_q = 0,74 \dots 0,88$ estes valores dependem do tipo do motor;

$\eta_m = 0,73 \dots 0,90$ os valores maiores usam-se em motores grandes;

$\eta_e = 0,275 \dots 0,42$ ($D_c = 800 \text{ mm}$, $n = 115 \text{ min}^{-1}$ $v_{em} = 4,5 \text{ m/s}$)

8.14.1 Perdas Internas do Motor

As **perdas internas** em um motor de combustão interna são todas aquelas que ocorrem no interior do motor, reduzindo a eficiência e impedindo que a energia química disponível no combustível seja completamente transformada em trabalho útil.

A perda interna do motor é a diferença entre o trabalho máximo ou a potência química e o trabalho indicado ou a potência indicada,

$$Per_i = \dot{B} \cdot Q_i (1 - \eta_i) \quad (8.41)$$

Onde:

Per_i São as perdas internas em [kW]

\dot{B} – fluxo mássico de combustível (kg/s)

Q_i – é o Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

8.14.2 Perdas do Motor Perfeito

As "perdas do motor perfeito", estão normalmente associadas às limitações inerentes aos ciclos termodinâmicos ideais (por exemplo, os Ciclos Otto ideal e Diesel ideal). Ou seja, mesmo um ciclo ideal (perfeito) possui uma eficiência limitada devido a restrições termodinâmicas, particularmente pela impossibilidade de converter integralmente energia térmica em trabalho, conforme a 2ª Lei da Termodinâmica.

$$Per_p = \dot{B} \cdot Q_i (1 - \eta_p) \quad (8.42)$$

Onde:

Per_p - São as perdas do motor perfeito [kW]

\dot{B} - fluxo mássico de combustível (kg/s)

Q_i - é o Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

8.14.3 Perdas do motor real em relação ao motor perfeito

As **perdas do motor real em relação ao motor perfeito** são as diferenças práticas que fazem com que um motor real nunca alcance a eficiência teórica máxima obtida por um motor ideal (perfeito). Essas perdas surgem principalmente devido a efeitos físicos inevitáveis e limitações operacionais reais tais como:

- Perdas Mecânicas (Atrito)
- Perdas por Combustão Imperfeita
- Perdas Térmicas (Calor)
- Perdas de Bombeamento
- Perdas por Vazamentos
- Perdas devido ao Timing Imperfeito (Sincronização)
- Perdas devido à Combustão Incompleta e Reações Químicas não Ideais

$$\begin{aligned} Per_{real} &= \dot{B} \cdot Q_i \cdot \eta_p (1 - \eta_q) \\ &= \dot{B} \cdot Q_i \cdot (\eta_p - \eta_p \cdot \eta_q) = \dot{B} \cdot Q_i \cdot (\eta_p - \eta_i) \quad [kW] \end{aligned} \quad (8.43)$$

8.15 Relações ar/combustível e Combustível/ar

- ▶ No teste de motores, as grandezas: fluxo de ar e fluxo de combustível são ambas alvo de medição. A relação entre estas grandezas é importante para definir os regimes de operação de um motor

$$\text{Relação Ar / Combustível } RAC = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{B}} \quad (8.44)$$

$$\text{Relação Combustível / Ar } RCA = \frac{\dot{B}}{\dot{m}_{ar}} \quad (8.45)$$

A faixa das relação para o funcionamento normal de motores é:

- **Motor Otto** $12 \leq RAC \leq 18$ ou $0,056 \leq RCA \leq 0,083$
- **Motor Diesel** $18 \leq RAC \leq 70$ ou $0,014 \leq RCA \leq 0,056$

8.16 Peso e Volume específicos do motor

- ▶ O peso e o volume do motor em relação a potência que este produz, são bastante importantes para diversas aplicações. Dois parâmetros bastantes usados para comparação entre vários motores são:

$$\textit{Peso específico} = \frac{\textit{Peso do motor}}{\textit{Potência}} \quad (8.46)$$

$$\textit{Volume específico} = \frac{\textit{Volume do motor}}{\textit{Potência}} \quad (8.47)$$

- ▶ Para estes parâmetros serem úteis é necessário definir-se que componentes fazem parte do motor.

8.17 Factores de Correção Para a Potência e Rendimento Volumétrico (I)

- ▶ A pressão, humidade e a temperatura do ar ambiente admitido num motor a dada velocidade, afectam o fluxo da massa de ar e a potência do motor. São usados vários factores de correção para ajustar os valores medidos de potência e de rendimento volumétrico às condições atmosféricas padrão, para providenciar uma base mais precisa de comparação entre motores.

As condições ambientais padrão são:

Pressão do ar seco	Pressão do vapor de água	Temperatura
736,3 mmHg	9,65 mmHg	29,4 °C

8.17 Factores de Correção Para a Potência e Rendimento Volumétrico (II)

- ▶ A base para a correção é a equação de energia, quando aplicada a um escoamento estacionário de um fluido compressível por meio de um orifício ou uma restrição de área A

$$\dot{m} = \frac{AgP_o}{\sqrt{RT_o}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P}{P_o} \right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_o} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (8.48)$$

- ▶ Para se deduzir esta equação, foi assumido que o fluido é um gás ideal com uma constante de gases R e que a relação dos seus calores específicos a pressão constante e a volume constante é constante (k). P_o e T_o são a pressão e a temperatura totais a montante da restrição e P a pressão na restrição.

8.17 Factores de Correccão Para a Potência e Rendimento Volumétrico (III)

Se a relação P/P_o for assumida constante num motor para a abertura total da garganta, num dado sistema de admissão e motor, o fluxo mássico de ar seco será determinado de:

$$\dot{m} \propto \frac{P_o}{\sqrt{T_o}} \quad (8.49)$$

Para misturas contendo a proporção correcta de combustível para usar todo o ar disponível (e daí prover a potência máxima), a potência indicada com a abertura máxima P_i será proporcional a m_a , fluxo mássico do ar seco. Daí:

Onde:

$$P_{i,s} = C_F P_{i,m} \quad (8.50)$$

- ▶ $P_{i,s}$ – Potência corrigida
- ▶ $P_{i,m}$ – Potência calculada

8.17 Factores de Correção Para a Potência e Rendimento Volumétrico (IV)

- ▶ O factor de correcção C_F é dado por:

$$C_F = \frac{P_{s,d}}{P_m - P_{v,m}} \left(\frac{T_m}{T_s} \right)^{1/2} \quad (8.51)$$

Onde:

- ▶ P_{sd} – pressão absoluta padrão de ar seco (Pa)
- ▶ P_m – pressão medida do ar seco ambiente (Pa)
- ▶ $P_{v,m}$ – pressão do vapor de água parcial padrão (Pa)
- ▶ T_m – temperatura medida do ambiente (K)
- ▶ T_s – temperatura padrão do ambiente (K)

8.17 Factores de Correção Para a Potência e Rendimento Volumétrico (V)

A Pressão efetiva corrigida no cilindro que é a pressão média que actua sobre o pistão durante o ciclo de combustão, responsável pelo trabalho realizado pelo motor.

$$P_v = C_F P_{i,m} - P_{f,m} \quad (8.52)$$

C_F - factor leva em consideração as condições atmosféricas e a temperatura ambiente, permitindo comparar o desempenho do motor em diferentes condições. Ele é usado para ajustar as pressões medidas para condições padrão.

$P_{i,m}$ - pressão média medida dentro do cilindro durante o ciclo de combustão, obtida através de um indicador de pressão.

$P_{f,m}$ - pressão média perdida devido ao atrito entre as partes móveis do motor, como pistões, anéis e mancais.

8.17 Factores de Correccão Para a Potência e Rendimento Volumétrico (VI)

O rendimento volumétrico é corrigido utilizando um factor de correção, que leva em consideração as condições atmosféricas padrão e as condições medidas. O rendimento volumétrico é proporcional a m_a/ρ_a . Como ρ_a é proporcional a P/T , o factor de correccão para o rendimento volumétrico C'_F é :

$$C'_F = \frac{\eta_{v,s}}{\eta_{v,m}} = \left(\frac{T_s}{T_m} \right)^{1/2} \quad (8.53)$$

Onde:

T_s – é a temperatura padrão do ambiente (K)

T_m – é a temperatura medida do ambiente (K)

8.18 Emissões específicas e Índice de Emissões (I)

- ▶ O nível de emissões de óxidos de Nitrogénio (NO e NO₂) geralmente agrupados como NO_x, monóxido de carbono (CO), Hidrocarbonetos não queimados (HC) e particulados são características importantes do funcionamento dos motores.
- ▶ A concentração de emissões nos gases de escape é geralmente medida em partes por milhões ou percentagem por volume que corresponde a fracção molar multiplicada por 10⁶ ou por 10² respectivamente.
- ▶ Os indicadores de emissões normalizados dos níveis de emissões são mais utilizados.

8.18 Emissões específicas e Índice de Emissões (II)

O coeficiente de excesso de ar pode ser calculado através da medição do oxigénio existente nos gases de escape como:

$$\lambda = \left(\frac{20,9}{20,9 - O_2 \text{ medido}} - 1 \right) \times 100 \quad (8.54)$$

Onde: λ é o coeficiente de excesso de ar em percentagem

O_2 medido – a percentagem de oxigénio medida nos gases d escape

O teor de Óxidos de Nitrogénio (NO_x) pode ser obtido por duas vias diferentes:

Através da medição do teor de monóxido de nitrogénio

$$NO_x = 1,05 NO \quad (ppm) \quad (8.55)$$

8.18 Emissões específicas e Índice de Emissões (III)

Ou como a soma das medições de Monóxido de Nitrogénio e de Dióxido de Nitrogénio

$$NO_x = NO + NO_2 \quad (8.56)$$

Factores de conversão de ppm para mg/m³n

$$\begin{aligned} CO \left(mg/m^3 \right) &= 1,25 \times CO \left(ppm \right) \\ H_2S \left(mg/m^3 \right) &= 1,52 \times H_2S \left(ppm \right) \\ SO_2 \left(mg/m^3 \right) &= 2,85 \times SO_2 \left(ppm \right) \\ NO \left(mg/m^3 \right) &= 1,34 \times NO \left(ppm \right) \\ NO_2 \left(mg/m^3 \right) &= 2,05 \times NO_2 \left(ppm \right) \end{aligned} \quad (8.57)$$

8.18 Emissões específicas e Índice de Emissões (IV)

As emissões específicas são o fluxo de emissões por unidade de potência.

$$\begin{aligned} sNO_x &= \frac{\dot{m}_{NO_x}}{P} \\ sCO &= \frac{\dot{m}_{CO}}{P} \\ sHC &= \frac{\dot{m}_{HC}}{P} \\ sPart &= \frac{\dot{m}_{part}}{P} \end{aligned} \quad (8.58)$$

Podem ser definidas emissões específicas indicadas e ao veio. As unidades mais comuns são $\mu\text{g}/\text{J}$, $\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h}$. Alternativamente, as taxas de emissões podem ser normalizadas pelo fluxo mássico de combustível. O Índice de Emissões (EI) é dado por:

$$EI_{NO_x} = \frac{\dot{m}_{NO_x} \text{ (g/s)}}{\dot{B} \text{ (kg/s)}} \quad (8.59)$$

8.19 Relação entre os Parâmetros de Desempenho (I)

A importância dos parâmetros definidos entre os Capítulos 8.7 e 8.10 para o desempenho do motor, mostra-se evidente quando a Potência, Momento Torsor, e Pressão média efectiva são expressos em termos desses parâmetros. As seguintes relações entre os parâmetros de desempenho do motor podem ser desenvolvidas:

▶ **Para a potência :**

$$P = \frac{\eta_t m_a N Q_i}{n_R \cdot RAC} \quad [kW] \quad (8.60)$$

Para motores a quatro tempos pode-se introduzir o rendimento volumétrico resultando em:

$$P = \frac{\eta_t \eta_v V_d \rho_{a,i} N Q_i}{2 \cdot RAC} \quad [kW] \quad (8.61)$$

8.19 Relação entre os Parâmetros de Desempenho (II)

Para o Momento Torsor :

$$T = \frac{\eta_t \eta_v V_d Q_i \rho_a}{4\pi \cdot RAC} \quad [kNm] \quad (8.52)$$

Para a Pressão Média Efectiva

$$P_{me} = \frac{\eta_t \eta_v \rho_{a,i} Q_i}{RAC} \quad [kPa] \quad (8.53)$$

A potência por unidade da área do êmbolo, também chamada Potência Específica é a medição do sucesso do projecto do motor em usar a área do pistão independentemente do tamanho do cilindro. A Potência específica é dada por:

$$\frac{P}{A_p} = \frac{\eta_t \cdot \eta_v \cdot S \cdot \rho_{a,i} \cdot N \cdot Q_i}{2 \cdot RAC} \quad [kW / m^2] \quad (8.54)$$

8.19 Relação entre os Parâmetros de Desempenho (III)

Introduzindo o conceito de velocidade média do êmbolo obtêm-se:

$$\frac{P}{A_p} = \frac{\eta_t \cdot \eta_v \cdot \bar{V}_p \cdot \rho_{a,i} \cdot Q_i}{4 \cdot RAC} \quad \left[\text{kW/m}^2 \right] \quad (8.55)$$

Onde:

\dot{m}_a - é o fluxo de ar admitido no cilindro [kg/s]

m_a - é a massa de ar no cilindro [kg]

ρ_a - é a massa específica do ar [kg/m³]

V_d - é o volume deslocado no cilindro [m³/s]

N - é o número de rotações da cambota [1/s]

S - é o curso [m]

\dot{B} - fluxo mássico de combustível [kg/s]

Q_i - é o Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]