

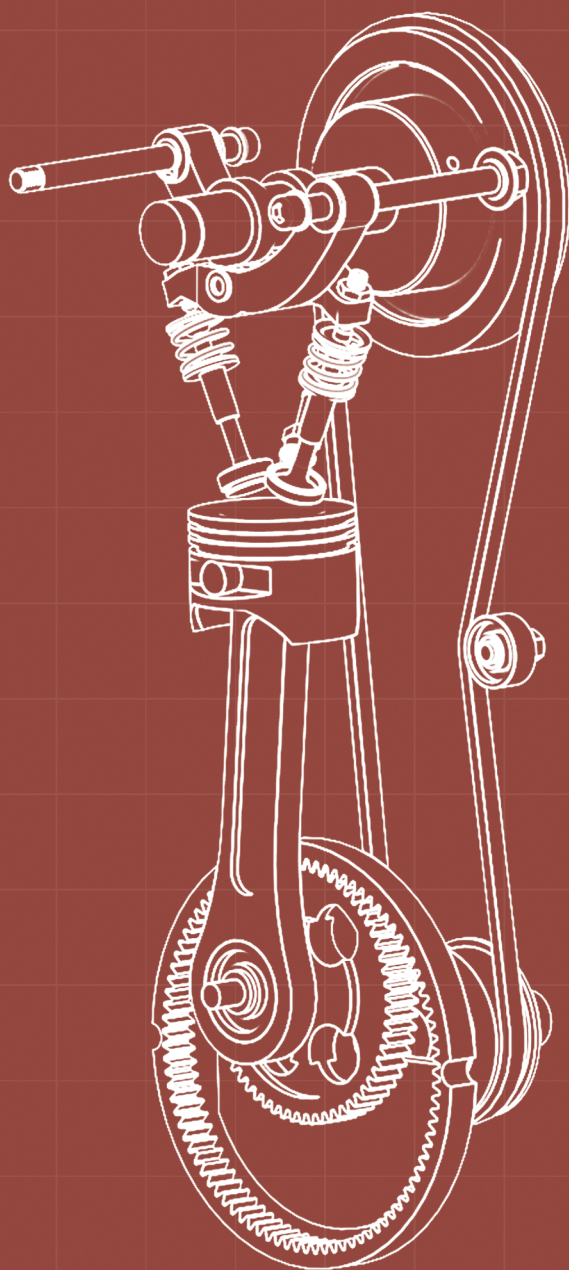
# Motores

## de Combustão Interna

Jorge Martins

**QUINTA EDIÇÃO**

Revista e aumentada



# Prefácio

Este livro é a primeira obra extensa em língua portuguesa sobre motores de combustão interna, nomeadamente os de tração automóvel. Embora tenha sido escrito como um elemento de estudo para alunos universitários de engenharia mecânica, pretende também ser uma obra de referência para mecânicos, engenheiros ou aficionados por automóveis e/ou motores.

Está dividido em 11 capítulos, incluindo a descrição de motores e a história da sua evolução até aos nossos dias. Contém aspetos mais teóricos como a análise de ciclos e mais práticos, como o teste de motores. Nele, o interessado poderá analisar o desempenho dos motores, prever as suas características e obter a informação necessária para os modelar e projetar. Por exemplo, o Capítulo 10 inclui as equações necessárias para projetar um escape “de rendimento” para motores a 2 tempos.

Esta obra integra assuntos não habituais em livros deste género. Nela pode encontrar-se uma descrição aprofundada sobre combustíveis, incluindo os usados pelos “dragsters top fuel” (nitro metano), o “aumentador de potência”  $N_2O$  (que não é um combustível mas sim um oxidante), combustíveis menos correntes como o hidrogénio, os álcoois e os éteres. Nesse capítulo referem-se ainda os conhecidos biodiesel (ésteres) e a forma como são produzidos, além de se descreverem os óleos lubrificantes, incluindo os sintéticos. Outros assuntos pouco frequentes neste tipo de obras passam pela descrição e projeto de salas de teste de motores, análise da variabilidade da combustão, descrição dos sistemas OBD, estudo minucioso do motor analisando o seu funcionamento por não menos que oito diferentes rendimentos, não incluindo as cinco relações (eficiências e rendimentos) apresentadas para estudar a lavagem dos motores a 2 tempos. Para além da parte eminentemente teórica desta obra (que inclui a avaliação dos ciclos em carga parcial), sobressai o Capítulo 5 (com uma centena de páginas) dedicado à descrição exaustiva dos

motores e dos seus vários componentes. Um subcapítulo é vocacionado aos motores de Formula 1.

Um dos aspetos importantes nos motores atuais é a sua potencialidade de produzir poucos poluentes, podendo-se afirmar que esta é uma das suas características mais importantes. Por esta razão, há um capítulo somente dedicado à produção e eliminação de poluentes nos motores. Para se conseguirem os baixíssimos níveis de emissão de poluentes, os motores necessitam de ser controlados por sofisticados sistemas eletrónicos, funcionamento que é descrito no texto.

Atualmente assiste-se a uma grande evolução nos motores, da qual os novos sistemas de “common-rail” nos motores Diesel e de injeção direta nos a gasolina são o resultado visível. Porém, outros progressos mais radicais estão a ser desenvolvidos, provavelmente levando a tipos de motores de combustão “híbrida” entre os que consomem gasolina e gasóleo. Estes tipos de combustão têm várias denominações, mas são geralmente conhecidos por CAI (Controlled Auto Ignition) e por HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition), assunto exposto no Cap.8, e que se prevê seja determinante no futuro dos motores.

Os motores de combustão interna são máquinas intensamente usadas no mundo, sendo, simultaneamente, uma fonte de satisfação mas também de problemas como os ambientais. Assim, espera-se que a leitura desta obra possa levar ao melhor conhecimento e utilização destas máquinas admiráveis.

Guimarães, 2004.10.02

# Prefácio à 5.<sup>a</sup> Edição

No seguimento de uma melhoria contínua deste livro, o autor apresenta a 5.<sup>a</sup> edição com as atualizações necessárias e com melhorias ao texto e aos conteúdos.

Dado que a grande maioria dos motores atuais usa o turbo-compressor, decidiu-se que seria importante dedicar mais espaço a este importante dispositivo, tal como à injeção direta a gasolina, pela mesma razão. Foram feitas também atualizações de dados e características por toda a obra, nomeadamente aos motores de competição que recentemente tiveram melhorias impressionantes, nomeadamente os de F1 ao nível do seu rendimento, sendo agora dos motores mais eficientes que alguma vez existiram, mas também se explica como os motores mais potentes (dos dragsters) conseguem chegar a essas potências inacreditáveis.

A parte relativa à emissão de poluentes foi também atualizada, como foi a descrição relativa aos testes de emissões, nomeadamente os relativos a testes em comportamento real de estrada. Novos tipos de ignição estão a ser desenvolvidos, com promessas de enormes melhorias em termos de eficiência.

Espera-se que a introdução destes novos temas e o melhoramento dos restantes adaptem da melhor forma este livro aos interesses dos leitores.

Guimarães, 2016.07.15

# Índice

|                                             |              |
|---------------------------------------------|--------------|
| <b>Prefácio.....</b>                        | <b>V</b>     |
| <b>Agradecimentos .....</b>                 | <b>VII</b>   |
| <b>Prefácio à 5ª Edição .....</b>           | <b>IX</b>    |
| <b>Índice .....</b>                         | <b>XI</b>    |
| <b>Glossário de Símbolos e Termos .....</b> | <b>XXIII</b> |

|                                                                               |          |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Capítulo 1. MOTORES – CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....</b> | <b>1</b> |
| 1.1. INTRODUÇÃO.....                                                          | 1        |
| 1.2. NOÇÃO DE MÁQUINA TÉRMICA.....                                            | 2        |
| 1.2.1. Classificação dos Motores.....                                         | 4        |
| 1.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR.....                              | 5        |
| 1.4. MOTOR DE IGNIÇÃO COMANDADA.....                                          | 7        |
| 1.5. MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO (DIESEL).....                            | 8        |
| 1.6. DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO.....                                            | 9        |
| 1.7. MOTOR A 2 TEMPOS.....                                                    | 12       |
| 1.8. MOTOR ROTATIVO WANKEL .....                                              | 13       |

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 2. HISTÓRIA DAS MÁQUINAS TÉRMICAS .....</b> | <b>17</b> |
| 2.1. PRIMÓRDIOS.....                                    | 17        |
| 2.1.1. Motores a Ar .....                               | 18        |
| 2.1.2. Motores a Água (Oxi-hidrogénio).....             | 19        |
| 2.1.3. Motores de Combustão Interna Atmosféricos.....   | 19        |
| 2.1.4. Motores com Compressão Prévia.....               | 22        |
| 2.1.5. Desenvolvimento dos Sistemas Auxiliares.....     | 24        |
| 2.1.6. Motores Diesel.....                              | 25        |
| 2.2. EVOLUÇÃO DO MOTOR CLÁSSICO.....                    | 26        |
| 2.2.1. Motor de Ignição Comandada.....                  | 26        |
| 2.2.1.1. Taxa de compressão (TC).....                   | 27        |
| 2.2.1.2. Relação curso/diâmetro (C/D).....              | 28        |
| 2.2.1.3. Relação peso/potência.....                     | 28        |

|          |                                            |    |
|----------|--------------------------------------------|----|
| 2.2.1.4. | Cilindrada.....                            | 29 |
| 2.2.1.5. | Preparação da mistura ar-gasolina .....    | 29 |
| 2.2.1.6. | Outras áreas de evolução.....              | 30 |
| 2.2.1.7. | Desenvolvimento dos Range Extenders .....  | 30 |
| 2.2.2.   | Motor Diesel.....                          | 32 |
| 2.2.2.1. | Câmaras de combustão.....                  | 32 |
| 2.2.2.2. | Sistemas de injeção .....                  | 33 |
| 2.2.2.3. | Catalisadores e filtros de partículas..... | 33 |
| 2.2.2.4. | Eliminação dos $NO_x$ .....                | 33 |
| 2.2.2.5. | Outras áreas de evolução.....              | 34 |

### **Capítulo 3. ANÁLISE TEÓRICA DE CICLOS..... 35**

|        |                                                                     |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.   | RENDIMENTO DOS CICLOS TEÓRICOS.....                                 | 36 |
| 3.2.   | CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE (OTTO) .....                       | 37 |
| 3.2.1. | Ciclo a Carga Parcial no Motor de Injeção Direta.....               | 39 |
| 3.2.2. | Ciclo a Carga Parcial e Mistura Estequiométrica (com Bombagem)..... | 40 |
| 3.3.   | CICLO TEÓRICO A PRESSÃO CONSTANTE (DIESEL) .....                    | 41 |
| 3.4.   | CICLO TEÓRICO A PRESSÃO LIMITADA (MISTO OU DUAL) .....              | 44 |
| 3.4.1. | Ciclo em Carga Parcial.....                                         | 45 |
| 3.5.   | CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE SOBRE-EXPANDIDO (MILLER).....      | 48 |
| 3.5.1. | Ciclo de Miller com $\epsilon_{ret}$ Fixa.....                      | 49 |
| 3.5.2. | Ciclo de Miller com $\epsilon_g$ Fixa .....                         | 50 |
| 3.6.   | CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE E EXPANSÃO TOTAL (ATKINSON).....   | 51 |
| 3.6.1. | Ciclo em Carga Parcial.....                                         | 53 |
| 3.7.   | COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS EM CARGA PARCIAL .....                   | 54 |
| 3.8.   | CICLOS COM SOBREALIMENTAÇÃO.....                                    | 56 |
| 3.8.1. | Ciclo de Otto Sobrealimentado .....                                 | 56 |
| 3.8.2. | Sobrealimentação de Outros Ciclos .....                             | 59 |
| 3.9.   | MODELAÇÃO DO CICLO REAL.....                                        | 59 |
| 3.10.  | CICLO DE CARNOT.....                                                | 61 |
| 3.11.  | CICLO DE TURBINAS DE GÁS (JOULE-BRAYTON) .....                      | 61 |

### **Capítulo 4. PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO ..... 65**

|          |                                                                 |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.     | PARÂMETROS BÁSICOS DOS MOTORES.....                             | 66 |
| 4.1.1.   | Binário, Potência, Rendimento e Consumo Específico .....        | 66 |
| 4.1.2.   | Parâmetros Geométricos .....                                    | 67 |
| 4.2.     | OUTROS PARÂMETROS .....                                         | 68 |
| 4.2.1.   | Relação Ar-Combustível, Excesso de Ar e Riqueza da Mistura..... | 68 |
| 4.2.2.   | Grandezas Importantes.....                                      | 69 |
| 4.2.2.1. | Pressão média efetiva .....                                     | 69 |
| 4.2.2.2. | Velocidade média do pistão .....                                | 70 |
| 4.2.2.3. | Potência específica aerial.....                                 | 70 |
| 4.2.3.   | Comparação entre Motores.....                                   | 71 |

|          |                                                                       |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.3.1. | Teoria da semelhança .....                                            | 72 |
| 4.2.4.   | Rendimentos e Eficiências.....                                        | 73 |
| 4.2.4.1. | Rendimento de combustão .....                                         | 73 |
| 4.2.4.2. | Rendimento adiabático.....                                            | 74 |
| 4.2.4.3. | Rendimento teórico.....                                               | 74 |
| 4.2.4.4. | Rendimento relativo às propriedades dos fluidos .....                 | 74 |
| 4.2.4.5. | Rendimento inerente .....                                             | 74 |
| 4.2.4.6. | Eficiência de bombagem.....                                           | 75 |
| 4.2.4.7. | Rendimento mecânico.....                                              | 75 |
| 4.2.4.8. | Rendimento total.....                                                 | 75 |
| 4.2.4.9. | Eficiência volumétrica .....                                          | 76 |
| 4.2.5.   | Fórmula da Potência Efetiva.....                                      | 77 |
| 4.3.     | CICLO INDICADO .....                                                  | 78 |
| 4.3.1.   | Pressão Média Indicada e de Atrito.....                               | 79 |
| 4.4.     | CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR.....                                  | 80 |
| 4.4.1.   | Curva do Binário.....                                                 | 81 |
| 4.4.2.   | Curva da Potência.....                                                | 81 |
| 4.4.3.   | Curva do Consumo Específico .....                                     | 82 |
| 4.4.4.   | Diagrama do Desempenho .....                                          | 83 |
| 4.4.5.   | Fatores de Correção para Potência e Eficiência Volumétrica.....       | 84 |
| 4.4.6.   | Carga Parcial.....                                                    | 85 |
| 4.4.7.   | Estabilidade do Motor .....                                           | 86 |
| 4.4.8.   | Desempenho dos Veículos Função do Binário e Potência dos Motores..... | 87 |
| 4.5.     | O MOTOR A 2 TEMPOS.....                                               | 88 |
| 4.5.1.   | Taxa de Compressão.....                                               | 89 |
| 4.5.2.   | Eficiências de Enchimento.....                                        | 89 |
| 4.6.     | MOTORES DE COMPETIÇÃO.....                                            | 91 |
| 4.6.1.   | Motores em Formula 1.....                                             | 91 |
| 4.6.1.1. | Antes de 2014 .....                                                   | 92 |
| 4.6.1.2. | Depois de 2014 .....                                                  | 96 |
| 4.6.2.   | Corridas de Arranque ("Drag Races") .....                             | 98 |

## **Capítulo 5. DESCRIÇÃO DOS MOTORES..... 101**

|          |                                                 |     |
|----------|-------------------------------------------------|-----|
| 5.1.     | MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS ..... | 102 |
| 5.1.1.   | Estrutura do Motor .....                        | 102 |
| 5.1.2.   | Bloco de Cilindros, Culassa e Cáter .....       | 105 |
| 5.1.2.1. | Bloco de cilindros.....                         | 106 |
| 5.1.2.2. | Cabeça do motor ou culassa.....                 | 107 |
| 5.1.2.3. | Cáter do óleo.....                              | 108 |
| 5.1.3.   | Sistema Biela-Manivela.....                     | 109 |
| 5.1.3.1. | Pistão.....                                     | 109 |
| 5.1.3.2. | Segmentos.....                                  | 112 |
| 5.1.3.3. | Biela.....                                      | 113 |
| 5.1.3.4. | Cambota .....                                   | 115 |

|          |                                                                   |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.3.5. | Motores multicilíndricos.....                                     | 116 |
| 5.1.3.6. | Variação da taxa de compressão.....                               | 118 |
| 5.1.4.   | Sistema de Distribuição.....                                      | 119 |
| 5.1.4.1. | Árvore de cames.....                                              | 120 |
| 5.1.4.2. | Válvulas.....                                                     | 122 |
| 5.1.4.3. | Variação da abertura das válvulas e da geometria da admissão..... | 126 |
| 5.1.4.4. | Sistemas não convencionais de controlo da distribuição.....       | 130 |
| 5.1.5.   | Sistema de Arrefecimento.....                                     | 130 |
| 5.1.5.1. | Arrefecimento a ar.....                                           | 131 |
| 5.1.5.2. | Circulação líquida por termossifão.....                           | 132 |
| 5.1.5.3. | Circulação líquida forçada.....                                   | 133 |
| 5.1.6.   | Lubrificação.....                                                 | 135 |
| 5.1.6.1. | Sistema de chapinagem.....                                        | 135 |
| 5.1.6.2. | Sistema por pressão e chapinagem.....                             | 136 |
| 5.1.6.3. | Sistema por pressão de óleo.....                                  | 136 |
| 5.1.6.4. | Sistema sob pressão a cárter seco.....                            | 137 |
| 5.1.6.5. | Bombas de óleo.....                                               | 137 |
| 5.1.6.6. | Filtros de óleo.....                                              | 138 |
| 5.1.6.7. | Tipos de óleo.....                                                | 139 |
| 5.2.     | MOTORES DE IGNIÇÃO COMANDADA.....                                 | 139 |
| 5.2.1.   | Carburadores.....                                                 | 140 |
| 5.2.1.1. | Combustíveis.....                                                 | 140 |
| 5.2.1.2. | Princípio de funcionamento do carburador.....                     | 141 |
| 5.2.1.3. | Correção da mistura.....                                          | 143 |
| 5.2.2.   | Sistema de Injeção.....                                           | 147 |
| 5.2.2.1. | Princípio de funcionamento.....                                   | 149 |
| 5.2.2.2. | Injeção mecânica.....                                             | 150 |
| 5.2.2.3. | Injeção eletrónica analógica.....                                 | 152 |
| 5.2.2.4. | Injeção eletrónica digital.....                                   | 154 |
| 5.2.2.5. | Injeção monoponto.....                                            | 156 |
| 5.2.2.6. | Carburadores eletrónicos.....                                     | 158 |
| 5.2.2.7. | Injeção direta.....                                               | 158 |
| 5.2.3.   | Sistema de Ignição.....                                           | 160 |
| 5.2.3.1. | Sistema de bateria convencional.....                              | 160 |
| 5.2.3.2. | Ignição eletrónica analógica.....                                 | 162 |
| 5.2.3.3. | Ignição eletrónica digital.....                                   | 163 |
| 5.2.3.4. | A vela.....                                                       | 165 |
| 5.2.3.5. | "Bobinas múltiplas".....                                          | 166 |
| 5.3.     | MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO.....                            | 167 |
| 5.3.1.   | Sistemas de Injeção.....                                          | 169 |
| 5.3.2.   | Componentes dos Sistemas Tradicionais.....                        | 172 |
| 5.3.2.1. | Bomba de injeção.....                                             | 172 |
| 5.3.2.2. | Injetores.....                                                    | 174 |
| 5.3.2.3. | Outros sistemas.....                                              | 175 |
| 5.3.3.   | Componentes dos Sistemas "Common-rail".....                       | 176 |

|          |                                                   |     |
|----------|---------------------------------------------------|-----|
| 5.3.3.1. | Bombas de alta e baixa pressão .....              | 177 |
| 5.3.3.2. | Injetores.....                                    | 178 |
| 5.4.     | MOTORES A 2 TEMPOS.....                           | 179 |
| 5.4.1.   | Tipos de Lavagem.....                             | 180 |
| 5.4.1.1. | Lavagem transversal.....                          | 180 |
| 5.4.1.2. | Lavagem em laço.....                              | 181 |
| 5.4.1.3. | Lavagem unidirecional.....                        | 181 |
| 5.4.2.   | Compressão de Cártter.....                        | 182 |
| 5.4.2.1. | Válvula rotativa.....                             | 184 |
| 5.4.2.2. | Lamelas.....                                      | 185 |
| 5.4.3.   | Outras Geometrias e Componentes.....              | 186 |
| 5.4.3.1. | Alteração do eixo do cilindro.....                | 186 |
| 5.4.3.2. | Motores com válvulas de tulpia.....               | 187 |
| 5.4.3.3. | Válvula de escape.....                            | 188 |
| 5.4.3.4. | Válvula rotativa de escape.....                   | 189 |
| 5.4.3.5. | Escape .....                                      | 189 |
| 5.4.3.6. | Carburadores.....                                 | 190 |
| 5.4.3.7. | Injeção de combustível.....                       | 191 |
| 5.4.3.8. | Catalisador.....                                  | 192 |
| 5.5.     | SOBREALIMENTAÇÃO .....                            | 192 |
| 5.5.1.   | Tipos de Compressores .....                       | 193 |
| 5.5.2.   | Compressor Comprex.....                           | 196 |
| 5.5.3.   | Compressão do Ar.....                             | 197 |
| 5.5.4.   | O Turbo-Compressor.....                           | 199 |
| 5.5.4.1. | "Twin-Turbo" .....                                | 201 |
| 5.5.4.2. | Turbo-compressores assistidos eletricamente.....  | 201 |
| 5.5.4.3. | "Twincharger" (compressor + turbo).....           | 202 |
| 5.5.4.4. | Turbo "twin-scroll" .....                         | 203 |
| 5.5.4.5. | Sistema "anti-lag".....                           | 203 |
| 5.5.5.   | Motores de Ignição Comandada (4 Tempos).....      | 203 |
| 5.5.6.   | Motores de Ignição por Compressão (4 Tempos)..... | 205 |
| 5.6.     | SENSORES USADOS NOS MOTORES .....                 | 206 |
| 5.6.1.   | Velocidade do Motor e Posição da Cambota.....     | 206 |
| 5.6.2.   | Pressão do Coletor de Admissão .....              | 206 |
| 5.6.3.   | Caudal de Ar .....                                | 207 |
| 5.6.4.   | Posição da Borboleta do Acelerador.....           | 208 |
| 5.6.5.   | Concentração de Oxigénio (Sonda $\lambda$ ).....  | 208 |
| 5.6.6.   | Temperatura.....                                  | 209 |
| 5.6.7.   | "Knock" (Sensor de Detonação).....                | 209 |
| 5.6.8.   | Outros.....                                       | 210 |
| 5.7.     | UTILIZAÇÃO DOS MOTORES.....                       | 210 |
| 5.7.1.   | Motores de Automóveis.....                        | 210 |
| 5.7.2.   | "Range Extenders".....                            | 211 |
| 5.7.3.   | Motores de Motociclos.....                        | 213 |
| 5.7.4.   | Motores de Aviação.....                           | 215 |

|          |                                      |     |
|----------|--------------------------------------|-----|
| 5.7.5.   | Motores Estacionários .....          | 217 |
| 5.7.6.   | Outras Aplicações.....               | 218 |
| 5.8.     | TURBINAS E FOGUETES .....            | 219 |
| 5.8.1.   | Tipos de Turbinas .....              | 222 |
| 5.8.2.   | Descrição das Turbinas.....          | 224 |
| 5.8.3.   | Tipos de Foguetes.....               | 228 |
| 5.8.3.1. | Foguetes de combustível sólido.....  | 229 |
| 5.8.3.2. | Foguetes de combustível líquido..... | 230 |

## **Capítulo 6. TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO .....231**

|        |                                        |     |
|--------|----------------------------------------|-----|
| 6.1.   | AR E COMBUSTÍVEIS.....                 | 231 |
| 6.2.   | REAÇÃO ENTRE O COMBUSTÍVEL E O AR..... | 232 |
| 6.2.1. | Coeficiente de Excesso de Ar .....     | 232 |
| 6.2.2. | Poder Calorífico do Combustível .....  | 233 |
| 6.2.3. | Poder Calorífico da Mistura.....       | 234 |
| 6.3.   | CÁLCULOS EM COMBUSTÃO.....             | 236 |
| 6.3.1. | Cálculo da Quantidade de Ar.....       | 237 |
| 6.3.2. | Cálculo dos Produtos de Combustão..... | 237 |
| 6.3.3. | Combustão Incompleta .....             | 239 |
| 6.3.4. | Dissociação.....                       | 241 |

## **Capítulo 7. COMBUSTÍVEIS E LUBRIFICANTES .....243**

|          |                                                          |     |
|----------|----------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.     | ESTRUTURA DOS COMBUSTÍVEIS.....                          | 245 |
| 7.1.1.   | Parafinas (Alcanos).....                                 | 245 |
| 7.1.2.   | Oleofinas (Alquenos).....                                | 246 |
| 7.1.3.   | Naftalenos (Cicloalcanos) .....                          | 246 |
| 7.1.4.   | Aromáticos .....                                         | 246 |
| 7.2.     | PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS.....                       | 247 |
| 7.2.1.   | Estequiometria da Combustão.....                         | 247 |
| 7.2.2.   | Pressão de Vapor de Reid e Temperatura de Ebulição ..... | 247 |
| 7.2.3.   | Calor Latente de Vaporização.....                        | 248 |
| 7.2.4.   | "Flash Point".....                                       | 249 |
| 7.2.5.   | Limites de Flamabilidade.....                            | 249 |
| 7.2.6.   | Temperatura de Auto-Ignicção.....                        | 250 |
| 7.2.7.   | Temperatura Adiabática de Chama.....                     | 250 |
| 7.2.8.   | Poder Calorífico.....                                    | 250 |
| 7.2.9.   | Produção de $\text{CO}_2$ .....                          | 252 |
| 7.3.     | GASOLINA.....                                            | 252 |
| 7.3.1.   | Índice de Octano.....                                    | 253 |
| 7.4.     | GASÓLEO.....                                             | 255 |
| 7.5.     | OUTROS COMBUSTÍVEIS .....                                | 257 |
| 7.5.1.   | Combustíveis Gasosos .....                               | 258 |
| 7.5.1.1. | Gases de petróleo liquefeitos (GPL – LPG) .....          | 260 |

|           |                                                          |     |
|-----------|----------------------------------------------------------|-----|
| 7.5.1.2.  | Gás natural .....                                        | 261 |
| 7.5.1.3.  | Hidrogénio .....                                         | 262 |
| 7.5.2.    | Álcoois, Éteres e outros Oxigenados.....                 | 263 |
| 7.5.2.1.  | Álcoois.....                                             | 264 |
| 7.5.2.2.  | Éteres.....                                              | 265 |
| 7.5.2.3.  | Ácidos gordos (gorduras) .....                           | 265 |
| 7.5.2.4.  | Ésteres (biodiesel).....                                 | 266 |
| 7.5.2.5.  | Estequiometria da combustão dos álcoois .....            | 268 |
| 7.5.2.6.  | Pressão de vapor dos álcoois.....                        | 269 |
| 7.5.2.7.  | Calor latente de vaporização dos álcoois.....            | 270 |
| 7.5.2.8.  | Solubilidade dos álcoois.....                            | 271 |
| 7.5.2.9.  | "Flash point" dos álcoois.....                           | 271 |
| 7.5.2.10. | Índice de octano ( <i>IO</i> ) dos álcoois .....         | 271 |
| 7.5.2.11. | Pré-ignição dos álcoois.....                             | 272 |
| 7.5.2.12. | Potencial de emissão de poluentes dos álcoois .....      | 272 |
| 7.5.2.13. | Reformação do metanol .....                              | 273 |
| 7.5.2.14. | Corrosão com os álcoois.....                             | 274 |
| 7.5.2.15. | Segurança com o uso dos álcoois .....                    | 274 |
| 7.5.2.16. | DME (éter dimetílico).....                               | 275 |
| 7.5.2.17. | Nitrometano.....                                         | 276 |
| 7.5.2.18. | Biodiesel .....                                          | 277 |
| 7.5.3.    | Combustíveis Involgares .....                            | 279 |
| 7.5.3.1.  | Acetileno e amoníaco .....                               | 279 |
| 7.5.3.2.  | Combustíveis que forneçam mais potência.....             | 279 |
| 7.5.4.    | Combustíveis Sintéticos .....                            | 280 |
| 7.5.5.    | Carvão (Emulsão – "Slurry").....                         | 280 |
| 7.5.6.    | Óxido Nitroso.....                                       | 281 |
| 7.6.      | ÓLEOS LUBRIFICANTES.....                                 | 282 |
| 7.6.1.    | Testes e Propriedades dos Óleos .....                    | 282 |
| 7.6.2.    | Óleos Sintéticos.....                                    | 284 |
| 7.6.3.    | Classificação dos Óleos Lubrificantes para Motores ..... | 285 |
| 7.6.4.    | Outras Propriedades.....                                 | 288 |
| 7.7.      | PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS .....                        | 289 |
| 7.7.1.    | Biodiesel .....                                          | 289 |
| 7.7.2.    | Bioetanol .....                                          | 290 |

## **Capítulo 8. COMBUSTÃO NOS MOTORES ..... 293**

|        |                                                                |     |
|--------|----------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.   | COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO COMANDADA ( <i>IC</i> ) ..... | 293 |
| 8.1.1. | Caracterização da Combustão Normal.....                        | 294 |
| 8.2.   | PARÂMETROS DA COMBUSTÃO NOS MOTORES DE <i>IC</i> .....         | 298 |
| 8.2.1. | Turbulência.....                                               | 298 |
| 8.2.2. | Taxa de Compressão.....                                        | 300 |
| 8.2.3. | Avanço da Ignição.....                                         | 301 |
| 8.2.4. | Qualidade da Faísca.....                                       | 302 |

|           |                                                                                   |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2.5.    | Riqueza da Mistura.....                                                           | 302 |
| 8.2.6.    | Nível de Preparação da Mistura.....                                               | 302 |
| 8.2.7.    | Carga e Velocidade do Motor .....                                                 | 303 |
| 8.2.8.    | Temperatura, Pressão e Humidade do Ar .....                                       | 304 |
| 8.2.9.    | Características do Combustível.....                                               | 304 |
| 8.3.      | CÂMARAS DE COMBUSTÃO DOS MOTORES DE IC .....                                      | 305 |
| 8.3.1.    | Câmara em "L" e em "T" (de Válvulas Laterais).....                                | 306 |
| 8.3.2.    | Câmara de Turbulência ou de "Ricardo" .....                                       | 307 |
| 8.3.3.    | Câmara em Banheira.....                                                           | 307 |
| 8.3.4.    | Câmara em Cunha ou Triangular .....                                               | 308 |
| 8.3.5.    | Câmara Hemisférica.....                                                           | 308 |
| 8.3.6.    | Câmara Trapezoidal ou "Sem Câmara".....                                           | 309 |
| 8.3.7.    | Câmara no Pistão .....                                                            | 309 |
| 8.3.8.    | Câmara de 4 Válvulas "Telhado de Alpendre" ("Pent-Roof") .....                    | 310 |
| 8.3.9.    | Câmara de 4 Válvulas Radiais.....                                                 | 311 |
| 8.3.10.   | Câmaras com mais de 4 Válvulas.....                                               | 311 |
| 8.4.      | COMBUSTÃO ANORMAL .....                                                           | 312 |
| 8.4.1.    | Pré-Ignicção (Ignicção à Superfície).....                                         | 313 |
| 8.4.2.    | Auto-Ignicção .....                                                               | 314 |
| 8.4.3.    | "Knock" (Grilar).....                                                             | 314 |
| 8.4.3.1.  | Detonação .....                                                                   | 319 |
| 8.4.4.    | Parâmetros Relativos ao "Knock" .....                                             | 319 |
| 8.4.4.1.  | Avanço da ignição .....                                                           | 319 |
| 8.4.4.2.  | Combustível .....                                                                 | 319 |
| 8.4.4.3.  | Taxa de compressão.....                                                           | 320 |
| 8.4.4.4.  | Turbulência.....                                                                  | 320 |
| 8.4.4.5.  | Carga imposta.....                                                                | 320 |
| 8.4.4.6.  | Riqueza da mistura.....                                                           | 320 |
| 8.4.4.7.  | Velocidade do motor.....                                                          | 320 |
| 8.4.4.8.  | Temperatura e pressão de admissão .....                                           | 320 |
| 8.4.4.9.  | Temperatura do motor.....                                                         | 321 |
| 8.4.4.10. | Câmara de combustão .....                                                         | 321 |
| 8.4.4.11. | Preparação da mistura.....                                                        | 321 |
| 8.4.4.12. | Recirculação de gases de escape (EGR).....                                        | 321 |
| 8.4.5.    | Índice de Octano.....                                                             | 321 |
| 8.4.5.1.  | Outras condições que originam alterações no <i>IO</i> requerido por um motor..... | 323 |
| 8.4.5.2.  | Combustíveis .....                                                                | 323 |
| 8.4.6.    | "Rateres" ("Backfire").....                                                       | 324 |
| 8.5.      | COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO (IPC).....                        | 325 |
| 8.5.1.    | Características da Combustão .....                                                | 325 |
| 8.5.2.    | Preparação da Mistura.....                                                        | 326 |
| 8.5.3.    | Tipo de Combustão .....                                                           | 327 |
| 8.5.4.    | Combustíveis.....                                                                 | 328 |
| 8.5.5.    | As Fases da Combustão nos Motores de IPC.....                                     | 328 |
| 8.5.5.1.  | Atraso da inflamação.....                                                         | 328 |

|          |                                                                      |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.5.5.2. | Combustão detonante ou explosiva .....                               | 330 |
| 8.5.5.3. | Combustão controlada ou progressiva.....                             | 330 |
| 8.5.5.4. | Combustão por difusão.....                                           | 331 |
| 8.6.     | PARÂMETROS DA COMBUSTÃO NOS MOTORES DE <i>IPC</i> .....              | 331 |
| 8.6.1.   | Sistema de Injeção.....                                              | 332 |
| 8.6.1.1. | Atomização.....                                                      | 333 |
| 8.6.1.2. | Penetração do “spray” .....                                          | 334 |
| 8.6.1.3. | Distribuição de tamanhos das gotas.....                              | 334 |
| 8.6.1.4. | Avanço da injeção .....                                              | 335 |
| 8.6.1.5. | Carga ou quantidade de massa injetada.....                           | 335 |
| 8.6.2.   | Turbulência.....                                                     | 335 |
| 8.6.3.   | Taxa de Compressão .....                                             | 336 |
| 8.6.4.   | Combustíveis.....                                                    | 336 |
| 8.6.5.   | Outros Parâmetros.....                                               | 337 |
| 8.6.5.1. | Pressão e temperatura de admissão.....                               | 337 |
| 8.6.5.2. | Sobrealimentação .....                                               | 337 |
| 8.6.5.3. | Velocidade do motor.....                                             | 337 |
| 8.6.6.   | Câmaras de Combustão dos Motores de <i>IPC</i> .....                 | 338 |
| 8.6.6.1. | Câmaras de injeção direta .....                                      | 338 |
| 8.6.6.2. | Câmaras de injeção indireta.....                                     | 339 |
| 8.7.     | VARIABILIDADE DA COMBUSTÃO.....                                      | 340 |
| 8.7.1.   | Valores Experimentais de $VAR_{pmj}$ .....                           | 341 |
| 8.8.     | MOTORES COM DIFERENTES PROCESSOS DE COMBUSTÃO .....                  | 342 |
| 8.8.1.   | Motores de Carga Estratificada.....                                  | 343 |
| 8.8.1.1. | Motor Honda CVCC .....                                               | 344 |
| 8.8.1.2. | Injeção direta .....                                                 | 344 |
| 8.8.1.3. | Sistema ignição por jato turbulento.....                             | 345 |
| 8.8.2.   | CAI (“Controlled Auto Ignition”).....                                | 346 |
| 8.8.3.   | Motores <i>HCCI</i> (“Homogeneous Charge Compression Ignition”)..... | 348 |
| 8.8.4.   | Motores “Dual-Fuel” (com 2 Tipos de Combustível).....                | 351 |

## **Capítulo 9. PRODUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE POLUENTES ..... 353**

|          |                                              |     |
|----------|----------------------------------------------|-----|
| 9.1.     | INTRODUÇÃO.....                              | 353 |
| 9.2.     | LEGISLAÇÃO EUROPEIA.....                     | 357 |
| 9.2.1.   | Dados Históricos.....                        | 357 |
| 9.2.2.   | Legislação Europeia Atual (Automóveis) ..... | 359 |
| 9.2.3.   | Legislação Europeia Atual (Pesados).....     | 362 |
| 9.2.4.   | Legislação Futura.....                       | 362 |
| 9.3.     | POLUENTES.....                               | 363 |
| 9.3.1.   | Proveniência dos Poluentes.....              | 364 |
| 9.3.1.1. | Motores de ignição comandada.....            | 364 |
| 9.3.1.2. | Motores de ignição por compressão.....       | 365 |
| 9.3.1.3. | Fontes de poluentes na Europa.....           | 366 |
| 9.3.2.   | Toxicidade dos Poluentes .....               | 366 |

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.4. MECANISMO DE FORMAÇÃO DE POLUENTES.....                                                   | 368 |
| 9.4.1. Óxidos de Azoto.....                                                                    | 368 |
| 9.4.2. Monóxido de Carbono.....                                                                | 371 |
| 9.4.3. Hidrocarbonetos Não Queimados.....                                                      | 371 |
| 9.4.4. Partículas (PM – Particulate Matter) ou Fumo.....                                       | 372 |
| 9.5. SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA.....                                                             | 374 |
| 9.5.1. Soluções Iniciais.....                                                                  | 374 |
| 9.5.1.1. Legislação Federal dos Estados Unidos.....                                            | 374 |
| 9.5.2. Motores de Carga Estratificada.....                                                     | 375 |
| 9.5.3. Catalisador de Triplo Efeito, Sonda $\lambda$ , "Closed-Loop" e Injeção Eletrônica..... | 377 |
| 9.5.3.1. Reações no catalisador.....                                                           | 379 |
| 9.5.4. Motores de Queima Pobre.....                                                            | 379 |
| 9.5.5. Motores Diesel.....                                                                     | 380 |
| 9.5.5.1. Catalisadores de oxidação.....                                                        | 382 |
| 9.5.5.2. Redução seletiva de $NO_x$ (SCR).....                                                 | 382 |
| 9.5.5.3. Adsorção de $NO_x$ (LNT).....                                                         | 383 |
| 9.5.5.4. EGR (recirculação dos gases de escape).....                                           | 383 |
| 9.5.5.5. Conteúdo de enxofre do combustível.....                                               | 384 |
| 9.5.5.6. Número de válvulas.....                                                               | 384 |
| 9.5.5.7. Turbulência.....                                                                      | 385 |
| 9.5.5.8. Avanço da injeção.....                                                                | 385 |
| 9.5.5.9. Pressão de injeção.....                                                               | 385 |
| 9.5.5.10. Componentes.....                                                                     | 385 |
| 9.5.5.11. Turbo-compressores e "inter-coolers".....                                            | 386 |
| 9.5.5.12. Filtros de partículas.....                                                           | 386 |
| 9.5.5.13. Sistemas de injeção.....                                                             | 387 |
| 9.6. MOTORES A 2 TEMPOS.....                                                                   | 388 |
| 9.7. "ON-BOARD DIAGNOSTICS" – OBD.....                                                         | 390 |
| 9.7.1. OBD I e OBD II.....                                                                     | 390 |
| 9.7.2. Funcionamento.....                                                                      | 391 |
| 9.7.3. Códigos.....                                                                            | 393 |
| 9.7.4. Análise ao Catalisador.....                                                             | 394 |
| 9.8. SÍNTESE.....                                                                              | 394 |

## **Capítulo 10. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO E CÁLCULO ..... 397**

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| 10.1. RENDIMENTOS.....                                | 397 |
| 10.1.1. Rendimento de Combustão.....                  | 398 |
| 10.1.1.1. Dissociação.....                            | 400 |
| 10.1.1.2. Preparação da mistura.....                  | 400 |
| 10.1.1.3. Turbulência.....                            | 400 |
| 10.1.1.4. Modelo de libertação de calor.....          | 401 |
| 10.1.1.5. Cálculo da função de Wiebe.....             | 403 |
| 10.1.1.6. Cálculo da taxa de libertação de calor..... | 404 |
| 10.1.2. Rendimento Adiabático.....                    | 405 |

|           |                                                                                 |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10.1.2.1. | Transferência de calor para as paredes da câmara de combustão.....              | 405 |
| 10.1.2.2. | Motores adiabáticos.....                                                        | 407 |
| 10.1.2.3. | Injeção de água.....                                                            | 408 |
| 10.1.2.4. | Influência das condições de funcionamento.....                                  | 408 |
| 10.1.3.   | Rendimento Teórico.....                                                         | 409 |
| 10.1.4.   | Rendimento Relativo às Propriedades dos Fluidos.....                            | 410 |
| 10.1.4.1. | Riqueza da mistura.....                                                         | 411 |
| 10.1.4.2. | Capacidade calorífica específica do ar.....                                     | 411 |
| 10.1.4.3. | Propriedades dos gases intervenientes.....                                      | 413 |
| 10.1.5.   | Rendimento Inerente.....                                                        | 414 |
| 10.1.5.1. | Cálculo da transferência de calor num motor.....                                | 416 |
| 10.1.5.2. | Calor (latente) da vaporização do combustível.....                              | 419 |
| 10.1.6.   | Eficiência de Bombagem.....                                                     | 419 |
| 10.1.6.1. | Passagem nas válvulas.....                                                      | 420 |
| 10.1.6.2. | Número de Mach.....                                                             | 421 |
| 10.1.6.3. | Pressão média de bombagem.....                                                  | 423 |
| 10.1.6.4. | Gases residuais.....                                                            | 424 |
| 10.1.6.5. | Passagem na válvula limitadora do ar (acelerador).....                          | 424 |
| 10.1.7.   | Rendimento Mecânico.....                                                        | 425 |
| 10.1.7.1. | Pistão, segmentos e cilindro.....                                               | 427 |
| 10.1.7.2. | Chumaceiras.....                                                                | 430 |
| 10.1.7.3. | Sistema de distribuição.....                                                    | 432 |
| 10.1.7.4. | Acessórios.....                                                                 | 435 |
| 10.1.7.5. | Atrito total.....                                                               | 435 |
| 10.1.7.6. | Medição das perdas de atrito.....                                               | 436 |
| 10.1.8.   | Eficiência Volumétrica.....                                                     | 437 |
| 10.1.8.1. | Modelos de cálculo dos fluxos de gás no motor.....                              | 438 |
| 10.1.8.2. | Efeito de sintonia e inercial dos gases de admissão e escape.....               | 439 |
| 10.1.8.3. | Cálculo do escape do motor a 2 tempos.....                                      | 441 |
| 10.1.8.4. | Calor latente de vaporização do combustível.....                                | 443 |
| 10.1.8.5. | Temperatura do motor.....                                                       | 443 |
| 10.2.     | BALANÇO DE ENERGIA DO MOTOR.....                                                | 443 |
| 10.3.     | CÁLCULO DA ENERGIA DESCARREGADA NOS GASES DE ESCAPE.....                        | 445 |
| 10.4.     | CÁLCULO DA RIQUEZA DA MISTURA.....                                              | 447 |
| 10.4.1.   | Métodos de Cálculo.....                                                         | 448 |
| 10.4.1.1. | Shell-Thornton I.....                                                           | 448 |
| 10.4.1.2. | Shell-Thornton II.....                                                          | 449 |
| 10.4.1.3. | Equação de Spindt.....                                                          | 449 |
| 10.4.2.   | Riqueza da Mistura ( $\phi$ ) e Coeficiente de Excesso de Ar ( $\lambda$ )..... | 449 |
| 10.5.     | CONTROLO DO MOTOR.....                                                          | 450 |
| 10.5.1.   | O Sistema de Injeção.....                                                       | 451 |
| 10.5.1.1. | Medição do caudal de ar.....                                                    | 451 |
| 10.5.1.2. | Injeção da gasolina.....                                                        | 455 |
| 10.5.2.   | Ignição.....                                                                    | 461 |
| 10.5.3.   | "Ralenti".....                                                                  | 462 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 10.5.4. Tempo de Resposta..... | 462 |
|--------------------------------|-----|

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 11. TESTE DE MOTORES.....</b> | <b>465</b> |
|-------------------------------------------|------------|

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.1. INTRODUÇÃO.....                                                                                    | 465 |
| 11.2. TIPOS DE DINAMÔMETROS.....                                                                         | 466 |
| 11.2.1. Dinamômetros de Inércia.....                                                                     | 466 |
| 11.2.2. Dinamômetros Hidráulicos.....                                                                    | 468 |
| 11.2.3. Dinamômetros Elétricos.....                                                                      | 468 |
| 11.2.4. Dinamômetros de Fricção.....                                                                     | 469 |
| 11.2.5. Comparação entre Dinamômetros.....                                                               | 469 |
| 11.3. O LABORATÓRIO DE TESTE.....                                                                        | 470 |
| 11.4. CARGA TÉRMICA RETIRADA NA VENTILAÇÃO.....                                                          | 473 |
| 11.4.1. Convecção e Radiação do Motor.....                                                               | 473 |
| 11.4.2. Convecção e Radiação do Escape.....                                                              | 474 |
| 11.4.3. Perdas no Dinamômetro.....                                                                       | 474 |
| 11.4.4. Perdas nas Tubagens de Água Quente.....                                                          | 474 |
| 11.5. FORNECIMENTO DE COMBUSTÍVEL, ÓLEO, ÁGUA, AR E RETIRAGEM<br>DE GASES QUEIMADOS E SUAS MEDIÇÕES..... | 475 |
| 11.5.1. Fornecimento de Combustível.....                                                                 | 475 |
| 11.5.2. Água de Arrefecimento.....                                                                       | 476 |
| 11.5.3. Ar de Combustão.....                                                                             | 477 |
| 11.5.4. Gases de Escape.....                                                                             | 480 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>Bibliografia .....</b> | <b>481</b> |
|---------------------------|------------|

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>Índice Remissivo .....</b> | <b>491</b> |
|-------------------------------|------------|

### 3º Tempo – **Expansão**

Idealmente, a combustão dever-se-ia desenrolar a volume constante, no *PMS*, sendo seguida pela expansão dos gases a elevada pressão. Na prática, isto não acontece, pois a ignição e a combustão não são instantâneas. Assim, é necessário fornecer a faísca à vela antes do *PMS*. O avanço à ignição (*AI*) serve para que a combustão da mistura se dê de modo a que a pressão máxima do ciclo ocorra depois do *PMS*, de maneira a aumentar a componente de pressão útil (a pressão exercida sobre o pistão no seu movimento ascendente é contraproducente, pois trava-o). Interessa também que a combustão se complete o mais rapidamente possível.

### 4º Tempo – **Escape**

A **abertura da válvula de escape** dá-se muito antes do pistão chegar ao *PMI*. Este avanço à abertura do escape (*AAE*) tem a função de permitir que grande parte dos gases queimados se escapem do cilindro o mais cedo possível, fazendo com que o pistão não encontre muita resistência durante o curso ascendente de escape e assim não incorra em muitas perdas por bombagem. A válvula fecha já depois do *PMS* (atraso ao fecho do escape – *RFE*), para permitir o lavar completo da câmara de combustão. Como já foi dito, na altura do fecho da válvula de escape é importante haver um pico negativo de pressões junto a ela, o que facilita a entrada à mistura.

O **diagrama de distribuição** de um motor convencional é apresentado na Fig.1.9.

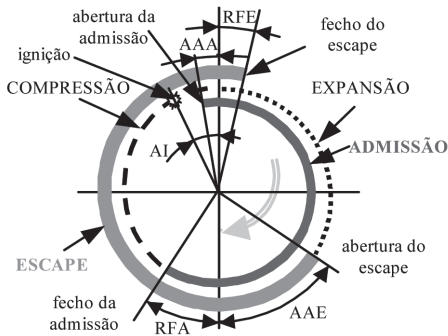


Fig.1.9 – Diagrama de distribuição

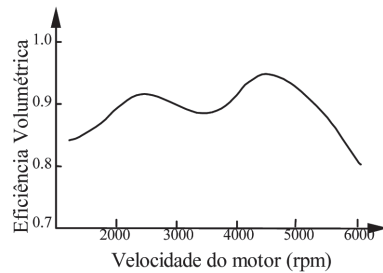


Fig.1.10 – Variação da eficiência volumétrica com a velocidade

Os efeitos dinâmicos das colunas gasosas são variáveis com a velocidade do motor, pois as ondas de pressão viajam a uma velocidade aproximadamente constante (velocidade do som nesse meio), qualquer que seja a velocidade do motor. As ondas de pressão são originadas pelas aberturas das válvulas dos diferentes cilindros, movem-se ao longo das condutas com uma certa velocidade, dependente das características do gás, e são refletidas por quaisquer discontinuidades que existam na conduta, nomeadamente em junções de tubos. Se a velocidade do motor variar, a fase da onda que chega a determinada válvula também variará.

Os motores que apresentam as condutas de admissão e de escape devidamente estudadas para aproveitar os efeitos dinâmicos da colunas gasosas, vulgarmente têm diagramas de binário em forma de bossas de camelo (Fig.1.10). Esta forma reflete a variação da eficiência volumétrica, e o segundo pico apresenta-se geralmente ao dobro da velocidade de rotação do primeiro.

O rotor tem uma cavidade circular internamente dentada que roda sobre uma roda dentada (RD) fixa à carcaça, enquanto que o veio de saída (V) apresenta uma excentricidade de modo a que o movimento do rotor lhe seja transmitido. A geometria é tal que o rotor está sempre engrenado na roda dentada e os seus 3 vértices estão sempre sobre a carcaça.

O funcionamento deste motor pode ser visto na Fig.1.14. Vamos seguir somente uma das 3 faces do rotor. Na posição da Fig.1.14-a, o volume (a cinza) entre o rotor e a carcaça aumenta, estando a janela de admissão aberta, pelo que estamos em presença da fase de admissão. Seguidamente, a janela é fechada pelo rotor e o volume começa a diminuir na fase de compressão (Fig.1.14-b). Esta fase dura até que o espaço livre seja o mínimo (equivalente ao PMS num motor alternativo) e, nessa altura, dá-se a faísca das velas (geralmente não simultâneas) seguida pela fase de expansão (Fig.1.14-c, -c1). No final da expansão abre-se a janela de escape, por onde os gases queimados são descarregados durante a fase de escape (Fig.1.14-d).



Fig.1.14 – Ciclo de funcionamento do motor Wankel

Enquanto um dos lóbulos do motor faz estas 4 fases, os restantes fazem-nas também (com desfaseamento), pelo que temos 3 fases motoras para cada rotação do rotor. Reparemos também que, para cada rotação do rotor, o eixo de saída realiza 3 rotações (o rotor sobe e desce 3 vezes), pelo que haverá uma fase motora para cada rotação do veio, o que torna este motor semelhante ao motor a 2 tempos. Na verdade, o motor Wankel é muito suave e isento de vibrações, pois funciona como um a 2 tempos e não apresenta movimentos alternativos. A sua subida de rotação é muito rápida, pela razão anterior e porque as peças em movimento têm pouca inércia. Outras vantagens são a elevada potência (dobro dos motores convencionais com a mesma cilindrada), elevada velocidade máxima de funcionamento e baixo volume e peso.

Porém, os inconvenientes deste motor são muitos:

- é difícil vedar-se a câmara de combustão, pois o rotor necessita de segmentos nos seus vértices e ao longo da periferia dos lóbulos, o que significa 9 zonas de vedação (cada zona poderá ter um ou mais segmentos);
- as perdas por atrito são elevadas graças ao elevado número de segmentos (embora não tenha sistema de distribuição);
- existe uma altura em que ambas as janelas estão abertas, o que pode ocasionar um “curto-circuito” da mistura diretamente para o escape;
- a câmara de combustão não é compacta (é extremamente longa), o que leva a problemas de combustão (estabilidade de chama, que obriga ao uso de 2 ou mesmo 3 velas) e a grandes perdas de calor, reduzindo o rendimento;

propuseram a compressão prévia da mistura (entre 3 e 8 atmosferas, o que daria um rendimento teórico de cerca de 30%) a admitir no cilindro do motor tipo **Lenoir** e, dois anos após, **Beau de Rochas** divulga o princípio do ciclo de 4 tempos com compressão prévia e combustão a volume constante.

Tab.2.1 – Comparação entre motor atmosférico (Otto & Langen) e de compressão prévia (Otto)

|                       | Otto & Langen | Otto (4 tempos) |
|-----------------------|---------------|-----------------|
| data (ano)            | 1876          | 1882            |
| potência (Cv)         | 2             | 2               |
| peso do motor (kg)    | 2 000         | 560             |
| cilindrada (L)        | 80.3          | 5.1             |
| velocidade (rpm)      | 90            | 160             |
| rendimento global (%) | 11            | 14              |

Beau de Rochas apresentou (em França, em 1862) uma proposta de patente (que não pagou, pelo que foi invalidada no ano seguinte) onde sugeria 4 pontos para o desenvolvimento do “seu” motor:

- 1 – um cilindro com o máximo de volume e o mínimo de superfície;
- 2 – a mais alta velocidade possível;
- 3 – a maior expansão possível;
- 4 – a maior pressão possível no início da expansão.

Antes da suspensão da patente de **Otto**, vários construtores adotaram o ciclo de **2 tempos** com compressão prévia, como Dugald Clerk (Escócia), James Robson (Inglaterra) e Karl Benz (Alemanha) e mesmo o de 6 tempos, para fugirem aos direitos. Em 1882, **Daimler**, ligado a **Maybach**, cria a sua própria companhia (atualmente a mais antiga na produção de motores), produzindo motores a 4 tempos extremamente leves para a época, que foram utilizados em motos, automóveis, barcos, locomotivas e aviões. Estes motores foram fabricados sob licença em França por Panhard e Levassor, marcando o início da produção de veículos nesse país.

Porém, o motor anterior mais parecido com o de Otto foi o desenvolvido por **Barnett** em 1838, que já possuía compressão prévia, embora fosse de 2 tempos, compreendendo meios-tempos de admissão, compressão, expansão e escape.

O ciclo teórico deste motor está esquematizado na Fig.2.10. Em 1 dá-se a combustão da mistura a volume constante até ao ponto 2, seguindo-se a meia-expansão até 3, altura em que se abre a válvula de escape e a pressão baixa até ao ponto 4. Nesta altura a válvula de admissão abre, e o pistão continua o seu curso até o ponto 5, admitindo mistura fresca (meia-admissão). Seguidamente, o pistão desloca-se para a esquerda e uma válvula de escape abre, de modo a que os restantes gases queimados que ainda estavam no cilindro sejam expulsos, após o que a mistura é comprimida até o ponto 1.

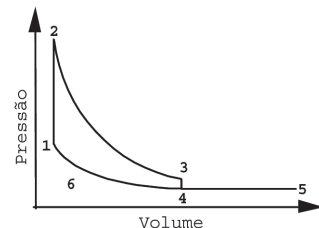


Fig.2.10 – Ciclo de Barnett

O ciclo dever-se-ia fechar (4-1) por uma retirada de calor isobárica a pressão atmosférica, mas, na realidade, o que acontece é a substituição dos gases queimados por ar fresco à mesma pressão. Para a realização prática deste ciclo (Fig.3.30) usa-se um compressor (1-2), uma câmara de combustão (2-3) e uma turbina (3-4).

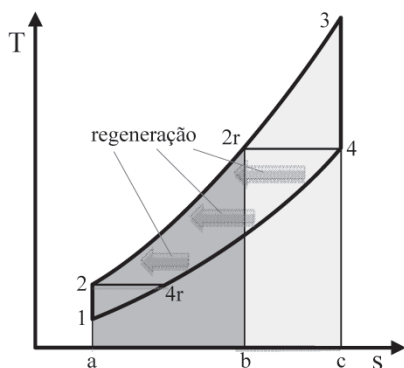


Fig.3.29 – Ciclo teórico de turbinas de gás

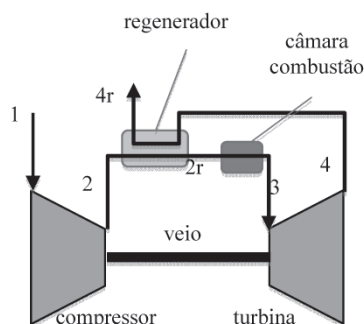


Fig.3.30 – Funcionamento de turbina de gás

Este ciclo permite a regeneração de calor interna, onde se dá o aproveitamento da entalpia de parte dos gases de escape. A **regeneração** é efetuada entre os pontos 4-4r (fornece calor) e 2-2r (recebe calor). No diagrama T-s (Fig.3.29) pode-se ver o potencial de poupança de combustível (o calor relativo à área a-2-2r-b da área a-2-3-c deixa de ser fornecido). As **turbinas de reação** não usam a regeneração por problemas construtivos, porque à saída não se pode perturbar o escoamento dos gases, pois perderiam velocidade, além de interferirem com a área frontal da turbina, o que iria aumentar o arrasto e consigo o consumo. Nas turbinas com regeneração, o fluxo dos gases de saída e/ou os de entrada terão de ter o escoamento invertido, pelo que este tipo de turbina nunca poderá ser tão “elegante” como as finas turbinas de reação.

Um outro fator que influencia o funcionamento e rendimento das turbinas de gás é a **razão de pressões**, determinada como o quociente entre a pressão de combustão e a atmosférica ( $R_p = p_2/p_1$ , na Fig.3.29). O **rendimento ( $\eta$ ) do ciclo de Joule-Brayton** é (Fig.3.31, linha grossa)

$$\eta = 1 - R_p^{-\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (3.23)$$

em que  $\gamma$  é a razão das capacidades caloríficas do gás.

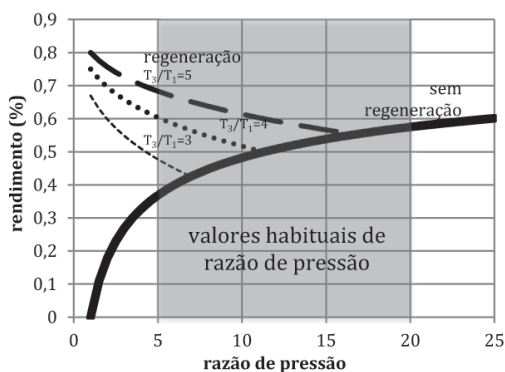


Fig.3.31 – Rendimento do ciclo de turbinas de gás (com e sem regeneração)

#### 4.2.4.6. Eficiência de bombagem

As perdas por bombagem são particularmente importantes em motores de ignição comandada, em que a carga é controlada pela restrição à passagem de ar. Nesse caso, o motor trabalha como uma bomba de vácuo, de modo a fornecer aos cilindros uma mistura a baixa pressão. A área do ciclo indicado (real) é dada pela área inerente deduzida da de bombagem (Fig.4.4). No caso de motores sobrealimentados (ou motores com elevados efeitos de “ram” e sintonia), esta eficiência poderá ser superior à unidade, pois a pressão de admissão pode ser mais elevada que a de escape, sendo esta área positiva.

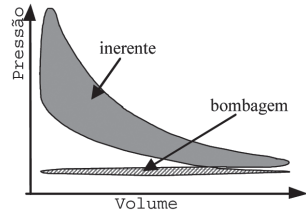


Fig.4.4 – Ciclo indicado

$$e_B = 1 - \frac{\text{perdas de bomb.}}{\text{trab. do ciclo inerente}} = \frac{\text{trab. do ciclo indicado}}{\text{trab. do ciclo inerente}} = \frac{W_i}{W_l}$$

#### 4.2.4.7. Rendimento mecânico

Num motor real, as maiores perdas são as resultantes dos atritos mecânicos e hidráulicos (bombagem de fluidos, com exceção da admissão). O rendimento mecânico relaciona o trabalho produzido no interior dos cilindros (calculado pelo diagrama indicado) com o disponível no veio motor.

$$\eta_M = 1 - \frac{\text{perdas por atrito}}{\text{trab. do ciclo indicado}} = \frac{\text{trabalho efectivo}}{\text{trabalho do ciclo indicado}} = \frac{W_e}{W_i}$$

É possível calcular-se o rendimento mecânico pela medição das perdas por atrito. Tal pode ser feito diretamente, medindo a potência necessária para rodar um motor a uma dada velocidade, se dispusermos de um freio dinamométrico elétrico (ver Cap.11.2.3). Uma outra maneira consiste na inoperação de um cilindro (retirando-se a corrente ao injetor ou à vela\*) e medir-se a diferença de potência para a mesma velocidade, mantendo-se a posição do acelerador. Ambos os métodos não são totalmente corretos, pois o atrito pistão-cilindro é maior quando existe combustão, dado que a pressão sobre o pistão resulta em forças tangenciais derivadas da obliquidade da biela. Uma metodologia mais correta consiste no cálculo do trabalho do ciclo indicado (inerente menos bombagem) e na sua comparação com o binário do motor (ver Cap.10.1.7.6).

#### 4.2.4.8. Rendimento total

O produto de todos os rendimentos referidos dá-nos a relação entre o trabalho produzido pelo motor e a energia do combustível que nele é queimado.

\* Em motores dotados de catalisador dever-se-á cortar a injeção, pois quando se corta a ignição a mistura ar-gasolina entra em reação no catalisador, destruindo-o.

Para aumentar o binário de um motor dever-se-á aumentar a sua cilindrada ou operar os 4 últimos pontos apresentados para o aumento de potência. Motores a gasolina sem sobrealimentação com  $\eta_t = 0.35$  e  $e_{vol} = 1$  e  $\lambda = 1$  conseguirão  $100 \text{ Nm/L}_{cil}$ , enquanto que Diesels atmosféricos não passarão dos  $70 \text{ Nm/L}_{cil}$ , pois a eficiência volumétrica é mais baixa e trabalham com mais de 25% de excesso de ar. Mas, nos novos motores Diesel com elevada pressão de admissão e melhores eficiências volumétricas (4 val/cil), o  $p_{ar}$  pode ser cerca de 3 vezes mais elevado, pelo que são possíveis binários superiores a  $200 \text{ Nm/L}_{cil}$ .

### 4.3. CICLO INDICADO

A designação de **ciclo indicado** provém do mecanismo utilizado nas antigas máquinas de vapor, que tinha por finalidade a regulação da distribuição pelo maquinista. Como a velocidade de funcionamento de tais máquinas era reduzida, o indicador traçava o ciclo de pressões em tempo real, em função da deslocação do pistão (Fig.4.6). Assim, o ciclo indicado representa o diagrama de pressões existentes dentro do cilindro como função do deslocamento do pistão ou ângulo de rotações da cambota. Uma aparelhagem como a da Fig.4.6 não pode ser usada nos novos motores, pois as elevadas acelerações não seriam aceitáveis.

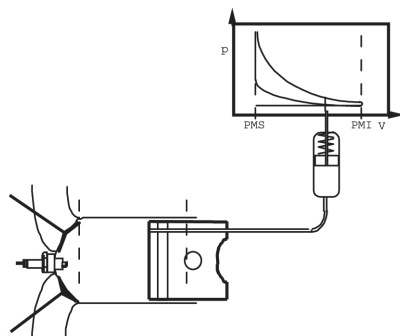


Fig.4.6 – Esquema dum indicador e ciclo indicado função da posição do pistão

Atualmente é possível desenhar-se o ciclo indicado (mesmo que as velocidades dos motores sejam muito elevadas) pelo recurso a sensores de pressão colocados no interior do cilindro e de posição da cambota. Os sinais podem ser apresentados num osciloscópio ou analisados num computador, no formato apresentado na Fig.4.7. Manuseando-se a informação obtida num ou em vários ciclos, é possível obterem-se valores que possibilitam a análise do comportamento do motor, como a seguir se explicará. O diagrama da Fig.4.6 pode ser convertido no da Fig.4.7 por uma simples transformação de coordenadas, conhecendo-se o comprimento da biela ( $L$ ) e o raio da cambota ( $R=D/2$ ), como se pode ver na Fig.4.8.

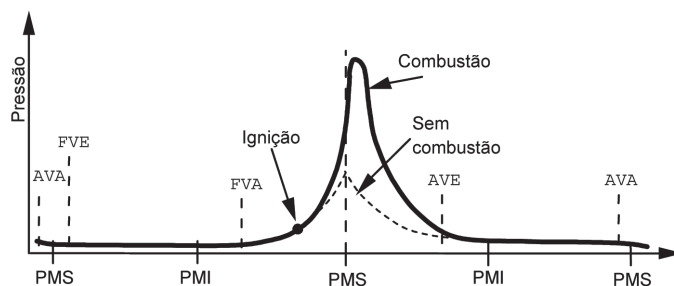


Fig.4.7 – Ciclo indicado em função do ângulo de cambota

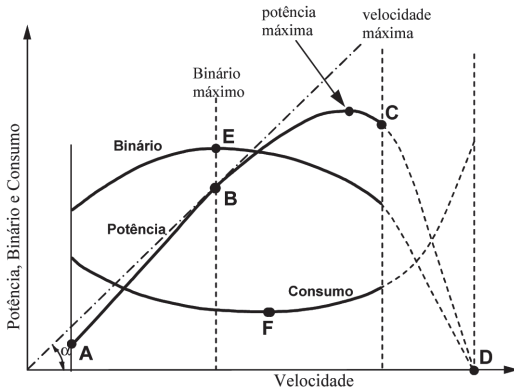


Fig.4.11 – Curvas características do motor com carburador

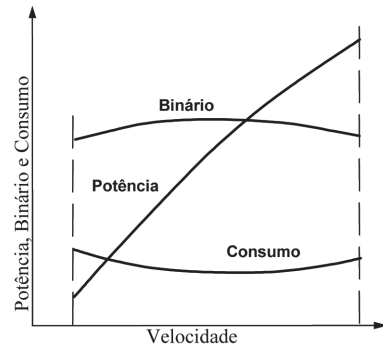


Fig.4.12 – Curvas características do motor Diesel

Os motores a gasolina de injeção, como não são restringidos pelo “venturi” do carburador, apresentam o mesmo problema, sendo dotados de limitador de regime, cortando a injeção de combustível. Um motor a carburador apresenta as características da Fig.4.11, nos quais, não havendo carga resistente, o motor não excede o ponto D. Isto acontece quando se pressiona completamente o acelerador em ponto morto (sem binário resistente). Esta situação é, no entanto, de evitar, pois o ponto de velocidade máxima permitido ao motor (C) foi excedido.

#### 4.4.1. Curva do Binário

O valor do **binário** indicado é, aproximadamente, proporcional à quantidade de ar que entra no motor em cada ciclo, como atrás foi explicado. A baixas rotações, os avanços e atrasos à abertura e fecho das válvulas do escape e da admissão resultam em baixo binário, mas, com o aumento de velocidade, o efeito dinâmico das colunas gasosas vai ganhando importância, permitindo que mais ar seja admitido em cada ciclo, chegando ao ponto de **binário máximo**. A partir daqui, o aumento de rotação implica que as perdas de carga nos coletores e válvulas invertem esta tendência. O binário efetivo sofre ainda uma redução suplementar a rotações elevadas relativamente ao indicado, mercê do aumento das perdas por atrito. Assim se explica a forma da curva de binário apresentada na Fig.4.11, na qual se dá um aumento inicial, seguido por uma redução do seu valor com o crescimento da velocidade. Os motores Diesel lentos não são dotados de efeitos dinâmicos (rodam a pouca velocidade) nem têm restrições nas condutas que afetem a eficiência volumétrica. Desta maneira, é compreensível que apresentem curvas de binário praticamente horizontais, como indicado na Fig.4.12. Os motores Diesel semi-rápidos apresentam características híbridas dos motores lentos (Diesel) e rápidos (a gasolina).

#### 4.4.2. Curva da Potência

Como a **potência** é dada pelo produto do binário pela velocidade, a sua forma advirá da do binário. Durante a fase em que o binário aumenta com as rotações, a curva da potência cresce rapidamente até ao ponto de binário máximo. A partir daí o seu aumento é originado somente pelo aumento da velocidade, visto que o binário baixa, atingindo um ponto de máximo. À direi-

elevadas velocidades de rotação. As elevadas velocidades aumentam as perdas por atrito, limitam o desenvolvimento eficiente da combustão e obrigam a aberturas prematuras da válvula de escape, reduzindo o curso útil de expansão.

No entanto, alguns motores de competição apresentam **consumos específicos** verdadeiramente extraordinários (muito baixos). Estes motores geralmente são turbo-comprimidos, a sua velocidade máxima não é excessiva e usam **misturas pobres**. O efeito conjunto destes elementos (mas principalmente da mistura pobre) permite consumos muito baixos, possibilitando a minimização do número de reabastecimentos em provas de resistência, ou atingir os consumos limites.

Um destes motores bastante eficientes foi o M119 HL montado num Mercedes-Benz de grupo C, que venceu as 24 Horas de Le Mans de 1990 (Fig.4.17). Em qualificação (mistura estequiométrica), o motor debitava 680 kW (912 Cv) às 7 000 rpm, enquanto que em corrida (mistura pobre), este valor caía para 530 kW (710 Cv), mas com um consumo específico de 260 g/kW·h nessas condições (HIERET *et al.*, 1992)

O melhor valor de consumo aparecia às 4 000 rpm, sendo de 235 g/kW·h, valor mínimo típico de um motor Diesel de câmara auxiliar. O motor era um V8 de 5 L e 4 válvulas por cilindro, derivado do de série, com o compressor limitado a 2 bar (absolutos) e com sensor de detonação em cada cilindro. Com este motor, o carro conseguiu atingir os 51 L/100km, que constituíam o limite para a prova.



Fig.4.17 – Mercedes-Benz Grupo C (1990)

Mas os extraordinários motores que apareceram na Formula 1 em 2014 conseguiram exceder largamente estes rendimentos. As contas são fáceis de fazer, pois o caudal de combustível está limitado a 100 L/hora e como atualmente eles têm mais de 750 CV, o rendimento é de 45% e o consumo específico cerca de 180 g/kW·h.

4.4.5. Fatores de Correção para Potência e Eficiência Volumétrica

A pressão, a temperatura e a humidade do ar ambiente podem fazer variar notoriamente a potência de um motor. Fatores de correção têm de ser utilizados para que, por exemplo, se possam comparar motores que foram ensaiados em condições diferentes, de modo a que todas as medições possam ser comparáveis. Todos os valores experimentais terão de ser referidos ao valor para ar atmosférico padrão (que aparece na Tab.4.2).

Tab.4.2 – Valores para o ar atmosférico padrão

| Pressão atmosférica | Pressão de vapor | Temperatura |
|---------------------|------------------|-------------|
| 98.2 kPa            | 1287 Pa          | 29.4 °C     |

O desenho do escape (ver Cap.5.4.3.4 e 10.1.8.3) destes motores é fundamental para o seu bom funcionamento, pois permite que parte dos gases frescos expulsos pelo escape sejam “devolvidos” ao cilindro, conseguindo-se, nalguns casos, aprisionar mais mistura do que a que teoricamente lá caberia.

### 4.5.1. Taxa de Compressão

Durante a primeira parte da subida do pistão (Fig.4.20), a janela de escape permanece aberta, pelo que não é possível dar-se a compressão dos gases dentro do cilindro. Somente após o fecho desta janela começa a compressão propriamente dita. Assim, poderemos especificar duas taxas de compressão

- **geométrica**  $\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_{cc}}$

- **retida**  $\varepsilon_{ret} = \frac{V_{ret}}{V_{cc}}$

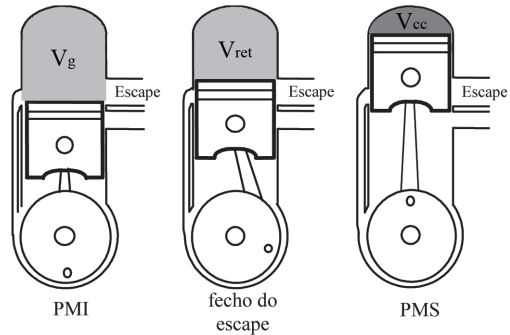


Fig.4.20 – Geometria do motor a 2 tempos

A existência destas duas relações dá motivo a dificuldades na comparação entre motores diferentes, pois os construtores poderão apontar uma ou outra como a “taxa de compressão” do seu motor. Por esta razão, vemos especificações de taxas de compressão para motores a 2 tempos de ignição comandada, variando de 6:1 (retida) até 15:1 (geométrica).

### 4.5.2. Eficiências de Enchimento

O motor a 2 tempos é de análise mais complexa do que o motor a 4 tempos, pois não existe segregação entre os vários processos do ciclo. Assim, enquanto que no motor a 4 tempos geralmente é suficiente apresentar a eficiência volumétrica como medida da eficácia do processo de lavagem (retiragem dos gases de escape e fornecimento de gases frescos), no motor a 2 tempos são necessários vários parâmetros (ver na Fig.4.21 o significado da simbologia) (BLAIR, 1996):

- **relação de entrega**  $RE = \frac{m_{form}}{m_{vv}}$  (“delivery ratio”)
- **rendimento de retenção**  $\eta_{ret} = \frac{m_{ret}}{m_{form}}$  (“trapping efficiency”)
- **rendimento de lavagem (pureza)**  $\eta_{lav} = \frac{m_{ret}}{m_{total}}$  (“scavenging efficiency” ou “purity”)
- **eficiência de fornecimento**  $e_{form} = \frac{m_{ret}}{m_{vv}}$  (“charging efficiency”)
- **eficiência de enchimento**  $e_{ench} = \frac{m_{total}}{m_{vv}}$  (“relative cylinder charge”)

Embora haja muitas variáveis em jogo, ao longo dos anos tem-se visto que a potência dos motores tem sido proporcional à sua velocidade de rotação (Fig.4.27), ou seja, o produto dos 3 rendimentos pela eficiência volumétrica manteve-se constante. De notar que o motor Mercedes W196 (Fig.4.28), embora usasse combustível sofisticado (uma mistura de álcoois e outros produtos), cai sobre a linha, mostrando que a sua sofisticação em termos de desenho (provavelmente câmara de combustão) era inferior à dos motores mais modernos. No entanto, o nitrometano usado no Vanwall de 1957 fê-lo passar essa linha.

Esta figura faz-nos perceber a evolução destes motores: aumentar a velocidade de rotação mantendo o produto dos 3 rendimentos e da eficiência volumétrica.

O nível de sofisticação imposto aos motores pode ser visto na Fig.4.29, em que nos aparece a velocidade de rotação máxima dos motores relativamente ao ano de construção.

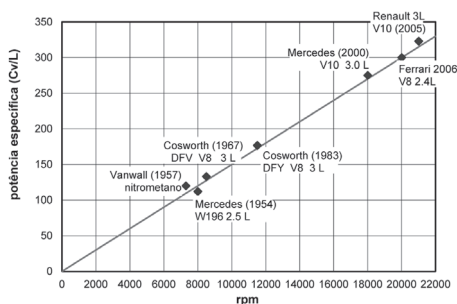


Fig.4.27 – Potência específica dos motores de F1  
função da velocidade

Como se pode verificar, o aumento da velocidade dos motores até 2006 foi quase exponencial, mas a partir desse ano houve uma limitação de velocidade máxima dos motores, de modo a travar o escalar dos custos relacionados com o seu desenvolvimento.

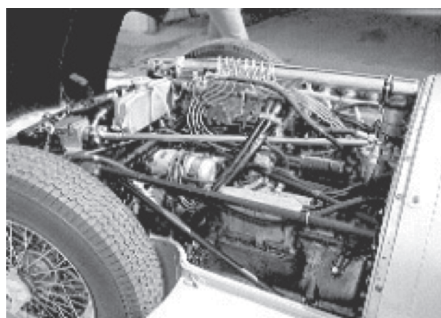


Fig.4.28 – Motor do Mercedes W196

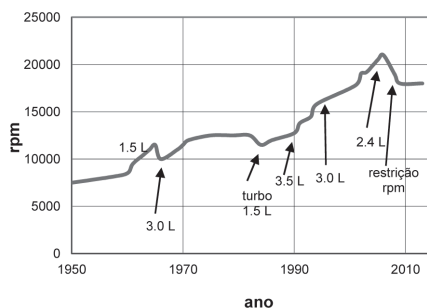


Fig.4.29 – Velocidade máxima dos motores ao longo dos anos

Em 30 anos a rotação máxima mais do que duplicou. De notar que as forças de inércia nos diferentes componentes internos (pistões, bielas, válvulas, etc.) aumentam com o quadrado da velocidade do motor, pelo que este aumento teve de ser, em parte, conseguido à custa da redução da massa dos componentes e da amplitude do seu movimento.

Para aumentar a velocidade de rotação, os construtores desde sempre aumentaram ao número de cilindros (limitado a 8 até 2014) e reduziram o curso dos pistões. Os motores Cosworth DFV de 1966 tinham uma relação  $D/C$  (diâmetro/curso) de 1.3:1, enquanto que nos motores anteriores a 2014 esta relação é de 2.46:1, estabelecida por regulamento (FIA, 2012). Esta redução do

Tab.5.2 – Redução da massa do volante de inércia com o aumento do número de cilindros (para que a velocidade não varie mais do que 10% ao “ralenti”)

| nº de cilindros | Quociente entre binário máx. e médio | Redução percentual da massa do volante e inércia |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1               | 10.3                                 | –                                                |
| 2               | 4.45                                 | 20                                               |
| 3               | 3.47                                 | 56                                               |
| 4               | 1.95                                 | 78                                               |
| 5               | 2.33                                 | 67                                               |
| 6               | 1.65                                 | 89                                               |
| 8               | 1.49                                 | 96                                               |

Como também se pode ver na mesma tabela, a massa do **volante de inércia** necessária para que a velocidade instantânea da cambota não sofra alterações superiores a 10% (ao “ralenti”), pode ser grandemente reduzida pelo uso de vários cilindros. Um motor a 2 tempos comporta-se como um de 4 tempos com o dobro dos cilindros, em virtude de ter o dobro dos tempos motores. Por razões de natureza mecânica (cargas nos apoios), os motores multicilíndricos (com mais de 3 cilindros) não têm as explosões dos seus cilindros seguidas (1-2-3-...), mas desencontradas. No caso de um motor de 4 cilindros em linha, a ordem de explosões pode ser 1-3-4-2 (Fig.5.42) ou 1-2-4-3 (pouco usada), em que os algarismos se referem aos cilindros, sendo o cilindro nº 1 o da frente do motor.

|               | Cilindro 1 | Cilindro 2 | Cilindro 3 | Cilindro 4 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|
| 1ª meia volta | EXPANSÃO   | Escape     | Compressão | Admissão   |
| 2ª meia volta | Escape     | Admissão   | EXPANSÃO   | Compressão |
| 3ª meia volta | Admissão   | Compressão | Escape     | EXPANSÃO   |
| 4ª meia volta | Compressão | EXPANSÃO   | Admissão   | Escape     |

Fig.5.42 – Ordem de funcionamento de um 4 cilindros em linha (1-3-4-2)

Vistos da frente, praticamente todos os motores rodam no sentido dos ponteiros do relógio. Os motores de 4 cilindros não podem ser perfeitamente equilibrados, a não ser que os cilindros sejam opostos. Nos motores de 4 cilindros em linha, embora o movimento dos pistões esteja perfeitamente balanceado, os movimentos laterais das bielas não. Assim, este tipo de motor necessita de 2 veios de equilibragem que rodam ao dobro da velocidade da cambota, para ficarem perfeitamente equilibrados. Motores de 6 cilindros em linha apresentam uma **equilibragem** perfeita, pelo que são muito suaves e são escolhidos por construtores de carros de luxo. Se os 6 cilindros se dispuserem em V (de 60, 90 ou de 120°), apresentam a vantagem do motor ser significativamente mais curto (podendo-se mesmo colocar transversalmente), mas não podem ser perfeitamente equilibrados e necessitam de um veio de equilibragem que roda à velocidade da cambota. Os motores de 8 cilindros em V (com o ângulo entre as 2 linhas de cilindros de 90°) são quase perfeitamente equilibrados (se a cambota for de 2 planos – Fig.5.43), o que, aliado ao elevado número de cilindros, os torna extremamente suaves, somente ultrapassados em suavidade pelos motores V12 (os Rolls-Royce atuais usam motores com esta configuração). Correntemente, várias marcas oferecem motores V12 nos seus topos de gama, tais como Rolls-Royce, Daimler-Chrysler, BMW, Ferrari e Lamborghini. Estes dois últimos construtores usam-nos, não tanto para garantir suavidade, mas para aproveitarem a maior potência resultante de um maior número de cilindros (maior área de pistões).

temperatura da culassa. Este é o único controlo possível neste tipo de arrefecimento, sendo a temperatura de funcionamento dependente da carga do motor e da temperatura ambiente. Como a capacidade de transferência de calor é reduzida (bastante inferior à da água), estes motores trabalham, geralmente, a temperaturas mais elevadas do que os arrefecidos a líquido.

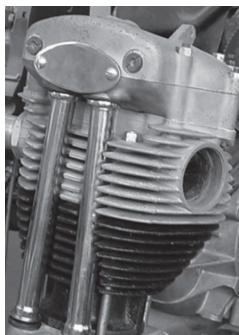


Fig.5.81 – Alhetas num motor arrefecido a ar



Fig.5.82 – Corte de motor Porsche arrefecido a ar

#### 5.1.5.2. Circulação líquida por termossifão

No **arrefecimento a líquido** podemos considerar dois sistemas diferentes: por **termossifão** e forçada. Na circulação líquida por termossifão (Fig.5.83), a força motora da movimentação do líquido provém das diferenças de densidade da água quente e fria. Quando a temperatura da água aumenta, a sua densidade baixa (por dilatação), elevando-se quando no seio de água mais fria. Desta maneira, se tivermos um circuito aberto com água quente num dos ramos verticais e fria no outro, dar-se-á uma circulação natural, na qual a água quente sobe no seu ramo e a fria desce no outro. A água sairá quente do motor, sendo dirigida para o permutador de calor, erroneamente denominado “**radiador**” (Fig.5.83). Neste aparelho, a água é arrefecida pela passagem de ar frio na sua superfície exterior, que é dotada de alhetas (Fig.5.84). Pelo explicado se compreende que o modo de transferência de calor no “radiador” seja predominantemente por convecção em vez de por radiação, como o seu nome sugere.

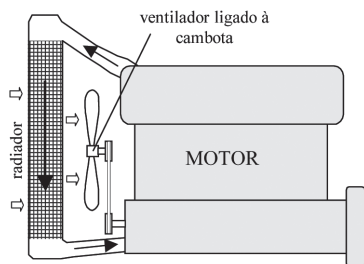


Fig.5.83 – Sistema de “termossifão”



Fig.5.84 – Arrefecedor da água de um motor antigo (tubos com alhetas circulares)

É necessário, portanto, haver um desnível apreciável entre a saída do motor e o “radiador”. Quando se aplica este tipo de arrefecimento num automóvel é forçoso usar-se uma frente muito

- b) **estratificação da carga:** a cargas baixas (Fig.5.127), o combustível é injetado durante o tempo de compressão, de modo a formar uma mistura heterogênea (Fig.5.128). Na zona da ignição (vela), deverá haver uma mistura aproximadamente estequiométrica (para proporcionar uma combustão estável), mas o restante volume terá uma mistura pobre ou, somente, ar. Deste modo consegue-se diminuir a carga do motor sem utilizar a borboleta, ou seja, sem a diminuição drástica de rendimento, comum aos motores a gasolina em carga parcial.

Porém, os motores atuais de injeção direta ainda não conseguem controlar a estratificação da carga de modo a poderem eliminar a borboleta, e o funcionamento em modo b) é somente conseguido para baixas velocidades do motor.

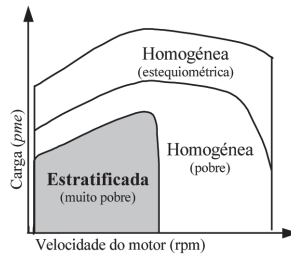


Fig.5.127 – Zona de mistura estratificada (ZAO, 1999)

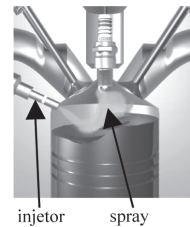


Fig.5.128 – Sistema de injeção direta produzindo estratificação da mistura

Todos os construtores estão a desenvolver (ou já têm) motores de injeção direta, embora o desenho (do pistão, da admissão e da posição do injetor) e funcionamento sejam diferentes de marca para marca. Um dos problemas é a interação entre o “spray”, as paredes e o fluxo de ar dentro do motor (como o exposto na Fig.5.128). Alguns construtores optaram por introduzir gases de escape queimados (em vez de ar) no modo de estratificação, de forma a manter a estequiometria da mistura em carga parcial e, assim, poderem usar catalisadores de triplo efeito.

Relativamente ao desenho da câmara e localização do injetor, a mistura pode ser “guiada” pelas paredes do pistão para perto da vela (Fig.5.129) ou usando o fluxo de ar com o mesmo efeito (Fig.5.130). Na Fig.5.130 usa-se o “tumble” (ver Cap.8.2.1) para direcionar o “spray” para junto da vela. Num terceiro caso (Fig.5.131), o injetor pode ser orientado de modo a que o “spray” esteja diretamente direcionado para o local da faísca da vela. Esta poderá ter os polos estendidos para o centro da câmara de combustão, tal como acontece na figura.

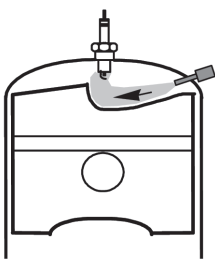


Fig.5.129 – O pistão deflete o “spray”

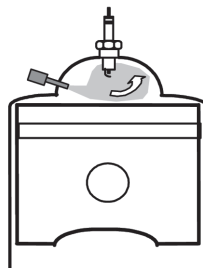


Fig.5.130 – O fluxo de ar deflete o “spray”

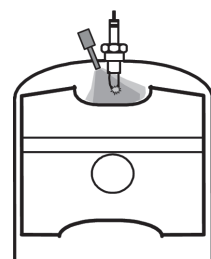


Fig.5.131 – O “spray” é direcionado para a vela

são mais altos e as suas prestações são muitíssimo mais elevadas pelo uso de altas pressões de admissão (turbo-compressor).

Comparando motores Diesel comercializados com equivalentes a gasolina (mesma cilindrada), vemos que, no caso de não haver sobrealimentação (que são raros), a sua potência é sensivelmente metade da média dos a gasolina e o seu binário cerca de 2/3. No entanto, se a comparação se fizer entre motores sobrealimentados Diesel (os mais comuns) e atmosféricos a gasolina (também os mais comuns), as potências são comparáveis (cerca de 5% menos nos motores Diesel, não considerando os motores a gasolina de elevadas prestações) mas os binários são significativamente (35 a 50%) maiores nos de ignição por compressão (Fig.5.151). Em termos de consumo, embora a comparação tenha incluído diferentes veículos, tudo indica que os motores Diesel serão cerca de 25% mais económicos que os a gasolina da mesma potência. Estes resultados basearam-se nos dados dos automóveis à venda em 2015 em Portugal.

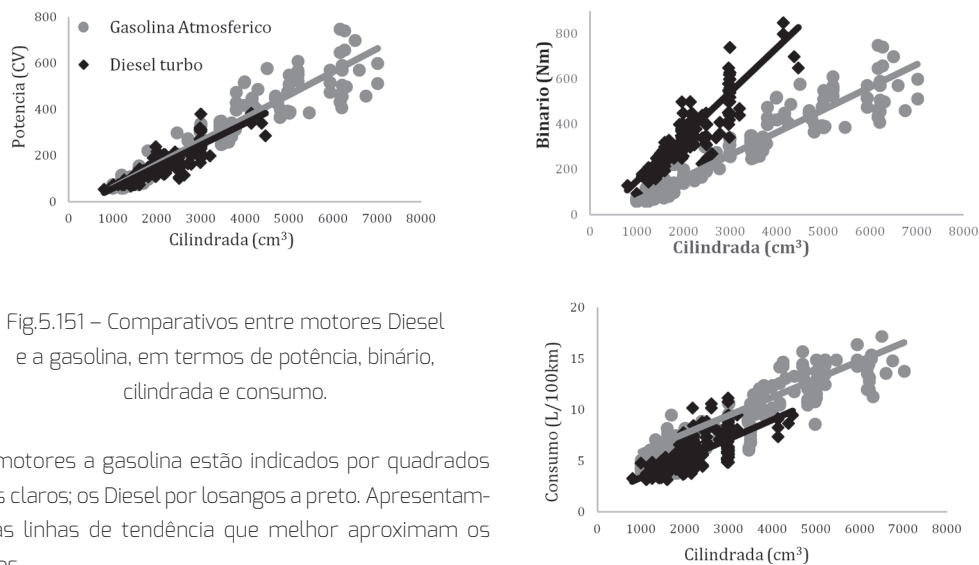


Fig.5.151 – Comparativos entre motores Diesel e a gasolina, em termos de potência, binário, cilindrada e consumo.

Os motores a gasolina estão indicados por quadrados mais claros; os Diesel por losangos a preto. Apresentam-se as linhas de tendência que melhor aproximam os dados.

Os grandes motores Diesel (> 500 kW) podem-se dividir em lentos, semi-rápidos e rápidos, de acordo com as seguintes características:

| Tipo                          | Lento    | Semi-rápido | Rápido   |
|-------------------------------|----------|-------------|----------|
| Potência (MW)                 | 11-45    | 4-12        | 0.5-2    |
| Ciclo                         | 2 tempos | 4 tempos    | 4 tempos |
| Velocidade (rpm)              | 60-300   | 300-1 200   | > 1 200  |
| Diâmetro dum cilindro (mm)    | 450-900  | 200-620     | 120-300  |
| Rendimento (%)                | 53       | 50          | 48       |
| Relação peso/potência (kg/kW) | 25-50    | 10-20       | 3-6      |
| p <sub>me</sub> (bar)         | 10-17    | 15-30       | 7-25     |

Estes motores estão também a ter uma evolução significativa em termos de desenho e, principalmente, de sistema de injeção. Tal como nos motores mais pequenos, também nas aplicações

#### 5.4.1.2. Lavagem em laço

A lavagem em laço (Fig.5.181), também conhecida por Schnürle, é tida como mais eficiente que a anterior, sendo a mais usada nos vários motores a gasolina atualmente comercializados. Estes motores têm várias janelas de admissão dispostas radialmente e ocupando grande parte do perímetro do cilindro, sendo algumas orientadas para cima, na direção oposta da janela de escape. É por causa desta orientação do fluxo de entrada que deriva o nome “laço”.

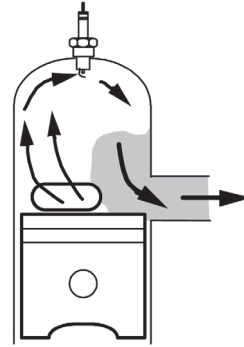


Fig.5.181 – Lavagem em laço

#### 5.4.1.3. Lavagem unidirecional

Nas lavagens descritas anteriormente, a entrada e saída dos gases são feitas aproximadamente à mesma altura, embora a janela de escape tenha sempre de abrir antes da de admissão. Assim, durante a lavagem, os gases frescos viajam da base para o topo do cilindro, deslocando os queimados para a janela de escape.

Na lavagem unidirecional, a entrada e a saída dos gases dão-se em locais diferentes do cilindro, uma no topo e a outra na base. Geralmente, na base do cilindro aparecem janelas de admissão a toda a sua volta e o escape é feito por válvulas de tülipa situadas na cabeça do motor (Fig.5.182-a). A configuração pode ser a contrária, ou seja, admissão por válvulas na cabeça e escape por janelas na base (Fig.5.182-b).

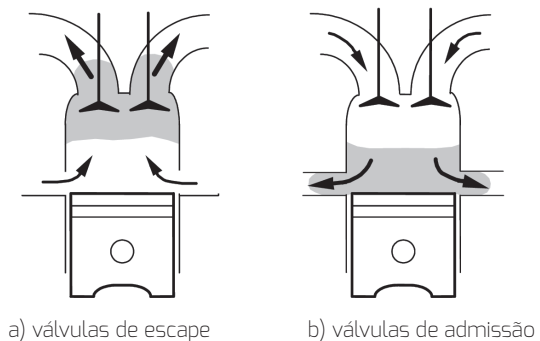


Fig.5.182 – Lavagem unidirecional

Este tipo de lavagem tem a vantagem de permitir lavagens mais eficientes que as anteriores, principalmente em cilindros altos e estreitos, pois se não houver mistura entre os gases queimados e frescos, a remoção pode ser quase perfeita. Na maioria das vezes, as condutas e janelas de admissão têm uma inclinação de modo a proporcionarem rotacionalidade, o que, além de aumentar a turbulência, melhora a lavagem. A lavagem unidirecional usa-se na quase generalidade em motores diesel a 2 tempos lentos, apresentando grandes rendimentos térmicos. A lavagem é conseguida através de compressores exteriores ao motor ou usando turbo-compressores.

Uma particularidade da lavagem unidirecional é a possibilidade de se produzir sobrealimentação. Nas restantes lavagens, como a janela de escape tem de abrir antes da de admissão, fechará também depois, não permitindo que permaneça uma sobrepressão no cilindro, mesmo que a admissão esteja a elevada pressão (os gases escoam-se sempre pelo escape, à pressão atmosférica). Nos motores com lavagem unidirecional, embora as válvulas de escape abram antes das de

Estes motores são diferentes dos existentes nos **veículos híbridos**, pois nestes o motor é o elemento que proporciona a tração, sendo o motor/gerador elétrico usado na regeneração de travagem e para aumentar as prestações do veículo em aceleração.

Os “range extenders” são somente uma parte do **veículo elétrico**, não estando ligados diretamente às rodas do carro. A sua função é somente produzir eletricidade quando a carga da bateria estiver abaixo de um valor estipulado. No geral, funcionam a velocidade constante, pelo que não estão ligados ao acelerador e o seu funcionamento é gerido pelo controlador do veículo e não pelo condutor.

Existem três filosofias relativamente à escolha do “range extender”:

- o carro elétrico deverá ser o mais parecido com o carro “normal”, pelo que o “range extender” deverá ser um motor “normal”, só que ligado a um gerador elétrico;
- dado que o veículo elétrico é uma viatura extremamente eficiente, então o “range extender” é desenhado para ser o mais eficiente possível;
- uma vez que o “range extender” vai trabalhar por períodos curtos e muito poucas vezes, então a prioridade será dada ao seu peso e compacidade para ser facilmente integrável no veículo.

A primeira filosofia foi a usada pela GM no seu carro elétrico (o **Chevrolet Volt** e **Opel Ampera**), que se assemelha o mais possível a um carro com tração de motor de combustão interna. O “range extender” é um motor convencional da GM, com 4 cilindros e 1.4 L, e a sua atuação é em velocidade e carga variável, função das necessidades de potência do carro. Existe, inclusivamente, uma ligação “mecânica” entre o “range extender” e as rodas através de um sistema epicicloidal que liga o motor elétrico ao gerador (do motor de combustão) e às próprias rodas.

Esta ligação mecânica faz-se acima dos 110 km/h, de modo a que a passagem da potência entre o “range extender” e as rodas seja mais eficiente do que a sua transferência através de eletricidade. Neste caso (Fig.5.234), o motor de combustão está ligado ao gerador (pela embraiagem C3), que está ligado ao anel exterior do trem epicicloidal (pela embraiagem C2). No funcionamento normal (abaixo de 110 km/h), a embraiagem C2 encontra-se aberta e o anel exterior do trem epicicloidal é travado pela embraiagem C1.

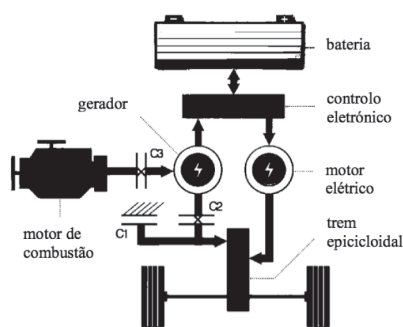


Fig.5.234 – Powertrain do Chevrolet Volt

No caso b), devem-se usar motores de combustão de ciclo eficiente, tais como motores de **ciclo sobre-expandido** ou ciclo de Diesel. Estes motores, dado que trabalharão somente num determinado ponto de velocidade e carga, têm o seu desenho otimizado para essa situação, pelo que poderão ser mais eficientes que os motores convencionais que funcionam em todo o espectro de velocidade e carga. Um dos problemas dos motores sobre-expandidos é terem uma potência nominal significativamente (1/3) inferior à potência máxima de um motor de igual cilindrada. Este

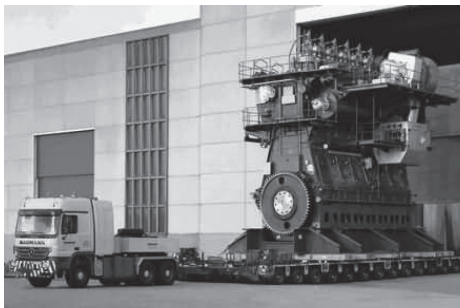


Fig.5.246 – Motor Wartsilä RTA96-C a sair da fábrica



Fig.5.247 – Corta-relva com motor de combustão interna

Tab. 5.3 – Exemplo de valores de emissão de poluentes para motores “fora de estrada”

|                |                       | CO<br>(g/kW.h) | HC<br>(g/kW.h) | NOx<br>(g/kW.h) | HC+NOx<br>(g/kW.h) | PM<br>(g/kW.h) |
|----------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Europa         | Cilindrada<20cm³      | 805            | 295            | 5.36            |                    |                |
|                | Cilindrada >225cm³    | 519            |                |                 | 13.4               |                |
|                | Motores estacionários | 3.5            | 0.19           | 2.0             |                    | 0.025          |
| Estados Unidos | Cilindrada <225cm³    | 610            |                |                 | 10.0               |                |
|                | Cilindrada >225cm³    | 610            |                |                 | 8.0                |                |
|                | Peq. embarcações      | 300            |                |                 | 30                 |                |
|                | Grandes barcos        | 5.0            | 2.0            | 3.4             |                    |                |
|                | Motores estacionários | 3.5            | 0.4            | 3.5             |                    | 0.1            |

**nota:** Usaram-se dados das Diretivas 2002/88/EC e 2004/26/EC e 40 CFR part 89 (EUA), como simples exemplos. A lista total encheria folhas de tabelas e texto e pode ser encontrada nas referências CFR (2012) e EC (2002)

5.8. TURBINAS E FOGUETES

O objetivo deste livro é o estudo dos motores alternativos de pistão. No entanto, dado que as **turbinas (de gás)** estão a ser usadas em inúmeras aplicações e com eficiências cada vez mais elevadas, faz-se aqui uma apresentação geral desse tipo de motores de combustão interna.

Como será discutido mais à frente, existem diversos desenhos de turbinas e **foguetes**. Enquanto que as turbinas (de gás) podem ser usadas aproveitando a energia mecânica (rotação do veio) ou usando o seu impulso para locomoção, no caso dos foguetes somente o impulso pode ser aproveitado. É necessário apresentar aqui uma nota relativamente à nomenclatura. Por foguete considera-se a máquina motora que não usa o ar ambiente para a sua combustão, pelo que terá de ter combustível+comburente. As restantes máquinas (usando o ar ambiente para a combustão) são aqui denominadas turbinas. No entanto, a turbina é um componente da “turbina de gás”, pois, como se verá mais à frente, tem outros componentes como um compressor e uma câmara de combustão.

combustível é relativamente constante se estivermos sobre a assíntota que delimita a região colorida. Os motores vão ficando menos eficientes quanto mais distantes ficarem dessa assíntota.

Os valores de **impulso específico** têm como unidade o *segundo* e têm significado físico. Se o impulso do motor for o do peso do seu combustível, o motor funcionará durante esse valor do Impulso Específico em segundos. O gráfico da Fig.5.249 refere-se a combustível de jato (“**jet fuel**” ou querosene). Outros combustíveis resultarão noutro gráfico.

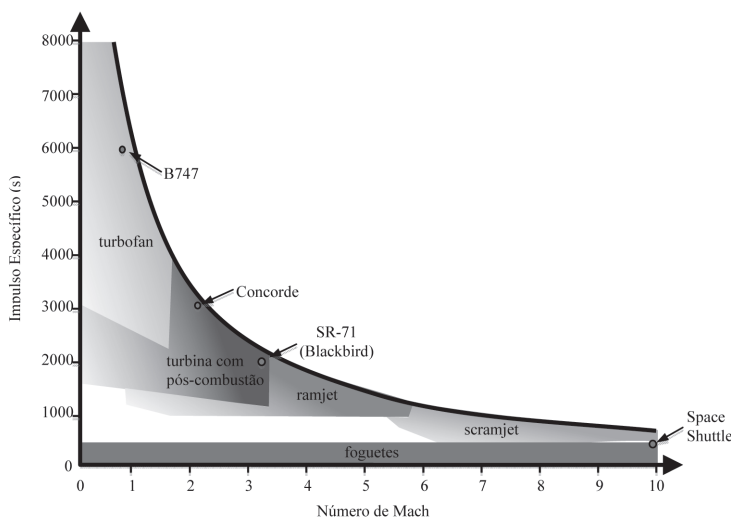


Fig.5.249 – Impulso Específico para diferentes tipos de motor

Como atrás se disse, a energia fornecida pelas turbinas pode ser aproveitada como energia mecânica de rotação do seu veio, o que não é possível nos foguetes. As turbinas com veio de potência usam-se na aeronáutica (aviões e helicópteros) e na produção de eletricidade, mas cada vez mais se usam mini e **microturbinas** noutras aplicações, tais como em sistemas de cogeração. No caso destas turbinas (não de reação), o uso de **regeneração** é bastante eficaz, pois o rendimento aumenta significativamente. Na regeneração, parte da entalpia dos gases de escape é fornecida aos gases de entrada após a sua compressão, reduzindo a quantidade de calor fornecida.

### 5.8.1. Tipos de Turbinas

As turbinas de gás podem ser de reação (a **jato**) ou de produção de potência, através de um veio. Na sua aplicação, podem ser aeronáuticas ou **turbo-geradores**, as primeiras para propulsão de aviões (a jato ou por hélice, incluindo helicópteros) e as últimas para produção de eletricidade ou, eventualmente, para locomoção (navios, comboios e mesmo carros). A Fig.5.250 representa uma turbina a jato. Nesta pode-se ver o compressor (com 6 andares de compressão), a câmara de combustão, a turbina (com 2 andares de expansão e a tubeira de descarga com injeção de combustível para **pós-combustão** (“**afterburner**”). Os vários andares de compressão e expansão são formados por pares de pás fixas (ligadas ao estator) e móveis (ligadas ao veio que liga o compressor à turbina).

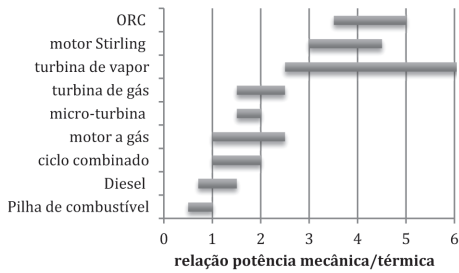


Fig. 5.254 – Relação potência mecânica/térmica para diferentes tipos de geração

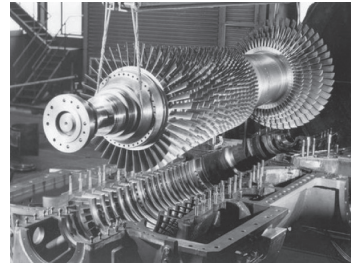


Fig. 5.255 – Turbina Siemens, com 17 andares de compressão e 4 de expansão. Por baixo, podem-se ver as pás fixas do estator.

A turbina poderá ser usada somente para produzir a potência necessária para o compressor, o que é o caso das **turbinas de reação**. Nos outros casos, a turbina terá também de produzir potência para uso exterior a ela. As turbinas (tanto as de produção de potência como as de reação) podem ter 1, 2 ou mais eixos. No caso de 1 eixo (Fig. 5.250), o compressor e a turbina rodam à mesma velocidade. Havendo 2 eixos, parte da turbina é usada para fazer funcionar o compressor (um eixo) e a parte restante da turbina está montada noutro eixo de onde se pode tirar potência para fora (Fig. 5.256). Podem também haver turbinas de vários eixos que ligam vários andares de compressão e de expansão, obviamente rodando a velocidades diferentes (Fig. 5.257). Neste caso, os andares de alta pressão do compressor e da turbina estão ligados por um veio coaxial ao veio que liga os andares de baixa pressão de ambos os dispositivos. Os andares de alta pressão, dado serem de menor diâmetro, rodam a maior velocidade. Em casos extremos, poderá haver 3 veios coaxiais ligando os andares de alta, média e baixa pressão. Deste modo, consegue-se otimizar a velocidade dos gases através das pás nos diferentes andares do compressor e da turbina. O número de andares de uma turbina é função da sua sofisticação. Turbinas recentes de aviões podem ter mais de 16 andares de compressão e mais de 6 de expansão (Fig. 5.255). As turbinas de vapor poderão ter até 40 andares.

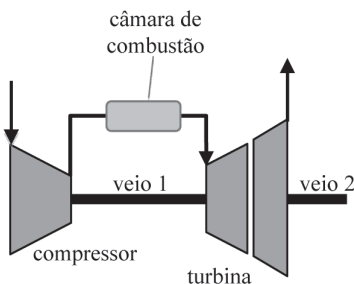


Fig. 5.256 – Turbina de 2 eixos (para realização de trabalho)

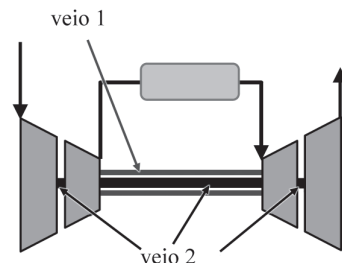


Fig. 5.257 – Turbina de 2 eixos (ligando os andares de alta e baixa pressão)

Parte do ar movido por estas pás não é ar de combustão. Este “**by-pass**” serve para reduzir o ruído da turbina (pois envolve a saída dos gases queimados) mas serve também para propulsão. A **razão de “by-pass”** (razão entre a massa de ar exterior e o ar de combustão) é, em motores modernos, entre 5:1 e 17:1. O aumento da razão de “by-pass” eleva a eficiência de funcionamento da turbina.



Fig.5.267 – Turbina “turbo-fan” sem carenagem

“By-passes” elevados implicam que o impulso dado pela “fan” é maior que o dado pelos gases de combustão, o que é mais eficiente na decolagem e à velocidade de cruzeiro dos aviões comerciais. A “fan” não é mais do que uma hélice carenada.

### 5.8.3. Tipos de Foguetes

Como atrás foi dito, os **foguetes** (Fig.5.268) são propulsores que não usam o ar como comburente, pelo que podem sair da atmosfera terrestre. Todos os propulsores de foguetões e naves espaciais são deste tipo, mas há também veículos atmosféricos que usam esta tecnologia. A grande vantagem é a extrema simplicidade dos foguetes, comparativamente com as turbinas ou com os motores de pistão.



Fig.5.268 – Vaivém, com 3 motores de foguete de combustível líquido e 2 foguetes sólidos

Os foguetes podem ser de combustível líquido ou sólido (eventualmente gasoso, mas a densidade energética dos gases é muito baixa), necessitando também de comburente. Nos propulsores sólidos, o combustível está misturado ao comburente, mas usando combustíveis líquidos, há um reservatório para o combustível ( $H_2$ ,  $N_2H_4$ , álcoois ou hidrocarbonetos) e outro para o oxidante ( $O_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $N_2O$ ,  $N_2O_4$ ,  $HNO_3$ ,  $HClO_4$ ). No caso dos combustíveis sólidos, a pólvora era um combustível antigo e ainda usado em foguetes de fogo de artifício, mas o mais usado parece ser o  $NH_4ClO_4$  (**PerClorato de Amónia**), juntamente com alumínio (os foguetes do vaivém tinham este combustível). Em termos de massa, o par mais energético é  $O_2/H_2$ , mas os combustíveis sólidos têm maior densidade volumétrica (energia/volume). Uma vantagem dos combustíveis líquidos é o potencial de controlo de caudal, incluindo poder-se desligar a combustão, cortando-se o fornecimento do combustível. Tal não é possível com combustível sólido. A grande desvantagem do uso de oxigénio e hidrogénio líquidos é serem **substâncias criogénicas**, necessitando de baixíssimas temperaturas (-183 e -253 °C, respetivamente) para se conservarem líquidos.

Além dos foguetes com combustível líquido e sólido, há ainda os **foguetes híbridos** (combustível sólido e líquido) e, em fase experimental, os **foguetes nucleares** (onde uma reação nuclear

### 8.3.9. Câmara de 4 Válvulas Radiais

Este tipo de câmaras (Fig.8.32) é de custo elevadíssimo, sendo somente utilizado em competição ou motores de motos. Tem uma compacidade elevada, a vela coloca-se centralmente, tem turbulência a alta rotação e apresenta as características da câmara anterior, mas as válvulas são maiores do que na câmara em “telhado de alpendre”. O acionamento das válvulas é complicado, com utilização de balanceiros de desenho específico. Nas várias utilizações, a potência específica dos motores providos deste tipo de câmaras é superior aos 100 Cv/L. Os atuais motores de Formula 1 usam este tipo de câmara.

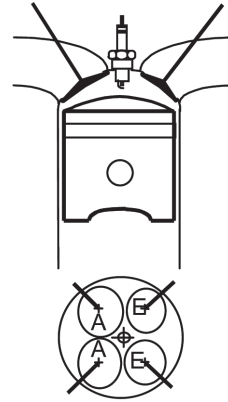


Fig.8.32 – Câmara de 4 válvulas radiais

### 8.3.10. Câmaras com mais de 4 Válvulas

Segundo os técnicos da Yamaha (Aoi, 1986), câmaras com 5 válvulas maximizam a área útil das válvulas (Fig.8.33). Desde os anos 80 que esta tecnologia é utilizada em motores de motos e, mais atualmente, em motores de competição (Formula 1, embora pelo regulamento atual sejam proibidas). Este tipo de câmara é de construção cara e a sua compacidade é inferior à de 4 válvulas. A razão assenta no uso de duas árvores de cames, uma das quais aciona as 3 válvulas. Como se mostra na Fig.8.34, a válvula de admissão central origina que a parede da câmara seja levemente convexa (Fig.8.35). Poder-se-ão usar 3 árvores de cames, mas o custo, complexidade e perdas mecânicas serão elevados. Um bom compromisso consiste em atuar a 5ª válvula com um balanceiro.

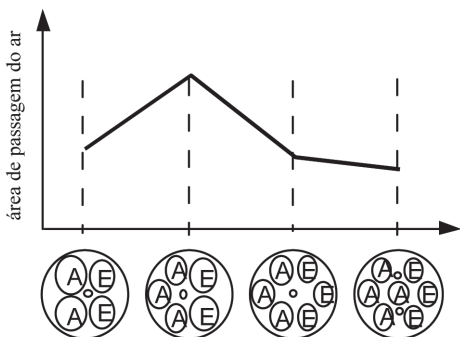


Fig.8.33 – Área de passagem dos gases função do número de válvulas

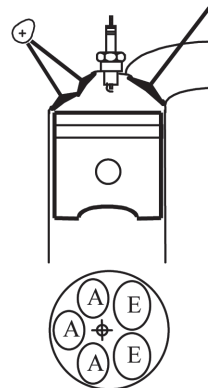


Fig.8.34 – Câmara de 5 válvulas



Fig.8.35 – Câmara de 5 válvulas

fabricado pela Waukesha Engine Division of Dresser Industries, em Waukesha, Wisconsin, EUA. As especificações para os testes dos combustíveis podem ser vistas na Tab.8.1.

Tab.8.1 – Descrição das condições de teste para determinação do MON e RON (motor CRF)

| Método                      | ASTM D2700-92(104)<br>MON                                 | ASTM D2699-92(105)<br>RON                                                  |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Velocidade                  | 900 rpm                                                   | 600 rpm                                                                    |
| Temperatura da admissão     | 38 °C                                                     | variável com a pressão<br>(19.4 °C a 88kPa; 52.2 °C a 101.6 kPa)           |
| Humidade do ar de admissão  | 3.56 – 7.12 g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>ar</sub> | 3.56 – 7.12 g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>ar</sub>                  |
| Temperatura da mistura      | 149 °C                                                    | não especificado                                                           |
| Temp. água de arrefecimento | 100 °C                                                    |                                                                            |
| Temperatura do óleo         | 57 °C                                                     | 57 °C                                                                      |
| Avanço da ignição           | variável com TC<br>(entre 14 e 26 °C)                     | 13 °C                                                                      |
| “Venturi” do carburador     | 14.3 mm                                                   | variável com a altitude:<br>14.3 mm para 0-500m<br>15.1 mm para 500-1000 m |

As gasolinas de aviação apresentam *IO* maiores que 100, denominados **Índice de Desempenho** (*ID*, “Performance Number”). Há dois métodos de determinação destes *ID*: o método da mistura rica e o método da mistura pobre.

Existe o mito que a **naftalina (naftaleno)** aumenta o *IO* das gasolinas. Na verdade, o naftaleno tem um *IO* (de mistura) de 90, pelo que adicioná-lo a gasolina com maior *IO* irá reduzi-lo. No período do entre guerras, quando o *IO* das gasolinas andava perto dos 60, a naftalina aumentava o seu *IO*, mas atualmente tal não corresponde à verdade.

O *IO* da gasolina afeta a taxa de compressão que o motor pode ter, sem incorrer em “knock” (Tab.8.2). Esta tabela refere-se a motores de carburador, com aquecimento da mistura, apresenta os valores de taxa de compressão e de rendimento, função do *IO* do combustível que queimam.

Tab.8.2 – Exigência do *IO* do combustível e rendimento possível função da taxa de compressão

| Taxa de compressão | IO necessário | Rendimento (%) |
|--------------------|---------------|----------------|
| 5:1                | 72            |                |
| 6:1                | 81            | 25             |
| 7:1                | 87            | 28             |
| 8:1                | 92            | 30             |
| 9:1                | 96            | 32             |
| 10:1               | 100           | 33             |
| 11:1               | 104           | 34             |
| 12:1               | 108           | 35             |

Motores modernos, com câmaras de 4 válvulas em telhado de alpendre (“pent-roof”) e injeção eletrónica *MPI*, requerem gasolinas com menores *IO* que os acima apresentados, resultando em maiores rendimentos.

estando-se a estudar processos de ignição que dispensam o fornecimento de energia do exterior (faísca, plasma ou outro) e inexistência de propagação de frente de chama.

### 8.8.1. Motores de Carga Estratificada

Nos motores de carga estratificada (motores de ignição comandada), uma mistura rica adjacente à vela permite um início de combustão rápida, estável e eficiente (Fig.8.67). Deste modo, a propagação da frente de chama pode ser feita para a mistura pobre ou extrapobre que enche o resto do cilindro. Com esta combustão consegue-se obter um rendimento elevado (semelhante ao do Diesel) e uma baixa produção de poluentes ( $NO_x$  e  $CO$ ) em condições de baixa carga. Embora seja um motor de ignição por faísca, o que o torna diferente é o uso de uma mistura heterogênea queimando misturas muito pobres, impossível num motor convencional (de mistura homogênea).

Este tipo de motores foi idealizado por Sir Harry Ricardo na década de 30, mas foi nos finais da década de 70 que surgiram alguns motores com esta tecnologia, tais como o Texaco TCCS, Porsche SKS e o Ford PROCO. Porém, o único motor com esta filosofia a ser comercializado foi o **Honda CVCC** (Cap.8.8.1.1) no Civic para o mercado americano.

A maneira de produzir a estratificação variava entre os construtores. Sistemas de injeção direta produziam a mistura rica na proximidade da vela em câmaras “abertas”, ou usavam-se câmaras auxiliares (tipo Diesel *IDI*) onde a mistura rica era produzida e queimada, ficando o resto do cilindro com a mistura pobre (Fig.8.68).

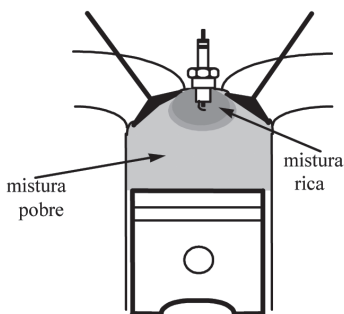


Fig.8.67 – Princípio de funcionamento do motor de carga estratificada

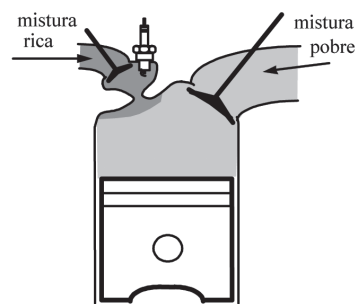


Fig.8.68 – Motor de carga estratificada com câmara auxiliar

Este tipo de motores é muito mais complexo que o habitual motor de mistura homogênea e o aparecimento dos catalisadores de triplo efeito (que obrigavam ao uso de misturas estequiométricas) levou ao seu desinteresse. Atualmente, os motores de injeção direta a gasolina usam este princípio, conseguindo reduzir significativamente os consumos em carga parcial. Recentes motores usando gás natural (para cogeração), utilizam carga estratificada de modo a queimarem misturas pobres e assim obterem elevado rendimento (Goto, 1990).

Teoricamente, este tipo de motor viria a dar solução ao difícil problema proposto aos construtores, mas o desenvolvimento (nos anos 80) foi muito difícil. Houve várias tentativas de produção deste tipo de conceito, mas somente uma chegou à fase de comercialização: o Honda Civic CVCC (Fig.9.22).

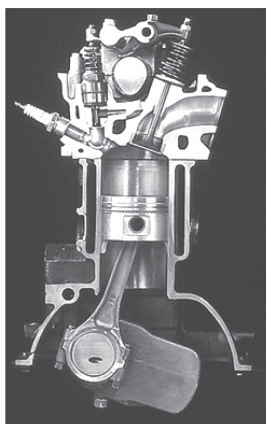


Fig.9.22 – Motor Honda CVCC

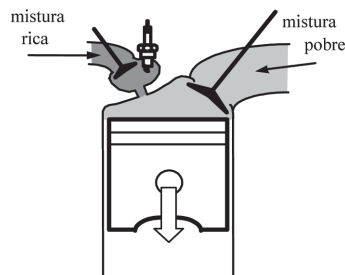


Fig.9.23 – Motor de carga estratificada com câmara auxiliar

Geralmente, para se promover a estratificação da carga era necessário haver dupla câmara de combustão (Fig.9.23), uma abastecida por mistura rica (onde se dava a ignição) e a outra com mistura pobre. Houve várias soluções, mas quase todas eram baseadas na utilização de dois sistemas de preparação de mistura (uma pobre e outra rica) por carburadores ou injeção de combustível e duas válvulas de admissão por cilindro, uma para cada câmara. A combustão era iniciada na câmara auxiliar (de pequenas dimensões) com mistura rica, sendo a combustão propagada para a câmara principal (no topo do cilindro), onde a mistura pobre arderia com elevado rendimento. A carga seria regulada, não pela utilização de uma válvula restritora do ar, mas pela quantidade de combustível a fornecer à câmara principal. Na condição limite, não haveria necessidade de válvula de acelerador.

As principais razões de falha deste tipo de sistema nos anos 80 assentaram na impossibilidade de regulação de carga efetiva pela injeção de mais ou menos combustível, pela dificuldade de criação de uma mistura verdadeiramente estratificada e ainda pela elevada transferência de calor dos gases para as câmaras de combustão, especialmente no orifício de passagem entre uma e outra. Outros problemas de não menos importância relacionaram-se com a impossibilidade de manter o mesmo nível de estratificação a vários regimes e a várias cargas. O motor funcionaria bem a um dado regime, mas não para velocidades ou cargas diferentes. Embora as emissões de  $NO_x$  e de  $CO$  fossem extremamente baixas, a produção de  $HC$  era sempre superior a motores convencionais, em virtude de ineficiências de combustão. Por estas razões, este tipo de motor foi preterido em relação ao tipo convencional dotado de catalisador de triplo efeito. Atualmente continua a ser desenvolvido uma vez que alguns motores de injeção direta a gasolina assentam no seu princípio.

No caso dos pistões, o atrito é principalmente hidrodinâmico, pois existe uma camada de óleo entre o pistão e o cilindro. No entanto, o atrito aumenta quando o pistão é “empurrado” contra a camisa, como resultado da pressão da combustão e da inclinação da biela. Assim, quanto maior for a relação entre o comprimento da biela e o diâmetro da cambota ( $L/C$ , pois o diâmetro da cambota é igual a dois cursos), menor será a inclinação da cambota e menor será o atrito pistão-camisa. Um outro processo de reduzir este atrito é desviar lateralmente o eixo do cilindro (Fig.10.26), de modo a que durante a expansão se minimize a inclinação da biela, reduzindo a força pistão-camisa e com ela o atrito entre estes dois elementos.

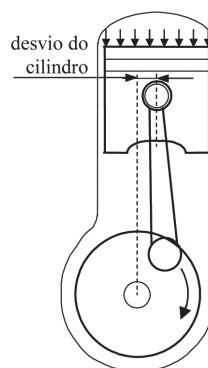


Fig.10.26 – Desvio do eixo do cilindro para reduzir o atrito pistão-cilindro

O mesmo efeito pode ser conseguido mantendo o eixo do cilindro a passar pelo da cambota, descentrando o cavilhão do pistão. Porém, este procedimento alterará o equilíbrio do pistão durante as acelerações.

Vulgarmente, os cilindros são em ferro fundido nodular, pois é um material mais poroso que o aço, o que permite uma melhor lubrificação mas, em muitos casos, usa-se o aço vazado.

Na retificação do cilindro deixam-se propositamente sulcos com uma profundidade entre 3 e 5  $\mu\text{m}$  e dispostos em hélice (cruzada) com cerca de 60° de inclinação (“**honing**”, Fig.10.27). A distância entre sulcos será inferior a 1 mm, o que dará uma rugosidade média de cerca de 0.3  $\mu\text{m}$ . Alguns motores apresentam as camisas em ferro fundido ou alumínio fundido com um revestimento duro e anti-desgaste em ligas de níquel e/ou crômio com silício. Esta deposição eletrolítica (de cerca de 0.1 mm de espessura) é extremamente dura, o que reduz o desgaste, embora o atrito não seja significativamente diminuído.



Fig.10.27 – “Honing” dum cilindro

A força de atrito pistão-cilindro é praticamente proporcional à velocidade do pistão, pelo que será maior aproximadamente a meio do curso (FERGUSON, 2001), altura em que a inclinação da biela é também maior, mesmo que a pressão máxima ocorra muito antes. Na zona de elevada velocidade, o pistão sofre lubrificação hidrodinâmica, mas nas zonas dos pontos mortos é possível que haja contacto entre os segmentos e o metal dos cilindros, pois o pistão para. Havendo este contacto metálico, as forças de atrito são bastante elevadas nestas posições (TAYLOR, 1992), além de haver desgaste.

A **pressão média de atrito** resultante do atrito da saia do **pistão-cilindro** pode ser descrita por (SANDOVAL, 2003)

Jorge Martins

# Motores de Combustão Interna

QUINTA EDIÇÃO, REVISTA E AUMENTADA

## Sobre o livro

Este livro tem 11 capítulos integralmente dedicados aos motores de combustão interna, incluindo a sua descrição e a história da sua evolução até aos nossos dias. Nele, o interessado poderá analisar o desempenho dos motores, prever as suas características e obter a informação necessária para os modelar e projetar. A obra inclui assuntos não habituais em livros deste género, tais como uma descrição aprofundada sobre combustíveis e a forma como são produzidos. Para além da parte eminentemente teórica desta obra sobressai uma descrição exaustiva dos motores e dos seus vários componentes. Um subcapítulo é vocacionado aos motores de Formula 1 e corridas de arranque (dragsters).

Atualmente, assiste-se a uma grande evolução nos motores, da qual os sistemas de "common-rail" (nos motores Diesel) e de injeção direta (nos a gasolina) são o resultado visível, com a maioria dos motores atuais a usarem algum sistema de sobrealimentação. Porém, outros progressos mais radicais estão a ser desenvolvidos, tais como os geralmente conhecidos por CAI e por HCCI, conceitos que se prevê sejam determinantes no futuro dos motores.

Os motores de combustão interna são máquinas intensamente usadas no mundo, sendo, simultaneamente, uma fonte de satisfação, mas também de problemas (como os ambientais). Assim, espera-se que a leitura desta obra possa levar ao melhor conhecimento e à utilização destas máquinas admiráveis.

## Sobre o autor



**Jorge Martins** obteve o seu doutoramento em Motores de Combustão Interna na Universidade de Birmingham, Inglaterra, trabalhou no desenvolvimento de motores no "National Engineering Laboratory" em East Kilbride, Escócia, e, atualmente, é professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, onde é responsável pelo Laboratório de Motores Térmicos e Termodinâmica Aplicada (LaMoTA). Nesta universidade leciona as disciplinas de Máquinas Térmicas e de Termodinâmica do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica. Tem trabalhado como professor convidado em várias universidades nacionais e estrangeiras, nomeadamente no Brasil. Vem

desempenhando funções de perito técnico de engenharia automóvel (incluindo avaliações de motores) para diversos tribunais desde 2001, tendo atuado em mais de duas centena de processos.

Nas décadas de 80 e 90 trabalhou como consultor em projetos de investigação na área de motores para empresas da indústria automóvel britânica, tal como a Jaguar, Rolls-Royce, Rover e Ford, além da Lucas. Desde 1999, além da sua função de docente e investigador na universidade, tem sido avaliador de projetos europeus para a Comissão Europeia na área dos transportes, da energia e dos motores de combustão interna. Liderou um projeto MIT-Portugal no desenvolvimento de sistemas de veículos elétricos, incluindo "range extenders", além de ter liderado e participado noutros projetos ligados ao desenvolvimento de motores. Tem publicados mais de uma centena de artigos científicos em revistas e congressos internacionais e é autor de três patentes ligadas a motores. O autor foi colaborador técnico do jornal "Volante" de 1989 a 1992, tendo escrito cerca de uma centena de artigos técnicos, testes e artigos de opinião, entre outros. Tem um outro livro também editado pela Publindústria: "Carros Elétricos".



ENGEBOOK®