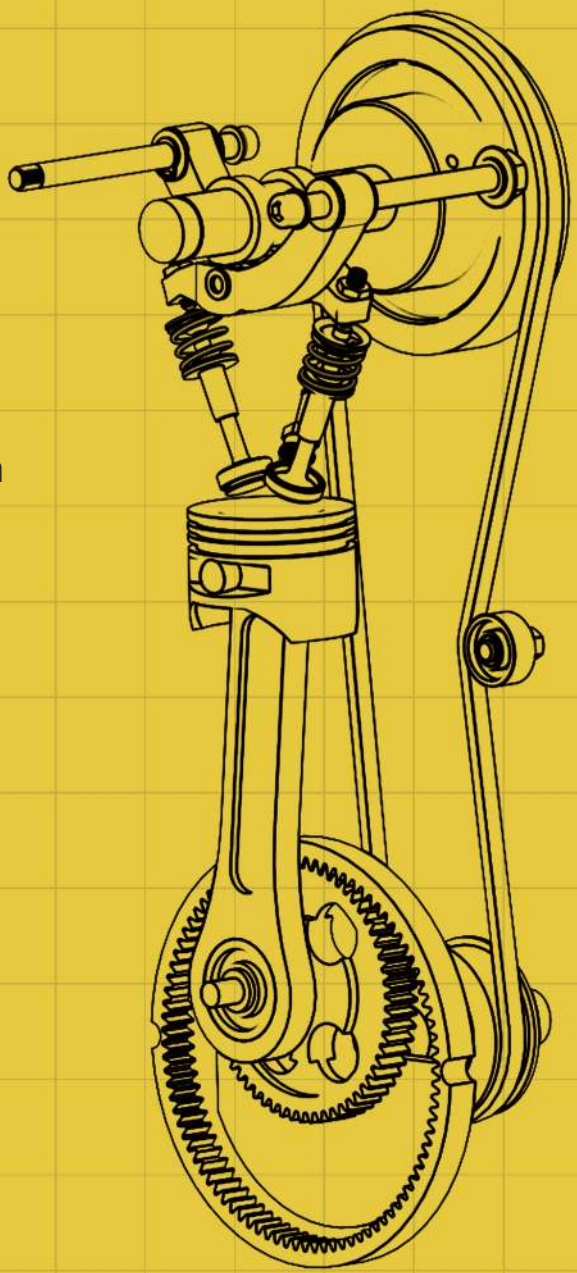
Motores
de **Combustão Interna**

Jorge Martins



SEXTA EDIÇÃO
Revista e aumentada

engebook

AUTORA
Jorge Martins

TÍTULO
Motores de Combustão Interna (Sexta Edição, revista e aumentada)

EDIÇÃO
Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO
Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt

CHANCELA
Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO
Booki – Conteúdos Especializados
Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

DESIGN
Luciano Carvalho
Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

IMPRESSÃO
junho, 2020

DEPÓSITO LEGAL
461140/19

A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2020 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, e ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU
621.43 Motores de Combustão Interna

ISBN
Papel: 9789898927842

Catalogação da publicação
Família: Mecânica
Subfamília: Mecânica Auto

Prefácio à 1.ª Edição

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 6.ª Edição

No seguimento de uma melhoria contínua deste livro, o autor apresenta a 6ª edição com as atualizações necessárias e com melhorias ao texto e aos conteúdos.

Os motores de combustão interna estão, atualmente, com um grave problema de sobrevivência. O escândalo denominado "dieselgate" confirmou o que muitos já imaginavam: que os automóveis emitem quantidades de poluentes muito superiores às das condições de teste, incluindo os valores de consumo de combustível. Foi então necessário "meter a casa em ordem", pelo que foram tomadas medidas que realmente trouxeram mais rigor nestas medições, pela introdução de novos testes de medição.

Mas o problema da continuidade deste tipo de motorização continua, com vários países a publicitar o fim do uso dos combustíveis (depreende-se que "fósseis") entre 2030 e 2050. Assim, viu-se como importante apresentar o cenário corrente relativo aos potenciais combustíveis que possam vir a substituir a gasolina e o gasóleo como combustíveis futuros dos nossos carros. Por esta razão o capítulo relativo aos combustíveis alternativos foi significativamente estendido e melhorado, referindo-se vários combustíveis desde o conhecido hidrogénio a outros mais estranhos, tais como a aguarrás, a amónia ou os vários éteres.

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

Guimarães, 2019.10.10

Índice

Prefácio à 1ª Edição ..... **V**
Agradecimentos ..... **VII**
Prefácio à 6ª Edição ..... **IX**
Índice ..... **XI**
Glossário de Símbolos e Termos ..... **XXIII**

Capítulo 1. MOTORES – CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO **31**
1.1. INTRODUÇÃO 31
1.2. NOÇÃO DE MÁQUINA TÉRMICA 32
1.2.1. Classificação dos Motores 34
1.3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR 35
1.4. MOTOR DE IGNIÇÃO COMANDADA 37
1.5. MOTOR DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO (DIESEL) 38
1.6. DIAGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO 39
1.7. MOTOR A 2 TEMPOS 42
1.8. MOTOR ROTATIVO WANKEL 43

Capítulo 2. HISTÓRIA DAS MÁQUINAS TÉRMICAS **47**
2.1. PRIMÓRDIOS 47
2.1.1. Motores a Ar 48
2.1.2. Motores a Água (Oxi-hidrogénio) 49
2.1.3. Motores de Combustão Interna Atmosféricos 49
2.1.4. Motores com Compressão Prévia 52
2.1.5. Desenvolvimento dos Sistemas Auxiliares 54
2.1.6. Motores Diesel 55
2.2. EVOLUÇÃO DO MOTOR CLÁSSICO 56
2.2.1. Motor de Ignição Comandada 56
2.2.1.1. Taxa de compressão (TC) 57
2.2.1.2. Relação curso/diâmetro (C/D) 58
2.2.1.3. Relação peso/potência 58
2.2.1.4. Cilindrada 58
2.2.1.5. Preparação da mistura ar-gasolina 59
2.2.1.6. Outras áreas de evolução 60
2.2.1.7. Desenvolvimento dos Range Extenders 60
2.2.2. Motor Diesel 62

2.2.2.1. Câmaras de combustão 62
2.2.2.2. Sistemas de injeção 63
2.2.2.3. Catalisadores e filtros de partículas 63
2.2.2.4. Eliminação dos *NOx* 63
2.2.2.5. Outras áreas de evolução 64

Capítulo 3. ANÁLISE TEÓRICA DE CICLOS 65
3.1. RENDIMENTO DOS CICLOS TEÓRICOS 66
3.2. CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE (OTTO) 67
3.2.1. Ciclo a Carga Parcial no Motor de Injeção Direta 69
3.2.2. Ciclo a Carga Parcial e Mistura Estequiométrica (com Bombagem) 70
3.3. CICLO TEÓRICO A PRESSÃO CONSTANTE (DIESEL) 71
3.4. CICLO TEÓRICO A PRESSÃO LIMITADA (MISTO OU DUAL) 74
3.4.1. Ciclo em Carga Parcial 75
3.5. CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE SOBRE-EXPANDIDO (MILLER) 78
3.5.1. Ciclo de Miller com ε_{ret} Fixa 79
3.5.2. Ciclo de Miller com ε_{g} Fixa 80
3.6. CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE E EXPANSÃO TOTAL (ATKINSON) 81
3.6.1. Ciclo em Carga Parcial 83
3.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS EM CARGA PARCIAL 84
3.8. CICLOS COM SOBREALIMENTAÇÃO 86
3.8.1. Ciclo de Otto Sobrealimentado 86
3.8.2. Sobrealimentação de Outros Ciclos 89
3.9. MODELAÇÃO DO CICLO REAL 89
3.10. CICLO DE CARNOT 91
3.11. CICLO DE TURBINAS DE GÁS (JOULE-BRAYTON) 91

Capítulo 4. PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO 95
4.1. PARÂMETROS BÁSICOS DOS MOTORES 96
4.1.1. Binário, Potência, Rendimento e Consumo Específico 96
4.1.2. Parâmetros Geométricos 97
4.2. OUTROS PARÂMETROS 98
4.2.1. Relação Ar-Combustível, Excesso de Ar e Riqueza da Mistura 98
4.2.2. Grandezas Importantes 99
4.2.2.1. Pressão média efetiva 99
4.2.2.2. Velocidade média do pistão 100
4.2.2.3. Potência específica aerial 100
4.2.3. Comparação entre Motores 101
4.2.3.1. Teoria da semelhança 102
4.2.4. Rendimentos e Eficiências 103
4.2.4.1. Rendimento de combustão 103
4.2.4.2. Rendimento adiabático 104
4.2.4.3. Rendimento teórico 104

4.2.4.4. Rendimento relativo às propriedades dos fluidos 104
4.2.4.5. Rendimento inerente 104
4.2.4.6. Eficiência de bombagem 105
4.2.4.7. Rendimento mecânico 105
4.2.4.8. Rendimento total 105
4.2.4.9. Eficiência volumétrica 106
4.2.5. Fórmula da Potência Efetiva 107
4.3. CICLO INDICADO 108
4.3.1. Pressão Média Indicada e de Atrito 109
4.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR 110
4.4.1. Curva do Binário 111
4.4.2. Curva da Potência 111
4.4.3. Curva do Consumo Específico 112
4.4.4. Diagrama do Desempenho 115
4.4.5. Fatores de Correção para Potência e Eficiência Volumétrica 116
4.4.6. Carga Parcial 117
4.4.7. Estabilidade do Motor 118
4.4.8. Desempenho dos Veículos Função do Binário e Potência dos Motores 119
4.5. O MOTOR A 2 TEMPOS 120
4.5.1. Taxa de Compressão 121
4.5.2. Eficiências de Enchimento 121
4.6. MOTORES DE COMPETIÇÃO 123
4.6.1. Motores em Formula 1 123
4.6.1.1. Antes de 2014 124
4.6.1.2. Depois de 2014 128
4.6.1.3. O Futuro (após 2025) 132
4.6.2. Corridas de Arranque ("Drag Races") 132

Capítulo 5. DESCRIÇÃO DOS MOTORES 137
5.1. MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS 138
5.1.1. Estrutura do Motor 138
5.1.2. Bloco de Cilindros, Culassa e Cárter 141
5.1.2.1. Bloco de cilindros 142
5.1.2.2. Cabeça do motor ou culassa 144
5.1.2.3. Cárter do óleo 145
5.1.3. Sistema Biela-Manivela 146
5.1.3.1. Pistão 146
5.1.3.2. Segmentos 150
5.1.3.3. Biela 151
5.1.3.4. Cambota 153
5.1.3.5. Motores multicilíndricos 155
5.1.3.6. Variação da taxa de compressão 157
5.1.4. Sistema de Distribuição 158
5.1.4.1. Árvore de cames 158

5.1.4.2. Válvulas 161
5.1.4.3. Variação da abertura das válvulas e da geometria da admissão 164
5.1.4.4. Sistemas não convencionais de controlo da distribuição 168
5.1.5. Sistema de Arrefecimento 169
5.1.5.1. Arrefecimento a ar 170
5.1.5.2. Circulação líquida por termossifão 171
5.1.5.3. Circulação líquida forçada 172
5.1.5.4. Melhorias no arrefecimento e controlo térmico do motor 174
5.1.5.5. Líquidos do sistema de arrefecimento 174
5.1.6. Lubrificação 175
5.1.6.1. Sistema de chapinagem 175
5.1.6.2. Sistema por pressão e chapinagem 176
5.1.6.3. Sistema por pressão de óleo 176
5.1.6.4. Sistema sob pressão a cárter seco 177
5.1.6.5. Bombas de óleo 177
5.1.6.6. Filtros de óleo 178
5.1.6.7. Tipos de óleo 179
5.2. MOTORES DE IGNIÇÃO COMANDADA 180
5.2.1. Carburadores 180
5.2.1.1. Combustíveis 181
5.2.1.2. Princípio de funcionamento do carburador 181
5.2.1.3. Correção da mistura 183
5.2.2. Sistema de Injeção 187
5.2.2.1. Princípio de funcionamento 189
5.2.2.2. Injeção mecânica 190
5.2.2.3. Injeção eletrónica analógica 192
5.2.2.4. Injeção eletrónica digital 194
5.2.2.5. Injeção monoponto 196
5.2.2.6. Carburadores eletrónicos 198
5.2.2.7. Injeção direta 198
5.2.3. Sistema de Ignição 200
5.2.3.1. Sistema de bateria convencional 201
5.2.3.2. Ignição eletrónica analógica 202
5.2.3.3. Ignição eletrónica digital 203
5.2.3.4. A vela 206
5.2.3.5. "Bobinas múltiplas" 207
5.2.3.6. Tipos de ignição avançados 207
5.3. MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO 209
5.3.1. Sistemas de Injeção 212
5.3.2. Componentes dos Sistemas Tradicionais 215
5.3.2.1. Bomba de injeção 215
5.3.2.2. Injetores 217
5.3.2.3. Outros sistemas 218
5.3.3. Componentes dos Sistemas "Common-rail" 219
5.3.3.1. Bombas de alta e baixa pressão 220

5.3.3.2. Injetores 221
5.4. MOTORES A 2 TEMPOS 222
5.4.1. Tipos de Lavagem 223
5.4.1.1. Lavagem transversal 223
5.4.1.2. Lavagem em laço 224
5.4.1.3. Lavagem unidirecional 224
5.4.2. Compressão de Cárter 225
5.4.2.1. Válvula rotativa 227
5.4.2.2. Lamelas 228
5.4.3. Outras Geometrias e Componentes 229
5.4.3.1. Alteração do eixo do cilindro 229
5.4.3.2. Motores com válvulas de túlipa 230
5.4.3.3. Válvula de escape 231
5.4.3.4. Válvula rotativa de escape 232
5.4.3.5. Escape 232
5.4.3.6. Carburadores 233
5.4.3.7. Injeção de combustível 235
5.4.3.8. Catalisador 236
5.5. SOBREALIMENTAÇÃO 236
5.5.1. Tipos de Compressores 237
5.5.2. Compressor Comprex 240
5.5.3. Compressão do Ar 241
5.5.4. O Turbo-Compressor 243
5.5.4.1. "Twin-Turbo" 245
5.5.4.2. Turbo-compressores assistidos eletricamente 245
5.5.4.3. "Twincharger" (compressor + turbo) 246
5.5.4.4. Turbo "twin-scroll" 247
5.5.4.5. Sistema "anti-lag" 247
5.5.5. Motores de Ignição Comandada (4 Tempos) 247
5.5.6. Motores de Ignição por Compressão (4 Tempos) 249
5.6. SENSORES USADOS NOS MOTORES 250
5.6.1. Velocidade do Motor e Posição da Cambota 250
5.6.2. Pressão do Coletor de Admissão 250
5.6.3. Caudal de Ar 251
5.6.4. Posição da Borboleta do Acelerador 252
5.6.5. Concentração de Oxigénio (Sonda λ) 252
5.6.6. Temperatura 253
5.6.7. "Knock" (Sensor de Detonação) 253
5.6.8. Outros 254
5.7. UTILIZAÇÃO DOS MOTORES 254
5.7.1. Motores de Automóveis 254
5.7.2. "Range Extenders" 255
5.7.3. Motores de Motociclos 257
5.7.4. Motores de Aviões 259
5.7.5. Motores Estacionários 261

5.7.6. Outras Aplicações 262
5.8. TURBINAS E FOGUETES 263
5.8.1. Tipos de Turbinas 266
5.8.2. Descrição das Turbinas 268
5.8.3. Tipos de Foguetes 272
5.8.3.1. Foguetes de combustível sólido 273
5.8.3.2. Foguetes de combustível líquido 274

Capítulo 6. TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO 275
6.1. AR E COMBUSTÍVEIS 275
6.2. REAÇÃO ENTRE O COMBUSTÍVEL E O AR 276
6.2.1. Coeficiente de Excesso de Ar 276
6.2.2. Poder Calorífico do Combustível 277
6.2.3. Poder Calorífico da Mistura 278
6.3. CÁLCULOS EM COMBUSTÃO 280
6.3.1. Cálculo da Quantidade de Ar 281
6.3.2. Cálculo dos Produtos de Combustão 281
6.3.3. Combustão Incompleta 283
6.3.4. Dissociação 285

Capítulo 7. COMBUSTÍVEIS E LUBRIFICANTES 287
7.1. ESTRUTURA DOS COMBUSTÍVEIS (HIDROCARBONETOS) 291
7.1.1. Parafinas (Alcanos) 291
7.1.2. Oleofinas (Alquenos) 292
7.1.3. Naftalenos (Cicloalcanos) 292
7.1.4. Aromáticos 292
7.2. PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS 293
7.2.1. Estequiometria da Combustão 293
7.2.2. Pressão de Vapor de Reid e Temperatura de Ebulição 293
7.2.3. Calor Latente de Vaporização 294
7.2.4. "Flash Point" 295
7.2.5. Limites de Flamabilidade 295
7.2.6. Temperatura de Auto-Ignição 296
7.2.7. Temperatura Adiabática de Chama 296
7.2.8. Poder Calorífico 296
7.2.9. Produção de CO_2 298
7.3. GASOLINA 299
7.3.1. Índice de Octano 300
7.3.2. Necessidade de Índice de Octano 302
7.4. GASÓLEO 305
7.4.1. Combustíveis Marítimos 306
7.4.2. Misturas Gasóleo-Água 307
7.4.3. Misturas Gasóleo-Etanol 308

7.5. OUTROS COMBUSTÍVEIS 309
7.5.1. Combustíveis Gasosos 310
7.5.1.1. Gases de petróleo liquefeitos (*GPL – LPG*) 311
7.5.1.2. Gás natural 313
7.5.1.3. Hidrogénio 314
7.5.2. Combustíveis Oxigenados 316
7.5.3. Álcoois 316
7.5.3.1. Estequiometria da combustão dos álcoois 317
7.5.3.2. Pressão de vapor dos álcoois 318
7.5.3.3. Calor latente de vaporização dos álcoois 319
7.5.3.4. Solubilidade dos álcoois 320
7.5.3.5. "Flash point" dos álcoois 320
7.5.3.6. Índice de octano (*IO*) dos álcoois 321
7.5.3.7. Pré-ignição dos álcoois 321
7.5.3.8. Potencial de emissão de poluentes dos álcoois 322
7.5.3.9. Reformação do metanol 323
7.5.3.10. Corrosão com os álcoois 323
7.5.3.11. Segurança com o uso dos álcoois 324
7.5.4. Éteres 325
7.5.4.1. DME (Éter Dimetílico) 325
7.5.4.2. DEE (Éter Dietílico) 327
7.5.5. Ésteres 327
7.5.5.1. Biodiesel 328
7.5.5.2. Índice de Iodo 331
7.5.6. Ácidos gordos (gorduras) 331
7.5.6.1. Queima de Óleos e Gorduras 332
7.5.7. Combustíveis Sintéticos 332
7.5.7.1. Fisher-Tropsch (F-T) 334
7.5.7.2. BTL (biomass to liquid) 334
7.5.7.3. HVO (Óleos Vegetais Hidrogenados) 335
7.5.7.4. Combustíveis de Gasificação 336
7.5.7.5. Combustíveis de Pirólise (PL) 336
7.5.7.6. DMF (Dimetilfurano) 337
7.5.7.7. Nitrometano 337
7.5.8. Combustíveis Invulgares 338
7.5.8.1. Acetileno 338
7.5.8.2. Amónia 339
7.5.8.3. Aguarrás 344
7.5.8.4. Glicerina 346
7.5.8.5. Combustíveis que forneçam mais potência 350
7.5.9. Carvão (Emulsão – "Slurry") 350
7.5.10. Óxido Nitroso 351
7.6. ÓLEOS LUBRIFICANTES 352
7.6.1. Testes e Propriedades dos Óleos 352
7.6.2. Óleos Sintéticos 354

7.6.3. Classificação dos Óleos Lubrificantes para Motores 355
7.6.4. Outras Propriedades 358
7.7. PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS CORRENTES 359
7.7.1. Biodiesel 359
7.7.2. Bioetanol 360
7.7.3. Eletrocombustíveis 361
7.7.4. Outros combustíveis oxigenados 362

Capítulo 8. COMBUSTÃO NOS MOTORES 363
8.1. COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO COMANDADA (*IC*) 363
8.1.1. Caracterização da Combustão Normal 364
8.2. PARÂMETROS DA COMBUSTÃO NOS MOTORES DE *IC* 368
8.2.1. Turbulência 368
8.2.2. Taxa de Compressão 370
8.2.3. Avanço da Ignição 371
8.2.4. Qualidade da Faísca 372
8.2.5. Riqueza da Mistura 372
8.2.6. Nível de Preparação da Mistura 372
8.2.7. Carga e Velocidade do Motor 373
8.2.8. Temperatura, Pressão e Humidade do Ar 374
8.2.9. Características do Combustível 374
8.3. CÂMARAS DE COMBUSTÃO DOS MOTORES DE *IC* 375
8.3.1. Câmara em "L" e em "T" (de Válvulas Laterais) 376
8.3.2. Câmara de Turbulência ou de "Ricardo" 377
8.3.3. Câmara em Banheira 377
8.3.4. Câmara em Cunha ou Triangular 378
8.3.5. Câmara Hemisférica 378
8.3.6. Câmara Trapezoidal ou "Sem Câmara" 379
8.3.7. Câmara no Pistão 379
8.3.8. Câmara de 4 Válvulas "Telhado de Alpendre" ("Pent-Roof") 380
8.3.9. Câmara de 4 Válvulas Radiais 381
8.3.10. Câmaras com mais de 4 Válvulas 381
8.4. COMBUSTÃO ANORMAL 382
8.4.1. Pré-Ignição (Ignição à Superfície) 383
8.4.2. Auto-Ignição 384
8.4.3. "Knock" (Grilar) 384
8.4.3.1. Detonação 389
8.4.4. Parâmetros Relativos ao "Knock" 389
8.4.4.1. Avanço da ignição 389
8.4.4.2. Combustível 389
8.4.4.3. Taxa de compressão 390
8.4.4.4. Turbulência 390
8.4.4.5. Carga imposta 390
8.4.4.6. Riqueza da mistura 390
8.4.4.7. Velocidade do motor 390

8.4.4.8. Temperatura e pressão de admissão 390
8.4.4.9. Temperatura do motor 391
8.4.4.10. Câmara de combustão 391
8.4.4.11. Preparação da mistura 391
8.4.4.12. Recirculação de gases de escape (*EGR*) 391
8.4.5. Índice de Octano 391
8.4.5.1. Outras condições que originam alterações no *IO* requerido por um motor 393
8.4.5.2. Combustíveis 393
8.4.6. "Rateres" ("Backfire") 394
8.5. COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO (*IPC*) 395
8.5.1. Características da Combustão 395
8.5.2. Preparação da Mistura 396
8.5.3. Tipo de Combustão 397
8.5.4. Combustíveis 398
8.5.5. As Fases da Combustão nos Motores de *IPC* 398
8.5.5.1. Atraso da inflamação 398
8.5.5.2. Combustão detonante ou explosiva 400
8.5.5.3. Combustão controlada ou progressiva 400
8.5.5.4. Combustão por difusão 401
8.6. PARÂMETROS DA COMBUSTÃO NOS MOTORES DE *IPC* 401
8.6.1. Sistema de Injeção 402
8.6.1.1. Atomização 403
8.6.1.2. Penetração do "spray" 404
8.6.1.3. Distribuição de tamanhos das gotas 404
8.6.1.4. Avanço da injeção 405
8.6.1.5. Carga ou quantidade de massa injetada 405
8.6.2. Turbulência 405
8.6.3. Taxa de Compressão 406
8.6.4. Combustíveis 406
8.6.5. Outros Parâmetros 407
8.6.5.1. Pressão e temperatura de admissão 407
8.6.5.2. Sobrealimentação 407
8.6.5.3. Velocidade do motor 407
8.6.6. Câmaras de Combustão dos Motores de *IPC* 408
8.6.6.1. Câmaras de injeção direta 408
8.6.6.2. Câmaras de injeção indireta 409
8.7. VARIABILIDADE DA COMBUSTÃO 410
8.7.1. Valores Experimentais de VAR_{pmi} 411
8.8. MOTORES COM DIFERENTES PROCESSOS DE COMBUSTÃO 412
8.8.1. Motores de Carga Estratificada 413
8.8.1.1. Motor Honda CVCC 414
8.8.1.2. Injeção direta 414
8.8.1.3. Sistema ignição por jato turbulento 415
8.8.2. CAI ("Controlled Auto Ignition") 417
8.8.3. Motores *HCCI* ("Homogeneous Charge Compression Ignition") 419
8.8.4. Motores "Dual-Fuel" (com 2 Tipos de Combustível) 422

Capítulo 9. PRODUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE POLUENTES 425
9.1. INTRODUÇÃO 425
9.2. LEGISLAÇÃO EUROPEIA 429
9.2.1. Dados Históricos 429
9.2.2. Legislação Europeia Atual (Pesados) 434
9.2.3. Legislação Europeia Atual (Automóveis) 434
9.2.4. O DieselGate 436
9.2.5. Testes de estrada RDE 436
9.3. POLUENTES 440
9.3.1. Proveniência dos Poluentes 440
9.3.1.1. Motores de ignição comandada 440
9.3.1.2. Motores de ignição por compressão 442
9.3.1.3. Fontes de poluentes na Europa 442
9.3.2. Toxicidade dos Poluentes 443
9.4. MECANISMO DE FORMAÇÃO DE POLUENTES 445
9.4.1. Óxidos de Azoto 445
9.4.2. Monóxido de Carbono 449
9.4.3. Hidrocarbonetos Não Queimados 449
9.4.4. Partículas (PM – Particulate Matter) ou Fumo 451
9.5. SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA 452
9.5.1. Soluções Iniciais 452
9.5.1.1. Legislação Federal dos Estados Unidos 452
9.5.2. Motores de Carga Estratificada 453
9.5.3. Catalisador de Triplo Efeito, Sonda λ, "Closed-Loop" e Injeção Eletrónica 455
9.5.3.1. Reações no catalisador 457
9.5.4. Motores de Queima Pobre 457
9.5.5. Motores Diesel 458
9.5.5.1. Catalisadores de oxidação 460
9.5.5.2. Redução seletiva de *NOx* (SCR) 460
9.5.5.3. Adsorção de *NOx* (LNT) 461
9.5.5.4. *EGR* (recirculação dos gases de escape) 461
9.5.5.5. Conteúdo de enxofre do combustível 462
9.5.5.6. Número de válvulas 462
9.5.5.7. Turbulência 463
9.5.5.8. Avanço da injeção 463
9.5.5.9. Pressão de injeção 463
9.5.5.10. Componentes 463
9.5.5.11. Turbo-compressores e "inter-coolers" 464
9.5.5.12. Filtros de partículas 464
9.5.5.13. Sistemas de injeção 467
9.6. MOTORES A 2 TEMPOS 469
9.7. "ON-BOARD DIAGNOSTICS" – *OBD* 470
9.7.1. *ODB* I e *OBD* II 471
9.7.2. Funcionamento 471
9.7.3. Códigos 473

9.7.4. Análise ao Catalisador 474
9.8. SÍNTESE 475

Capítulo 10. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO E CÁLCULO 477
10.1. RENDIMENTOS 477
10.1.1. Rendimento de Combustão 478
10.1.1.1. Dissociação 480
10.1.1.2. Preparação da mistura 480
10.1.1.3. Turbulência 480
10.1.1.4. Modelo de libertação de calor 481
10.1.1.5. Cálculo da função de Wiebe 483
10.1.1.6. Cálculo da taxa de libertação de calor 484
10.1.2. Rendimento Adiabático 485
10.1.2.1. Transferência de calor para as paredes da câmara de combustão 485
10.1.2.2. Motores adiabáticos 487
10.1.2.3. Temperature Swing 488
10.1.2.4. Injeção de água e "regeneração interna" 489
10.1.2.5. Influência das condições de funcionamento 490
10.1.3. Rendimento Teórico 491
10.1.4. Rendimento Relativo às Propriedades dos Fluidos 492
10.1.4.1. Riqueza da mistura 493
10.1.4.2. Capacidade calorífica específica do ar 493
10.1.4.3. Propriedades dos gases intervenientes 495
10.1.5. Rendimento Inerente 496
10.1.5.1. Cálculo da transferência de calor num motor 498
10.1.5.2. Calor (latente) da vaporização do combustível 501
10.1.6. Eficiência de Bombagem 501
10.1.6.1. Passagem nas válvulas 502
10.1.6.2. Número de Mach 503
10.1.6.3. Pressão média de bombagem 505
10.1.6.4. Gases residuais 506
10.1.6.5. Passagem na válvula limitadora do ar (acelerador) 506
10.1.7. Rendimento Mecânico 507
10.1.7.1. Pistão, segmentos e cilindro 509
10.1.7.2. Chumaceiras 512
10.1.7.3. Sistema de distribuição 514
10.1.7.4. Acessórios 516
10.1.7.5. Atrito total 516
10.1.7.6. Medição das perdas de atrito 518
10.1.8. Eficiência Volumétrica 518
10.1.8.1. Modelos de cálculo dos fluxos de gás no motor 520
10.1.8.2. Efeito de sintonia e inercial dos gases de admissão e escape 520
10.1.8.3. Cálculo do escape do motor a 2 tempos 522
10.1.8.4. Calor latente de vaporização do combustível 524

10.1.8.5. Temperatura do motor 525
10.2. BALANÇO DE ENERGIA DO MOTOR 525
10.3. CÁLCULO DA ENERGIA DESCARREGADA NOS GASES DE ESCAPE 526
10.4. CÁLCULO DA RIQUEZA DA MISTURA 528
10.4.1. Métodos de Cálculo 529
10.4.1.1. Shell-Thornton I 529
10.4.1.2. Shell-Thornton II 530
10.4.1.3. Equação de Spindt 530
10.4.2. Riqueza da Mistura (ϕ) e Coeficiente de Excesso de Ar (λ) 530
10.5. CONTROLO DO MOTOR 532
10.5.1. O Sistema de Injeção 532
10.5.1.1. Medição do caudal de ar 532
10.5.1.2. Injeção da gasolina 536
10.5.2. Ignição 542
10.5.3. "Ralenti" 543
10.5.4. Tempo de Resposta 543

Capítulo 11. TESTE DE MOTORES 545
11.1. INTRODUÇÃO 545
11.2. TIPOS DE DINAMÓMETROS 546
11.2.1. Dinamómetros de Inércia 546
11.2.2. Dinamómetros Hidráulicos 548
11.2.3. Dinamómetros Elétricos 548
11.2.4. Dinamómetros de Fricção 549
11.2.5. Comparação entre Dinamómetros 549
11.3. O LABORATÓRIO DE TESTE 550
11.4. CARGA TÉRMICA RETIRADA NA VENTILAÇÃO 553
11.4.1. Convecção e Radiação do Motor 553
11.4.2. Convecção e Radiação do Escape 554
11.4.3. Perdas no Dinamómetro 554
11.4.4. Perdas nas Tubagens de Água Quente 554
11.5. FORNECIMENTO DE COMBUSTÍVEL, ÓLEO, ÁGUA, AR E RETIRAGEM DE GASES QUEIMADOS E SUAS MEDIÇÕES 555
11.5.1. Fornecimento de Combustível 555
11.5.2. Água de Arrefecimento 556
11.5.3. Ar de Combustão 557
11.5.4. Gases de Escape 560

Bibliografia 561
Índice Remissivo 575

Capítulo 1
MOTORES – CLASSIFICAÇÃO E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

1.1. INTRODUÇÃO

As máquinas são omnipresentes no nosso mundo. Usamo-las para facilitar a nossa vida, para nos movimentarmos e para produzirmos bens e serviços. Este livro vai incidir sobre uma destas máquinas que queima combustível e produz trabalho, o MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA, disseminado por inúmeras utilizações, das quais, sem dúvida, a mais importante é ser fonte de potência para locomoção de veículos. Neste campo, o motor de combustão interna usa-se em automóveis, motos, camiões, locomotivas, navios, aviões, além de ter utilizações noutros campos tais como a produção de eletricidade (larga e pequena escala) e outras menores aplicações (bombear água, produzir ar comprimido, mover máquinas, cortar relva ou árvores, etc.).

Embora seja reconhecido que o motor de combustão interna é dos maiores responsáveis pela poluição atmosférica e pela diminuição das reservas de petróleo bruto, o seu uso continua a intensificar-se, principalmente nos transportes. É previsível que as melhorias do nível de vida na Europa Oriental (incluindo Rússia e Turquia) e principalmente na Ásia (China, Índia) originem um incremento do uso do motor de combustão interna nas próximas décadas, antes que outras formas de conversão de energia (pilhas de combustível, motores elétricos) ou outras fontes de energia (renováveis incluindo álcoois, éteres e ésteres, hidrogénio e eletricidade) venham substituir o binómio motor térmico - combustíveis fósseis.

O motor de combustão interna (a pistão) foi inventado no século XIX sendo das invenções que mais impacto teve na sociedade e no nível de vida das populações. Atualmente, embora já ultrapassado por outras tecnologias ao nível da aviação (turbinas), dos caminhos de ferro (motores elétricos) e dos navios de muito grande porte e submarinos (usando motores nucleares), continua sem concorrência no campo do transporte rodoviário. Podem-se encontrar motores térmicos com potências entre 10 W e 10 MW, mas a maioria apresenta valores na ordem das dezenas ou

1.4. MOTOR DE IGNIÇÃO COMANDADA

O motor de combustão interna mais vulgar é o motor a gasolina, que se denomina **motor de ignição comandada** ou de ignição por faísca, pois a sua combustão inicia-se por uma descarga elétrica de elevada tensão (faísca) dentro da câmara de combustão, onde existe uma mistura ar-combustível.

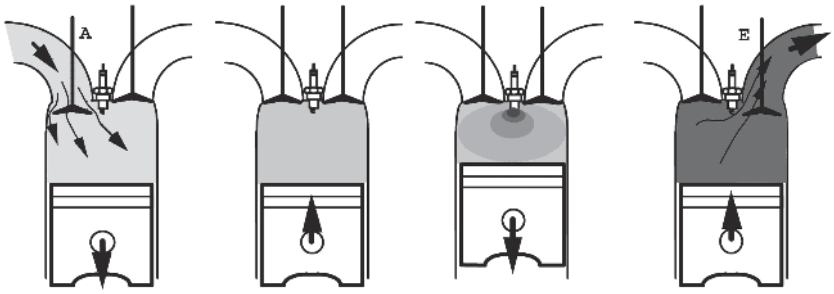
As Fig.1.6-a) a d) representam este motor (de ignição comandada) em estágios diferentes do seu ciclo. Existem duas válvulas (pelo menos) na parte superior do cilindro, a culassa, que podem ser abertas ou fechadas por um mecanismo que se detalhará mais à frente (Cap.5.1.4).

A válvula *A* é a **válvula de admissão** e, quando aberta, mantém o cilindro em comunicação com o sistema de alimentação, cujo papel é fornecer uma pré-mistura de ar e combustível.

A válvula *E* é a **válvula de escape**, que tem a missão de permitir que os gases saiam do cilindro. Ambas as válvulas se abrem para o interior do cilindro, sendo a sua vedação auxiliada pelas altas pressões aí reinantes. Seguidamente apresenta-se o funcionamento deste tipo de motor.

Admissão

A Fig.1.6-a mostra-nos o pistão a efetuar um curso descendente, estando a válvula de admissão aberta. O pistão, no seu movimento descendente, provoca uma depressão no interior do cilindro, o que introduz a mistura vinda do sistema de alimentação para dentro do cilindro. Assim se dá o enchimento do cilindro, com o pistão movimentando-se de *PMS* a *PMI*.



a) Admissão b) Compressão c) Explosão-Expansão d) Escape

Fig.1.6 – Os 4 tempos do motor de ignição comandada

Compressão

Com ambas as válvulas fechadas, o pistão sobe do *PMI* ao *PMS*, comprimindo os gases que foram admitidos durante a admissão. Esta compressão vai elevar a temperatura e a turbulência da mistura, vaporizando alguma gasolina ainda no estado líquido e homogeneizando a mistura. A combustão será, nestas condições, mais completa, libertando mais calor e uma menor quantidade de produtos não queimados, altamente poluentes. No entanto, a temperatura no final da compressão deverá ficar bastante abaixo da temperatura de autoignição da mistura.

Os **coletores de admissão** dos motores de injeção são longos, havendo alguns de geometria variável (Fig.1.8). O projeto da geometria das condutas está irmamente ligado à abertura e fecho das válvulas (diagrama de distribuição), podendo originar eficiências volumétricas superiores a 100% (um motor de cilindrada *V*, poderá admitir um volume de ar superior a *V*, por ciclo). Por exemplo, as eficiências volumétricas dos motores de Fórmula 1 chegaram a ultrapassar largamente os 130%.

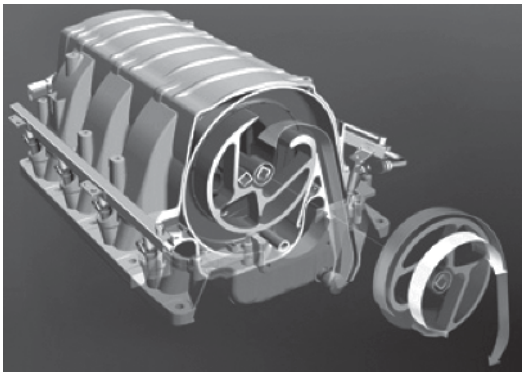


Fig.1.8 – Variação contínua do comprimento da admissão

Este é o funcionamento do motor a 4 tempos de ignição comandada (Fig.1.9):

1º Tempo – **Admissão**

A válvula de admissão encontra-se aberta durante todo o percurso do pistão desde *PMS* a *PMI*, permanecendo aberta durante algum tempo depois de *PMI*. Este atraso do fecho da admissão (*RFA* – o *R* indica retardamento, para não usar a letra *A* que é usada para avanço – ver Fig.1.9) origina que a inércia da coluna gasosa permita a entrada da mistura durante a primeira parte da subida do pistão. É possível calcular as ondas de pressão do ar nas proximidades da válvula de admissão e, com um projeto cuidado, consegue-se que a válvula feche durante um pico de pressão, ou seja, que a massa de ar dentro do cilindro fique a uma pressão superior à do coletor de admissão. Por outro lado, as altas velocidades do ar na entrada do cilindro criam inércia, levando a que a mistura continue a entrar no cilindro mesmo que a sua pressão seja elevada. Se o coletor estiver à pressão atmosférica, a pressão de enchimento poderá ser bastante maior, ou seja, consegue-se admitir uma massa de ar superior à que caberia no cilindro à pressão atmosférica.

A **abertura da válvula de admissão** dá-se antes da chegada do pistão ao *PMS*. Este avanço à abertura da admissão (*AAA*) serve para que a inércia dos gases de escape, ainda a sair a grande velocidade pela respetiva válvula, provoque a aspiração do ar de admissão, lavando o cilindro dos gases de escape. Por ocasião do fecho da válvula de escape é favorável haver nesse local uma onda de pressão negativa, de modo a retirar o máximo possível de gases queimados, para que estes não se escapem para o coletor de admissão. Porém, quando o motor funciona a baixa carga (baixa pressão de admissão) os gases de escape entram no coletor de admissão, em virtude da sua pressão ser superior, criando efeitos pulsantes importantes e indesejáveis no ar de admissão.

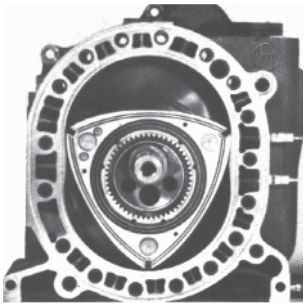
2º Tempo – **Compressão**

Ambas as válvulas estão fechadas, sendo a mistura gasosa comprimida pelo movimento ascensional do pistão.

- o motor tem zonas intrinsecamente quentes (entre as velas e a janela de escape) e outras intrinsecamente frias (zona após a admissão), pelo que apresenta grandes gradientes térmicos que têm de ser minimizados;
- a lubrificação é feita por óleo perdido, o que eleva o seu consumo e poderá criar problemas de poluição dos gases de escape;
- a reparação deste tipo de motores é difícil (e cara) pela complicada geometria da carcaça;
- embora a potência seja elevada (quando comparado com motor alternativo de igual cilindrada) o seu binário é relativamente modesto.

Tradicionalmente, as janelas eram colocadas na periferia da carcaça, mas, aparentemente, esta localização cria mais problemas de "curto-circuito" da mistura fresca, embora a abertura e fecho das janelas sejam mais rápidos. Tem havido exemplares deste tipo de motor que funcionaram com turbo-compressor e mesmo com o ciclo de Diesel. A última versão comercializada pela Mazda era a gasolina e de admissão atmosférica. O número de rotores por motor tem variado entre um e quatro, sendo o mais normal motores de dois rotores, que se equilibram mutuamente, minimizando as poucas vibrações deste tipo de motor. Na Fig.1.15 podem-se identificar: (a) a câmara de combustão do rotor; (b) o rotor e a carcaça; (c) os excêntricos do veio motor birrotor.

a) Rotor com câmara de combustão



b) Rotor na carcaça

c) Veio motor com dois excêntricos (de um birrotor)

Fig.1.15 – Motor Wankel

Um dos problemas deste tipo de motor é o cálculo da cilindrada, pois está ligado com o valor da sua velocidade de rotação. É possível medir com exatidão o caudal volúmico (L/s) deslocado e a cilindrada será igual a este valor dividido pela velocidade de rotação. Aqui é que existem indefinições, uma vez que o rotor e o veio motor não rodam à mesma velocidade. Assim, o motor Renesis do Mazda RX-8 nos EUA tem 1.3 L e roda a 8 500 rpm, enquanto que em alguns países da Europa (Portugal incluído) tem 2.6 L e 4 250 rpm (o que o torna um motor muito lento...). Dado que em cada 3 voltas do veio motor há 3 explosões, este motor funcionará como um 2 cilindros a 4 tempos, daí o dobro da cilindrada. A sua potência máxima é de 143 kW, o que certamente é de mais para um motor atmosférico de 1.3 L. Para confundir ainda mais a situação, no Japão este motor é tido como um 2 L (multiplicando 1.3 L por 1.5), o que parece ser um bom compromisso para explicar o nível de potência e de binário máximo (216 Nm).

Capítulo 2
HISTÓRIA DAS MÁQUINAS TÉRMICAS

2.1. PRIMÓRDIOS

Pode-se dizer que o **motor de combustão interna** teve início com a invenção das armas de fogo, pois nestas a energia térmica da explosão transformava-se em trabalho (deslocação do projétil). Na realidade, as primeiras tentativas para realizar trabalho útil usando um combustível, tiveram lugar na segunda metade do século XVII, usando a explosão de pólvora para elevar um pistão dentro de um cilindro. Os gases de combustão arrefeciam, baixando a sua pressão e a descida do pistão fazia subir água ou carvão pela ação da pressão atmosférica. Esta foi a ideia proposta por Christiaan **Huygens** em 1673 (Fig.2.1)*, que se tornou a primeira notícia divulgada sobre um motor, havendo, no entanto, um esquema de Leonardo da **Vinci** (Fig.2.2) datado de 1508, em que este propõe "elevar um peso por meio de fogo", com o mesmo princípio (aproveitamento do vácuo resultante do arrefecimento dos gases de combustão).

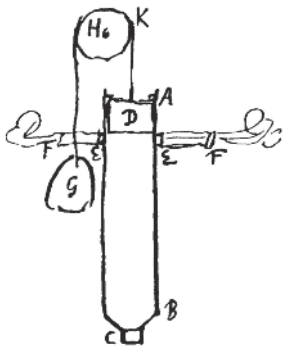


Fig.2.1 – Motor de Huygens

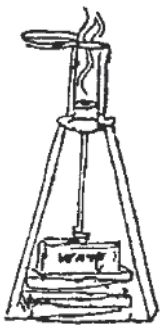


Fig.2.2 – Motor de Leonardo da Vinci

* Este capítulo é baseado nos livros de Hardenberg (Hardenberg, 1993; Hardenberg, 1999)

1973/74, deu-se a necessidade de baixar os consumos, o que implicou a introdução de motores económicos de 1 000 cm^3 pela maioria dos construtores, o que passou a ser norma em alguns países, nomeadamente os do Sul. Atualmente, os carros mais vendidos na Europa encontram-se ainda no setor dos 1 400 – 1 600 cm^3, embora os segmentos superiores apresentem níveis de vendas semelhantes. Nota-se presentemente uma redução da cilindrada generalizada à mercê do chamado "**downsizing**" dos motores, em que a cilindrada baixa mas as prestações mantêm-se (ou aumentam) pelo uso da sobrealimentação.

Nos EUA era norma o uso de carros enormes, com motores de cilindradas superiores a 4 ou 5 L na época pré-1974, com consumos prodigiosos (20 a 40 L/100 km), denominados "**gas-guzzlers**" (sôfregos de gasolina). Com a crise do petróleo, o valor das cilindradas baixou significativamente para valores à volta de 2 L, que foram crescendo nos anos pós-crise. Atualmente existe uma imposição do governo federal (Corporative Average Fuel Economy ou *CAFE*), na qual a média de consumo de todos os automóveis vendidos por um construtor não pode ser superior a 8.5 L/100 km, havendo penalizações fiscais para cada carro com consumo superior a 10 L/100km. Esta imposição obrigou a que inicialmente os construtores diminuíssem a cilindrada dos motores, mas como o valor desta norma não foi atualizado entre 1990 e 2010, a sua cilindrada foi aumentando à medida a que as medidas de eficiência dos motores o permitiram (os chamados "light trucks", MPVs, "pick ups" e "jeeps" só foram sujeitos ao CAFE em 2004, altura em que a média global de consumo era de 11.4 L/100km), sendo normal usarem-se grandes motores V8. Em 2016 os carros deverão consumir 6.0 L/100km e os "light trucks" 7.8 L/100km. Em 2011 Obama acordou com os construtores a passagem aos 4.3 L/100km para consumo médio de carros e "light trucks" por construtor, em 2025, usando fórmulas complicadas para o consumo, em função do tamanho dos veículos. Consequentemente a cilindrada dos carros americanos está a diminuir drasticamente.

2.2.1.5. Preparação da mistura ar-gasolina

Desde a infância do motor de explosão que se utilizam carburadores para preparar a mistura ar-gasolina para a combustão dentro dos cilindros. No entanto, sistemas de **injeção** de combustível foram utilizados em motores de aviação, pela dificuldade dos carburadores manterem o teor de mistura a baixas pressões (em altitude), por gelarem e por não permitirem o voo invertido (em virtude de possuírem um reservatório de nível constante). O primeiro voo dos irmãos Wright foi propulsionado por um motor com injeção de gasolina.

Nos automóveis, a introdução da injeção foi mais tardia, com o primeiro sistema a aparecer nos motores a 2 tempos dos carros das marcas Goliath e Gutbrod de 1951, e no revolucionário e bonito Mercedes-Benz 300 SL de 1954 (motor a 4 tempos, similar ao da Fig.2.16). Este tipo de injeção era mecânico e direto (para dentro da câmara de combustão) e mais tarde deu origem à injeção indireta (nas condutas de admissão) mecânica, que posteriormente evoluiu para a injeção eletrónica (ver Cap.5.2.2).

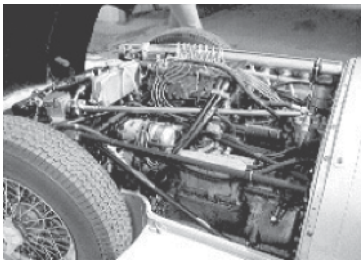
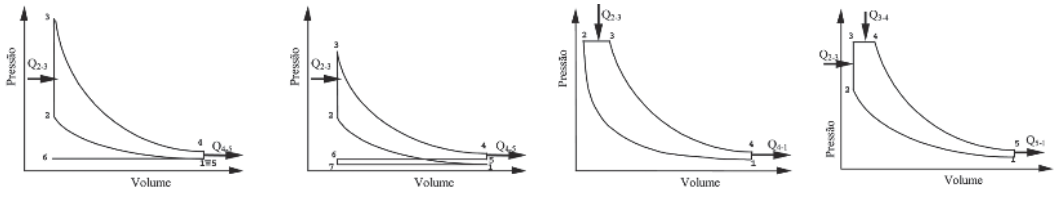


Fig.2.16 – Motor de injeção direta do Mercedes W196

Capítulo 3
ANÁLISE TEÓRICA DE CICLOS

O funcionamento dos motores pode ser analisado pelo recurso à termodinâmica, dividindo o seu ciclo de funcionamento em diferentes processos: admissão, compressão, fornecimento de calor, expansão, etc. Estes vários processos ideais podem ser agrupados de modo a produzir-se o ciclo global de funcionamento do motor. Cada processo poderá ter vários níveis de aproximação ao processo físico, apresentando-se neste capítulo a análise teórica mais simplista. Tendo por base os ciclos teóricos, o modo de funcionamento dos vários tipos de motores pode-se dividir em (Fig.3.1):

- **ciclo de Otto** ou de volume constante;
- **ciclo de Diesel** ou de pressão constante;
- **ciclo misto** ou de pressão limitada.



a) Ciclo de Otto b) Ciclo de Otto a média carga c) Ciclo de Diesel d) Ciclo misto

Fig.3.1 – Vários ciclos teóricos

Na realidade, a progressão das propriedades dos gases dentro do cilindro de um motor real (Fig.3.2) é significativamente diferente da análise teórica. Ao passar através do motor, o fluido operante é submetido a uma série de transformações químicas e físicas (compressão, expansão, combustão, transferência de calor através das paredes, etc.) que vão constituir o ciclo do motor.

Como seria de prever, o rendimento aumenta com o abaixamento da carga, pois a quantidade de calor fornecida a volume constante (Ψ) mantém-se constante. A redução da carga é conseguida à custa da redução da zona de fornecimento de calor a pressão constante, pelo que o ciclo se aproxima do de Otto.

3.5. CICLO TEÓRICO A VOLUME CONSTANTE SOBRE-EXPANDIDO (MILLER)

Quando, num motor de ignição controlada, se abre a válvula de escape, os gases presentes dentro do cilindro estão com elevada entalpia (pressão e temperatura) que é descarregada (perdida) pelo escape. Se fosse possível aproveitar parte desta entalpia, o rendimento do ciclo seria aumentado. Tal é o princípio do **ciclo de Miller** (ver Fig.3.15).

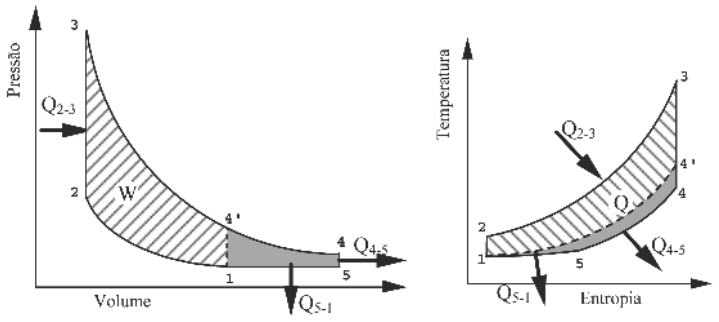
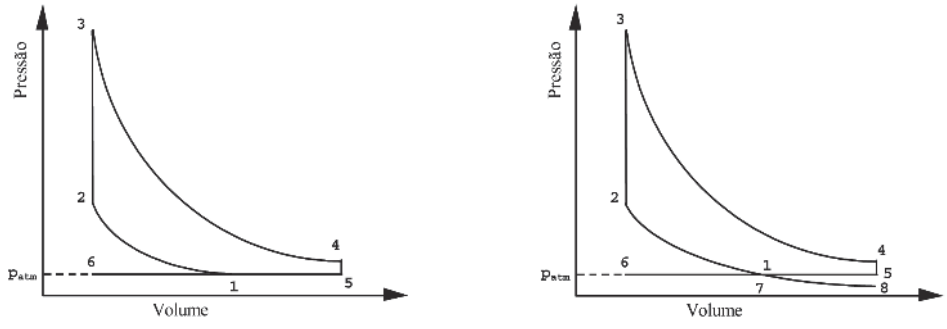


Fig.3.15 – Ciclo teórico de Miller

O trabalho extra que é aproveitado está representado nesta figura pela zona a cinzento. O ciclo de Otto é representado por 1-2-3-4'-1.

A variação da carga do ciclo de Miller consegue-se movendo o ponto 1 (no diagrama *p-V*) para a esquerda (diminuição) ou para a direita (aumento). Mas para percebermos melhor o funcionamento deste ciclo reportemo-nos à Fig.3.16.



a) Fecho da admissão atrasado e "back-flow" b) Fecho da admissão adiantado

Fig.3.16 – Ciclo de Miller

Capítulo 4
PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO

Os motores de combustão interna têm características de desenho e de funcionamento que os especificam. Como já foi visto (Cap.1), apresentam uma certa arquitetura, têm uma determinada cilindrada, podem rodar até uma dada velocidade máxima e produzem um certo valor de potência. Estes e outros são parâmetros importantes e específicos dos vários motores. No geral, os fatores importantes para um utilizador/comprador de motores serão:

1. prestações do motor;
2. custo do motor e facilidade de instalação;
3. consumo de combustível (e seu custo);
4. ruído, vibração e emissão de poluentes;
5. fiabilidade, durabilidade, manutenção e seus custos.

Estes parâmetros determinarão a escolha de um entre vários motores, tanto por considerações económicas como por outras (por exemplo, prestações). Nesta obra debruçar-nos-emos sobre os fatores 1, 3 e 4 da lista anterior, não por os restantes serem menos importantes, mas por serem estes os específicos da matéria aqui apresentada.

Os carros não têm caixa de velocidades, pelo que é a embraiagem o elemento a responsável pela relação entre a velocidade de rotação do motor e das rodas. O motor durante toda a corrida roda a cerca de 8 500 rpm e a embraiagem somente perto do final é que é totalmente ligada. Como nesta competição eram proibidos os controlos eletrónicos (só podia haver eletricidade, não eletrónica) tanto o avanço da ignição como a pressão da embraiagem eram comandados mecanicamente por elementos elétricos ("relais") e mecânicos (molas e alavancas - Fig.4.37) em função do tempo. Geralmente a corrida começa com mistura pobre e ignição muito retardada de modo a que as rodas não patinem. Ao longo do tempo a ignição vai sendo avançada e a mistura enriquecida (Butcher, 2015). Atualmente já são permitidos sistema de controlo eletrónico para a ignição e injeção. Esses sistemas têm a finalidade de permitir, no futuro, o controlo da potência destes motores pela NHRA.

Fig.4.36 - Engenheiro a medir o atrito do asfalto

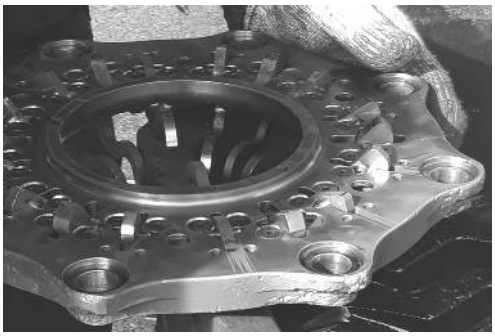


Fig.4.37 - Embraiagem de top fuel, com as diferentes alavancas

Os escapes estão orientados para cima e para trás, pois desenvolvem uma imensa força, funcionando quase como motores a jato.

Embora os dragsters top fuel usem compressores Roots (Fig.4.38), as restantes categorias usam outros tipos de compressores, entre compressores centrífugos (Fig.4.39) ligados à cambota até os turbo-compressores (Fig.4.40).

Fig.4.38 - Compressor Roots de um dragster top fuel

Capítulo 5
DESCRIÇÃO DOS MOTORES

Desde sua a invenção, no século XIX, os motores de combustão interna têm evoluído continuamente, mas os princípios básicos têm-se mantido:

- o volume varrido é criado por um pistão a evoluir dentro de um cilindro;
- o movimento do pistão é controlado por um sistema biela-manivela;
- a energia é fornecida ao motor por meio de um combustível líquido ou gasoso;
- o motor fornece energia ao exterior através de um veio que roda.

Existem algumas exceções à lista acima enunciada, tais como os motores rotativos (sem cilindros nem pistões circulares alternativos) e os motores de êmbolos livres, que não produzem potência pela rotação do veio (aproveitam a entalpia dos gases de escape para fazer rodar uma turbina). A descrição dos motores aqui efetuada incide sobre os motores convencionais, incluindo pequenos e grandes, rápidos e lentos, queimando gasolina, gasóleo ou outro tipo de combustível. Começar-se-á por uma descrição geral dos elementos construtivos comuns a todos estes motores, passando para os sistemas necessários ao seu funcionamento e terminando pela descrição dos motores e sistemas específicos dos motores de ignição comandada, de ignição por compressão e de 2 tempos. Segue-se com a descrição dos sistemas usados para a sobrealimentação, de alguns sensores e da descrição da utilização dos motores de combustão interna. No último subcapítulo descrevem-se as turbinas e os foguetes.

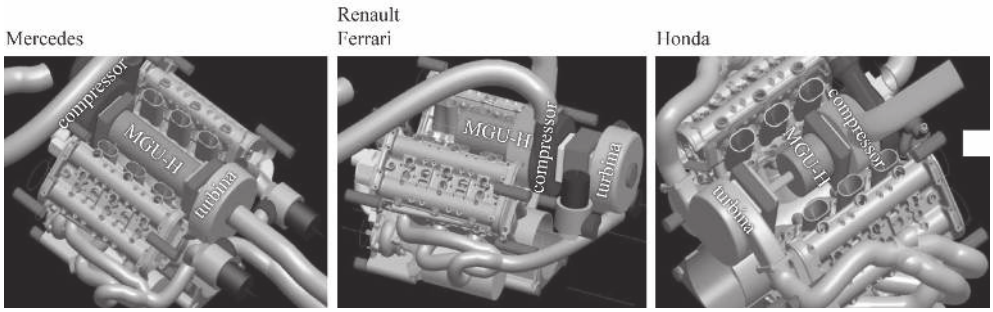


Fig.5.232 – Colocação do sistema MGU-H (recuperação de energia ligado à turbina e ao compressor) nos vários motores de Formula 1 em 2016 (adaptado de Marmorini, 2014)

5.5.4.3. "Twincharger" (compressor + turbo)

Os compressores volumétricos são bons a manter a pressão de admissão elevada em condições de baixa velocidade do motor enquanto que os turbo-compressores funcionam otimamente para elevadas velocidades do motor. Assim, a associação entre estes dois compressores (Fig.5.233) permitirá eliminar o "turbo-lag" e permitir elevado binário a baixa velocidade do motor e gerar elevada potência (a elevada velocidade do motor). Este desenho foi apresentado inicialmente pelo Lancia Delta S4, em 1985, um carro de rally, e, mais recentemente, pelos motores da VW ("twincharger") a gasolina em que um compressor Eaton funciona em paralelo com um turbo-compressor, proporcionando aos motores em que está montado um elevado binário desde o arranque e elevada potência (170 Cv no motor 1.4 L), reduzindo o consumo pelo uso de um motor com muito menor cilindrada.

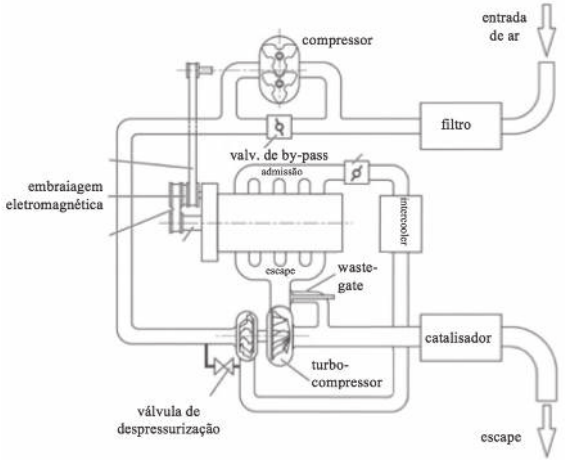


Fig.5.233 – Montagem do compressor e do turbo-compressor no motor "twincharger" da VW (adaptado de Wan, 1997)

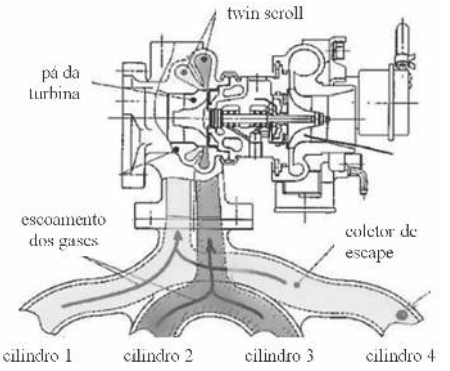


Fig.5.234 – Funcionamento do turbo-compressor "twin-scroll" (adaptado de Wan, 1997)

produz a energia para o impulso) e, em fase de conceção, os **foguetes iónicos**, onde um feixe de iões (geralmente de xénio) é emitido a elevadíssimas velocidades (Sutton, 2000). Nos **foguetes de propulsão elétrica,** a energia produzida internamente (por exemplo, por reação nuclear) é convertida em eletricidade e esta, por meio de resistências ou de arco, aquece um gás propulsor a temperaturas elevadíssimas (15 000 K), de modo a que seja descarregado a velocidades extremas (5 km/s) e produza impulso (Sutton, 2000).

A atividade de um conjunto combustível/oxidante é dada pelo **Impulso Específico** (impulso/ /caudal de combustível), tal como foi especificado para as turbinas. O par H_2O_2/petróleo apresenta o valor de 260 s, O_2/petróleo 280 s e O_2/H_2 455 s (em vácuo). O Impulso Específico dos foguetes do vaivém (no vácuo) é de 265 s (NASA, 1991). O Impulso Específico não depende somente dos combustíveis mas também do desenho do foguete.

5.8.3.1. Foguetes de combustível sólido

A taxa de combustão dos **foguetes** de combustível sólido é controlada somente pelo desenho interior dos canais, embora a temperatura do combustível e a pressão exterior também a influenciem. Inicialmente, o combustível era compactado dentro do invólucro e a queima fazia-se da traseira (saída) para a frente (Fig.5.282). O grande problema deste desenho é a área de reação ser pequena (a área do círculo). Para aumentar a taxa de reação, a ignição é feita na frente do foguete, havendo uma (ou mais) cavidade(s) (Fig.5.283) ligando até à saída. Assim, a reação dá-se ao longo dessa(s) cavidade(s), proporcionando um muito maior **impulso**.

Fig.5.282 – Foguete com queima pela traseira

Fig.5.283 – Foguete com queima transversal

Com o consumo do combustível, o diâmetro da cavidade aumenta, pelo que a taxa de reação aumenta e com ela o **impulso**, ou seja, neste desenho (cavidade circular), o impulso aumenta com o tempo. Desenvolveram-se desenhos de cavidades que proporcionam diferentes variações da taxa de impulso com o tempo. Na Fig.5.284 (Sutton, 2000) mostram-se os contornos de queima de um desenho desenvolvido para ter impulso (área de queima) constante (a escuro está o canal original).

Fig.5.284 – Diagrama mostrando os sucessivos contornos de combustão de igual perímetro (Sutton, 2000)

Capítulo 6
TERMODINÂMICA DA COMBUSTÃO

6.1. AR E COMBUSTÍVEIS

Normalmente, os combustíveis são queimados no seio do ar, que é uma mistura de inúmeros componentes, mas geralmente considera-se a mistura indicada na Tab.6.1.

Tab.6.1 – Principais constituintes do ar

gás	% (volume)	massa molar	% (molar)
O_2	20.95	31.998	20.95
N_2	78.09	28.012	79.05
Ar	0.93	38.948	
CO_2	0.03	40.009	
ar	100	28.962	

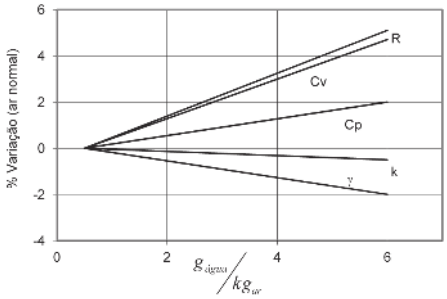


Fig.6.1 – Efeito da humidade do ar em várias das suas propriedades

ou seja, para uma massa de combustível m_f a massa de mistura é $m_{mist} = m_f\left[1+\lambda\left(A/F\right)_{esteq}\right]$

e assim (usando Eq.6.3), pode-se chegar aos valores dos poderes caloríficos da mistura em

termos de massa $$Q_{mist,M} = \frac{Q_{pi}\times m_f}{m_{mist}} = \frac{Q_{pi}}{1+\lambda\left(A/F\right)_{esteq}} \tag{6.4}$$

termos de volume $$Q_{mist,V} = \frac{Q_{pi}\times m_f}{\left(V_{ar}+V_f\right)} = \frac{Q_{pi}\times m_{mist}}{V_{mist}\times\left[1+\lambda\left(A/F\right)_{esteq}\right]} = \frac{Q_{pi}\times\rho_{mist}}{1+\lambda\left(A/F\right)_{esteq}} \tag{6.5}$$

no qual $\rho_{mist} = \frac{m_{ar}+m_f}{V_{ar}+V_f}$

Num motor de injeção direta ou em motores em que os combustíveis sejam injetados no estado líquido: $\frac{V_{ar}}{V_f} \approx \frac{800}{1.2}$, pelo que podemos ignorar o volume do combustível, e teremos

$$Q_{mist,V} = \frac{Q_{pi}\times m_f}{V_{ar}} = \frac{Q_{pi}\times\rho_{ar}}{\lambda\left(A/F\right)_{esteq}} \tag{6.6}$$

Como pode ser visto na Fig.6.2, embora o **hidrogénio** tenha um poder calorífico muitíssimo maior que o dos outros combustíveis, quando fornecido a um motor (com limitação de volume), o poder calorífico da sua mistura é significativamente inferior. A razão está no grande volume ocupado pelo hidrogénio na mistura, que reduz a presença de ar.

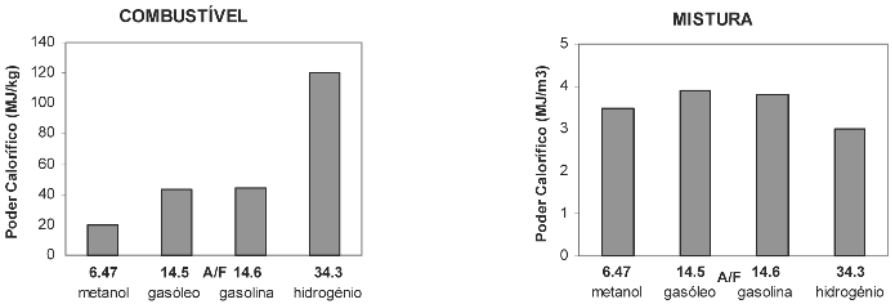


Fig.6.2 – Poder calorífico do combustível e da mistura estequiométrica com ar

Capítulo 7
COMBUSTÍVEIS E LUBRIFICANTES

No capítulo anterior tratou-se de combustíveis formados por um simples composto, no entanto, os vulgares combustíveis consistem em misturas de mais de cem compostos. Seguidamente, mostrar-se-á a estrutura de alguns destes compostos, a sua classificação e algumas das suas propriedades. Seguidamente apresentam-se outros combustíveis menos convencionais, tais como a sua produção.

A maioria dos combustíveis que usamos tem origem no petróleo bruto ("crude oil" ou petróleo fóssil) e é produzido por refinação (fracionada) deste, aquecendo-o a temperaturas superiores a 370 °C. A quantidade de **petróleo bruto** existente nas **reservas** apenas pode ser estimada e, presentemente, aponta-se para um valor superior a um bilião (10^{12}) de barris, enquanto que na década de 50 se apresentava o valor de cem mil milhões (10^{11}), ou seja, 10 vezes menos. Desde o começo do uso do petróleo, já se gastaram cerca de 70 mil milhões de barris, ou seja, quase a quantidade estimada nos anos 50 e muito menos do que as reservas que atualmente se pensam existir.

A tecnologia atual permite que se retire uma dada quantidade de petróleo das jazidas, que geralmente não ultrapassa os 70% da quantidade que realmente lá existe, sendo por vezes inferior a 50%. Tal significa que, quando as jazidas "secam", ainda contêm petróleo, só que de mais difícil (e não rentável) extração. Porém, logo que todas as jazidas estejam "esgotadas", usar-se-ão outros métodos mais sofisticados e mais caros, de modo a recuperar o restante. Repare-se que, nessa altura, o preço do petróleo será muito mais elevado, e outras fontes de energia serão talvez mais atraentes.

Uma outra eventualidade relativamente ao uso do petróleo fóssil pode ser a proibição do seu uso numa das próximas décadas, por vários países, nomeadamente europeus. Certamente que

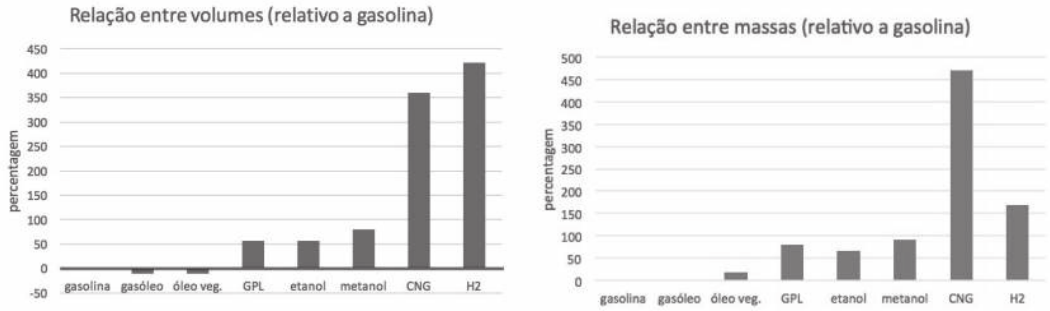


Fig.7.2 – Relação entre volumes e massas necessários para armazenamento, relativos à energia contida num depósito com 55L de gasolina (100%) (o hidrogénio é líquido)

7.1. ESTRUTURA DOS COMBUSTÍVEIS (HIDROCARBONETOS)

Os principais hidrocarbonetos constituintes da gasolina e do gasóleo agrupam-se em famílias chamadas parafinas, olefinas, naftalenos e aromáticos. Cada família tem características comuns de ligações entre os seus átomos que lhe conferem algumas propriedades específicas.

7.1.1. Parafinas (Alcanos)

As parafinas (ou alcanos) são hidrocarbonetos de fórmula geral $C_nH_{2(n+1)}$, nos quais os átomos de carbono se ligam em cadeia linear (aberta), com ligações simples (Fig.7.3). As restantes ligações de cada átomo de carbono fazem-se com átomos de hidrogénio (em cadeias sem ramificação). Poderão existir cadeias com ramificações, nas quais alguns átomos de carbono da cadeia linear se ligam com outros átomos de carbono. Um exemplo é o **iso-octano**.

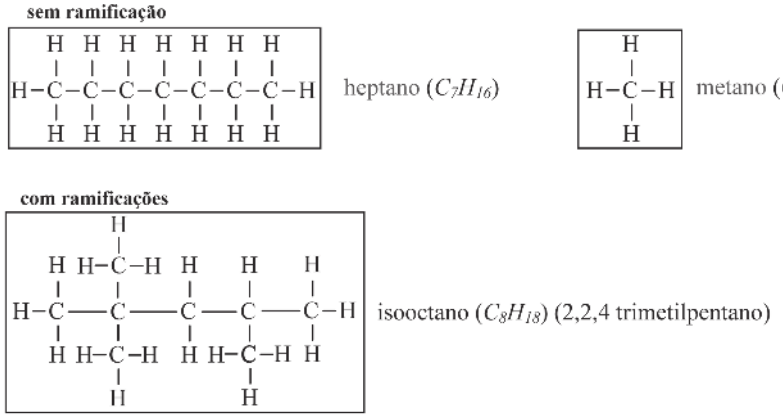


Fig.7.3 – Parafinas CnH2(n+1), ligação simples, cadeia aberta

O nome dos hidrocarbonetos parafínicos termina em "ano", sendo o prefixo relativo ao número de átomos de carbono da molécula (1-met; 2-et; 3-prop; 4-but; 5-pent; 6-hex; 7-hept; 8-oct; 9-non; 10-dec; 11-undec; 12-dodec.).

Capítulo 8
COMBUSTÃO NOS MOTORES

8.1. COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO COMANDADA (*IC*)

No motor convencional de **ignição comandada** (também conhecido por "ignição controlada", "a gasolina" ou "de explosão") o ar e o combustível misturam-se no coletor de admissão, passam pela válvula de admissão e são comprimidos pelo pistão para o volume da câmara de combustão. Perto do *PMS* inicia-se a combustão, através duma faísca elétrica que salta entre os elétrodos da vela. Após a inflamação da mistura nessa região, a frente de chama é propagada ao restante volume de mistura, sendo extinguida nas paredes da câmara e do cilindro.

A **frente de chama** é, teoricamente, de propagação esférica. Na prática, como a propagação da frente de chama é turbulenta e não laminar, a frente de chama desenvolve-se numa forma irregular, que pode variar de ciclo para ciclo.

Numa câmara de vela central, a frente de chama atinge as paredes desta aproximadamente 15º depois do *PMS* (ângulo da cambota), mas a combustão pode continuar por mais 5 ou 10º (Fig.8.1). Nesta figura pode-se verificar a diferença entre 5 ciclos sucessivos. A forma irregular de propagação da frente de chama é causada não só pelo desenvolvimento turbulento da combustão, mas também pela turbulência que a mistura possuía aquando da sua introdução no cilindro e pelas descontinuidades espaciais de riqueza da mistura.

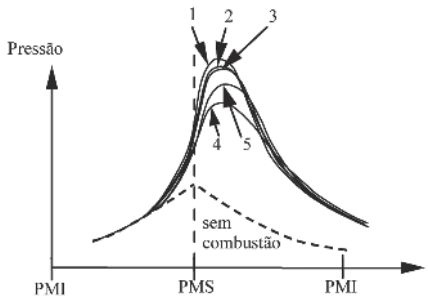


Fig.8.1 – Variações cíclicas da pressão do motor de ignição comandada

Este método foi iniciado nos anos 30, utilizando-se uma câmara de válvulas laterais e uma janela de quartzo na culassa. Estas imagens podem ser fotografadas a alta velocidade para se poderem estudar mais tarde. Com estes processos é possível medir-se o atraso da ignição, a velocidade de propagação da chama, etc. Atualmente usam-se pistões com coroa em quartzo para se observar o funcionamento de motores com válvulas à cabeça (Fig.8.8). Pode-se também medir a velocidade de propagação da chama usando detetores de radiação ou sensores de temperatura espalhados pela superfície da câmara de combustão. À medida que a frente de chama passa por cada uma dessas localizações, os sensores recebem essa informação e esta velocidade é facilmente calculada.

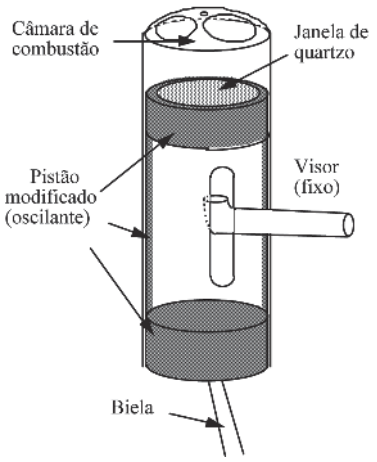


Fig.8.8 – Processo utilizado para visualizar a combustão

8.2. PARÂMETROS DA COMBUSTÃO NOS MOTORES DE *IC*

São vários os parâmetros importantes para o desenrolar de uma combustão eficiente, rápida e completa. Estes poderão estar relacionados com a geometria do motor (tais como o desenho da câmara de combustão, taxa de compressão e turbulência) ou com o comando do motor, tais como avanço da ignição, riqueza e nível de preparação da mistura, carga e velocidade do motor e características do combustível. Iremos discutir separadamente cada um destes parâmetros. É importante que a combustão se inicie facilmente e se propague à velocidade mais elevada possível. Se a propagação fosse instantânea, cairíamos no caso do ciclo teórico de combustão a volume constante que, como já se viu no Cap.3.2, apresenta um rendimento muito elevado. Dado que a secção sobre a geometria das câmaras de combustão é bastante importante, ela aparecerá num subcapítulo diferente.

8.2.1. Turbulência

A combustão duma mistura estacionária (sem movimento e sem turbulência) é efetuada a uma velocidade extraordinariamente baixa. Tal combustão não poderia verificar-se num motor que rodasse a velocidade mediana ou elevada. Na prática, como a mistura tem de ser escoada através de condutas e restrições (válvula de admissão) e ser comprimida no cilindro, apresentará uma elevada turbulência na altura da combustão. Neste caso, a velocidade de combustão vai ser muito mais de 10 vezes superior ao caso da mistura estacionária.

Existem três formas de produzir turbulência num motor: "swirl", em barril (ou "tumble") e "squish". Sobre estes tipos de turbulência falar-se-á nos parágrafos seguintes.

Capítulo 9
PRODUÇÃO E ELIMINAÇÃO DE POLUENTES

9.1. INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna são os principais responsáveis pela poluição do ar dos centros urbanos. São conhecidos três modos pelos quais estes motores emitem elementos considerados poluentes para a atmosfera:

- por evaporação do combustível no depósito ou nos elementos do circuito de fornecimento de combustível (por exemplo: carburador);
- por emissão para a atmosfera dos gases contidos no cárter;
- pelos gases de escape.

Existe, ainda, um outro modo de poluição associado aos veículos automóveis que tem lugar durante o reabastecimento. Durante esta operação, algum combustível evapora-se ao ser transferido da agulheta para o depósito e os vapores existentes dentro deste são deslocados para atmosfera por ação do combustível líquido que o vai encher.

Não existe legislação sobre este tipo de emissões de poluentes mas, em alguns estados dos EUA, usam-se agulhetas de abastecimento providas de um circuito de aspiração desses vapores (Fig.9.1). Após serem aspirados, os referidos vapores são passados pelo evaporador duma máquina frigorífica para condensarem, sendo retornados ao tanque da gasolineira. Desta forma, a bomba fornecedora pode "poupar" entre 1 a 5% da gasolina vendida.

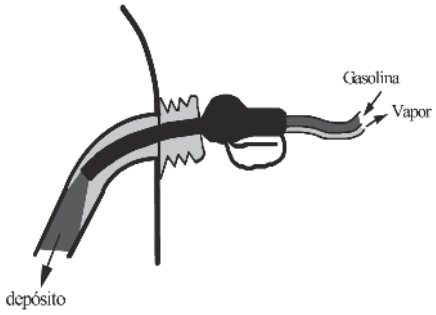


Fig.9.1 – Agulheta com retorno de vapor

testados por vários condutores em vários tipos de estrada, usando medidores de emissões portáteis (PEMS - Portable Emissions Measurement System). Este tipo de teste, que foi iniciado em Setembro de 2017, obriga os construtores a desenvolver os motores de modo a que sejam não poluentes em todos os regimes de funcionamento dos seus motores (na globalidade dos mapas em termos de velocidade e carga do motor - Fig.9.9) e não somente em percursos pré-determinados, como acontecia até ao momento, em que os testes eram feitos em banco de ensaio e segundo um teste conhecido. Segundo esta figura, o teste NEDC apresenta-se num campo muito limitado do funcionamento do motor. Com a introdução do WLTC o campo de aplicação abriu-se, mas ainda é uma pequena parte do mapa global do motor. Com o teste RDE, como pode ser testado por qualquer pessoa, a aplicabilidade do teste pode ser estendida à globalidade das condições possíveis de funcionamento do motor (Fig.9.9). Como a severidade destes testes é elevada, a Comissão Europeia permite que haja um "fator de conformidade" *FC* (que se ultrapassem os limites em 100% - *FC*=2,1 - até 2021 e depois em 50% - *FC*=1,5) até 2025, altura em que os valores especificados terão de ser cumpridos.

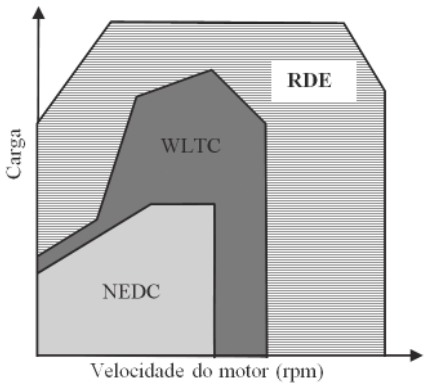


Fig.9.9 - Aplicação dos vários ciclos de condução relativamente ao mapa do motor (baseado em Jackson, 2017)

Estas são as principais diferenças entre os denominados *Euro* 6b, 6c e 6d (as letras a e b tinham sido anteriormente usadas para o *Euro* 5a e 5b). Ou seja, os valores limites para os poluentes relativos ao *Euro* 6 (como apresentados na Tab.9.7) são os aplicados em cada "tipo" de *Euro* 6 (b, c ou d), mas o teste a que o veículo é submetido é diferente e os fatores de conformidade são também diferentes. O *Euro* 6d-TEMP terá fator de conformidade de 2,1 para o RDE e foi aplicado entre 2017 (novos modelos) e 2019 (novos carros) e o *Euro* 6d terá fator 1,5 (mais 50% que o limite imposto, referente a "margem de erro" para o RDE) e será aplicado em 2020/21.

Os testes reais em estrada (RDE) também têm limites (ver Tab.9.9 e Tab.9.10), pois tem de se cumprir uma distância (>16km), tempo e terem uma composição de condução em estradas abertas, urbanas e auto-estrada igualmente repartida (entre 23% e 44% em cada) e terem velocidades médias estipuladas em cada um deste tipo de estrada, ultrapassando obrigatoriamente os 160 km/h por mais de 5 minutos, de modo a ilustrar a condução europeia, nomeadamente na

Capítulo 10
CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO E CÁLCULO

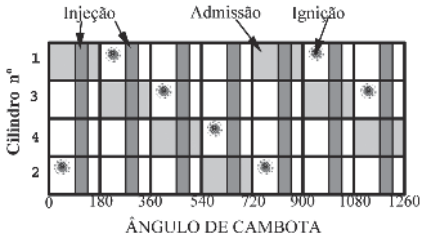
10.1. RENDIMENTOS

Nesta secção desenvolveremos os condicionamentos ligados aos diferentes rendimentos apresentados no Cap.4, que nos permitirão desenvolver processos de melhoria do rendimento global. Alguns destes tópicos já foram anteriormente discutidos, pelo que por vezes se encaminhará o leitor para outros capítulos, de modo a evitar duplicações. Os rendimentos em questão (eficiências, quando puderem ser superiores à unidade) são os seguintes (Cap.4.2.4):

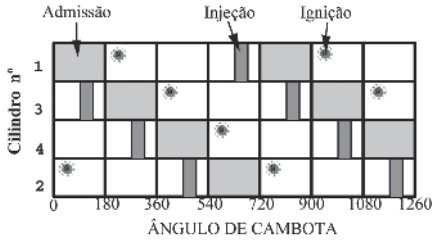
- rendimento de combustão;
- rendimento adiabático;
- rendimento teórico;
- rendimento relativo às propriedades dos fluidos;
- rendimento inerente;
- eficiência de bombagem;
- rendimento mecânico;
- eficiência volumétrica.

Quem pretender melhorar um motor (tanto em termos de rendimento como em termos de prestações) deverá tentar incrementar cada uma destas entidades de forma a aumentar o seu rendimento global, gastando menos combustível a produzir a mesma quantidade de trabalho, ou gastando o mesmo e produzindo mais trabalho. O aumento da potência do motor poderá também ser conseguido à custa da elevação da velocidade de rotação máxima deste, desde que o enchimento (eficiência volumétrica) não seja muito prejudicado.

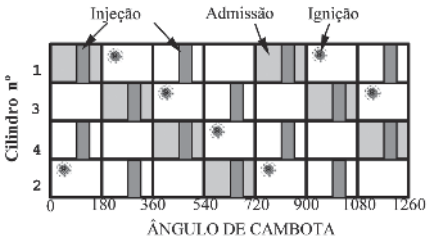
Num motor pluricilíndrico, o combustível poderá ser injetado simultaneamente em todos os cilindros (**injeção paralela** – Fig.10.49-a), resultando num sistema mais simples, pequeno e barato, ou poderá ser injetado na mesma altura do ciclo de cada cilindro (**injeção sequencial** – Fig.10.49-b). A discussão acima conduzida é específica para sistemas de injeção sequencial, pois somente nesses terá sentido falar-se em injeção durante ou após a abertura da válvula de admissão. Como em cada instante os vários cilindros estão em fases distintas dos seus ciclos, se a injeção for paralela ela decorrerá em fases diferentes em cada cilindro, podendo haver a injeção sobre válvula aberta num cilindro e sobre a válvula fechada nos outros. Geralmente, a injeção paralela ocorre uma vez por cada volta da cambota (2 por ciclo), enquanto que a injeção sequencial ocorrerá uma vez por ciclo. Alguns construtores utilizam uma estratégia diferente. A injeção é efetuada 2 vezes por ciclo em cada cilindro e desfasada em meia rotação para cada metade dos cilindros. Este tipo de injeção denomina-se **injeção agrupada** (Fig.10.49-c), sendo as suas características híbridas dos dois outros sistemas. Existe uma injeção a todas as voltas da cambota (2 por ciclo) mas estas estão em fase em todos os cilindros. Por simplificação, suponhamos que no cilindro #1 a injeção ocorre no *PMS*. Como no cilindro #4 (de um motor com 4 cilindros), o *PMS* corresponde ao do cilindro #1, estes dois cilindros serão agrupados. Como os pistões dos cilindros #2 e #3 trabalham paralelos, haverá injeção simultânea no *PMS* de cada um destes cilindros (nesta altura, os cilindros #1 e #4 estarão no *PMI*).



a) Injeção paralela



b) Injeção sequencial



c) Injeção agrupada

Fig.10.49 – Lógica de injeção

ENRIQUECIMENTO DE ACELERAÇÃO

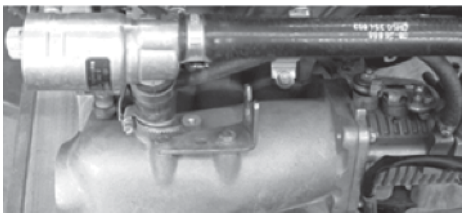
Parte da gasolina injetada é depositada nas paredes do coletor de admissão em frente ao injetor, tanto no caso de *SPI* ou de *MPI*, formando superfícies molhadas. Destes "charcos", a gasolina evapora-se, em resultado da sua volatilidade, volume depositado, área molhada e temperatura (e fornecimento de calor) das paredes. Em situações de carga constante, a quantidade de gasolina injetada iguala a gasolina a entrar no motor, por maior ou menor que seja a massa de gasoli-

10.5.3. "Ralenti"

Em alguns motores, o circuito de "**ralenti**" é parcialmente independente do funcionamento normal do motor. O caudal de ar não é medido, mas o circuito de malha fechada ("**closed-loop**") da sonda lambda continua a funcionar. Noutros motores, o funcionamento em "ralenti" é semelhante ao funcionamento normal, com a medição do caudal e o controlo pela sonda lambda.

No arranque a frio existe um mapa próprio para o "ralenti" (função da temperatura do motor), que comanda a velocidade de rotação do motor e o impulso de injeção, permitindo a necessária mistura rica. A lógica de atuação dos injetores pode também ser diferente para que haja uma maior estabilidade de funcionamento. Neste caso, o controlo em "closed-loop" pode ser desativado.

Para variar a velocidade do "ralenti" existe uma válvula de ar (Fig.10.53) comandada por um motor passo-a-passo somente utilizada para este fim. Desta maneira, consegue-se dar uma resposta rápida a solicitações de carga impostas durante o "ralenti", como sejam o arranque do ar condicionado, ligação de luzes, etc. Existe um controlo em malha fechada para esta válvula de ar, de maneira a manter a velocidade do motor o mais baixa possível e assim diminuir o consumo nestas circunstâncias. Nos motores com acelerador eletrónico ("**fly-by-wire**"), o controlo do caudal de ar para o "ralenti" pode ser feito somente pela borboleta principal, eliminando a válvula de ar do "ralenti".



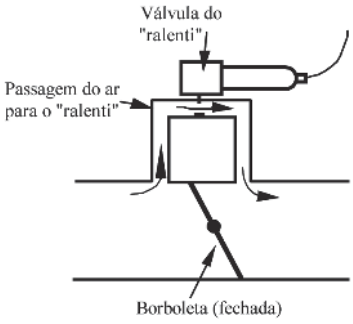


Fig.10.53 – Válvula de "ralenti"

10.5.4. Tempo de Resposta

Cada instrumento de medida tem o seu **tempo de resposta**, que é caracterizado como o tempo necessário para que, quando a entrada é sujeita a um degrau unitário, a saída apresente 63% do valor final. Nem sempre é necessário que o tempo de resposta seja o mínimo possível. No caso do medidor de caudal do ar por fio quente, como já foi visto, interessa que tenha um certo atraso na resposta para que, durante uma aceleração, a mistura não se torne excessivamente rica (Martins, 1994).

A contabilização do tempo de resposta não afeta drasticamente as operações a regime constante, mas é importante durante **acelerações**. Um dos problemas que cria atrasos de resposta prende-se com a maneira como se pode identificar o início de uma aceleração. Os sinais, tanto

Capítulo 11
TESTE DE MOTORES

11.1. INTRODUÇÃO

Testar motores (Fig.11.1) é um procedimento que tem de ser efetuado inúmeras vezes. Todos os motores fabricados têm de ser testados mas, antes de chegar ao fabrico, os protótipos foram sujeitos a milhares de horas de teste. Os motores têm de ser testados a vários níveis, sendo os últimos testes os de longevidade e de fiabilidade.

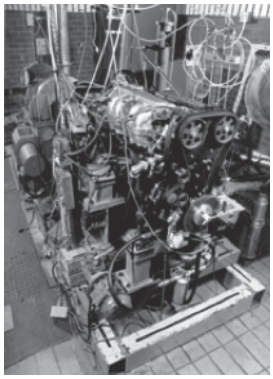


Fig.11.1 – Motor em célula de teste

Atualmente, o tempo de teste dos motores é significativamente mais longo do que há umas décadas atrás, porque são mais elaborados e têm de funcionar em condições mais controladas. Porém, como as equipas são muito maiores, os meses de desenvolvimento são em menor número.

Enquanto que, há quatro décadas, a aplicação de um carburador a um motor era um procedimento relativamente simples, os atuais sistemas digitais de injeção obrigam a estabelecer mapas de injeção no banco de ensaio, ou seja, todas as possíveis condições de funcionamento têm de ser convenientemente testadas e gravadas na memória do seu controlador (ver Cap.5.2.2.4).

O nível exigido pela legislação de emissão de poluentes, por exemplo, obriga a que as condições de funcionamento do motor durante toda a sua vida sejam desprovidas de problemas. Obviamente que, para se chegar a este nível de confiança, foi necessário testar inúmeros motores (praticamente até à sua destruição), de modo a isolar e resolver potenciais dificuldades. Mas, mesmo antes de um motor estar projetado, é necessário testar soluções novas, sendo que a maioria das quais nunca serão usadas.

tempo), multiplicado pela inércia do dinamómetro, dá-nos o binário debitado pelo motor (subtraído do binário absorvido pelo dinamómetro, quando for caso disso)

$$\omega = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{B - C}{I}$$

na qual ω – aceleração angular (rad/s^2);
θ – ângulo da cambota (rad);
t – tempo (s);
B – binário do motor (N·m);
C – carga (binário) de travagem do dinamómetro (N·m);
I – inércia do dinamómetro (kg·m^2).

Este tipo de dinamómetro consiste simplesmente em massas (cilindros de inércia) que são obrigadas a rodar pelo motor. O motor pode estar diretamente acoplado ao dinamómetro (Fig.11.3) ou o veículo pode colocar a(s) roda(s) motriz(es) diretamente sobre o(s) cilindro(s) de inércia (Fig.11.4). Neste caso, estamos a medir a inércia não só do(s) cilindro(s) mas também do sistema de transmissão e das rodas. De notar que o próprio motor tem inércia (cambota, bielas, pistões, distribuição, embraiagem, etc.), pelo que uma medição "dinâmica" resulta em valores mais baixos de binário que uma medição "estática" e, quanto mais baixas forem as massas de inércia (ou mais baixa a relação da caixa de velocidades), maior será essa diferença, pois parte do binário produzido foi usado para vencer as inércias do próprio motor. Este tipo de dinamómetro poderá também ter "travagem", fornecida por um dinamómetro provido de freio.

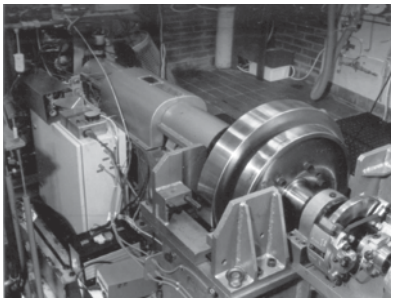


Fig.11.3 – Dinamómetro com discos de inércia para testes de aceleração

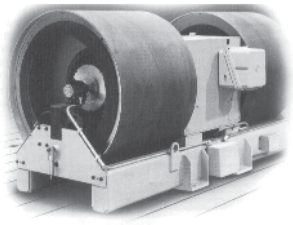


Fig.11.4 – Banco de rolos (de inércia)

Este facto ajuda a compreender a razão pela qual dois motores de igual binário (um a gasolina e outro Diesel, com mais massa interna) resultam em acelerações diferentes quando instalados no mesmo veículo. A inércia própria do motor pode ser avaliada por uma aceleração brusca sem carga resistente; o motor com mais inércia interna demora mais tempo a subir de rotação.

Os dinamómetros de inércia são vantajosos por serem fáceis de usar, por não necessitarem de controlo e por não exigirem arrefecimento. Proporcionam resultados rapidamente (curva de binário e potência em apenas alguns segundos), mas não podem ser usados para "mapear" o motor (escolher e gravar os dados de injeção e ignição no ECU), medir consumos ou noutros tipos de testes, exceto no caso em que também disponham de dinamómetro de "travagem" (caso

Jorge Martins

Motores de Combustão Interna

SEXTA EDIÇÃO, REVISTA E AUMENTADA

Sobre a obra

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, nomeadamente vários tipos de combustíveis alternativos ao gasóleo e gasolina, 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 de corridas de arranque (*dragsters*).

Atualmente, assiste-se a uma grande evolução nos motores, da qual os sistemas de injeção direta (nos motores 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 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 EastKilbride, 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 três centenas 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, tais 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 quatro 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 mais dois livros publicados: *Carros Elétricos* e *Acidentes e Conflitos em Veículos Automóveis e sua Avaliação*.

ISBN: 978-989-892-784-2

9 789898 927842

www.engebook.pt

engebook