

Guilherme Bastos Machado

**Metodologias para Desenvolvimento de Combustíveis e
Determinação da Velocidade de Propagação de
Chama em Motores de Ignição por Centelha**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como
requisito parcial para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Sergio Leal Braga
Coorientador: Carlos Valois Maciel Braga
Coorientador: José Eduardo Mautone Barros

Rio de Janeiro
Junho de 2012

Guilherme Bastos Machado

**Metodologias para Desenvolvimento de Combustíveis e
Determinação da Velocidade de Propagação de
Chama em Motores de Ignição por Centelha**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eduardo Mautone Barros

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Albino José Kalab Leiroz

Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ

Prof. Ramon Molina Valle

Departamento de Engenharia Mecânica – UFMG

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de junho de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Guilherme Bastos Machado

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense, em 1995. De 1996 a 1997 atuou na área de comissionamento de oleodutos e gasodutos pela empresa Halliburton. Desde 1997 atua na área de desenvolvimento de motores e combustíveis. De 1997 até 2001 trabalhou na engenharia de motores da Fiat Automóveis. Em 2001 ingressou na Petrobras, onde atua na gerência de Desempenho de Produtos em Motores do CENPES, coordenando projetos com foco no desenvolvimento de combustíveis para o segmento automotivo. Obteve o título de mestre em Engenharia Mecânica pela UFRJ em 2005, na área de termociências, com ênfase na vaporização de combustíveis.

Ficha Catalográfica

Machado, Guilherme Bastos

Metodologias para o desenvolvimento de combustíveis e determinação da velocidade de propagação de chama em motores de ignição por centelha / Guilherme Bastos Machado ; orientador: Sérgio Leal Braga ; coorientadores: Carlos Valois Maciel Braga, José Eduardo Mautone Barros. – 2012.

297 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Gasolina. 3. Etanol. 4. Formulação reduzida. 5. Motor de combustão interna. 6. Ignição por centelha. 7. Combustão. 8. Modelagem. 9. Velocidade de chama. I. Braga, Sérgio Leal. II. Braga, Carlos Valois Maciel. III. Barros, José Eduardo Mautone. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho à minha mulher Ana Líbia, meus filhos Felipe e Carolina e à
memória do meu pai, Ricardo.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador José Eduardo Mautone Barros pela amizade, ensinamentos e orientação sempre presente, nas inúmeras trocas de correios e telefonemas, que superaram a distância física. Pela recepção e atenção durante as visitas a UFMG e pelas bases lançadas nas suas pesquisas, que permitiram a elaboração deste trabalho. Agradeço também à sua mulher Delba e filho Otávio pela amizade.

Aos meus orientadores Sérgio Leal Braga e Carlos Valois Maciel Braga pela amizade, orientação, senso prático e trabalhos de revisão, fundamentais nos períodos de obtenção dos créditos, na qualificação e durante a elaboração da Tese.

Agradeço especialmente à minha mulher Ana Líbia e meus filhos Felipe e Carolina por toda compreensão, apoio e, por vezes, privações a que se submeteram neste período. À minha mãe Léa pela presença e carinho e ao meu pai Ricardo pelos ensinamentos e exemplos, que permanecem vivos em seus filhos.

À Petrobras / CENPES, meu gerente-geral, Alípio Ferreira Pinto Junior e, em especial, meu gerente na Desempenho de Produtos em Motores, Décio Magioli Maia, pela oportunidade, confiança e apoio constantes durante todo o período do Doutorado. Ao ex-coordenador do Laboratório de Ensaios em Motores, agora coordenador do Programa de Inovação em Combustíveis do CENPES (INOVA), Carlos Vinicius Costa Massa, e ao atual coordenador do Laboratório de Ensaios em Motores do CENPES, Tadeu Cavalcante Cordeiro de Melo, pela estrutura disponibilizada, compreensão e apoio para realização dos experimentos e análises deste trabalho.

À Professora Verônica Maria de Araújo Calado e ao amigo e colega da Petrobras, Antônio Henrique M. da Fonseca T. da Silva, pela disponibilidade para troca de ideias e orientações nas análises estatísticas realizadas neste trabalho.

À engenheira Ellen Cristina Zalona de Azevedo, ex-estagiária na gerência Desempenho de Produtos em Motores do CENPES, pela ajuda no tratamento dos extensos dados experimentais e materialização de análises realizadas ao longo do trabalho.

Ao técnico da Petrobras e amigo Ronaldo Aguiar pela grande ajuda no desenho da geometria da câmara de combustão do motor e no mapeamento detalhado dos dados de evolução da frente de chama esférica para diversas posições do pistão.

Aos engenheiros, colegas de trabalho, Leonardo de Oliveira Carvalho, Airton Giongo e Edimilson Jesus de Oliveira, pelo apoio na realização dos ensaios experimentais e no levantamento das propriedades dos combustíveis utilizados.

Aos técnicos da gerência Desempenho de Produtos em Motores do CENPES, em especial Emir dos Santos Junior, Jorge Luiz de Carvalho Silva, José Roberto de Souza Rocha, Ana Paula do Carmo Figueiredo, Manuel dos Santos, Romeu César de Carvalho, Vinicius Guarabyra da Costa e ao engenheiro Marcos Fernando Mendes de Brito, pelos trabalhos de montagem do banco de provas, calibração da instrumentação, preparação e análise dos combustíveis, limpeza de linhas de combustível, entre outras atividades que suportaram os ensaios experimentais.

À Biblioteca da Petrobras / CENPES, em especial à técnica Maria Madalena de Barros Nascimento, pela ajuda no trabalho de revisão bibliográfica.

Aos amigos da PUC-Rio, Julio César Cuisano Egúsqiza, Allan Nogueira de Albuquerque e Igor Lins e Silva, pelo suporte bibliográfico, troca de ideias e ajuda com programas computacionais específicos durante as fases de obtenção de créditos e elaboração da tese.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus professores, pelos ensinamentos e ao Instituto Tecnológico, ITUC/PUC-Rio, seu diretor Sérgio Leal Braga e seus técnicos, pela infraestrutura disponibilizada durante todo o curso.

Resumo

Machado, Guilherme Bastos; Braga, Sergio Leal; Braga, Carlos Valois Maciel; Barros, José Eduardo Mautone. **Metodologias para desenvolvimento de combustíveis e determinação da velocidade de propagação de chama em motores de ignição por centelha**. Rio de Janeiro, 2012. 297p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As projeções para as próximas décadas indicam que os combustíveis tradicionais, derivados do petróleo, associados à utilização de biocombustíveis nos motores de combustão interna continuarão sendo a principal fonte de propulsão dos veículos. Isto justifica as intensas pesquisas por todo o Mundo, para atender aos desafios de aumento de eficiência e redução de emissões de poluentes. As modelagens dos combustíveis comerciais, que possuem centenas de componentes, e dos processos de combustão em motor são, hoje, desafios reais. Também carecem estudos sistemáticos para compreender melhor como os diferentes componentes de combustíveis interagem em mistura e influenciam os parâmetros de combustão e desempenho nos motores. No presente trabalho, realizaram-se seleção de componentes e ensaios experimentais em motor comercial para identificar formulações reduzidas representativas de gasolinas comerciais brasileiras. Concluiu-se que formulações compostas de n-heptano, iso-octano, tolueno e etanol podem ser utilizadas para modelagem de gasolinas oxigenadas. Implementaram-se metodologias para avaliar a influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis e parâmetros de combustão e desempenho do motor, identificando os potenciais de cada componente e seus grupos químicos. Com dados experimentais de pressão no cilindro desenvolveu-se modelagem para se calcular a velocidade de propagação de chama no motor, bem como foram obtidas relações para calculá-la a partir da velocidade de chama laminar do combustível na condição padrão. Estas relações possuem como parâmetros de entrada o Reynolds de admissão, pressão e temperatura dos gases não queimados na câmara de combustão. Os resultados reúnem informações e metodologias que poderão ser usadas em várias etapas do processo de desenvolvimento de combustíveis para diferentes aplicações.

Palavras-chave

Gasolina; Etanol; Formulação reduzida; Motor de combustão interna; Ignição por centelha; Combustão; Modelagem; Velocidade de chama.

Abstract

Machado, Guilherme Bastos; Braga, Sergio Leal (Advisor); Braga, Carlos Valois Maciel (Coadvisor); Barros, José Eduardo Mautone (Coadvisor). **Methodologies for fuel development and determination of flame propagation velocity in spark ignition engines.** Rio de Janeiro, 2012. 297p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

For the next decades it is expected that the fossil fuels and bio-fuels usage in internal combustion engines remains to be the main source for vehicular propulsion. This justifies the intense worldwide research and development to comply with the challenges of increasing efficiency and emissions reduction. The modeling of commercial fuels and engine combustion processes presents great challenges. There is also the need to better understand how different fuel components interact and influence engine combustion and performance parameters. In the present work, components selection and engine dynamometer tests were done to identify representative surrogate fuels for commercial Brazilian gasoline. It was concluded that formulations of n-heptane, iso-octane, toluene and ethanol can be used to model oxygenated gasolines. Methodologies were implemented to evaluate the influence of the fuel components on fuel properties and several engine combustion and performance parameters. The potentials of each component and corresponding chemical group were identified. Using in cylinder pressure measurements it was developed a methodology to calculate flame propagation velocity in a commercial engine. Further, mathematical modeling was developed to calculate this combustion parameter, based on fuel laminar flame velocity at standard condition. The relations were designed considering the intake Reynolds number, temperature and pressure of the unburned gases inside the cylinder. The results put together informations and methodologies that can be used in several steps of the fuel development process for different applications.

Keywords

Gasoline; Ethanol; Surrogate fuel; Internal combustion engine; Spark ignition; Combustion; Modeling; Flame velocity.

Sumário

1 Introdução	34
1.1. Motivação.....	38
1.2. Estrutura do trabalho.....	38
2 Revisão Bibliográfica.....	40
2.1. Gasolinas e formulações reduzidas	40
2.1.1. Componentes de gasolinas.....	40
2.1.2. Gasolinas comerciais nacionais.....	42
2.1.3. Formulações reduzidas.....	43
2.2. Simulação de motores de combustão interna	47
2.2.1. Modelos de motores	47
2.2.2. Modelos de combustão	54
2.2.2.1. Taxa de queima definida	56
2.2.2.2. Velocidade de propagação de chama	58
2.3. Velocidades de chama.....	61
2.3.1. Velocidades de chama laminares	62
2.3.2. Velocidades de chama turbulentas	74
2.4. Comentários.....	86
3 Objetivos	88
4 Metodologias	90
4.1. Seleção dos componentes e das formulações reduzidas	90
4.1.1. Propriedades das formulações reduzidas	93
4.2. Preparação dos ensaios experimentais	94
4.2.1. Motor utilizado.....	94
4.2.1.1. Central eletrônica do motor.....	95
4.2.2. Banco de provas	96
4.2.2.1. Estrutura geral do banco de provas.....	96
4.2.2.2. Instrumentação para análise de combustão	97

4.2.2.3. Instrumentação para análise de emissões de escapamento	99
4.2.2.4. Características técnicas da instrumentação utilizada ...	100
4.2.3. Preparação dos combustíveis de teste	102
4.3. Metodologia de execução dos ensaios experimentais em motor	102
4.3.1. Condições operacionais do motor	103
4.3.2. Ajuste da mistura ar-combustível	104
4.3.3. Temperaturas	104
4.3.4. Calibração do avanço de ignição, ponto de injeção de combustível e aquisição dos dados	105
4.4. Redução dos dados experimentais dos parâmetros de desempenho do motor	107
4.4.1. Eficiência global	107
4.4.2. Eficiência volumétrica	108
4.4.3. Emissões de escapamento	109
4.5. Incertezas de medição dos ensaios experimentais	111
4.6. Cálculo dos parâmetros de combustão	112
4.6.1. Pressão média efetiva indicada (<i>IMEP</i>)	114
4.6.2. Coeficiente de variação percentual da pressão média efetiva indicada ($COV\%_{IMEP}$)	114
4.6.3. Pressão média efetiva de bombeamento (<i>PMEP</i>)	115
4.6.4. Pressão média efetiva de fricção (<i>FMEP</i>)	115
4.6.5. Eficiência de combustão	116
4.6.6. Eficiência térmica	118
4.6.7. Eficiência mecânica	119
4.6.8. Retardo de ignição	119
4.6.9. Duração da combustão	121
4.6.10. Pressão média de combustão	121
4.6.11. Temperatura média de combustão	122
4.6.12. Temperatura média dos gases não queimados durante a combustão	122
4.6.13. Ângulo de desenvolvimento de chama	122

4.6.14. Ângulo de queima rápida	123
4.6.15. Fração de massa queimada.....	123
4.6.16. Parâmetros de Wiebe	124
4.7. Determinação do coeficiente politrópico	125
4.8. Metodologia de determinação das velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro.....	128
4.8.1. Procedimento de cálculo.....	128
4.8.1.1. Cálculo do volume instantâneo e sua derivada com o ângulo de virabrequim	129
4.8.1.2. Taxa de liberação de calor.....	129
4.8.1.3. Fração de massa queimada	130
4.8.1.4. Cálculo do volume dos gases queimados	130
4.8.1.5. Cálculo da temperatura dos gases queimados.....	130
4.8.1.6. Cálculo da temperatura média dos gases no cilindro ...	131
4.8.1.7. Cálculo da temperatura dos gases não queimados.....	131
4.8.1.8. Cálculo do volume dos gases não queimados.....	132
4.8.1.9. Identificação do raio de chama	133
4.8.1.10. Cálculo da velocidade de propagação de chama	138
4.8.2. Considerações sobre a metodologia utilizada para determinação das velocidades de propagação de chama no interior do cilindro.....	138
4.9. Metodologia de determinação das relações de redução da velocidade de propagação de chama no interior do cilindro para a velocidade laminar do combustível na condição padrão.....	142
4.9.1. Desenvolvimento das relações de redução	142
4.9.2. Cálculo das velocidades laminares dos combustíveis de teste	144
4.9.3. Metodologia de identificação dos expoentes de dependência	146
4.10. Técnicas estatísticas utilizadas na análise dos resultados.....	150
4.10.1. Análises de Normalidade e Homoscedasticidade	150

4.10.2. Técnicas utilizadas para comparações de conjuntos de dados e análises das influências dos componentes nas variáveis de interesse	153
4.10.2.1. Técnicas utilizadas para comparações de conjuntos de dados.....	153
4.10.2.2. Técnicas utilizadas para análises das influências dos componentes nas variáveis de interesse	153
5 Resultados dos ensaios experimentais em banco de provas de motor e identificação de formulações reduzidas representativas de gasolinas comerciais oxigenadas.....	157
6 Análise dos resultados de influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis e parâmetros de desempenho do motor	164
6.1. Influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis	164
6.2. Influência dos componentes nos parâmetros de desempenho do motor	169
6.2.1. Torque de eixo	170
6.2.2. Consumo de combustível.....	173
6.2.3. Consumo específico de combustível	174
6.2.4. Eficiência global do motor	176
6.2.5. Eficiência volumétrica	178
6.2.6. Estabilidade de combustão	180
6.2.7. Emissões	182
6.2.7.1. Emissões de CO ₂	182
6.2.7.2. Emissões de CO	184
6.2.7.3. Emissões de HC	186
6.2.7.4. Emissões específicas em g/kWh	188
6.3. Comentários.....	191
7 Análise dos resultados de influência dos componentes nos parâmetros de combustão do motor.....	195

7.1. Curvas típicas características do processo de combustão no motor.....	195
7.2. Influência dos teores dos componentes nos parâmetros de combustão.....	199
7.2.1. Pressão média efetiva indicada (<i>IMEP</i>)	199
7.2.2. Pressão média efetiva de bombeamento (<i>PMEP</i>)	200
7.2.3. Pressão média efetiva de atrito (<i>FMEP</i>)	201
7.2.4. Eficiências.....	203
7.2.4.1. Eficiência de combustão.....	203
7.2.4.2. Eficiência térmica.....	205
7.2.4.3. Eficiência mecânica	208
7.2.5. Retardo de ignição.....	210
7.2.6. Parâmetros de Wiebe e durações de queima.....	212
7.3. Comentários.....	217
 8 Resultados das velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor.....	 219
8.1. Curvas típicas características da evolução do raio de chama e velocidades instantâneas de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor.....	219
8.2. Resultados das velocidades de propagação de chama turbulentas para os diferentes combustíveis e condições operacionais.....	223
8.3. Influência dos componentes nas velocidades de propagação de chama turbulentas no interior do cilindro do motor	225
 9 Relações para redução das velocidades de propagação de chama turbulentas no motor em velocidades de chama laminares dos combustíveis	 231
9.1. Relações de redução	231
9.2. Influência dos componentes nas velocidades de propagação de chama reconstruídas e avaliação de sinergias entre os componentes.....	239

10 Conclusões e Sugestões.....	244
10.1. Formulações reduzidas representativas de gasolinas comerciais oxigenadas.....	244
10.2. Influência de componentes de gasolina nos parâmetros de desempenho e combustão do motor.....	245
10.2.1. Comentários gerais e consolidação da influência dos componentes nos parâmetros de desempenho e combustão do motor.....	249
10.3. Velocidades de propagação de chama no motor	251
10.4. Critérios para conversão das velocidades de chama laminares dos combustíveis em velocidades de propagação de chama turbulentas no motor	253
10.5. Sugestões	255
Referências Bibliográficas	257
Apêndice I – Procedimento de cálculo da pressão parcial de vapor de água no ambiente.....	277
Apêndice II – Exemplo da metodologia de cálculo de propagação das incertezas do tipo B	278
Apêndice III – Modelagem de uma zona para um cilindro de motor a pistão.....	280
Apêndice IV – Procedimento de cálculo dos parâmetros da lei de Wiebe	287
Apêndice V – Tabela de resultados e incertezas de medição dos ensaios experimentais em motor.....	289

Listas de figuras e tabelas

Figuras

Figura 1.1 - Projeção da participação das vendas de veículos de passageiros por tecnologia de motor (<i>World Energy Outlook</i> 2009, IEA, 2009)	36
Figura 1.2 - Projeção do consumo energético mundial por combustível e setor no cenário de referência (<i>World Energy Outlook</i> 2009, IEA, 2009)	37
Figura 1.3 - Densidade energética de baterias e combustíveis (<i>Energy Technology Perspectives</i> 2008, IEA, 2008)	37
Figura 2.1 - Faixa aproximada de parafinas, naftenos, olefinas e aromáticos em gasolinas comerciais norte-americanas (Pitz et al., 2007)	41
Figura 2.2 - Estruturas representativas das diferentes classes moleculares encontradas em gasolinas comerciais (Pitz et al., 2007)	42
Figura 2.3 - Modelos aplicáveis à simulação de motores de combustão interna (Barros, 2003)	54
Figura 2.4 - Esquema representativo da velocidade de propagação de chama	58
Figura 2.5 - Velocidades de chama laminares do n-heptano em ar (pressão atmosférica, 298 K) (Van Lipzig et al., 2011)	73
Figura 2.6 - Velocidades de chama laminares do n-heptano, iso-octano e sua mistura binária (50% v/v) em ar (pressão atmosférica, 298 K) (Van Lipzig et al., 2011)	74
Figura 2.7 - Regimes de chamas turbulentas (Turns, 2000)	76
Figura 4.1 - Formulações reduzidas selecionadas (concentrações em % v/v normalizadas excluindo os 25% de Etanol)	92
Figura 4.2 - Motor <i>Fiat Fire Tetrafuel</i> no banco de provas	95
Figura 4.3 - Central eletrônica programável, <i>MoTeC m800</i>	96
Figura 4.4 - Diagrama esquemático do sistema para análise da pressão no interior do cilindro (AVL, 2002)	98
Figura 4.5 - Ciclo com evento de detonação fraca da formulação I a 3875 rpm em plena carga	99
Figura 4.6 - Pesquisa de avanço de <i>MBT</i> da formulação B a 2250 rpm em plena carga	106
Figura 4.7 - Comparação da curva de pressão média com uma das	

curvas originais do combustível de referência a 2250 rpm em plena carga	113
Figura 4.8 - Mecanismo biela-manivela.....	118
Figura 4.9 - Curva típica da taxa de liberação de calor exemplificada pela formulação E a 2250 rpm em plena carga.....	120
Figura 4.10 - Fração de massa queimada versus ângulo do virabrequim da formulação E a 2250 rpm em plena carga.....	124
Figura 4.11 - Curva de pressão da formulação E a 2250 rpm em plena carga.....	126
Figura 4.12 - Diagrama PV da formulação E a 2250 rpm em plena carga	126
Figura 4.13 - Diagrama PV logaritmo da formulação E a 2250 rpm em plena carga.....	127
Figura 4.14 - Modelagem de duas zonas e propagação de frente de chama esférica para cálculo da velocidade de propagação de chama	129
Figura 4.15 - Modelagem 3D da câmara de combustão do motor <i>Fiat Fire Tetrafuel</i> - Posição do pistão: 43 mm em relação ao PMS	134
Figura 4.16 - Plano da vela utilizado para definir os raios de interesse para coleta de dados do modelo de propagação de chama 3D - Posição do pistão: 5 mm em relação ao PMS	134
Figura 4.17 - Modelagem da propagação da frente de chama esférica na câmara de combustão - Posição do pistão: 43 mm em relação ao PMS.....	135
Figura 4.18 - Volume queimado versus raio de chama adimensional para várias posições do pistão	136
Figura 4.19 - Área de chama versus raio de chama adimensional para várias posições do pistão	137
Figura 4.20 - Raio de chama versus ângulo do virabrequim da formulação C a 5500 rpm em plena carga	137
Figura 4.21 - Exemplo de propagação de frente de chama na altura da junta do cabeçote em motor a gasolina, obtida por tomografia (Winklhofer, 2007)	140
Figura 4.22 - Exemplo de propagação de frente de chama esférica obtida por técnica de <i>laser shadowgraph</i> em motor monocilíndrico de cabeçote transparente (Heywood, 1988).....	140
Figura 4.23 - Exemplo de caracterização do expoente de dependência do Reynolds de admissão, formulação C em plena carga	147
Figura 4.24 - Velocidade de propagação de chama instantânea reduzida no intervalo de 10 a 90% de fração de massa queimada, formulação B em carga parcial.....	149

Figura 4.25 - Exemplo de gráfico para análise da normalidade dos resíduos (formulação D e combustível de referência a 1500 rpm em carga parcial).....	150
Figura 4.26 - Exemplo de histograma dos resíduos com testes de normalidade (formulação D e combustível de referência a 1500 rpm em carga parcial).....	151
Figura 4.27 - Exemplo de gráfico de distribuição dos resíduos para análise de homoscedasticidade (formulação D e combustível de referência a 1500 rpm em carga parcial).....	152
Figura 4.28 - Exemplo de aplicação da técnica de Planejamento e Análise de Misturas, ilustrando forma de leitura no gráfico para análise da influência dos componentes nas variáveis de interesse - Massa específica das formulações	154
Figuras 5.1(a-f) - Torque, diferença percentual das formulações reduzidas em relação ao combustível de referência, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 2250 rpm em plena carga (exceto formulação F); (d) – 3875 rpm em carga parcial; (e) – 2250 rpm em carga parcial; (f) – 1500 rpm em carga parcial.....	158
Figuras 5.2(a-f) - Consumo de combustível, diferença percentual das formulações reduzidas em relação ao combustível de referência, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 2250 rpm em plena carga (exceto formulação F); (d) – 3875 rpm em carga parcial; (e) – 2250 rpm em carga parcial; (f) – 1500 rpm em carga parcial.....	159
Figuras 5.3(a-f) - Consumo específico de combustível, diferença percentual das formulações reduzidas em relação ao combustível de referência, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 2250 rpm em plena carga (exceto formulação F); (d) – 3875 rpm em carga parcial; (e) – 2250 rpm em carga parcial; (f) – 1500 rpm em carga parcial	160
Figuras 6.1(a-f) - Propriedades dos combustíveis, (a) – Índice antidetonante (IAD); (b) – Poder calorífico inferior (PCI); (c) – Relação ar-combustível estequiométrica; (d) – Massa específica; (e) – T ₅₀ ; (f) – Entalpia de vaporização (H _{vap}).....	165
Figura 6.2 - Poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico	166
Figura 6.3 - Entalpia de vaporização por kg de ar estequiométrico.....	167
Figuras 6.4(a-e) - Relações molares, (a) – Relação H/C molar; (b) – Relação O/C molar; (c) – Fração molar de carbono; (d) – Fração molar de hidrogênio; (e) – Fração molar de oxigênio	168
Figuras 6.5(a-d) - Torque do motor, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	170
Figuras 6.6(a-d) - Avanço de ignição, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial	171

Figuras 6.7(a-b) - Consumo de combustível, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 2250 rpm em carga parcial.....	173
Figuras 6.8(a-d) - Consumo específico de combustível, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	174
Figuras 6.9(a-b) - Consumo específico de combustível, (a) – 2250 rpm em carga parcial; (b) – 3875 rpm em carga parcial.....	175
Figuras 6.10(a-d) - Eficiência global do motor, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	177
Figura 6.11 - Eficiência global do motor, 2250 rpm em carga parcial.....	177
Figuras 6.12(a-c) - Eficiência volumétrica, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga; (c) – 1500 rpm em carga parcial.....	179
Figuras 6.13(a-d) - Estabilidade de combustão, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	181
Figuras 6.14(a-f) - Emissões de CO ₂ , (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial; (e) – 2250 rpm em carga parcial; (f) – 3875 rpm em carga parcial.....	183
Figuras 6.15(a-e) - Emissões de CO, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 2250 rpm em carga parcial; (e) – 3875 rpm em carga parcial.....	185
Figuras 6.16(a-d) - Emissões de HC, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga; (c) – 1500 rpm em carga parcial; (d) – 3875 rpm em carga parcial.....	186
Figura 6.17 - Emissões de CO ₂ em g/kWh a 3875 rpm, plena carga	189
Figura 6.18 - Emissões de CO ₂ em g/kWh a 2250 rpm, carga parcial ...	189
Figura 6.19 - Emissões de CO em g/kWh a 3875 rpm, plena carga	190
Figura 6.20 - Emissões de CO em g/kWh a 2250 rpm, carga parcial.....	190
Figuras 6.21(a-b) - Emissões de HC em g/kWh, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em carga parcial.....	191
Figura 7.1 - Curvas de pressão das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga.....	196
Figura 7.2 - Diagramas PV das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga.....	196
Figura 7.3 - Diagramas PV logaritmos das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga	197
Figura 7.4 - Taxa de liberação de calor aparente das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga.....	197

Figura 7.5 - Fração de massa queimada das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga	198
Figura 7.6 - Temperaturas dos gases queimados (T_b), não queimados (T_{ub}) e média (T_m) das formulações B e I a 3875 rpm em plena carga.....	198
Figuras 7.7(a-d) - <i>IMEP</i> , (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	200
Figuras 7.8(a-d) - <i>FMEP</i> , (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	201
Figuras 7.9(a-d) - Pressão média de combustão, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	202
Figuras 7.10(a-d) - Eficiência de combustão, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	204
Figura 7.11- Eficiência de combustão a 2250 rpm em carga parcial.....	205
Figuras 7.12(a-d) - Eficiência térmica, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial	206
Figura 7.13 - Energia admitida por ciclo a 5500 rpm em plena carga	207
Figura 7.14 - Energia aparente por ciclo a 5500 rpm em plena carga....	208
Figuras 7.15(a-d) - Eficiência mecânica, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial	209
Figuras 7.16(a-b) - Retardo de ignição, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 1500 rpm em carga parcial	210
Figuras 7.17(a-b) - Temperatura de ignição, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 1500 rpm em carga parcial.....	211
Figuras 7.18(a-b) - Retardo de ignição, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga	211
Figuras 7.19(a-b) - Temperatura de ignição, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga.....	212
Figuras 7.20(a-d) - Parâmetro m de Wiebe, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial	213
Figuras 7.21(a-d) - Duração de combustão, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial	214
Figuras 7.22(a-b) - Parâmetro a de Wiebe, (a) 3875 rpm em plena carga; (b) – 1500 rpm em carga parcial	215

Figuras 7.23(a-d) - Ângulo de queima rápida (10 a 90% de X_b), (a) 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.....	216
Figura 8.1 - Evolução do raio de chama, formulações J e D a 2250 rpm em plena carga	220
Figura 8.2 - Velocidade de propagação de chama instantânea, formulações J e D a 2250 rpm em plena carga.....	220
Figura 8.3 - Evolução do raio de chama, com detalhamento do <i>squish</i> , formulação D a 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga	222
Figuras 8.4(a-d) - Velocidades médias de propagação de chama (10 a 90% de X_b), (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 2250 rpm em carga parcial.....	226
Figuras 8.5(a-b) - Velocidades de chama laminares das formulações na condição padrão, (a) – $\phi = 1,00$; (b) – $\phi = 1,11$	228
Figuras 8.6(a-c) - Temperatura média dos gases não queimados durante a combustão (T_{mubc}), (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga.....	229
Figura 9.1 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação G a 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga.....	236
Figura 9.2 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação G a 1500, 2250 e 3875 rpm em carga parcial.....	236
Figura 9.3 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação A em 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga.....	237
Figura 9.4 - Velocidades reduzidas ao longo do intervalo angular adotado (10 a 90% de X_b), formulação A em 1500, 2250 e 3875 rpm em carga parcial.....	237
Figuras 9.5(a-b) - Velocidades médias de propagação de chama reconstruídas, (a) – Plena carga; (b) – Carga parcial.....	242
Figura AIII.1 - Esquema de modelagem uma zona para um cilindro de motor a pistão.....	280

Tabelas

Tabela 2.1 - Expoentes de dependência da velocidade de chama laminar com a temperatura e pressão (Kuo, 2005)	67
Tabela 4.1 - Detalhamento dos percentuais volumétricos das formulações.....	92

Tabela 4.2 - Propriedades das formulações.....	94
Tabela 4.3 - Características técnicas do motor <i>Fiat Fire Tetrafuel</i>	95
Tabela 4.4 - Características da instrumentação principal do banco de provas.....	101
Tabela 4.5 - Regimes operacionais do motor avaliados.....	103
Tabela 4.6 - Velocidades de chama laminares dos componentes na condição padrão.....	145
Tabela 4.7 - Velocidades de chama laminares das formulações na condição padrão.....	145
Tabela 5.1 - Igualdade estatística observada entre as formulações reduzidas e o combustível de referência.....	161
Tabela 8.1 - Velocidades médias de propagação de chama nas condições de plena carga, no intervalo de 10 a 90% de fração de massa queimada ($\bar{V}_{pch(10-90\%)}$)	224
Tabela 8.2 - Velocidades médias de propagação de chama nas condições de carga parcial, no intervalo de 10 a 90% de fração de massa queimada ($\bar{V}_{pch(10-90\%)}$)	224
Tabela 9.1 - Expoentes das relações de redução encontrados para Reynolds e pressão com as diferentes formulações em plena carga e carga parcial.....	233
Tabela 9.2 - Velocidades de propagação de chama reduzidas médias (10 a 90% de X_b) com as diferentes formulações em plena carga e carga parcial ($\bar{V}_{pchr(10-90\%)}$).....	234
Tabela 9.3 - Parâmetros de entrada para cálculo das velocidades médias de propagação de chama reconstruídas para o intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada, em plena carga e carga parcial.....	241
Tabela 9.4 - Velocidades médias de propagação de chama reconstruídas e calculadas a partir dos dados experimentais (10 a 90% de X_b)	241
Tabela A1.1 - Coeficientes da fórmula de <i>Antoine</i> para a água	277
Tabela AV.1 - Tabela de resultados e incertezas de medição dos ensaios experimentais em motor.....	289

Nomenclatura

a	Parâmetro da lei de Wiebe.
A_{ch}	Área da frente de chama.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
A/C	Relativo à razão ar-combustível mássica.
AD	Área transversal do cilindro.
Adm.	Abreviação para admitida.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
APMS	Antes do ponto morto superior.
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> ; Sociedade Americana de Testes e Materiais.
Av.	Abreviação para avanço (de ignição).
AVL	Empresa austríaca fornecedora de equipamentos, <i>softwares</i> e serviços no segmento de desenvolvimento de motores e veículos.
BMEP	<i>Break Mean Effective Pressure</i> ; Pressão média efetiva de freio.
BOOST	Programa computacional de simulação 1D de motores, da AVL.
c_p	Calor específico à pressão constante.
c_v	Calor específico à volume constante.
C	Relativo ao carbono.
C.	Abreviação para Carga (em Carga parcial).
CAD	<i>Computer-Aided Drawing</i> .
CARE	<i>Cycle Analysis for Reciprocating Engines</i> - Análise de Ciclo para Motores Alternativos (programa de simulação de motores).
CE	Consumo específico.
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras.

<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> ; Fluidodinâmica computacional.
<i>CFR</i>	<i>Cooperative Fuel Research Engine</i> ou <i>Code of Federal Regulations</i> (EUA).
<i>Chemkin</i>	Programa computacional de simulação de cinética química, da <i>Reaction Design</i> .
CO	Monóxido de carbono.
CO ₂	Dióxido de Carbono.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
$COV\%_{IMEP}$	Coefficiente de variação percentual da pressão média efetiva indicada (razão entre o desvio padrão e a média).
d	Notação de diferencial (derivada).
∂	Notação de diferencial (derivada parcial).
D	Diâmetro do cilindro do motor.
D_p	Diâmetro do pistão.
Da	Número de Damköhler.
DC	Abreviação para Duração de Combustão.
Dur.	Abreviação para Duração (em Duração de combustão).
e	Energia total (Apêndice III).
E	Etanol anidro.
E_i	Emissões específicas onde i é o poluente.
<i>ECU</i>	<i>Electronic Control Unity</i> ; Central eletrônica de controle do motor.
Ef.	Abreviação para eficiência.
Esp.	Abreviação para específico (consumo específico).
est.	Abreviação para estequiométrica.
EUA	Estados Unidos da América.
F_T	Fator de turbulência - razão entre a velocidade de queima turbulenta e a velocidade de chama laminar.
<i>FIAT</i>	<i>Fabbrica Italiana di Automobile Torino</i> ; Fábrica Italiana de Automóveis de Turim.
<i>FIRE</i>	<i>Fully Integrated Robotized Engine</i> (relativo aos motores <i>FIAT</i> com processo produtivo integrado e robotizado) ou

programa computacional de simulação 3D de motores, da AVL.

FMEP *Friction Mean Effective Pressure*; Pressão média efetiva de fricção ou atrito.

FORTTRAN *Formula Translation* - Linguagem Científica de Programação.

g Aceleração da gravidade.

GCA *Gas Exchange and Combustion Analysis Software*; Programa computacional para análise das trocas gasosas e combustão em motor, da AVL.

GNV Gás Natural Veicular.

GTPOWER Programa computacional de simulação de motores, da *Gamma Technologies*.

h Entalpia (Apêndice III).

H Relativo ao hidrogênio ou ao etanol hidratado.

H_o Relativo à hipótese nula em estatística.

H_{vap} Entalpia de vaporização.

HC Hidrocarbonetos.

H/C Relação molar hidrogênio-carbono.

H PI Veículos Híbridos *Plug In*.

I_A Incerteza de medição do tipo A.

I_B Incerteza de medição do tipo B.

I_C Incerteza de medição combinada.

I_E Incerteza de medição expandida.

I_R Incerteza de medição relativa.

IAD Índice Antidetonante.

IEA *International Energy Agency*; Agência Internacional de Energia.

Ig. ou IGN. Abreviações para ignição.

IMEP *Indicated Mean Effective Pressure*; Pressão média efetiva indicada.

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

IO Iso-octano.

ISO	<i>International Standard Organization</i> ; Organização de Padronização Internacional.
JANNAF	<i>Joint Army Navy NASA Air Force Propulsion Organization</i> ; Organização Conjunta de Propulsão do Exército, Marinha, NASA e Aeronáutica (EUA).
k	Fator de abrangência na análise de incertezas de medição.
l_0	Escala integral (turbulência).
l_k	Escala de Kolmogorov (turbulência).
L_b	Distância entre centros da biela.
LDI	Limite de Detonação Inferior.
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i> ; Técnica de medição do perfil de velocidades em escoamentos, utilizando <i>laser</i> .
LES	<i>Large Eddy Simulation</i> ; Simulação de grandes escalas (modelo de turbulência).
\ln	Logaritmo neperiano.
\log	Logaritmo.
LSD	<i>Least Square Difference</i> ; Relativo ao método dos mínimos quadrados.
m	Parâmetro da lei de Wiebe ou massa.
\dot{m}	Vazão mássica.
M	Massa molecular.
MBT	<i>Minimum spark advance for Best Torque</i> ou <i>Maximum Break Torque</i> ; Menor avanço para o maior torque.
MCI	Motor ou Motores de Combustão Interna.
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> ; Instituto de Tecnologia de Massachusetts.
MON	<i>Motor Octane Number</i> ; Número de octano método motor.
MP	Material particulado.
MTBE	<i>Methyl Tertiary-Butyl Ether</i> ; Éter metil terciário-butílico.
n	Expoente do processo politrópico.
\vec{n}	Vetor unitário (Apêndice III).
n_R	Número de revoluções por ciclo do motor.
N	Velocidade rotacional do motor.

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> ; Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (EUA).
NBR	Norma Brasileira.
NH	N-heptano.
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> ; Instituto Nacional de Padronização e Tecnologia.
NO _x	Óxidos de nitrogênio.
O	Relativo ao oxigênio.
O/C	Relação molar oxigênio-carbono.
p	Variável referente ao nível de significância estatístico.
P	Pressão.
P_0	Pressão na condição de referência ou padrão.
P_{ig}	Pressão no interior do cilindro no momento da ignição.
P_{mc}	Pressão média no período de combustão.
P_{sat,H_2O}	Pressão de saturação do vapor de água.
P_{v,H_2O}	Pressão parcial do vapor de água no ambiente.
PCI	Poder calorífico inferior.
Pl.	Abreviação para Plena (em Plena carga).
PMEP	<i>Pumping Mean Effective Pressure</i> ; Pressão média efetiva de bombeamento.
PMI	Ponto morto inferior.
PMS	Ponto morto superior.
°PMS	Graus em relação ao PMS (relativo à ignição).
ppm	Partes por milhão (volumétrico).
PRF	<i>Primary reference fuels</i> ; Combustíveis de referência primários.
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Alcool.
Q	Calor.
Q_a	Calor aparente liberado pelo combustível.
Q_l	Calor trocado com as paredes do cilindro (Apêndice III).
r_{ch}	Raio de chama.
$r_{ch,ad}$	Raio de chama adimensional.
R	Constante de gas ideal.

R^2	Coeficiente de determinação - variável estatística referente à qualidade de ajuste do modelo matemático.
R_v	Raio do virabrequim (centro a centro).
Re	Número de Reynolds.
Re_{ad_r}	Número de Reynolds de admissão reduzido.
Re_{l_0}	Número de Reynolds de turbulência referente à escala integral.
RON	<i>Research Octane Number</i> ; Número de octano método pesquisa.
rpm	Rotações por minuto.
S_L	Velocidade de chama laminar do combustível.
S_{L_0}	Velocidade de chama laminar do combustível na condição de referência ou padrão.
S_p	Deslocamento do pistão em relação ao PMS.
S_T	Velocidade de queima turbulenta.
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> ; Sociedade dos Engenheiros Automotivos.
$S.C.$	Superfície de controle (Apêndice III).
<i>SOLIDWORKS</i>	Programa computacional de <i>CAD</i> , da <i>Dassault Systèmes</i> .
<i>STATISTICA</i>	Programa computacional para análise estatística de dados, da <i>Statsoft</i> .
t	Tempo.
t_{rig}	Tempo correspondente ao retardo de ignição.
T	Tolueno ou Temperatura.
T_0	Temperatura na condição de referência ou padrão.
T_b	Temperatura média instantânea dos gases queimados (<i>burned</i>).
T_m	Temperatura média instantânea dos gases no cilindro (queimados e não queimados).
$T_{m_{ig}}$	Temperatura média instantânea dos gases no cilindro no momento da ignição.
T_{mc}	Temperatura média dos gases no período de combustão (queimados e não queimados).

T_{mubc}	Temperatura média dos gases não queimados (<i>unburned</i>) no período combustão.
T_{ub}	Temperatura média instantânea dos gases não queimados (<i>unburned</i>).
T50% ou T50	Temperatura em que 50% do volume do combustível é evaporado.
Tab.	Abreviação para Tabelas.
TDC	<i>Top Dead Center</i> ; Ponto Morto Superior (PMS).
u	Energia interna (Apêndice III).
u'_{rms}	Média quadrática de flutuação da velocidade do escoamento.
USA	<i>United States of America</i> ; Estados Unidos da América (EUA).
UR	Umidade relativa.
v	Velocidade (Apêndice III).
\bar{v}_p	Velocidade média do pistão.
\vec{V} ou V	Velocidade (Apêndice III).
V_{pch}	Velocidade de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro.
$V_{pch(10-90\%)}$	Velocidade de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro no intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada.
$\bar{V}_{pch(10-90\%)}$	Velocidade média de propagação de chama turbulenta no interior do cilindro no intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada.
V_{pchcp}	Velocidade de propagação de chama turbulenta em carga parcial.
V_{pchplc}	Velocidade de propagação de chama turbulenta em plena carga.
V_{pchr}	Velocidade de propagação de chama reduzida (adimensional).

$V_{pchr(10-90\%)}$	Velocidade de propagação de chama reduzida no interior do cilindro no intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada (adimensional).
$\bar{V}_{pchr(10-90\%)}$	Velocidade de propagação de chama reduzida média no interior do cilindro no intervalo angular de 10 a 90% de fração de massa queimada (adimensional).
$V_{pchr_{cp}}$	Velocidade de propagação de chama reduzida em carga parcial (adimensional).
$V_{pchr_{plc}}$	Velocidade de propagação de chama reduzida em plena carga (adimensional).
Vap.	Abreviação para vaporização.
V. C.	Volume de controle (Apêndice III).
VE	Veículos Elétricos.
VECTIS	Programa computacional de simulação 3D de motores, da <i>Ricardo</i> .
Vels.	Abreviação para velocidades.
VH	Veículos Híbridos.
Vol.	Abreviação para Volumétrico(a).
v/v	Relativo à concentração em base volumétrica.
\forall	Volume instantâneo da câmara de combustão (volume fixo da câmara com o pistão no PMS mais o volume descoberto do cilindro).
\forall_b	Volume instantâneo dos gases queimados (<i>burned</i>).
$\forall_{b,ad}$	Volume instantâneo adimensional dos gases queimados (<i>burned</i>).
\forall_{cc}	Volume fixo da câmara de combustão com o pistão no PMS.
\forall_d	Volume deslocado por um cilindro por curso do pistão.
$\forall_{d,m}$	Volume deslocado pelo motor por ciclo (cilindrada do motor).
\forall_{ub}	Volume instantâneo dos gases não queimados (<i>unburned</i>).
$W_{c,i}$	Trabalho indicado de um cilindro por ciclo.
\dot{W}_{eixo}	Potência de eixo do motor.

W_s	Trabalho de superfície (Apêndice III).
W_μ	Trabalho de atrito (Apêndice III).
WAVE	Programa computacional de simulação 1D de motores, da <i>Ricardo</i> .
X_b	Fração de massa queimada (<i>burned</i>).
Y_b	Fração de volume queimado (<i>burned</i>).
z	Elevação (Apêndice III).

Subscritos

0	Relativo à condição de referência ou padrão ou relativo à escala integral de turbulência.
a	Relativo à aparente (líquido).
ad	Relativo à admissão ou à variável adimensional.
ar	Relativo ao ar.
atm	Relativo à condição atmosférica ou ambiente.
b	Relativo à mistura queimada (<i>burned</i>) ou à biela do motor.
c	Relativo ao ciclo motor ou ao período da combustão ou à combustão (eficiência).
ch	Relativo à chama.
cil	Relativo ao cilindro do motor.
$comb$	Relativo ao combustível.
cp	Relativo à carga parcial.
dch	Relativo ao desenvolvimento de chama.
esc	Relativo aos gases de escapamento.
est	Relativo à mistura estequiométrica.
fq	Relativo ao fim de queima.
g	Relativo a global (eficiência) ou relativo à gasolina.
i	Relativo à indicado (no cilindro, antes das perdas mecânicas) ou relativo ao poluente (emissões).
ig	Relativo à ignição.
ini	Relativo ao início da combustão (taxa de calor positiva).
k	Relativo à escala de Kolmogorov (turbulência).

L	Relativo à condição laminar.
m	Relativo à média ou ao motor ou à mecânica (eficiência).
p	Relativo ao pistão ou à condição de pressão constante.
pch	Relativo à propagação de chama.
plc	Relativo à plena carga.
qr	Relativo à queima rápida.
r	Relativo à variável reduzida.
rig	Relativo ao retardo de ignição.
rms	<i>Root mean square</i> ; Média quadrática.
sat	Relativo à condição de saturação.
sat, H_2O	Relativo à condição de saturação do vapor de água.
$seco$	Relativo à condição de ar seco.
t	Relativo à térmica (eficiência).
T	Relativo à condição turbulenta.
ub	Relativo à mistura não queimada (<i>unburned</i>).
v	Relativo ao virabrequim ou à volumétrica (eficiência).
v, H_2O	Relativo ao vapor de água.
v	Relativo a volume.
vap	Relativo à vaporização.
10%	Relativo a 10% de fração de massa queimada.
90%	Relativo a 90% de fração de massa queimada.
10 – 90%	Relativo ao intervalo entre 10 e 90% de fração de massa queimada.

Letras gragas

α	Expoente da temperatura na fórmula de correção da velocidade de chama laminar da condição de referência para outra condição termodinâmica ou variável estatística referente ao limite de aceitação do nível de significância.
β	Expoente da pressão na fórmula de correção da velocidade de chama laminar da condição de referência para outra condição termodinâmica.

γ	Razão de calores específicos.
δ	Incerteza, nas fórmulas de propagação das incertezas do tipo B de variáveis dependentes ou notação de diferencial inexata.
δ_L	Espessura de chama laminar.
$\Delta\theta_c$	Duração total da combustão.
$\Delta\theta_{dch}$	Intervalo angular correspondente ao desenvolvimento de chama.
$\Delta\theta_{qr}$	Intervalo angular correspondente à queima rápida.
$\Delta\theta_{rig}$	Intervalo angular correspondente ao retardo de ignição.
$\Delta\theta_{10-90\%}$	Intervalo angular entre 10 e 90% de fração de massa queimada.
η_c	Eficiência de combustão.
η_g	Eficiência global do motor.
η_m	Eficiência mecânica.
η_t	Eficiência térmica.
η_v	Eficiência volumétrica.
θ	Ângulo do virabrequim.
θ_{fq}	Ângulo do virabrequim correspondente ao fim de queima.
θ_{ig}	Ângulo do virabrequim correspondente à ignição (centelha).
θ_{ini}	Ângulo do virabrequim correspondente ao início da combustão (taxa de calor positiva).
$\theta_{10\%}$	Ângulo do virabrequim correspondente a 10% da fração de massa queimada.
$\theta_{90\%}$	Ângulo do virabrequim correspondente a 90% de fração de massa queimada.
λ	Lambda – razão ar-combustível real sobre a estequiométrica.
μ	Viscosidade absoluta ou dinâmica.
ξ	Expoente do Reynolds de admissão reduzido na fórmula de correção da velocidade de chama laminar da condição de referência para a velocidade de propagação de chama no motor.

ρ	Massa específica.
σ	Desvio padrão.
τ	Torque do motor.
ϕ	Razão de equivalência.
ω	Velocidade angular (Apêndice III).

Nota: Todas as variáveis e símbolos são identificados ao longo do texto. As variáveis e símbolos oriundos das referências bibliográficas consultadas foram, na maioria dos casos, mantidos no formato original e identificados somente ao longo do texto.