

**JEAN AMADEO BRAMBILA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE  
DESEMPENHO EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA  
OPERANDO COM ÓLEO DIESEL E ETANOL**

São Paulo  
2006

**JEAN AMADEO BRAMBILA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO TERMODINÂMICA DE  
DESEMPENHO EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA  
OPERANDO COM ÓLEO DIESEL E ETANOL**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Doutor  
Guenther Carlos Krieger Filho

São Paulo  
2006

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo,     de dezembro de 2006.**

**Assinatura do autor \_\_\_\_\_**

**Assinatura do orientador \_\_\_\_\_**

**Brambila, Jean Amadeo**

**Estudo experimental e simulação termodinâmica de desempenho em um motor de combustão interna operando com óleo diesel e etanol / J.A. Brambila. -- ed.rev. --São Paulo, 2006.**

**114 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Conservação de energia 2.Álcool como combustível 3.Combustíveis alternativos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Milena, a meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram desde o primeiro instante e todos os meus Professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores e amigos Guenther Carlos Krieger Filho e Mauricio Trielli, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o desenvolvimento do estudo, aos professores e amigos do Instituto Mauá de Tecnologia e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

## RESUMO

Motivado pela grande necessidade da utilização de combustíveis alternativos, o presente trabalho apresenta o estudo experimental e simulação termodinâmica (zero-dimensional) do desempenho de um motor de combustão interna de ignição por compressão utilizando álcool e óleo Diesel. Primeiramente são apresentados definições e conceitos relacionados a motores de combustão interna; a seguir apresenta-se o problema e os objetivos almejados. Posteriormente apresentam-se os resultados obtidos em dinamômetro confrontando-os com uma simulação no software Chemkin<sup>®</sup>. Dos resultados obtidos em dinamômetro, destacam-se as comparações das curvas características do motor para ambos os combustíveis. Também é discutida a metodologia empregada e as modificações realizadas. Todas as modificações realizadas no motor foram realizadas com o uso de componentes comercialmente disponíveis. Utilizou-se como facilitador da ignição, para o álcool, o "Princípio do Ponto Quente". As curvas características para ambos os combustíveis foram obtidas segundo a norma NBR-ISO 1585. Mediu-se, também, consumo de combustível, pressão na câmara de combustão e temperaturas do sistema. Destes dados obtém-se a comparação da pressão de combustão para os dois combustíveis. É feita também a comparação entre as pressões de combustão obtidas com a simulação termodinâmica. Esses resultados, por um lado, sustentam a viabilidade desta substituição entre os combustíveis, por outro lado mostram as dificuldades em se utilizar um combustível alternativo como o álcool nos motores de ignição por compressão.

Palavras chave: Motor ciclo Diesel, liberação de calor no ciclo Diesel, ciclo Diesel utilizando álcool como combustível.

## ABSTRACT

Due to a huge necessity to use alternatives fuels, this study presents an experimental performance investigation and its thermodynamics simulation (zero-dimensional) of an ignition engine Diesel cycle working with ethanol and Diesel. First of all some definitions and concepts related to internal combustion engines are given. Following this, an explanation of the problem and the aims are exposed; after that the dynamometer data have been presented and compared with engine simulation carried out with Chemkin<sup>®</sup>. From the dynamometer data, characteristics performance curves for both fuels can be highlighted. The applied methodology and technical modifications are also presented. All changes proposed in the engine are based on commercial components. To facilitate the mixture ignition into the combustion chamber, the glow plugs principle was used. Dynamometer tests were carried out according to norms NBR ISO 1585. Fuel consumption, chamber pressure and temperatures were also acquired. From these data combustion pressure for both fuels are compared. The experimental pressure is compared also to the results obtained with the thermodynamics simulation. The present results show the possibility of interchangeability between the ethanol and diesel in a compression ignition engines.

Keywords: Diesel engines, heat release ratio, Diesel engine working with ethanol.

## LISTA DE FIGURAS

1. Esquema do cilindro do motor utilizado para calcular o volume em função do tempo.....	24
2. Swirl promovido pelos dutos de admissão .....	33
3. Detalhe do cabeçote em corte .....	33
4. Radiografia do cabeçote .....	35
5. Posição da vela no cabeçote.....	46
6. Esquema elétrico do controle de tensão das velas .....	49
7. Resistência elétrica da vela incandescente em função de sua temperatura .....	51
8. Temperatura lida x temperatura efetiva na ponta da vela .....	52
9. Comparativo do avanço de injeção para álcool e óleo Diesel.....	54
10. Valores da relação ar/combustível para álcool.....	55
11. Curvas características com óleo diesel e álcool.....	56
12. Consumo específico para o álcool.....	57
13. Comparativo das temperaturas de gases de escape para álcool e para óleo Diesel.....	58
14. Comparativo das temperaturas do ar após o intercooler para álcool e para óleo Diesel.....	59



15. Comparativo da pressão de combustão na rotação de torque máximo a 1800rpm.....	60
16. Comparativo da pressão de combustão na rotação de potência máxima a 3400 rpm.....	61
17. Comparativo da pressão de combustão na rotação de máxima pressão a 2400 rpm.....	61
18. Comparativo dos picos de pressão no primeiro cilindro.....	62
19. Comparativo do rendimento do motor.....	63
20. Torque em função do avanço de injeção do álcool a 1400 rpm.....	64
21. Torque em função do consumo de álcool a 1400 rpm e 9° de avanço.....	65
22. Comparativo da temperatura dos gases de escape na condição de potência máxima para o álcool e para o óleo Diesel. ....	66
23. Comparativo do consumo na condição potência máxima para o álcool e para o óleo Diesel.....	66
24. Comparativo de potência máxima para o álcool e para o óleo Diesel.....	67
25. Torque do motor em função da tensão na vela incandescente	

para 1800rpm e 100% de carga.....	67
26. Simulação de pressão de combustão do motor obtida pelo simulador	
Chemkin® .....	69
27. Pressão de combustão do último ciclo do motor no simulador.....	69
28. Temperatura dos gases de escape do motor do simulador.....	70
29. Liberação de calor do motor no simulador.....	70
30. Comparação entre as pressões de combustão.....	72
31. Comparação entre as pressões de combustão	
para o pico de pressão.....	73
32. Comparação entre as energias de liberação de calor.....	74
33. Curva de razão de liberação de calor .....	75
34. Atraso de ignição nos motores ciclo Diesel .....	81
35. Atraso de ignição x rotação do motor.....	81
36. Velocidade de liberação de energia x ângulo do virabrequim.....	83
37. Atraso de ignição x número de cetanas .....	86
38. Nível de ruído x número de cetano .....	87
39. Número de cetanas x concentração de nitrato .....	88
40. Vela incandescente.....	91

## LISTA DE TABELAS

1. Ficha técnica do motor ..... 32
2. Comparativo das propriedades químicas do álcool e do óleo Diesel..... 89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PMI –	Ponto Morto Inferior
PMS –	Ponto Morto Superior
pci –	Poder calorífico inferior
CO –	Monóxido de Carbono
HC –	Hidróxidos de Carbono
NOX –	Óxidos de Nitrogênio
ISO –	<i>International Standards Organization</i>
NBR –	Normas Brasileiras Regulamentadoras
EPA –	<i>Environmental Protection Agency</i>
MCI –	Motor de combustão interna

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\eta_t$	Rendimento térmico
$W_c$	Trabalho mecânico
$Q_1$	Calor fornecido
$Q_2$	Calor liberado
$T_2$	Temperatura no final da compressão
$T_3$	Temperatura no final da expansão
$k$	condutividade térmica
$r_v$	Razão volumétrica
$\eta_m$	Rendimento mecânico
$N_e$	Potência efetiva
$N_T$	Potência total
$\eta_v$	Rendimento volumétrico
$m_a$	Massa de ar seco
$m_v$	Massa de ar total
$\eta_g$	Rendimento global
$\lambda$	Relação ar/combustível
$m_{\text{Diesel}}$	Vazão mássica de óleo Diesel

$m_{\text{álcool}}$	Vazão mássica do álcool
$\rho_{\text{ciDiesel}}$	Poder calorífico do óleo Diesel
$\rho_{\text{ciálcool}}$	Poder calorífico do álcool
$V$	Vazão volumétrica
$\rho$	Densidade do combustível
$V_{\text{Diesel}}$	Vazão volumétrica do óleo Diesel
$V_{\text{álcool}}$	Vazão volumétrica do álcool
$\rho_{\text{Diesel}}$	Densidade do óleo Diesel
$\rho_{\text{álcool}}$	Densidade do álcool
$C_{\text{bm}}$	Consumo bruto de combustível em massa
$C_{\text{específico}}$	Consumo específico
$C_{\text{álcool}}$	Consumo em massa de álcool
$m_{\text{O}_2}$	Consumo em massa de oxigênio
$V_{\text{esf}}$	Volume da gota de combustível
$A_{\text{esf}}$	Área da gota de combustível
$h_a$	Entalpia do combustível
$n$	Rotação de funcionamento do motor
$t_a$	intervalo de tempo para atingir a temperatura de auto ignição
$t_{\text{máx}}$	Tempo máximo para a troca térmica
$\text{cons}_{\text{Diesel}}$	Consumo rodoviário com óleo Diesel

$p_{\text{Diesel}}$	Preço do óleo Diesel
$\theta$	Posição angular do virabrequim,
$Q_{\text{entra}}$	Energia recebida pela massa de combustível no cilindro,
$V$	Volume da câmara de combustão (variável em função de $\theta$ ),
$V_d$	Cilindrada unitária do motor,
$p$	Pressão na câmara (variável em função de $\theta$ ),

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	.....	viii
<b>Lista de Tabelas</b>	.....	xi
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	.....	xii
<b>Lista de Símbolos</b>	.....	xiii
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	.....01
	1.1	Cenário Atual dos Combustíveis .....01
	1.2	Objetivo do Estudo .....04
	1.3	Justificativa do Tema .....05
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	.....07
<b>3</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	.....16
	3.1	Descrição do Modelo para o cálculo da Taxa de Liberação de Energia .....31
	3.2	Descrição do Modelo 0D Utilizado na Simulação .....34
	3.3	Correlação de Woschini para Transferência de Calor ..... 38
	3.4	Correlação para Média dos Coeficientes Espaciais Instantâneos .....40



<b>4</b>	<b>Ensaaios e Desenvolvimentos Realizados</b>	<b>44</b>
4.1	Ensaaios Realizados Utilizando Óleo Diesel	30
4.2	Ensaaios Realizados Utilizando Álcool	31
4.3	Procedimento para a Realização das Curvas de Desempenho	31
4.4	Desenvolvimento do Projeto	32
4.5	Dados Técnicos do Banco de Ensaaios	34
4.6	Estudo da Quantidade de Combustível Injetada	37
4.7	Comprovação da Necessidade da Vela Incandescente	41
4.8	Adaptações Realizadas no Motor	45
4.9	Avanço da Bomba Injetora	46
4.10	Bicos Injetores	47
4.11	Controle da Temperatura da Vela Incandescente	48
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>50</b>
5.1	Descrição dos Dados Coletados para o Óleo Diesel	52
5.2	Descrição dos Resultados Coletados para o Álcool Comparados com Óleo Diesel	53
5.2.1	Curvas Características Utilizando Álcool	53
5.2.2	Comportamento das Temperaturas	58
5.2.3	Comportamento das Pressões de Combustão	59
5.2.4	Redimento Global	63
5.2.5	Ensaio de Potência Máxima	64

5.3	Variação da Tensão da Vela Incandescente.....	67
5.4	Resultados do Simulador .....	68
5.5	Comparação entre as Pressões de Combustão.....	73
<b>6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>76</b>
	Apêndice A .....	79
	Apêndice B .....	92
	Apêndice C .....	96
	Apêndice D .....	100
	Apêndice E .....	116
	Anexo A .....	111
	Anexo B .....	112
	<b>Referências Bibliograficas .....</b>	<b>113</b>