



**Anthony Oswaldo Roque Ccacya**

**Estudo Experimental da Ignição por Compressão de  
Misturas Homogêneas em Motores a Combustão Interna**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre.

Orientadores: Prof. Sergio Leal Braga  
Prof. Juan José Milón Guzmán

Rio de Janeiro  
Setembro de 2010



**Anthony Oswaldo Roque Ccacya**

**Estudo Experimental da Ignição por Compressão de  
Misturas Homogêneas em Motores a Combustão Interna**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Juan José Milón Guzmán**

Co-orientador

Programa Profissional de Engenharia Industrial – UCSP-Perú

**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. Calos Valois Maciel Braga**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de setembro de 2010

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

**Anthony Oswaldo Roque Ccacya**

Graduou-se em Engenharia Química na UNSA (Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Peru) em 2004.

Ficha Catalográfica

Roque Ccacya, Anthony Oswaldo

Estudo experimental da ignição por compressão de misturas homogêneas em motores a combustão interna / Anthony Oswaldo Roque Ccacya ; orientadores: Sergio Leal Braga, Juan José Milón Guzmán. – 2010.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. HCCI. 3. Combustão. 4. Ignição por compressão. 5. Auto-ignição. 6. Gasolina. I. Braga, Sergio Leal. II. Milón Guzmán, Juan José. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus queridos pais: Felicitas Ccacya e Antonio Roque,  
seu carinho e exemplo me proporcionaram o estímulo  
e a oportunidade de realizar este trabalho.

## Agradecimentos

A Deus, por ser fortaleza e auxílio para superar os desafios apresentados durante a realização do presente trabalho.

Ao meu orientador Sergio Leal Braga, pela escolha do tema moderno e interessante para a dissertação, pela ajuda na implantação da infra-estrutura para a realização do trabalho, pela disponibilidade de sempre para a troca de idéias na orientação, pela amizade e confiança depositadas em mim.

Ao meu Co-orientador e amigo Juan Jose Milón Guzmán pela confiança, apoio e amizade durante todo o percurso do presente trabalho.

À CNPq e à PUC – Rio, pelos auxílios concedidos no desenvolvimento do presente trabalho.

A minhas amigas Ana Maria C. Monteiro, Ana Teresa G. Cotta Monteiro e toda sua família, pelo apoio e confiança de sempre.

Aos meus amigos Antoine Albrecht do Instituto Francês do Petróleo e Felipe Moutella, pela troca de idéias, e ajuda na obtenção de diversos artigos, muitos dos quais raros, que enriqueceram as referências bibliográficas dessa dissertação.

Ao engenheiro Severino Vanderlei, pelo apoio na instalação dos sistemas eletrônicos da bancada experimental, pois sem a sua experiência, o funcionamento teria sido bem mais difícil.

Ao meu amigo e responsável pelo Laboratório de Engenharia Veicular da PUC – Rio, Julio Cuisano, pela troca de idéias, apoio de sempre e compreensão durante a realização dos testes.

Aos meus amigos do LEV José Alberto Aguilar, Gustavo V Cezar, Gilson Coutinho, Fabrício e Cesar Vasquez, pela ajuda na montagem dos equipamentos utilizados.

Aos meus amigos, funcionários da PUC, Marquez, Pascual e a todo o pessoal que trabalha junto deles, pelo apoio e amizade de sempre.

Às minhas amigas de sempre: Dita Coelho e Melissa Zambrano.

## Resumo

Roque C., Anthony Oswaldo. Braga, Sergio Leal (Orientador), **Estudo experimental da ignição por compressão de misturas homogêneas em motores a combustão interna**. Rio de Janeiro, 2010. 132p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o intuito de reduzir as emissões e melhorar a combustão em uma maior faixa de rotação e carga de um motor, foi proposto o estudo da combustão por compressão de misturas homogêneas (HCCI), este processo apresenta altas eficiências e baixas emissões, principalmente de NOx e fuligem. Assim, o objetivo do presente trabalho é a determinação das faixas de operação estável em um motor diesel, de alta taxa de compressão (20:1). O combustível utilizado foi gasolina tipo A, tendo em vista a sua grande produção, além das características de auto-ignição. Para atingir o objetivo proposto foram controladas a temperatura de entrada do ar e a quantidade de combustível da mistura, o que foi implementado sem modificação estrutural do motor. Os ensaios foram realizados com uma temperatura de alimentação entre 75 e 95 °C, com rotação entre 1200 e 2200 RPM. Os valores para o fator lambda ( $\lambda$ ) variaram, em função de um processo de combustão estável, entre 2 e 4. São apresentados os resultados experimentais obtidos em um dinamômetro de bancada, sobre os quais se fez uma análise do rendimento, para a faixa de melhor estabilidade da combustão. Para a mesma faixa foi realizada uma análise das curvas de pressão x tempo, caracterizando a auto-ignição como função da temperatura do ar e da riqueza da mistura. Os melhores rendimentos encontrados situam-se ao redor de 36,5 %, para uma temperatura de ingresso de 85 °C, para as maiores rotações pesquisadas.

## Palavras-chave

HCCI; Combustão; Ignição por compressão; Auto-ignição; Gasolina.

## Abstract

Roque C., Anthony Oswaldo; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Experimental study of homogeneous mixture compression ignition in internal combustion engines**. Rio de Janeiro, 2010. 132p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present study of homogeneous mixture compression ignition (HCCI) was proposed in order to reduce emissions and improve combustion at a higher speed range and load, this process has high efficiency and low emissions mainly  $\text{NO}_x$  and soot. Therefore, the aim of this study was to determine the ranges of stable operation in a diesel engine of high compression ratio (20:1), operating in HCCI. The fuel used was gasoline type A, given its large production, besides the good characteristics of auto-ignition. To achieve this purpose were controlled inlet air temperature and the amount of fuel in the mixture, these were implemented without structural modification of the engine. The tests were conducted with a feed temperature between 75 and 95 ° C, with rotation between 1200 and 2200 RPM. The values for the lambda factor ( $\lambda$ ) varied between 2 and 4, as a function of a stable combustion process. The experimental results here reported were obtained on a dynamometer bench, on which, it was made a performance analysis for the better stability combustion range. Additionally for this range, an analysis of the curves of pressure vs. time was performed, characterizing the auto-ignition as a function of air temperature and the richness of the mixture. The best results found are located around 36.5% at an intake temperature of 85 ° C for the highest speed studied.

## Keywords

HCCI; Combustion; Compression Ignition; Auto-ignition; Gasoline.

# Sumário

1	Introdução	19
1.1.	Combustão a baixa temperatura	21
1.2.	Saúde e efeito ambiental das emissões	22
1.2.1.	Óxidos de Nitrogênio	25
1.2.2.	Material particulado ou Fuligem	25
1.2.3.	Hydrocarbonetos não queimados	26
1.3.	Objetivos	26
1.4.	Atividades Desenvolvidas e descrição da dissertação	26
2	Auto-ignição e Combustão de Misturas Homogêneas	28
2.1.	Tipos de combustão Convencional	28
2.1.1.	Combustão por ignição de centelha (SI).	28
2.1.2.	Combustão por compressão (CI) ou Diesel Convencional	29
2.2.	Fundamentos da combustão de misturas homogêneas (HCCI)	31
2.2.1.	Desafios da combustão HCCI	33
2.2.2.	Parâmetros de controle	34
2.3.	Requerimentos do combustível para HCCI	39
2.4.	Auto-ignição em combustíveis a Gasolina	40
2.4.1.	Fases da auto-ignição controlada	42
2.5.	Cinética da combustão em um HCCI	43
2.5.1.	Química de Oxidação de Hydrocarbonetos na Gasolina	43
3	Aparato Experimental	48
3.1.	Sistema Motor	49
3.1.1.	Motor diesel avaliado	49
3.1.2.	Dinamômetro	51
3.2.	Sistema de condução Ar – Combustível	52
3.2.1.	Alimentação de Combustível	52



3.2.2. Alimentação de Ar	53
3.2.3. Combustível	54
3.3. Sistema de controle e medição	54
3.3.1. Medição da rotação	54
3.3.2. Medição do torque	55
3.3.3. Medição da Umidade Relativa	56
3.3.4. Medição de temperatura	56
3.3.5. Medição de Pressão	57
3.3.6. Medição de combustível	60
3.3.7. Medição de vazão de Ar	61
3.3.8. Controlador do aquecedor de Ar	62
3.3.9. Medidor de gases de exaustão	62
3.3.10. Software de controle e medição	63
4 . Condições Experimentais e Redução de Dados	64
4.1. Parâmetros experimentais	64
4.1.1. Parâmetros Fixos	64
4.1.2. Parâmetros Variáveis	66
4.2. Ensaio Motor Diesel	67
4.3. Arranjos experimentais para a avaliação do processo HCCI	68
4.4. Redução de dados	69
4.4.1. Potência	70
4.4.2. Pressão Média Efetiva	70
4.4.3. Consumo de Ar Úmido e Ar Seco	70
4.4.4. Massa Específica do Ar Ambiente	71
4.4.5. Consumo específico de Combustível	72
4.4.6. Eficiência de conversão do combustível	72
4.4.7. Eficiência Volumétrica	73
4.4.8. Fator lambda	73
4.5. Emissões específicas	74
5 Resultados e discussões	76
5.1. Análise do funcionamento do modo Diesel	76
5.2. Avaliação do desempenho do modo HCCI	78

5.2.1. Condições de operação	78
5.2.2. Performance do HCCI	82
5.2.3. Análise do Desempenho em modo HCCI com curvas de pressão interna	89
5.2.4. Emissões HCCI	102
5.3. Avaliação e Comparação dos resultados Diesel – HCCI	106
6 Conclusões e recomendações	112
6.1. Conclusões	112
6.2. Recomendações finais para trabalhos futuros	113
Referências bibliográficas	115
Apêndice A	119
A.1 Análise das Incertezas envolvidas	119
A.1.1 Calibração do banco de provas	119
A.1.2 Cálculo da incerteza de medição	119
Apêndice B Tabela de especificação da gasolina Automotiva	126
Apêndice C Planilhas de ensaio	129

## Lista de Figuras

Figura 1 – Estrutura do Consumo de Combustíveis. Setor de Transportes	20
Figura 2 - Taxa Equivalente – Temperatura, regiões de formação de Fuligem e NOx para motores Diesel, SI, HCCI, e LTC Diesel.	22
Figura 3 - Produção de automóveis das últimas décadas	23
Figura 4 – Distribuição da frota de veículos nas cinco regiões do Brasil	23
Figura 5 – Passado, presente e futuro da legislação de emissões nos países da União Européia	25
Figura 6 – Distribuição do frente de chama em um motor de SI	29
Figura 7 - Evolução temporal da combustão.	29
Figura 8 - Modelo conceitual da combustão de ignição por compressão (CI) convencional.	30
Figura 9 Calor liberado características da combustão SI, HCCI e CI.	32
Figura 10 – Bancada experimental	48
Figura 11 – Bancada experimental com os equipamentos de controle	49
Figura 12 – Vista do motor	50
Figura 13 – Sistema de alimentação de combustível	52
Figura 14 – Encoder HS35. Tipo incremental.	55
Figura 15 - Célula de carga U2A – 200	55
Figura 16 – Medidor de umidade relativa e temperatura Omega HHM25	56
Figura 17 – Sistema de interligação dos equipamentos para o registro da pressão de combustão.	58
Figura 18 – Marca de referência para a determinação do ponto morto superior.	59
Figura 19 – Corioli utilizado para a medição do combustível	61
Figura 20 – Medidor de Fluxo Laminar	61
Figura 21 – Sistema de medição de emissões.	62

Figura 22 – Unidade de controle do dinamômetro (esquerda) e unidade de registro e visualização da pressão interna (direita).	63
Figura 23 - Torque, Potência, cec e Rendimento Térmico - Rotação (RPM), modo Diesel convencional plena carga.	77
Figura 24 – Temperatura do óleo com rotação às temperaturas de alimentação de 75, 85, e 95 °C	79
Figura 25 - Temperatura do bloco com rotação às temperaturas de alimentação de 75°C, 85°C, e 95 °C	79
Figura 26 - Fator Lambda com rotação (RPM) a diferentes temperaturas de alimentação.	81
Figura 27 - Eficiência volumétrica com Rotação (RPM) às diferentes de alimentação (25, 75, 85, e 95).	82
Figura 28 - Torque com Rotação (RPM) às diferentes temperaturas de ingresso (75, 85 e 95 °C).	83
Figura 29 – Torque em função da rotação e o fator lambda a 85 °C	84
Figura 30 - Torque – Fator Lambda às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).	85
Figura 31 – Coeficiente de variação do torque (COV) – Rotação do motor às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).	85
Figura 32 - Rendimento Térmico – Rotação do motor às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).	86
Figura 33 - Consumo específico em função da velocidade do motor e lambda à temperatura de 85 °C	87
Figura 34 - Temperatura de escapamento – Rotação do motor às diferentes temperaturas no ingresso (75, 85 e 95 °C)	88
Figura 35 – Pressão máxima – Lambda para as rotações na faixa mais estável para as três temperaturas.	90
Figura 36 – Pressão interna com tempo a diferentes valores de lambda a 75 °C de temperatura de entrada @ 1900 RPM.	91
Figura 37 – Calor específico – temperatura para diferentes espécies de gases presentes na fase de baixa temperatura (LTHR).	92
Figura 38 – Pressão Interna com tempo a diferentes valores de lambda e 85 °C de temperatura de ingresso @ 1900 RPM.	92

Figura 39 – Pressão Interna com tempo a diferentes valores de lambda a 95 °C de temperatura de ingresso @ 1900 RPM.	94
Figura 40 - Curvas de pressão - tempo para diferentes valores de lambda a 85 °C de temperatura de ingresso @ 1800 RPM.	95
Figura 41 – Curvas de pressão – tempo para diferentes valores de lambda a 85 °C de temperatura de ingresso @2000 RPM.	95
Figura 42 – Pressão interna com tempo às temperaturas de 85 e 95 °C com valores de lambda comparáveis @ 1900 RPM.	96
Figura 43 – Pressão Interna com tempo, efeito da temperatura no inicio da ignição @ 1900 RPM.	97
Figura 44 - Potência, cec e Rendimento Térmico com Lambda @ 1800 RPM	99
Figura 45 - Potência, cec e Rendimento Térmico com Lambda @ 1900 RPM	100
Figura 46 - Potência, cec e Rendimento Térmico com lambda @ 2000 RPM	102
Figura 47 - Emissões específicas de NOx com a velocidade junto aos níveis máximos permitidos para a EURO 4 e 5, T in = 85 °C	103
Figura 48 - Emissões específicas para CO com a velocidade e os níveis máximos para a EURO IV e V, Tin = 85 °C	104
Figura 49 - Emissões específicas de NOx - lambda a diferentes velocidades com os limites máximos da EURO IV e V	104
Figura 50 - Emissões específicas de CO com lambda a diferentes velocidades, junto aos limites da EURO IV e V	105
Figura 51 – Foto do escapamento operando em modo Diesel	106
Figura 52 – Foto do escapamento operando em modo HCCI	106
Figura 53 - Temperatura do escapamento - velocidade. HCCI - Diesel	108
Figura 54 - MEP com a velocidade. Pontos a diferentes Temperaturas de alimentação. HCCI - Diesel	108
Figura 55 - Consumo específico de combustível com velocidade para diferentes Temperaturas de alimentação. HCCI – Diesel	109
Figura 56 - Rendimento Térmico com velocidade para diferentes temperaturas de alimentação. HCCI - Diesel	109

Figura 57 – Pressão interna – Tempo, comparação HCCI @ 1900 RPM ( $T_{in} = 85\text{ °C}$ ) com a combustão Diesel convencional.	110
Figura 58 – Pressão interna – Tempo, comparação HCCI a diferentes temperaturas de alimentação @ 1900 RPM ( $\lambda \approx 2,6$ ) com a combustão Diesel convencional.	111

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Gases de exaustão de motores de combustão interna	24
Tabela 2 – Métodos de controle do HCCI	35
Tabela 3 – Comparação nas propriedades de combustíveis	42
Tabela 4 – Dados técnicos do motor (Fonte: LINTEC)	50
Tabela 5 – Dados técnicos do inversor de frequência.	51
Tabela 6 – Dados técnicos do motor elétrico	51
Tabela 7 – Tipos de sensores de temperatura utilizados nos pontos de medição	57
Tabela 8 – Especificações dos transdutores de pressão e os pontos de medição	57
Tabela 9 – Especificações técnicas do sensor piezelétrico 6052CS31U20 KISTLER	59
Tabela 10 – Variação da precisão do Corelioli CFM010 quando se diminui a faixa de fluxo	60
Tabela 11 – Parâmetros Experimentais Fixos	65
Tabela 12 – Parâmetros experimentais variáveis	66
Tabela 13 – Variáveis registradas no ensaio modo Diesel	67
Tabela 14 – Variáveis adicionais registradas no modo HCCI	68
Tabela 15 – Arranjo experimental do processo HCCI variando a temperatura de ingresso	69

## Lista de símbolos e acrônimos

ABDC	Depois do Ponto Morto Inferior (After Bottom Dead Center)
A/C	Razão Ar - Combustível
BDC	Ponto Morto Inferior (Bottom Dead Center)
B e C	Constantes específicas para o LFE
CAD	Ângulo do virabrequim (Crank Angle Degree)
CAI	Auto-ignição Controlada (Controlled Auto-ignition)
cec	Consumo específico de combustível
CI	Ignição por compressão (Compression Ignition)
CN	Número de cetanagem (Cetane Number)
CFR	Tipo de motor para análise da octanagem (Cooperative Fuel Research)
CO	Monóxido de carbono
COV	Coefficiente de Variação (Coefficient of variation)
EGR	Gases de recirculação (Exhaust Gas Recirculation)
HC	Hidrocarbonetos
HCCI	Ignição por compressão de uma carga homogênea (Homogeneous Charge Compression Ignition).
HTHR	Calor Liberado a Alta Temperatura (High Temperature Heat Release)
IMEP	Pressão média indicada
$k_w$	Fator de conversão de base seca a úmida
LFE	Elemento de medição laminar de fluxo volumétrico de ar
LTC	Combustão a baixa temperatura (Low Temperature Combustion)
LTHR	Calor liberado a baixa temperatura (Low Temperature Heat Release)
MEP	Pressão média efetiva
MON	Número de octano motor (Motor Octane Number)
NOx	Óxidos de Nitrogênio
NTC	Fase do coeficiente de temperatura negativo (Negative Temperature Coefficient)
$\dot{m}_c$	Vazão mássica de combustível
$\dot{m}_{ar,u}$	Vazão mássica de ar úmido
$\dot{m}_{ar,s}$	Vazão mássica de ar seco
$\dot{m}_{esc}$	Vazão mássica de escapamento
$\dot{m}_{NOx}$	Vazão mássica de óxidos de nitrogênio



$\dot{m}_{CO}$	Vazão mássica de monóxido de carbono
$\dot{m}_{HC}$	Vazão mássica de hidrocarbonetos não queimados
N	Revoluções por minuto
NVO	Cruzamento negativo de válvulas (Negative Valve Overlap)
OKP	Processo cinético otimizado (Optimized Kinetic Process)
ON ou IO	Número de octanagem (Octane Number)
P	Potência
$P_{sat}$	Pressão de Saturação
PAHs	Hidrocarbonetos poliaromáticos (Polycyclic aromatic hydrocarbons)
$PCI_c$	Poder Calorífico Inferior
PFI	Injeção indireta (Port Fuel Injection)
PID	Controlador Proporcional - Integral - Derivativo
PM	Fuligem (Particulates Mater)
$\dot{Q}_f$	Vazão volumétrica de ar
$R_{ar,s}$	Constante específica do ar seco
$R_v$	Constante específica do vapor de água
RH	Umidade Relativa
RON	Número de octano pesquisa (Research Octane Number)
RPM	Revoluções por minuto
SI	Ignição por centelha (Spark Ignition)
SOI	Início da Injeção (Start of Injection)
sNOx	Emissões específicas de óxidos de nitrogênio
sCO	Emissões específicas de monóxido de carbono
sHC	Emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados
T	Torque
$T_{amb}$	Temperatura do ambiente
$T_{ar,u}$	Temperatura do ar úmido
TDC	Ponto Morto Superior (Top Dead Center)
UHC	Hidrocarbonetos não queimados (Unburned Hydrocarbons)
$V_d$	Volume deslocado
VCR	Taxa de Compressão Variável (Variable Compression Ratio)
VVT	Comando Variável de Válvulas (Variable Valve Timing)
$W_c$	Trabalho por ciclo
$X_i$	Medida da concentração de um poluente em ppm base seca ou úmida (u,s)

## Símbolos Gregos

$\Delta p$	Diferencial de pressão no LFE
$\rho_{ar,u}$	Massa específica do ar úmido
$\phi$	Taxa equivalente
$\lambda$	Fator lambda
$\eta_v$	Eficiência volumétrica
$\eta_c$	Eficiência de conversão do combustível
$\Omega$	Umidade específica
$\mu_{ar,u}$	Viscosidade do ar úmido
$\mu_{ar,s}$	Viscosidade do ar seco
$\mu_f$	Viscosidade do fluido em condições operacionais