



José Alberto Aguilar Franco

**Estudo Experimental de um Motor de
Ignição por Compressão de Mistura Homogênea - HCCI**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Co-Orientador: Prof. Juan José Milón Guzmán

Rio de Janeiro

Junho de 2011



José Alberto Aguilar Franco

**Estudo Experimental de um Motor de
Ignição por Compressão de Mistura Homogênea – HCCI**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre 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. Juan José Milón Guzmán

Co-Orientador

Universidad Católica San Pablo – Perú

Prof. José Alberto Dos Reise Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC – Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, Junho de 2011

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

José Alberto Aguilar Franco

Graduou-se em Engenharia Industrial na UCSP (Universidad Católica San Pablo de Arequipa – Perú) em 2009. Pesquisador assistente do Laboratório de Pesquisa Tecnológica em Energia, LITE-UCSP, atualmente pesquisador no Laboratório de Engenharia Veicular - LEV da PUC – Rio, Brasil.

Ficha Catalográfica

Aguilar Franco, José Alberto

Estudo Experimental de um Motor de Ignição por Compressão de Mistura Homogênea - HCCI.

José Alberto Aguilar Franco; orientador: Sergio Leal Braga. – Rio de Janeiro: PUC - Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

104 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Combustão HCCI. 3. Gasolina em ciclo Diesel 4. Parâmetros de controle HCCI. I. Braga, Sergio Leal. II. Guzmán, Juan José Milón. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Sergio Leal Braga pela confiança e parceria para a realização deste trabalho e de todo o mestrado.

Ao meu Co-orientador e amigo Juan Jose Milón pela amizade e confiança no presente trabalho. A pesar de estar longe sempre tive sua ajuda e apoio.

A CAPES e á PUC - Rio pelo suporte financeiro e auxílios concedidos para o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu amigo e responsável do LEV Julio Cuisano pela amizade, apoio e compressão durante o desenvolvimento do trabalho final. Agradeço de uma forma especial a ele já que muitas vezes foi como um orientador para mim permitindo-me esclarecer todas minha dúvidas e ter tido a oportunidade de aprender muitas coisas de ele.

A minha mãe pela compressão, confiança e esforço realizado para ter a oportunidade de estudar neste país. A minha família pelo incentivo de continuar.

Ao meu amigo de toda a vida Edward Fuentes pela motivação pessoal

Ao engenheiro Severino Wanderley pela grande amizade e apoio técnico na instalação dos sistemas eletrônicos necessários da bancada.

Aos meus colegas de trabalho e futuros mestres Gustavo Cesar e Fernando Zegarra pela amizade, apoio incondicional e confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos técnicos do LEV Gilson Coutinho, Fabrício Ferraz e Gerson Silveiro pelo apoio durante a montagem dos equipamentos. Também um agradecimento aos funcionários do ITUC Brice, Marquez, Paulo, Marcus, Pedro, Luciano por brindar sua amizade e apoio para a conclusão de meu trabalho final.

Aos meus amigos de pós-graduação da PUC que compartilmos bons momentos neste tempo: Jorge, Daniel, Elvis, Eliot, Fernando, Anthony, Rafael.

Aos meus amigos brasileiros Gabriel, Pedro, Washington, Isa, Gustavo pela amizade que tive com eles durante todo o período do mestrado e todos os bons momentos que compartilmos juntos.

Resumo

Aguilar Franco, Jose Alberto; Sergio Leal Braga (Orientador), Juan José Milón Guzmán (Co-Orientador). **Estudo Experimental de um Motor de Ignição por Compressão de Mistura Homogênea - HCCI**. Rio de Janeiro, 2011. 104 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma bancada experimental foi desenhada e desenvolvida para realizar ensaios experimentais de um motor de ciclo Diesel utilizando gasolina como combustível. O motor (originalmente de ciclo diesel) foi adequado com diferentes dispositivos para funcionar em modo HCCI. Estas modificações não afetaram as condições originais do motor, podendo em qualquer momento voltar ao modo diesel. A instrumentação inclui medição de: temperatura (gases de escapamento, entrada da carga de admissão, óleo lubrificante), pressão (entrada do ar de admissão, entrada da gasolina, câmara de combustão), torque, rotação, vazão de ar, vazão de combustível. O motor foi submetido a diversas condições de operação e parâmetros de controle para estudar e analisar os efeitos da rotação do motor, da relação ar-combustível e da temperatura da mistura (ar-gasolina) de entrada na combustão HCCI. Os resultados indicam que as variações na quantidade de combustível e na temperatura de admissão têm um efeito direto na combustão HCCI. Maiores temperaturas ou quantidades de combustível provocam um avanço da fase de ignição, que teria uma influência direta no início da combustão e nas máximas pressões no interior da câmara de combustão. Os resultados também indicam que, incrementando a quantidade de combustível e variando a temperatura de admissão, mais energia útil é gerada até atingir o limite da zona de detonação, obtendo os melhores resultados para a temperatura de 75°C com uma eficiência térmica de 34,2% na rotação de 1900 RPM. Pequenos ganhos na eficiência de combustão são traduzidos em economias significativas de energia, reduzindo também os níveis de poluição dos gases de escapamento.

Palavras-chave

Combustão HCCI; gasolina em ciclo Diesel; parâmetros de controle HCCI.

Abstract

Aguilar Franco, Jose Alberto; Sergio Leal Braga (Advisor). **Experimental Study of a Homogeneous Mixture Compression Ignition Engine - HCCI**. Rio de Janeiro, 2011. 104 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An experimental device was designed and developed to perform experimental tests of a Diesel cycle engine using gasoline as fuel. The engine (originally Diesel cycle) was adequated with different devices to operate in HCCI mode. These modifications did not affect the original conditions of the engine, making it able return to the diesel mode at any moment. The instrumentation included measurement of: temperature (exhaust gases, intake charge admission, lubricating oil), pressure (inlet ar admission, injector nozzle, combustion chamber), torque, engine speed, crankshaft angle, air flow and fuel rate. The engine was submitted to various operating conditions and control parameters to study and analyze the effects of the engine speed, the air-fuel ratio and the temperature of the mixture (air-gasoline) in the HCCI combustion. The results indicate that variations in the amount of fuel and the intake temperature have a direct effect on HCCI combustion. High temperatures or amounts of fuel cause an advanced ignition, which would have a direct influence on the combustion timing and in the maximum pressure inside the combustion chamber. The results also indicate that increasing the amount of fuel and varying the inlet temperature, more useful energy is generated until it reaches the zone of detonation, getting the best results for the temperature of 75°C with a thermal efficiency of 34,2% at 1900 RPM. Small gains in combustion efficiency are translated into significant energy savings, reducing also the pollution levels caused by exhaust gases.

Keywords

HCCI combustion; gasoline in Diesel cycle; HCCI control parameters.

Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Objetivos do Presente Trabalho	15
1.2.	Descrição da dissertação	15
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1.	Emissões em Motores de Combustão Interna	16
2.2.	Efeitos das emissões no ambiente e na saúde humana	17
2.3.	Características Gerais da Tecnologia HCCI	18
2.3.1.	Vantagens da Tecnologia HCCI	19
2.4.	Fundamentos da Combustão	19
2.5.	Operação HCCI	22
2.5.1.	Limites de Operação	23
2.5.2.	Parâmetros de Controle	23
2.5.3.	Características do Combustível	24
2.5.4.	Falha na Ignição HCCI	25
2.6.	Desafios da Tecnologia HCCI	26
2.6.1.	Controle da ignição em diferentes rotações e cargas	26
2.6.2.	Operação para cargas elevadas	27
2.6.3.	Partida em frio	27
2.6.4.	Ruído, vibração e emissões de HC e CO	27
2.6.5.	Preparação da mistura homogênea	28
3	Bancada Experimental	29
3.1.	Seção de Testes	31
3.1.1.	Motor Diesel	31
3.1.2.	Dinamômetro Elétrico	34
3.2.	Sistema de Alimentação de Ar	38
3.3.	Sistema de alimentação de combustível	40
3.4.	Seção de Aquisição e Processamento de Dados Experimentais	43
3.5.	Equipamentos de Apoio	45
3.5.1.	Sensores de Temperatura e Pressão	45
3.5.2.	Medidor de Umidade Relativa	46
4	Procedimento Experimental	47
4.1.	Operação Modo HCCI	47
4.2.	Parâmetros Estudados	48
4.3.	Redução de Dados	49

4.3.1. Potência	50
4.3.2. Pressão Média Efetiva	50
4.3.3. Consumo Específico de Combustível	50
4.3.4. Rendimento Térmico	51
4.3.5. Vazão de Ar Úmido e Ar Seco	51
4.3.6. Massa específica do Ar Ambiente	52
4.3.7. Eficiência Volumétrica	53
4.3.8. Razão Ar-Combustível	54
4.3.9. Razão de Equivalência e Fator Lambda	54
5 Resultados	56
5.1. Avaliação modo de combustão HCCI	56
5.1.1. Condições de Operação	56
5.2. Desempenho HCCI	57
5.3. Análise dos parâmetros de controle na combustão HCCI	63
5.3.1. Relação ar/combustível	63
5.3.2. Temperatura da mistura	72
5.3.3. Efeito da rotação do motor	77
6 Conclusões e Recomendações	81
6.1. Conclusões	81
6.2. Recomendações finais para trabalhos futuros	82
Referências Bibliográficas	84

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de Combustão. (a) CI (Diesel); (b) SI (Gasolina); (c) HCCI	20
Figura 2. Processo de Combustão: (a) SI; (b) CI; (c) HCCI. Zhao (2007).	21
Figura 3. Esquema do Aparato Experimental.	30
Figura 4. Fotografia do Aparato Experimental.	31
Figura 5. Motor Diesel. (a) Perspectiva de frente; (b) Perspectiva lateral	32
Figura 6. Sensor de Posição do Angulo	33
Figura 7. Sensor de Pressão Piezo Elétrico. (a) Sensor; (b) Amplificador de carga	33
Figura 8. Dinamômetro Elétrico. (a) Vista Frontal; (b) Vista Lateral.	34
Figura 9. Conexão Motor Combustão – Dinamômetro Elétrico	35
Figura 10. Inversor de Frequência	35
Figura 11. Dissipador de Potência.	36
Figura 12. Sensor de Torque.	36
Figura 13. Sensor de Rotação.	37
Figura 14. Bancada Experimental. (a) Bancada; (b) Amortecedor; (c) Bloco de Aço.	37
Figura 15. Filtro de Ar	38
Figura 16. Sistema Medidor de Vazão de Ar. 1) Medidor de fluxo laminar; 2) Diferencial de pressão.	38
Figura 17. Aquecedor de Ar	39
Figura 18. Controle de Temperatura PID.	39
Figura 19. Tanque de Combustível Pressurizado.	40
Figura 20. Detalhe Tanque de Combustível (esquerda), detalhe de válvulas (direita).	41
Figura 21. Regulador de Pressão e Tanque de Nitrogênio.	41
Figura 22. Medidor de Vazão de Combustível.	42
Figura 23. Filtro de Combustível.	42
Figura 24. Posição Bico Injetor (Base “T”). 1) Bico injetor; 2) Isolante; 3) Base T.	43
Figura 25. Visualização do Sistema de Aquisição e Processamentos de Dados	44
Figura 26. Imagem do Gerenciamento em LabView®, controle e medição.	44
Figura 27. Imagem do Gerenciamento em LabView®, pressão no cilindro Vs. ângulo do virabrequim.	45
Figura 28. Medidor de Umidade Relativa	46
Figura 29. Variação do torque e potência com a rotação e a temperatura da mistura.	58
Figura 30. Variação do consumo específico e do rendimento térmico com a rotação.	60
Figura 31. Eficiência Volumétrica em função da rotação.	61
Figura 32. Temperatura de escapamento em função da rotação.	62
Figura 33. Variação de temperaturas em função da rotação, 75°C na mistura.	63
Figura 34. Torque em função da rotação e o fator lambda.	65

Figura 35. Consumo específico em função da rotação e fator lambda.	67
Figura 36. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM e 75°C na mistura.	69
Figura 37. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900RPM, 75°C da mistura.	69
Figura 38. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM, 83°C da mistura.	70
Figura 39. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900 RPM, 83°C na mistura.	71
Figura 40. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM, 90°C na mistura.	71
Figura 41. Rendimento térmico em função da razão de equivalência, 1900RPM, 90°C na mistura.	72
Figura 42. Pressão media efetiva em função da temperatura da mistura e do fator lambda	74
Figura 43. Pressão em função do ângulo da manivela, 1900 RPM.	75
Figura 44. Máximos valores de pressão em função da razão de equivalência.	76
Figura 45. COVpmax em função da rotação.	77
Figura 46. COVpmax em função da razão de equivalência, 75°C da mistura de.	79
Figura 47. COVpmax em função da razão de equivalência, 90°C na mistura.	80
Figura 48. Vazão no bico injetor em função do Duty Cycle.	96
Figura 49. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1800 RPM, 75°C na mistura.	100
Figura 50. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1800 RPM, 83°C na mistura.	100
Figura 51. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1800 RPM, 90°C na mistura.	101
Figura 52. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 2000 RPM, 75°C na mistura.	101
Figura 53. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 2000 RPM, 83°C na mistura.	102
Figura 54. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 2000 RPM, 90°C na mistura.	102
Figura 55. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1700 RPM, 75°C na mistura.	103
Figura 56. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1700 RPM, 83°C na mistura.	103
Figura 57. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1600 RPM, 75°C na mistura.	104
Figura 58. Pressão em função do ângulo do virabrequim, 1600 RPM, 83°C na mistura.	104

Lista de Tabelas

Tabela 1. Principais impactos dos gases de combustão	17
Tabela 2. Diferença entre as tecnologias de motores. Ribeiro (2001)	18
Tabela 3. Dados técnicos do motor de combustão (Fonte: YANMAR)	32
Tabela 4. Dados técnicos do motor elétrico (Fonte: WEG)	34
Tabela 5. Dados Técnicos do Inversor de Frequência (Fonte: WEG)	36
Tabela 6. Distribuição e Especificações dos Sensores de Temperatura	45
Tabela 7. Distribuição e Especificação dos Transdutores de Pressão	46
Tabela 8. Condições de Operação HCCI – Motor Yanmar NSB50	57

Lista de Símbolos

(A/C)	Razão ar-combustível
cec	Consumo específico de combustível
CA	Ângulo da manivela
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COV	Coefficiente de variação
HC	Hidrocarbonetos não queimados
\dot{m}	Vazão mássica
MP	Material particulado
N	Velocidade angular
n_t	Rendimento térmico
n_v	Eficiência volumétrica
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
P	Potência
P_{ar}	Pressão atmosférica
PCI	Poder calorífico inferior
P_{sat}	Pressão de saturação do vapor da água á temperatura ambiente
PMS	Ponto morto superior
Q	Vazão Volumétrica
RC	Razão de Compressão
R_{ar}	Constante do ar
SO ₂	Dióxido de Enxofre
T	Torque
U_r	Umidade relativa
V_d	Volume deslocado do cilindro
w	Umidade absoluta

Letras Gregas e Subscritos

ar	Relacionado á vazão mássica de ar
s	Relacionado á vazão em base seca
u	Relacionado á vazão em base úmida
ρ_{ar}	Densidade do ar
λ	Lambda
ΔP	Diferencial de pressão de ar
ϕ	Razão de Equivalência

Convenção

HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition (Ignição por Compressão de Carga Homogênea)
CI	Compression Ignition (Ignição por Compressão)
SI	Spark Ignition (Ignição por Centelha)