

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Jorge Paulo
DANTAS DE ARAUJO E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 28/06/2011

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Jorge Paulo Dantas De Araujo

**A aplicação de planejamento estatístico
multivariado no desenvolvimento de
componentes do motor Diesel**

Campinas, 2011

Jorge Paulo Dantas De Araujo

A aplicação de planejamento estatístico multivariado no desenvolvimento de componentes do motor Diesel

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Projetos

Orientador: Roy Edward Bruns

Campinas, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Ar15a Araujo, Jorge Paulo Dantas de
A aplicação de planejamento estatístico multivariado
no desenvolvimento de componentes do motor Diesel /
Jorge Paulo Dantas de Araujo. --Campinas, SP: [s.n.],
2011.

Orientador: Roy Edward Bruns.
Dissertação de Mestrado (Profissional) -
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Análise fatorial. 2. Combustível diesel. I. Bruns, Roy Edward. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: The application of multivariate statistical planning in the development of diesel engine components

Palavras-chave em Inglês: Factor analysis, Diesel fuel

Área de concentração: Projetos

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Ines Joeques, Anderson Vicente Borille

Data da defesa: 28/06/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**A aplicação de planejamento estatístico
multivariado no desenvolvimento de
componentes do motor Diesel**

Autor: Jorge Paulo Dantas De Araujo

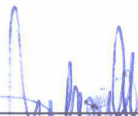
Orientador: Roy Edward Bruns



Prof. Dr. Roy Edward Bruns, Presidente
FEM/UNICAMP



Prof. Dra. Ines Joekes
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Anderson V. Borille
Centro de Competência em Manufatura – CCM/ITA

Campinas, 28 de junho de 2011.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, José Bezerra De Araujo e Eridan Dantas De Araujo, minha irmã Tatiane Dantas De Araujo, a minha esposa Viviane Praça Araujo e as minhas filhas Camila Praça Araujo e Fernanda Praça Araujo.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A minha família pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, Roy Edward Bruns, por ter mostrado os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas que ajudaram para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos de MWM e colegas de Universidade Marlon Casagrande Rodrigues e Bruno Cedola pela parceria e apoio durante todo o período do mestrado

Aos senhores Eurico Pereira, Cesar Almeida e Guilherme Ebeling, pelos ensinamentos que recebi durante minha carreira profissional

A MWM International Motores e seus colaboradores pelo apoio e incentivo.

*O homem que tem sorte é aquele que
está preparado para quando surge a oportunidade.*

Resumo

O processo de desenvolvimento de motores Diesel vem sendo cada vez mais estudado e aprimorado dentro da Indústria. A busca por ferramentas que possam reduzir o tempo de desenvolvimento e também otimizar o trabalho para atingir requisitos de desempenho, redução de consumo de combustível e limites de emissões cada vez mais restritivos é muito importante. Por esse motivo, o presente trabalho pretende contribuir com informações que podem conduzir ao conhecimento necessário para aplicação de planejamento multivariado, no processo de desenvolvimento de um motor Diesel, buscando uma diminuição no tempo para realizar esta atividade. Em uma primeira fase do trabalho, foram identificados quais os componentes (fatores) que deveriam ser estudados e também as variáveis de resposta, que no caso são consumo de óleo lubrificante e pressão de recirculação dos gases de combustão (pressão de carter). Após a definição dos componentes, foram selecionados quais os níveis dos fatores a serem estudados (no caso, mudanças geométricas dos componentes). Em seguida foi aplicada a metodologia de planejamento multivariado de experimentos (fatorial completo) para identificar qual o melhor compromisso entre as configurações estudadas visando os melhores resultados das variáveis de resposta. Ao final desta fase foi possível identificar a melhor configuração entre os componentes estudados e também um ganho substancial no tempo necessário para executar esta atividade. Já em uma segunda fase do trabalho, foi realizado um estudo verificando a influência das tolerâncias de especificação de projeto de alguns componentes considerados críticos para as mesmas respostas estudadas na fase 01 (consumo de óleo e pressão de carter). Através de um estudo fatorial fracionado foi possível identificar quais são as especificações críticas a serem controladas no processo produtivo para manter os valores de consumo de óleo e pressão de carter dentro dos padrões especificados para o motor em questão.

Palavras-chave: análise fatorial; combustível Diesel.

Abstract

The Diesel engine development process has been increasingly studied and improved by industry. The search for tools that can reduce development time and also optimize the work to achieve performance requirements, fuel consumption targets and restrictive emission limits is very important. For this reason, this work aims to contribute with information that may lead to knowledge necessary for the application of multivariate planning in the development process of a Diesel engine, seeking a reduction in time to perform this activity. In the first phase of this work components (factors) that should be studied and also the response variables, which are lubricating oil consumption and pressure of combustion gas recirculation (carter pressure) have been identified. After the component definitions were made the factor levels were selected for study (geometrical changes in the components). Then multivariate statistical designs were applied (full factorial) to identify the best compromise among the levels studied in order to obtain the best results for the response variables. At the end of this phase it was possible to identify the best configurations for the components studied, which also resulted in a substantial gain in the time necessary to perform this activity. In a second phase of this work, a tolerance study was carried out on the influences of the geometrical design specifications of some components considered critical for the same responses studied in phase 1 (oil consumption and carter pressure). Through a fractional factorial study it was possible to identify the critical specifications to be controlled in the productive process to maintain the values of oil consumption and carter pressure within the defaults specified for the engine in question.

Keywords: factorial analysis; Diesel fuel.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Limites de emissões de poluentes em ESC (legislação Brasileira para veículos pesados movidos à Diesel)	2
Figura 2.1 – Exemplo de um sistema de transmissão de potência de um motor ciclo Diesel	8
Figura 2.2 – Forças sobre um anel de pistão.	11
Figura 2.3 – Conjunto pistão-biela e pacote de anéis montados sobre um pistão.	12
Figura 2.4 – Tipos variados de distribuição da pressão de contato em anéis.	16
Figura 2.5 – Características controladas em anéis de pistão.	17
Figura 2.6 – Vista em corte da distribuição de temperaturas em um pistão e cilindro.....	19
Figura 2.7 – Dissipação térmica através de cada elemento do pistão.....	20
Figura 2.8 – Modelo Geral de um Experimento	27
Figura 2.9 – Experimento fatorial sem interação	35
Figura 2.10 – Experimento fatorial com interação	35
Figura 3.1 – Motor MWM Acteon 6.12TCE.....	43
Figura 3.2 – Fatores e Níveis da fase 01 do experimento.....	44
Figura 3.3 – Escolha do planejamento experimental.....	45
Figura 4.1 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: pressão de Carter	53
Figura 4.2 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: consumo de óleo.	54
Figura 4.3 – Desenvolvimento de pacote de anéis de pistão sem a utilização de ferramentas.....	55
baseadas em estatística.	55
Figura 4.4 – Desenvolvimento de pacote de anéis de pistão com a utilização de ferramentas baseadas em estatística.	55
Figura 4.5 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: pressão de Carter.	59
Figura 4.6 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: consumo de óleo.	60

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Redução dos limites de emissões de poluentes em ESC (norma europeia para veículos pesados movidos à Diesel)	2
Tabela 2.1 - Geometrias de anéis de corta-fogo.	13
Tabela 2.2 – Tipos de revestimento de anéis de corta-fogo.	13
Tabela 2.3 - Geometrias de anéis de estanqueidade	14
Tabela 2.4 - Geometrias de anéis de óleo	15
Tabela 2.6 – Experimento 2^2 com os respectivos resultados.....	33
Tabela 2.7 – Experimento 2^2 com interação entre os efeitos.....	34
Tabela 2.8 - Resultados de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos	37
Tabela 2.9 – Coeficientes de contraste	38
Tabela 2.10 – Valores dos efeitos.....	38
Tabela 3.1 – Especificação do motor Diesel utilizado no experimento	42
Tabela 4.1 – Dados referente à primeira fase do trabalho: escolha da melhor configuração entre componentes / fatorial completo.	50
Tabela 4.2 – Reorganização dos dados e análise de média e desvio padrão – resultados fase 1 – Resposta: Pressão de carter	51
Tabela 4.3 – Reorganização dos dados e análise de media e desvio padrão – resultados fase 1 – Resposta: Consumo de óleo.....	52
Tabela 4.4 Valores dos coeficientes dos efeitos e do erro padrão para as respostas	52
Tabela 4.5 - Dados referente à segunda fase do trabalho - estudo de robustez / fatorial fracionado	56
Tabela 4.6 – Resultados para pressão de carter (em amarelo as variáveis significativas)	57
Tabela 4.7 – Resultados para consumo de óleo (em verde as variáveis significativas)	58

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

a1	Profundidade do anel
d1	Diâmetro nominal do anel
Ft	Força tangencial (N) necessária para fechar a folga livre do anel até o diâmetro nominal
h	Hora
h1	Altura
g	Grama
m	Folga com o anel livre
N	Newton
R	Raio
s	Erro experimental
s1	Comprimento da folga com o anel montado
V	Variância
y	Variável resposta

Abreviações

F atrito	Atrito entre o anel e a parede do cilindro (Idem Fcontato)
Fcontato	Contato entre o anel e a parede do cilindro
Fd	Força diametral para manter o anel no diâmetro nominal
Ft	Força tangencial (N) necessária para fechar a folga livre do anel até o diâmetro nominal
Finf	Esforço inferior do canaleta do pistão
Finércia	Força de inércia
Fsup	Esforço superior do canaleta do pistão

Ftensão	Força de mola do anel
Mtotal	Momento em torno do próprio eixo do anel
Pcanalete	Pressão exercida pelos gases entre o anel e a parede do cilindro

Siglas

CO	Monóxido de carbono
CONAMA	Conselho nacional do meio ambiente
cv	Cavalo vapor
DOE	Design of Experiment
ECU	Engine Control Unit
EF	Valor do efeito
EPA	Environment Protection Agency
EPEF	Erro Padrão do Efeito
ESC	European Stationary Cycle
EURO	Norma Européia de emissões de poluentes
e _v	Número de graus de liberdade
GAP	Comprimento da folga com o anel montado
HC	Hidrocarbonetos
IC	Intervalo de Confiança
kW	kilowatt
MP	Material Particulado
N.m	Newton x metro
NO _x	Óxidos de nitrogênio
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PVD	Physical Vapor Deposition
rpm	Rotações por minuto
tv	Valor da distribuição t Student com 95% de confiança

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 SITUAÇÃO DO PROBLEMA	5
1.2 OBJETIVO	5
1.3 ETAPAS DE ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
2 REVISÃO DA LITERATURA.	7
2.1 ANÉIS DE PISTÃO	8
2.2 TIPOS DE ANÉIS	12
2.2.1 – Anéis corta-fogo	12
2.2.2 Anéis de Estanqueidade.....	14
2.2.3 Anéis de Controle de Óleo.....	15
2.3 VEDAÇÃO DOS GASES DA COMBUSTÃO	16
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DOS ANÉIS.....	18
2.5 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM ANÉIS.....	20
2.5.1 Elasticidade	20
2.5.2 Resistência à Corrosão.....	20
2.5.3 Baixo Peso	21
2.5.4 Tenacidade	21
2.6 MATERIAIS UTILIZADOS EM ANÉIS DE PISTÃO.....	21
2.7 REVESTIMENTOS APLICADOS EM ANÉIS CORTA-FOGO	21
2.8 ATRITO NOS ANÉIS DE PISTÃO	22
2.9 DESGASTE EM ANÉIS	23
2.9.1 Desgaste por Adesão	24
2.9.2 Desgaste Abrasivo	24
2.9.3 Desgaste Corrosivo	25
2.9.4 Desgaste por Fadiga de Contato.....	25
2.10 DESENVOLVIMENTO DE ANÉIS EM MOTORES.....	26
2.11 EXPERIMENTOS.....	26
2.12 PLANEJAMENTO FATORIAL	30
2.12.1 Planejamento Fatorial Completo ou Fatorial 2k.....	31
2.12.2 Planejamento Fatorial Fracionado 2 k-p.....	32
2.13 CÁLCULO DOS EFEITOS.....	33
2.14 CÁLCULO DA SIGNIFICÂNCIA DOS EFEITOS QUANDO OS EXPERIMENTOS POSSUEM RÉPLICAS	36

2.15 VERIFICAÇÃO DA SIGNIFICÂNCIA DOS EFEITOS QUANDO OS EXPERIMENTOS NÃO POSSUEM RÉPLICAS	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	50
4.1 ESCOLHA DA MELHOR CONFIGURAÇÃO ENTRE COMPONENTES.....	50
4.2 ESTUDO DE ROBUSTEZ.....	70
5 CONCLUSÕES.....	61
6 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	64
REFERÊNCIAS	65
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	69

1 INTRODUÇÃO

Devido à necessidade de meios de transporte cada vez mais eficientes, a engenharia da mobilidade foi desafiada a cada vez mais buscar soluções e alternativas para cada tipo de necessidade.

O transporte veicular é um dos meios mais utilizados, tanto para o transporte de pessoas quanto para escoar a produção dentro dos países. O transporte automotivo evoluiu muito nos últimos anos. Com o grande aumento do número de veículos no planeta, cresceu também a preocupação com o impacto ambiental de toda esta frota de veículos poluindo ao mesmo tempo. Para controlar esta situação, foram gerados mecanismos para mensurar e por limites a quantidade de gases poluentes que cada veículo gera. Com o passar do tempo, esses limites passaram a ser cada vez mais rígidos.

Conforme descrito por Calviti (2008) há que se considerar no processo de desenvolvimento de produtos e veículos, as demandas das legislações, que afetam o nível de ruído e poluentes emitido. Destacam-se as exigentes políticas de redução de emissão de poluentes aplicados em todos os mercados do mundo, liderados por frentes européias (EURO) e norte americanas (EPA – *Environment Protection Agency*) e expandidas ou adaptadas nos outros mercados pelos órgãos locais, ainda que normalmente defasadas. No caso do Brasil, o Conama, pelo programa Proconve, foi iniciado em 1986 e já está na sua 5ª fase, no caso de motores ciclo Diesel pesados.

A Figura 1.1 mostra, tomando como exemplo a legislação brasileira de emissões de veículos comerciais pesados movidos a Diesel, (que é baseada na legislação européia, diferenciando-se apenas na data de implementação de cada fase) o nível de redução dos limites a cada ciclo de evolução. São mostrados os 4 poluentes limitados pela legislação, e sua representação gráfica e proporções ao longo de cada etapa, sendo eles: NO_x, ou óxidos de nitrogênio, MP, ou material particulado, HC ou hidrocarbonetos e CO, ou monóxido de carbono, todos em g/kW.h, medidos em ciclo de dinamômetro ESC (Ciclo Estacionário Europeu – *European Stationary Cycle*).

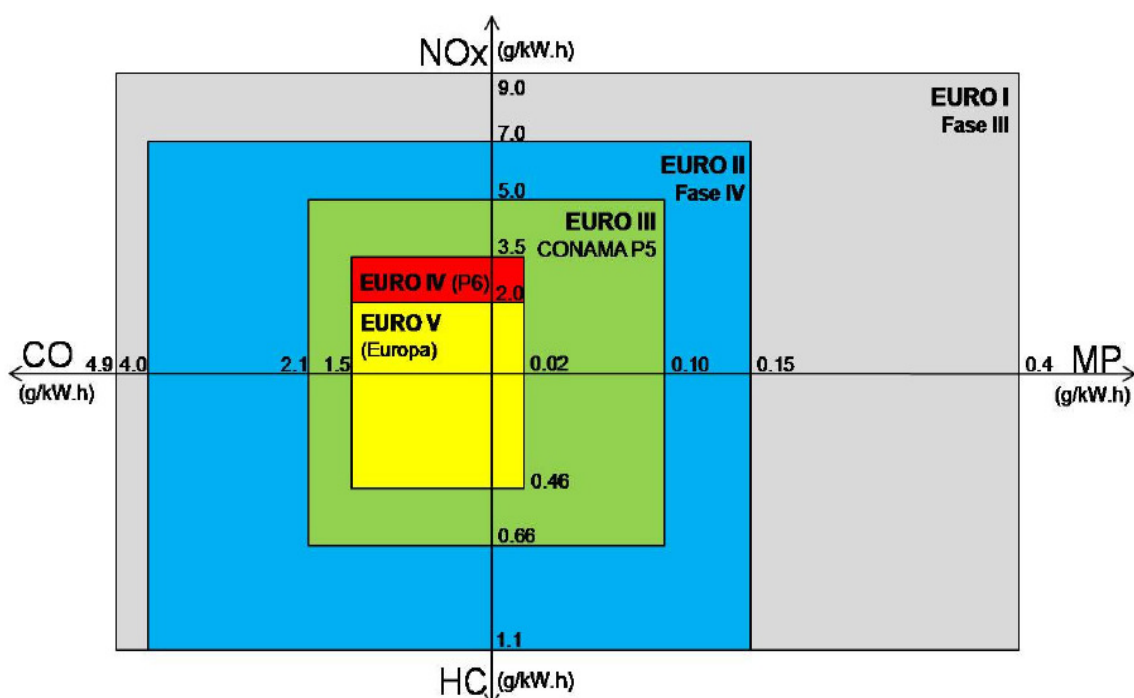


Figura 1.1 – Limites de emissões de poluentes em ESC (legislação Brasileira para veículos pesados movidos à Diesel) (adaptada de: www.dieselnet.com)

Tabela 1.1 – Redução dos limites de emissões de poluentes em ESC (norma européia para veículos pesados movidos à Diesel) (adaptada de www.dieselnet.com)

Fase	Ano	MP		NOX		CO		HC	
		Limite g/kW.h	% redução	Limite g/kW.h	% redução	Limite g/kW.h	% redução	Limite g/kW.h	% redução
Euro I	1992	0,36	NA	8,00	NA	4,50	NA	1,10	NA
Euro II	1996	0,15	58,33	7,00	12,50	4,00	11,11	1,10	0,00
Euro III	2000	0,10	33,33	5,00	28,57	2,10	47,50	0,66	40,00
Euro IV	2006	0,02	80,00	3,50	30,00	1,50	28,57	0,46	30,30
Euro V	2009	0,02	0,00	2,00	42,86	1,50	0,00	0,46	0,00

Na Tabela 1.1 vê-se que a redução dos limites de poluentes conforme a evolução para cada fase da legislação foi drástica, para um intervalo de tempo relativamente baixo. Por esse motivo, os motores de combustão interna, tanto ciclo Diesel quanto ciclo Otto evoluíram para atender a demanda de cada fase. Foram adotadas mudanças drásticas nos sistemas de gerenciamento de combustível, sistemas de admissão de ar evoluíram (utilização de turbocompressor e intercooler), também foram desenvolvidos sistemas de pós-tratamento dos gases resultantes da combustão. Conceitos de construção também foram totalmente modificados.

Conforme descrito por Calviti (2008), em paralelo a toda esta evolução, cresceu também a necessidade na melhoria da qualidade dos produtos. Cada vez mais, o consumidor deseja produtos específicos para cada necessidade. No caso de veículos movidos com motores ciclo Diesel, que são o tema desta dissertação, o que se espera é confiabilidade, baixo consumo de combustível, desempenho e custo competitivo.

Segundo Juran (1991), um produto deve ser projetado e desenvolvido visando a satisfação do cliente. As características desejadas são fornecidas pelos clientes, e no processo produtivo são criadas condições para que o produto atenda aos anseios do consumidor, inclusive em termos de adequação do preço.

Para atender todos estes requisitos, os fabricantes de motores vêm revolucionando os conceitos do motor Diesel. Hoje existe uma preocupação em desenvolver motores com materiais mais leves, mas que possam trabalhar com pressões e temperaturas cada vez maiores. Os motores também estão cada vez menores e mais eficientes.

Desenvolver os componentes para estes motores vem sendo um desafio. O conhecimento técnico, que sempre vai ser a base para realizar este trabalho é auxiliado pela aplicação de praticas e ferramentas para que os projetos sejam realizados dentro de um prazo cada vez mais desafiador, preservando a qualidade e o desempenho do produto. O custo para desenvolver o projeto também é um fator de grande relevância.

O planejamento multivariado de experimentos vem sendo uma destas ferramentas, que possui um grande potencial de aplicação em muitas etapas do processo de desenvolvimento de motores. Atualmente já existem ferramentas e aplicativos de softwares baseados em planejamento multivariado de experimentos que são amplamente utilizados para o desenvolvimento dos parâmetros de combustão do motor. Para preenchimento das tabelas com os valores dos parâmetros de combustão, denominadas na indústria como mapas do sistema de injeção de combustível, o planejamento multivariado de experimentos é a ferramenta ideal para otimização dos resultados e também do tempo necessário para realização deste trabalho.

De acordo com Lourenço (2008), o planejamento multivariado de experimentos também pode ser utilizado em outras situações, como no desenvolvimento de componentes, onde é necessário se comparar o desempenho de diferentes conceitos. Outro exemplo de aplicação é a utilização do projeto de experimentos para comprovar um resultado de um software de simulação numérica, ou também como uma alternativa, quando não se tem a segurança ideal nos dados utilizados ou na precisão da simulação.

Outra fase onde o planejamento multivariado de experimentos pode ser amplamente utilizado é no estudo de robustez do produto, onde se pode estudar a influência de vários fatores simultaneamente nos resultados de parâmetros importantes do motor.

1.1 Situação do problema

Hoje, a maioria das ferramentas eficazes de simulação e definição dos componentes que compõem o sistema de transmissão de potência (pistões, anéis, camisas) não estão em poder do fabricante do motor, e sim com os fornecedores destas peças, que detêm a tecnologia de cada componente. Já os fornecedores dos componentes não têm a visão exata de como o sistema se comporta devido a interação de diversos componentes, que muitas vezes, são fornecidos por fabricantes diferentes.

Por este motivo, muitas vezes a simulação aponta para uma solução que não se comprova na análise experimental, com isso novas simulações devem ser realizadas e novos componentes devem ser construídos, impactando de forma negativa os prazos de execução do projeto.

Com a aplicação de ferramentas de planejamento estatístico de experimentos, este risco será reduzido, onde uma avaliação experimental mais detalhada antes da realização da simulação numérica irá direcionar qual a melhor solução a ser utilizada, além de alimentar o modelo matemático de uma forma mais precisa. Com isso o fabricante do motor terá um envolvimento maior na definição da tecnologia a ser utilizada no produto final - motor, o que aumenta a confiabilidade do projeto e dá um respaldo técnico maior na discussão com cada fornecedor sobre a melhor solução a ser adotada observando desempenho e custo respectivamente.

1.2 Objetivo

O presente trabalho pretende contribuir com informações que podem conduzir ao conhecimento necessário para aplicação de planejamento multivariado, no processo de desenvolvimento de componentes do sistema de transmissão de potência de um motor Diesel, buscando uma diminuição no tempo para realizar esta atividade, promovendo então a robustez para a implementação do projeto.

1.3 Etapas de Organização do Trabalho

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução do tema, mostrando um panorama sobre o desenvolvimento e a evolução do motor Diesel, temas relacionados a processos de desenvolvimento de produtos e também planejamento multivariado.

O capítulo 2 descreve a revisão bibliográfica dos temas relacionados a motores Diesel com foco no sistema de transmissão de potência e sobre tudo, o sistema de anéis de pistão, mostrando a complexidade em se desenvolver tais componentes dentro da indústria. Também descreve uma revisão bibliográfica sobre as metodologias de planejamento multivariado, para experimento do tipo fatorial completo com réplicas e também do tipo fatorial fracionado.

O planejamento experimental realizado com a metodologia de ensaio para levantamento dos dados a serem estudados, está apresentada no capítulo 3.

O capítulo 4 mostra as tabelas com os resultados obtidos após a finalização de todos os testes, também exhibe as análises destes dados e o resultado após a aplicação das metodologias de planejamento multivariado.

No capítulo 5 estão descritas todas as conclusões após análise dos resultados obtidos na realização dos ensaios e também após a aplicação do planejamento multivariado.

Finalmente, Comentários, Sugestões, Referências e Bibliografia Consultada, fecham o texto desta dissertação de mestrado.

2 REVISÃO DA LITERATURA.

Conforme descrito por Glyniadakis (2009), Os motores de combustão interna podem ser divididos nos seguintes sistemas:

- Estrutural (bloco, cabeçote, suportes,...);
- Transmissão de Potencia (virabrequim, biela, pistões, anéis, camisas...);
- Lubrificação (bomba de óleo, ejetores de óleo,...);
- Gerenciamento de ar (turbo compressor, válvulas EGR e borboleta, coletores de admissão e escape,...);
- Arrefecimento (trocadores de calor, bomba d'água, válvula termostática,...);
- Elétrico (ECU, sensores, atuadores,...);
- Combustível (bomba de injeção de combustível, bomba alimentadora, bicos injetores, filtros,...);
- Auxiliar (compressor de ar, alternadores, bomba hidráulica,...);
- Distribuição e sincronismo (válvulas de admissão e escape, comando de válvulas, balanceiros, correia dentada, corrente, engrenagens,...)

Na Figura 2.1 vê-se o sistema de transmissão de potência com seus principais componentes.

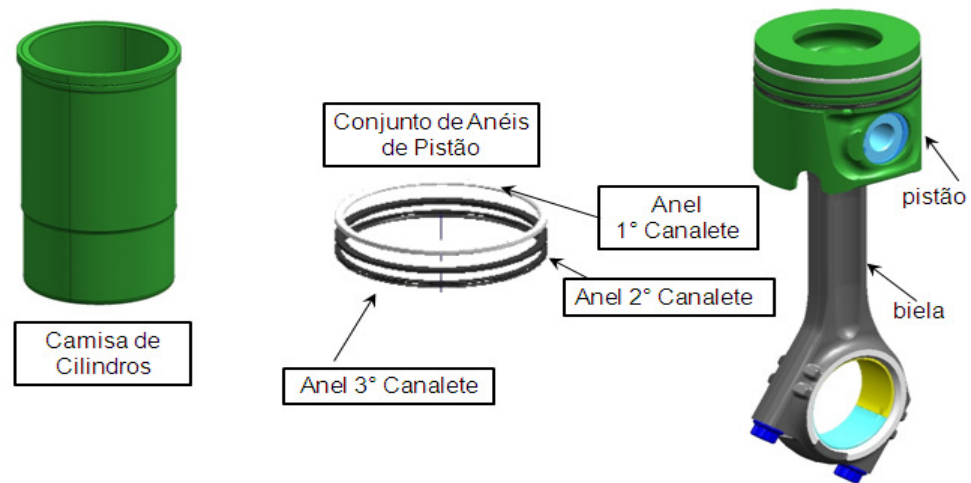


Figura 2.1 – Exemplo de um sistema de transmissão de potência de um motor ciclo Diesel

2.1 Anéis de Pistão

Conforme descrito por Volci (2007), este subsistema do sistema de transmissão de potência é responsável pela manutenção da vedação da câmara de combustão e tem influência direta no desempenho do motor, sendo também o principal responsável pelo consumo de óleo durante a vida do motor. O consumo de óleo controlado pelos anéis também influencia diretamente a quantidade de gases emitidos pelo motor e por consequência o respeito às normas de emissões.

Estes elementos são responsáveis por três funções primordiais para o funcionamento do motor:

1. Vedação da câmara de combustão com o bloco do motor em relação aos gases produzidos na câmara de combustão e resíduos da injeção não queimados (YOSHIDA, 1990);
2. Limitação e regulação do consumo de óleo do motor;
3. Transferência do calor gerado pela combustão para a área refrigerada do cilindro no bloco.

Em motores de combustão interna, os anéis de pistão têm sido largamente utilizados como soluções viáveis para estas aplicações e têm sido objeto de diversos desenvolvimentos e pesquisas que visam o aumento do rendimento dos motores alternativos e o atendimento das evoluções das normas de emissão de poluentes em todo o mundo (FEUGA, 1984).

Em relação à sua função, é possível estabelecer duas categorias de anéis:

1. Os anéis de compressão, sendo que o primeiro anel de um motor à combustão interna é chamado de anel corta fogo, e o segundo é chamado de anel de estanqueidade;
2. Os anéis raspadores de óleo, os quais têm a função de assegurar e regularizar o filme de óleo durante o movimento alternativo do pistão;

O gás que flui da câmara de combustão para o cárter de óleo situado na parte inferior dos motores é novamente aspirado pelo sistema de gases do motor (*Blow-by*) e admitido para ser queimado. Porém os resíduos de combustão presentes nestes gases degradam as propriedades do óleo lubrificante e aderem sob forma de depósitos nas canaletas dos pistões, nas superfícies dos anéis e até mesmo nas paredes dos cilindros (MUNRO, 1981). Estes depósitos podem atacar os anéis e cilindros provocando desgastes consideráveis, e desta maneira aumentar a fuga de gases da câmara de combustão para o cárter de óleo (TAYLOR, 1993).

De acordo com Volci (2007) a qualidade da combustão e o tipo de combustível utilizado têm influências significativas sobre a geração e circulação destes depósitos resultantes da combustão da mistura ar-combustível.

Segundo Yüksel (2004), as aplicações comerciais nos dias de hoje envolvem diversos tipos de motores que utilizam combustíveis dos mais variados: gasolina, Diesel, GNV, GPL, metanol, e mais recentemente os biocombustíveis como o biodiesel e o álcool. Sendo que cada aplicação apresenta solicitações térmicas e mecânicas diferentes que interferem diretamente no comportamento dos anéis, os quais têm que resistir a elevados gradientes de pressão e temperatura e mesmo assim manter sua eficiência e durabilidade.

Os anéis de pistão são retentores metálicos responsáveis basicamente por duas funções primordiais no funcionamento de um motor à combustão interna:

- 1) Manter os gases pressurizados da combustão na parte superior do pistão
- 2) Manter o óleo do motor abaixo do pistão

A segunda função se tornou mais importante nos últimos tempos em função do maior rigor das normas de emissões. Isto foi evidenciado por Andersson (2003). Esta segunda função evita o consumo excessivo de óleo lubrificante durante o funcionamento do motor e por consequência a emissão de poluentes resultantes desta queima (RABUTÉ, 2001). Além destas funções os anéis também cumprem importante papel na dissipação térmica do pistão, conduzindo calor do pistão para a parede do cilindro do bloco do motor (PRIEST, 2000).

Para atingir seu propósito, Fergurson (1985), destaca que os anéis do pistão devem estar em contato constante com o bloco do motor na região do cilindro, bem como com o canaleta superior e inferior do pistão. Para Basshuysen (2004) o contato com a parede do cilindro é mantido pela ação de mola do anel, ou também chamada de força tangencial, que faz o anel expandir radialmente contra o cilindro.

A Figura 2.2 mostra as forças atuantes sobre um anel de pistão conforme Andersson (2002). O anel está sujeito aos esforços devido ao contato com o pistão, como o esforço superior do canaleta (F_{sup}) e inferior (F_{inf}), e a pressão exercida pelos gases entre o anel e o fundo do canaleta ($P_{canaleta}$). Esforços de atrito também estão presentes, como o atrito entre o anel e a parede do cilindro (F_{atrito} / $F_{contato}$). Devido à sua massa em movimento, o anel também está sujeito aos esforços de inércia ($F_{inércia}$) e a um momento em torno de seu eixo (M_{total}). Além de todas essas componentes existe também a força de mola do anel ($F_{tensão}$), a qual é resultado do próprio processo de fabricação do anel que lhe proporciona um efeito de mola contra as paredes do cilindro quando montado em sua posição de funcionamento.

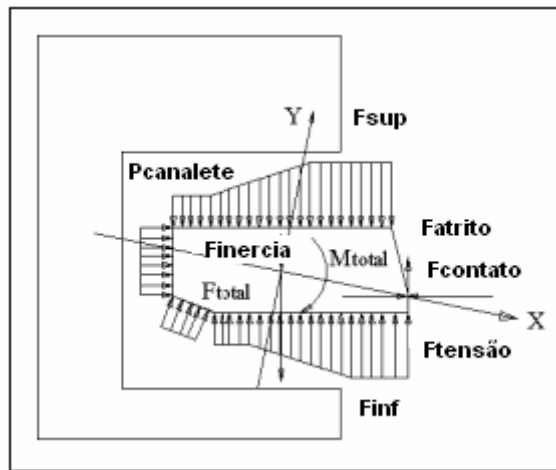


Figura 2.2 – Forças sobre um anel de pistão.

Fonte: Anderson (2002).

De acordo com Guibet (2000) a pressão dos gases na câmara de combustão aumenta o contato radial e axial com o canaleta do pistão. O contato axial alterna entre o flanco superior e inferior do canaleta devido à influência da massa do anel, da pressão de combustão e do atrito com o cilindro e o canaleta.

O número de anéis por pistão influencia a perda por atrito em um motor, e as massas dos anéis fazem parte das massas oscilantes de um motor conforme Ligier e Baron (2002). Estas razões conduziram a uma política de menores e poucos anéis por pistão (MAHLE METAL LEVE, 2003). Para Ricardo (1952) uma configuração com três anéis é padrão, com dois anéis de compressão e um anel de controle de óleo.

Rogowski (1953) salienta que arranjos com dois anéis apenas, visando uma redução de perdas por atrito, são igualmente encontrados em veículos de competição e também em veículos de série de alto desempenho. Porém, para Tung (2003), aqui se deve ter em conta que se um anel apresentar uma falha, a função de vedação de todo o conjunto será comprometida.

A Figura 2.3 mostra o posicionamento do pacote de anéis sobre o conjunto pistão e biela e também um exemplo de pistão com os anéis montados sobre os canaletes do pistão.



Figura 2.3 – Conjunto pistão-biela e pacote de anéis montados sobre um pistão.

Fonte: MWM, 2011.

2.2 Tipos de Anéis

2.2.1 – Anéis corta-fogo

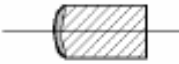
O anel de primeiro canaleta, também chamado de anel corta-fogo, geralmente trata-se de um anel retangular ou de face inclinada. A superfície de contato com o cilindro é geralmente abaulada. Em anéis de ferro fundido a superfície de contato é protegida contra o desgaste mediante revestimento de cromo ou molibdênio (VOLCI, 2007). Segundo Linchty (1951) anéis de aço nitretados também constituem uma alternativa ao desgaste. Na presença das altas temperaturas da câmara formam-se depósitos de resíduos de combustível e óleo lubrificante entre o anel e o canaleta, que reduzem a mobilidade do anel. Um anel de forma trapezoidal oferece maior segurança contra a deposição de resíduos que possam bloquear o funcionamento do anel, sendo frequentemente utilizado em motores Diesel (HEISLER, 1995).

A Tabela 2.1 mostra exemplos de geometrias de anéis corta-fogo e a Tabela 2.2 mostra os tipos de revestimento que podem ser aplicados aos anéis corta fogo.

Tabela 2.1 - Geometrias de anéis de corta-fogo. Adaptado de KS PISTÕES (2001).

Tipo de anel Corta-fogo	Representação geométrica
Anel retangular com face abaulada simétrica	
Anel retangular com face abaulada assimétrica	
Anel trapezoidal	
Anel trapezoidal com chanfro de torção direta	
Anel ½ trapezoidal	
Anel retangular abaulado com chanfro de torção direta	
Anel chanfrado	

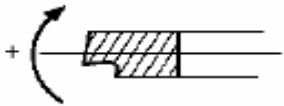
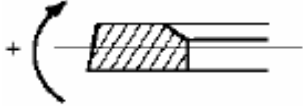
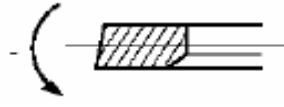
Tabela 2.2 – Tipos de revestimento de anéis de corta-fogo. Adaptado de KS PISTÕES (2001).

Localização do revestimento sobre a face de contato com o cilindro	Representação geométrica
Revestimento sobre toda a face	
Revestimento depositado sobre uma canaleta	
Revestimento depositado sobre uma canaleta não centrada	

2.2.2 Anéis de Estanqueidade

O segundo anel, chamado de anel de estanqueidade, é projetado geralmente como anel de face inclinada, com uma ação pronunciada de remoção de óleo. Assim age não somente como segundo estágio da vedação dos gases e equilíbrio de pressão no segundo cordão do pistão, mas também contribui na redução do consumo de óleo. A Tabela 2.3 mostra alguns tipos de anéis de estanqueidade (VOLCI, 2007).

Tabela 2.3 - Geometrias de anéis de estanqueidade.

Tipo de anel de Estanqueidade	Representação geométrica
Anel cônico simples	
Anel com extremidade inferior no formato de "bico de águia"	
Anel cônico com chanfro de torção direta	
Anel cônico com chanfro de torção indireta	

Fonte: KS PISTÕES (2001).

2.2.3 Anéis de Controle de Óleo

Além dos anéis de compressão, que têm seu papel como barreiras para os gases da combustão, o pistão precisa de um mecanismo que controle a quantidade de óleo presente sobre a superfície do cilindro. Este controle visa formar uma película constante de óleo sobre o cilindro, que permita o deslizamento do pistão e anéis sobre a superfície do cilindro com atrito reduzido, porém impedindo que o óleo chegue à câmara de combustão e seja queimado (ANDERSSON, 2002).

Para o terceiro canaleta, onde se localiza o anel raspador ou anel de óleo, já foram desenvolvidas diversas construções de anéis de pistão. Anéis sob tensão de mola adaptam-se melhor aos cilindros na falta de uma circularidade ideal e conseguem um ótimo efeito de raspagem de óleo. Algumas características importantes do anel de óleo, para obter um consumo reduzido e pequenas perdas por atrito, são intercanaletes pequenos e pouco distanciados entre si (KS PISTÕES, 2001). Na Tabela 2.4 são mostradas algumas configurações de anéis raspadores.

Tabela 2.4 - Geometrias de anéis de óleo.

Tipo de anel de óleo	Representação geométrica
Anel composto de 2 peças	
Anel composto de 3 peças	
Anel tipo U-Flex	

Fonte: KS PISTÕES (2001).

2.3 Vedação dos Gases da Combustão

Conforme descrito por Volci (2007), em sua posição de instalação no motor (anel fechado), o anel deve formar um círculo no qual toda a sua circunferência deve estar em contato com a parede do cilindro. Este é um requisito crítico para o bom funcionamento do sistema. Se o anel não vedar bem os gases contra o cilindro, gases da combustão e óleo passarão através desta barreira. É interessante notar que os anéis não pressionam com força uniforme toda a parede do cilindro, esta pressão é desigual e é controlada durante a fabricação do anel para garantir que a distribuição de pressão desejada seja obtida durante o funcionamento do motor.

A Figura 2.4 abaixo mostra como a pressão de contato dos anéis pode ser diferente, de acordo com cada projeto de anel e requisitos de funcionamento do motor.

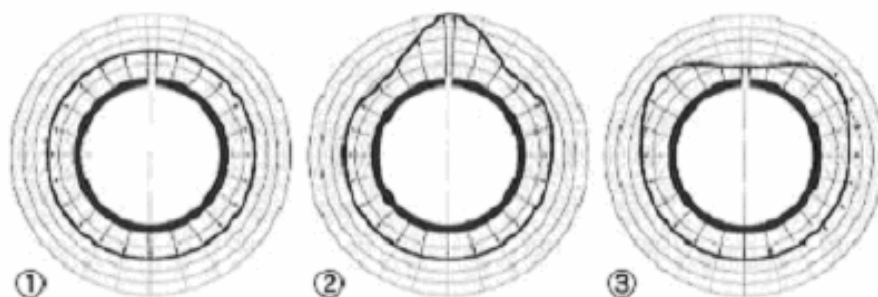


Figura 2.4 – Tipos variados de distribuição da pressão de contato em anéis.

Fonte: Riken (2006).

A Figura 2.4 indica: (1) distribuição constante, (2) distribuição em formato pêra, (3) distribuição em formato maçã.

A folga livre do anel e o formato da folga determinarão como a distribuição de pressão ocorrerá quando o anel estiver montado. Esta folga deve ser projetada para ter o mínimo movimento de oscilação vertical para garantir uma ótima vedação dos gases da combustão. A distribuição de pressão dos anéis de um pistão deve ser adequada ao projeto do motor, para garantir a pressão ideal para vedação dos gases sem comprometer em excesso o aumento de atrito com o cilindro (VOLCI 2007).

Para garantir a estanqueidade da câmara de combustão, os anéis de pistão são fabricados com dimensões definidas em projeto e validados em ensaios de durabilidade, de acordo com o tipo do motor e condições que o mesmo funcionará. Para isto, uma série de parâmetros são especificados e controlados nos anéis de pistão. A Figura 2.5 mostra as principais dimensões de fabricação e controle em anéis de pistões.

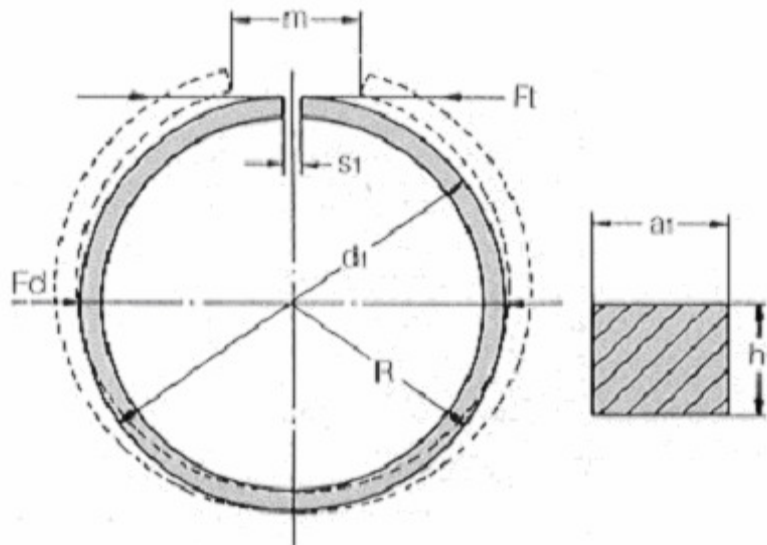


Figura 2.5 – Características controladas em anéis de pistão.

Fonte: Riken (2006).

Principais dimensões demonstradas na Figura 2.5:

d1: diâmetro nominal (mm) R: raio (mm)

h1: altura (mm) a1: profundidade (mm)

s1: comprimento da folga no anel montado (mm) m: folga com o anel livre (mm)

Ft: força tangencial (N) necessária para fechar a folga livre do anel até o diâmetro nominal.

Fd: Força diametral (N) necessária para manter o anel no diâmetro nominal, aplicada à 90° da folga.

2.4 Transferência de Calor através dos Anéis

O pistão e os anéis estão em constante contato com os gases quentes da combustão. A Figura 2.6 mostra um exemplo de mapeamento de temperaturas sobre o bloco de um motor em funcionamento. A faixa de temperaturas usual neste caso se situa entre 184°C e 201°C na região de contato dos anéis.

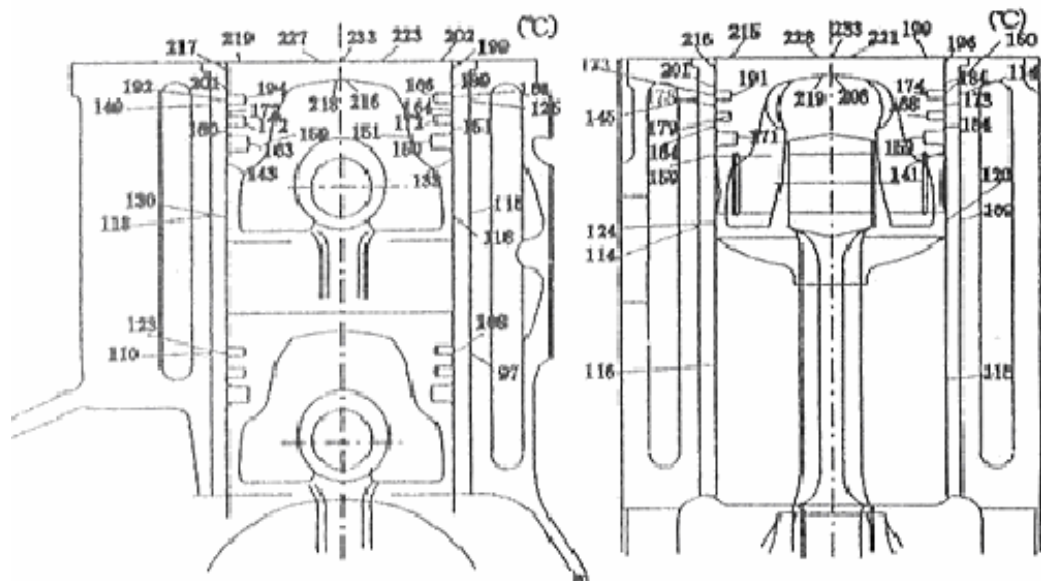


Figura 2.6 – Vista em corte da distribuição de temperaturas em um pistão e cilindro.
Fonte: Riken (2006).

A energia térmica gerada na combustão e que é transferida durante esse processo para o pistão também é transferida em parte pelos anéis para a parede do cilindro. Na sequência o calor vai da parede do cilindro para o fluido de arrefecimento que circula dentro das galerias de resfriamento do bloco do motor ou para o ar exterior. Como os anéis estão em permanente contato com o pistão, constantemente estão recebendo calor e transferindo para a parede do cilindro (VOLCI, 2007).

A Figura 2.7 mostra um exemplo de divisão da carga térmica dissipada por cada elemento do pistão em 2 condições de funcionamento: uma rotação do motor de 1500 rpm sem carga e 3000 rpm com 100% de carga. Pode-se evidenciar que cerca de 70% do calor do pistão é dissipado pelo conjunto de anéis. Devido a este papel importante na dissipação térmica a escolha do material adequado para os anéis de pistão é muito importante para o correto funcionamento térmico do conjunto



Figura 2.7 – Dissipação térmica através de cada elemento do pistão.
Fonte: Riken (2006)

2.5 Características dos Materiais Utilizados em Anéis

Conforme descrito por Volci (2007), os materiais utilizados em anéis de pistão devem possuir as seguintes características, de modo a permitir um correto funcionamento do motor, nas diversas condições de operação do sistema durante toda a vida do veículo.

2.5.1 Elasticidade

O material do anel deve permitir um funcionamento elástico (como mola) quando o anel se encontra fechado no cilindro. O efeito mola gera a tensão sobre as paredes do cilindro que garantem a estanqueidade da câmara de combustão.

2.5.2 Resistência à Corrosão

O material deve ser resistente a solicitações de agentes químicos causados pelos gases da combustão e altas temperaturas de trabalho.

2.5.3 Baixo Peso

Com o objetivo de reduzir as massas oscilantes em um motor de combustão interna, os anéis de pistão devem contribuir com o mínimo de inércia para o sistema, que contribui diretamente para as perdas de energia e aumento do desgaste entre os materiais em contato.

2.5.4 Tenacidade

O material deve resistir a elevadas forças e ao mesmo tempo ser capaz de se deformar, garantindo uma conformidade com o cilindro sem riscos de quebra ou fadiga de trabalho.

2.6 Materiais Utilizados em Anéis de Pistão

Atualmente sobre diversos motores, podem ser encontradas duas grandes famílias de materiais utilizados:

Ferro fundido (Nodular ou Lamelar);

Aço carbono (com processo de tempera com revenimento ou inoxidável);

2.7 Revestimentos Aplicados em Anéis Corta-Fogo

Os anéis corta-fogo são extremamente solicitados em relação à pressão e temperatura. Seu funcionamento frequentemente ocorre em situação limite de lubrificação com ruptura do filme de óleo entre a área de contato do anel e a parede do cilindro. Com o objetivo de proporcionar ao anel e ao cilindro uma vida útil máxima de funcionamento (resistência ao desgaste abrasivo) e evitar o engripamento do anel durante o contato com o cilindro, normalmente estes anéis possuem um revestimento ou são tratados termicamente.

Atualmente quatro grandes famílias de soluções são amplamente utilizadas nos anéis corta-fogo:

- Revestimento eletrolítico de cromo
- Revestimento de molibdênio por plasma
- Nitretação de anéis em aço inox
- Depósito iônico do tipo PVD (Physical Vapor Deposition)

2.8 Atrito nos Anéis de Pistão

O deslizamento entre os anéis do pistão e o cilindro está sujeito a diferentes mecanismos de atrito durante um ciclo térmico de trabalho do motor. Devido às variações de carga, velocidade e estado da superfície de contato do cilindro, as condições de lubrificação entre o anel e o cilindro são extremamente transientes, as quais refletem na variação do coeficiente de atrito e no comportamento em relação ao desgaste. O atrito do anel é determinado pela carga aplicada sobre o mesmo. As propriedades da superfície de contato e as condições de lubrificação são determinadas pela velocidade de deslizamento, viscosidade do óleo e a quantidade de lubrificante presente na interface de contato. A carga sobre o anel é gerada pela pré-tensão do anel (força tangencial) e pela força exercida pelo gás de combustão na parte traseira do anel (dentro do canaleta do pistão) (VOLCI, 2007).

Os mecanismos de atrito atuantes entre os anéis de pistão e o cilindro durante o funcionamento do motor incluem uma combinação de lubrificação limite e mista, no ponto morto inferior e superior do mecanismo biela-manivela, enquanto no meio-curso de funcionamento do pistão apresentam um comportamento hidrodinâmico de lubrificação. A máxima força de atrito, a qual ocorre sobre condições de lubrificação mista nas regiões próximas do ponto morto superior do motor, têm sido reduzidas com o aumento da viscosidade dos lubrificantes, enquanto que a pressão de atrito, influenciada fortemente pela lubrificação hidrodinâmica presente entre o ponto morto superior e inferior do cilindro, sofre um aumento com a redução da viscosidade do óleo lubrificante utilizado (ANDERSSON, 2002).

A formulação do óleo lubrificante afeta fortemente o contato limite entre as superfícies dos anéis e cilindros. Aditivos com a função de diminuir o desgaste, como àqueles à base de molibdênio utilizados em lubrificantes, contribuem positivamente para a formação de uma camada resistente ao desgaste entre os componentes. A quantidade de lubrificante, disponível entre as superfícies em contato, determina o mecanismo de atrito nas condições de funcionamento de ponto motor superior e inferior do movimento dos anéis. O efeito da lubrificação hidrodinâmica é responsável pela determinação do mecanismo de atrito durante deslocamento do pistão na região central do cilindro (TRUHAN, 2005). Além da lubrificação, a carga, velocidade, viscosidade e geometria de contato são determinantes no contato deslizante do anel.

2.9 Desgaste em Anéis

Os anéis de um pistão estão sujeitos a complexas e severas condições tribológicas que envolvem velocidades médias de até 20 m/s, pressões de até 200bar, rugosidades de cilindros em condições variáveis durante a vida e parede do cilindro à temperatura em torno de 100 °C.

Normalmente o desgaste dos anéis de pistão é considerado como um mecanismo envolvendo dois corpos em contato (anel e cilindro), mas no funcionamento do motor este mecanismo é na realidade muito mais complexo (VOLCI, 2007).

Podemos considerar que o mecanismo de desgaste envolve 3 corpos, sendo o terceiro corpo fruto do próprio desgaste ocasionado no contato (partículas do anel ou cilindro), ou contaminantes presentes no óleo lubrificante. Estes contaminantes podem ser provenientes do desgaste de outras partes do motor, agentes externos como poeira, por exemplo, ou depósitos gerados pelo processo de combustão do motor, entre outros. Todos estes elementos contribuem para a aceleração do desgaste dos anéis de pistão como partículas abrasivas entre o anel e o cilindro (DOWSON, 2003).

Os mecanismos de desgaste identificados em anéis de pistão podem ser de diferentes origens em função da fase de funcionamento, período da vida do componente e condições de

trabalho (RABINOWICZ, 1995). Dentro da literatura encontramos diversas apelações possíveis, porém podemos classificar as principais, de uma forma geral, da seguinte maneira (ANDERSSON, 2002):

- Desgaste por adesão;
- Desgaste por abrasão;
- Desgaste por corrosão;
- Desgaste por fadiga de contato.

2.9.1 Desgaste por Adesão

O desgaste por adesão ocorre quando duas superfícies em contato deslizam uma sobre a outra e as asperezas dos materiais entram em contato gerando fragmentos que se desprendem de um dos corpos e se aderem ao outro. Estes fragmentos podem igualmente se desprender após a adesão e continuarem presentes no meio em contato como suspensão no filme de lubrificação ou serem expelidos através da circulação do mesmo lubrificante. Este desprendimento de material normalmente ocorre em maior quantidade do pistão para o anel, onde partículas do material do pistão (normalmente em alumínio nos dias atuais) se aderem à superfície do anel.

2.9.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é fruto da interação entre superfícies que possuem diferentes durezas, sendo que uma superfície mais dura, ou a presença de partículas duras no material, quando em contato com outro corpo de menor dureza, pode provocar o desgaste deste contra-corpo (TOMANIK, 2003).

No caso dos motores de combustão interna, e especificamente no sistema tribológico dos anéis de pistão, as partículas frequentemente presentes e que podem contribuir para o desgaste abrasivo, normalmente são as seguintes:

- Óxido de silício proveniente do processo de fabricação de peças fundidas que utilizam areia;
- Partículas provenientes do desgaste de componentes metálicos do motor;
- Partículas de óxidos provenientes da oxidação de partes do motor;
- Resíduos do processo de combustão que são gerados na câmara de combustão e acabam por poluir a região de contato entre o anel e o cilindro;
- Contaminantes provenientes da admissão de ar do motor como a poeira;
- Revestimentos dos anéis arrancados pelo próprio mecanismo de desgaste;

2.9.3 Desgaste Corrosivo

O desgaste corrosivo é também parte dos fenômenos aos quais os anéis de pistão estão sujeitos. Este desgaste ocorre sempre que as superfícies em contato se encontram em um ambiente corrosivo (McGEEHAN, 1978). O deslizamento entre as superfícies provoca a remoção do filme protetor formado, facilitando assim o ataque corrosivo destas superfícies pelo meio (GAHR, 1987). O desgaste corrosivo deve-se às diversas reações químicas que ocorrem na câmara de combustão na presença de óleo lubrificante, combustível e o próprio ar (TUNG, 2004). A presença de enxofre no combustível aumenta o desgaste corrosivo (SABURI, 2005).

2.9.4 Desgaste por Fadiga de Contato

Os anéis de pistão estão sujeitos também a falhas por fadiga de contato. Este tipo de desgaste por fadiga ocorre devido ao funcionamento cíclico repetitivo dos anéis sobre o cilindro do motor. A repetição de carregamentos e descarregamentos provoca deformações plásticas sobre a superfície de contato do anel com o cilindro podendo induzir à formação de trincas na superfície ou logo abaixo da superfície.

Estas trincas podem evoluir e se unirem em fragmentos maiores que se deslocam da superfície do anel (TOMANIK, 2000). O desprendimento destes fragmentos da superfície de contato do anel pode ocasionar diversos problemas em funcionamento, como riscos na parede do

cilindro, princípios de engripamento do anel com o cilindro, deterioração da saia do pistão, além de diminuir a área de contato do anel com o cilindro, prejudicando a vedação dos gases da combustão e permitindo a passagem de óleo (SABURI, 2005).

2.10 Desenvolvimento de Anéis em Motores

Conforme visto nos tópicos anteriores, o sistema tribológico que envolve os anéis do pistão de um motor de combustão interna pode ser considerado de alta complexidade. Este sofre influência de cargas alternadas, velocidades variáveis e cíclicas durante sua vida útil. As superfícies possuem acabamentos desiguais e se modificam em função do tempo de trabalho. Deve ser considerado também o efeito do atrito hidrodinâmico, a presença de substâncias corrosivas com composições variáveis durante o funcionamento, passagem e aprisionamento de partículas resultantes da combustão do motor, funcionamento em condições adversas de temperaturas e paradas do sistema. Além da possibilidade de contaminação por agentes externos como poeira e água. Todos estes parâmetros são importantes para a vida útil dos anéis e também para o seu correto funcionamento, sendo que a rugosidade de cada um dos anéis e do cilindro evolui com o período de uso do motor influenciando no desgaste e durabilidade deste componente.

Devido a esta complexidade, cada vez mais se torna necessário o uso de práticas para aperfeiçoar o processo de desenvolvimento e validação deste componente, onde a metodologia de experimentos com a utilização de planejamento multivariado é uma ferramenta poderosa para este tipo de necessidade.

2.11 Experimentos

Segundo Taguchi (1993) experimentos podem ser realizados para se encontrar os níveis dos fatores do sistema que minimizam os desvios das características funcionais em relação aos valores nominais do projeto. São estabelecidos, desta forma, os níveis ótimos dos fatores e as tolerâncias aceitáveis.

O planejamento de experimentos tem como principal função melhorar a qualidade dos produtos e ou processos, avaliando um maior número de variáveis e mesmo assim reduzindo o número de testes e otimizando o uso de recursos (GALDAMEZ, 2002).

Conforme descrito por Montgomery (1997), experimentos são realizados por investigadores das mais variadas áreas, usualmente para descobrir alguma coisa sobre um processo ou sistema particular. Literalmente, um experimento é um teste. Um experimento planejado é um teste, ou uma série de testes, nos quais são feitas alterações planejadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, permitindo observar e identificar os efeitos das mudanças na variável de saída (resposta) conforme pode ser observado na Figura 2.8.

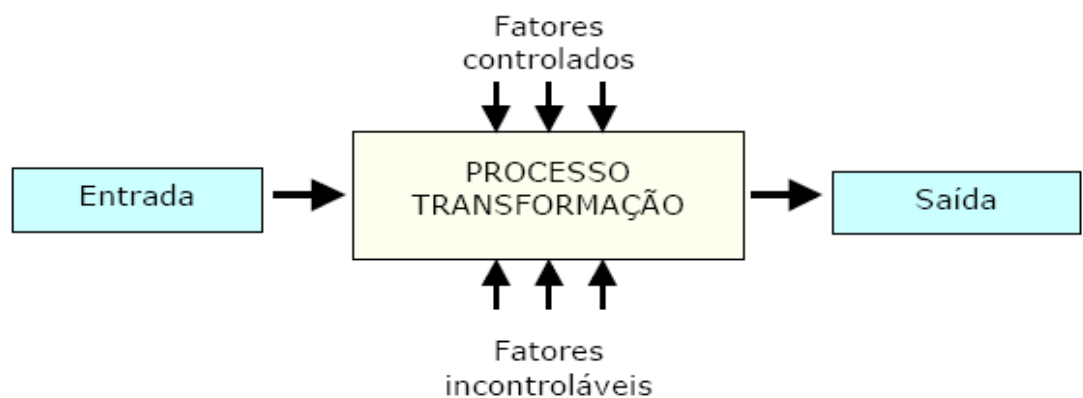


Figura 2.8 – Modelo Geral de um Experimento.
Fonte: Montegomery (1991).

Barros Neto *et al.* (2007) destacam que em um experimento os fatores ou variáveis de entrada atuam sobre o sistema produzindo mudanças nos valores das respostas seguindo uma função matemática desconhecida, e o objetivo dos experimentos é descobrir essa função.

É aconselhável a realização de uma análise exploratória dos dados para, como sondagem, avaliar características técnicas, como por exemplo, se existe a ocorrência de resultados anômalos.

Medidas descritivas de tendência central como a média, e de variabilidade, como o desvio-padrão, podem também ser utilizadas e, do mesmo modo, medidas de distribuição, como os coeficientes de assimetria.

Após esta análise, procuram-se os fatores e interações que interferem de maneira significativa no valor médio das observações. A análise dos dados de um experimento inicia-se, então, com a identificação dos efeitos, ou seja, aqueles fatores com diferentes valores esperados para a resposta em seus diferentes níveis.

De acordo com Lourenço (2008), pode-se então dizer que um experimento é um teste ou uma série de testes na quais alterações propositas são feitas nos fatores do processo ou sistema e pode-se observar e identificar as consequências destas alterações nas variáveis respostas.

Barros Neto *et al.* (2007) enfatizam que ao iniciar-se um planejamento de experimentos precisam-se definir primeiramente quais são os fatores e as respostas de interesse.

Fatores: que são as variáveis que sofrem alterações em um experimento, ou seja, sofrem mudanças de forma controlada com o objetivo de observar seu impacto sobre a variável resposta. Um fator pode ser qualitativo ou quantitativo. Durante o planejamento de um determinado experimento, alguns métodos podem ser utilizados para identificar os fatores. Entre eles podem-se destacar os mais importantes: mapeamento do processo, teorias científicas, conhecimentos da engenharia, experiência da equipe, *brainstorming* e diagrama de causa e efeito Ishikawa.

Variável resposta: uma variável observada ou medida em um determinado experimento, ou seja, o resultado do experimento. Um experimento pode ter uma ou mais variáveis respostas, devendo ela ser efetiva para quantificar os resultados desejados.

O próximo passo é definir qual é a finalidade do experimento, ou seja, seu objetivo. Para escolher-se o melhor planejamento, objetivos diferentes precisam de planejamentos diferentes.

Após conhecidos estas etapas precisa-se também definir alguns conceitos básicos:

Níveis: os fatores sofrem variações em seus valores e essas variações são chamadas de níveis. O nível pode ser associado a pontos em uma escala numérica para um fator quantitativo ou uma opção específica de um fator qualitativo incluído no experimento. Durante a seleção dos níveis, alguns erros podem ser cometidos como a seleção de níveis muito próximos ou muito distantes entre si.

Variável ruído: durante o experimento, algumas variáveis podem não ser totalmente controladas pelo pesquisador. Essas variáveis são classificadas como variável ruído. O ruído pode afetar uma variável resposta em um determinado experimento, mas ainda assim o ruído não é de interesse como fator. Os efeitos das variáveis ruído podem ser minimizados. Basicamente são duas as formas de minimizá-los:

- 1) Mantendo o nível dos fatores constante;
- 2) Medindo e levando em consideração seus efeitos durante a análise das variáveis respostas.

Quando o problema a ser analisado envolve dados sujeitos a erros experimentais, métodos estatísticos são a única maneira de realizar as análises. Contudo, existem dois aspectos aplicados a qualquer problema experimental: o planejamento de experimentos e a análise estatística dos dados.

Estes dois aspectos estão totalmente relacionados, pois o método de análise depende diretamente do planejamento ou estratégia utilizados.

Os três princípios básicos de Planejamento de Experimentos são: aleatoriedade, réplica e blocos.

Aleatoriedade: É base da utilização de métodos estatísticos em Planejamento de Experimentos. Entende-se por aleatoriedade quando a localização do material em estudo e a ordem em que o pesquisador irá desenvolver os experimentos são determinadas de forma aleatória, ou seja, não seguindo uma sequência pré-determinada.

Réplica: Entende-se por réplica a repetição autêntica do experimento. Isso pode ser feito tanto para um experimento individualmente, como também para todo o planejamento. Com a aplicação da réplica do experimento, pode-se obter uma estimativa do erro experimental. Esta estimativa de erros experimentais se torna uma ferramenta importantíssima para determinar se uma diferença observada em uma determinada combinação é realmente uma diferença estatística ou se foi somente causada por algum ruído de medição.

Blocos: Entende-se por blocos a técnica de Planejamento de Experimentos utilizada para aumentar a precisão entre comparativos realizados entre fatores de interesse. Normalmente blocos são utilizados para reduzir ou eliminar a variabilidade transmitida por fatores chamados “complicados”, que nada mais são do que fatores que podem influenciar as variáveis respostas do experimento de uma maneira pela qual não estamos diretamente interessados.

Várias técnicas estatísticas, tanto gráficas como analíticas, podem ser utilizadas para analisar dados de um experimento. As técnicas formais exigem que os erros sejam variáveis aleatórias independentes, com distribuição normal de valor esperado nulo e variância constante.

Sir Ronald A. Fisher, cientista britânico, foi o inovador no uso dos métodos estatísticos e da análise dos dados, em 1920. Fisher desenvolveu o primeiro uso da análise de variância, assim como os primeiros métodos de estatística no DOE. Em 1930, Fisher levou seu trabalho para a Universidade de Londres. Além da contribuição de Fisher, houve muitas outras para a literatura DOE, incluindo-se as de F. Yates, R.C. Bose, W.G. Cochran, R. H. Myers, J. S. Hunter e G. E. P. Box (MONTGOMERY, 1997).

2.12 Planejamento Fatorial

Um experimento fatorial consiste de um conjunto de ensaios, onde se mudam simultaneamente os níveis dos fatores que se deseja estudar. Depois de conduzir os experimentos, os dados são analisados para determinar os efeitos dos fatores. Um dos objetivos é aperfeiçoar o produto ou processo, isto é, determinar os níveis ótimos para cada fator.

Nos experimentos fatoriais, todas as combinações possíveis entre os níveis dos fatores são investigadas, neste caso o planejamento recebe o nome de fatorial completo (*full factorial*). Por exemplo, se existem níveis a de um fator A e níveis b de um fator B, cada réplica contém todas as combinações ab. Quando os fatores seguem um arranjo segundo uma estratégia de planejamento fatorial, normalmente são denominados de arranjos cruzados.

A Tabela 2.5 mostra um planejamento simples, ou seja, um experimento fatorial com dois fatores e com dois níveis para cada fator. Chamamos estes níveis de “baixo” e “alto” e são indicados por “-1” e “+1” respectivamente.

Tabela 2.5 – Planejamento fatorial com dois níveis e dois fatores

<i>Ensaio</i>	<i>Fator</i>	<i>Fator</i>
1	1	1
2	-1	1
3	1	-1
4	-1	-1

2.12.1 Planejamento Fatorial Completo ou Fatorial 2k

Os fatoriais completos se caracterizam pela realização de ensaios com todos os tratamentos, ou seja, todas as combinações possíveis de níveis dos fatores são testadas. Para executar um plano fatorial completo, um investigador seleciona um número fixo de níveis para cada um dos fatores. Se existem $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ ensaios é chamado experimento fatorial $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$. O resultado da multiplicação $p_1 \times p_2 \times \dots \times p_n$ representa o número de tratamentos. Deste modo, ele indica o número de ensaios a serem realizadas para se obter um fatorial completo. Por exemplo, um fatorial $3 \times 3 \times 2$ necessita de dezoito ensaios. Um experimento no qual cada tratamento é aplicado uma vez constitui uma única replicação do planejamento. Se cada tratamento é replicado n vezes, o planejamento é dito ser replicado n vezes ou envolver n réplicas. Quando existem réplicas, o número total de ensaios será um múltiplo do número de tratamentos.

Este tipo de planejamento é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Em cada réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada

variável são investigadas. Desta maneira todos os possíveis efeitos de interação entre os fatores podem ser determinados.

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas por ser um método onde as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo.

2.12.2 Planejamento Fatorial Fracionado 2 k-p

Quando o número de fatores k aumenta o número de testes também aumenta significativamente, tornando o planejamento inviável devido ao tempo e custos envolvidos. Neste caso pode-se realizar o planejamento fatorial fracionado para se obter a informação desejada com um número reduzido de ensaios.

Segundo Barros Neto *et.al.* (2007) isso é possível por dois motivos:

Primeiro motivo: o número de interações de ordem alta aumenta dramaticamente com o número de fatores. Na maioria dos casos, essas interações têm valores pequenos e são destituídas de qualquer importância prática.

Se em um determinado experimento, interações deste tipo podem ser desprezadas, informações sobre os efeitos principais e interações de ordens baixas como primeira e segunda ordens podem ser obtidas através de um experimento que englobe apenas uma fração do experimento completo. Experimentos fatoriais fracionados estão entre os mais utilizados experimentos fatoriais.

Segundo motivo: quando o número de fatores aumenta, crescem as chances de que um ou mais deles não afete significativamente a resposta.

Experimentos fatoriais fracionados são muito úteis quando uma grande quantidade de fatores está sendo estudada e deseja-se identificar quais deles são realmente representativos.

Muitas vezes experimentos fatoriais fracionados permitem a obtenção da informação desejada em menor tempo e investimento reduzido.

2.13 Cálculo dos Efeitos

O efeito de um fator é definido como sendo uma alteração em uma determinada variável resposta, produzida por uma alteração no nível deste fator. Isso é chamado de efeito principal (main effect) porque se refere aos fatores principais em um determinado planejamento. Considerando o exemplo Tabela 2.6 o efeito principal para o fator A pode ser calculado como sendo a média dos resultados do fator A no nível +1 menos a média dos resultados do fator A no nível -1, ou seja:

$$\text{Efeito} = \bar{\mathbf{R}}_{+} - \bar{\mathbf{R}}_{-}$$

Tabela 2.6 – Experimento 2^2 com os respectivos resultados

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Resposta</i>
1	1	1	60
2	-1	1	80
3	1	-1	30
4	-1	-1	50

Numericamente temos:

$$A = \frac{60+30}{2} - \frac{80+50}{2} = -20$$

Isto indica que o valor da variável resposta sofre uma redução de 20 unidades quando o fator A muda do seu nível mais alto +1 para o nível mais baixo -1.

Em alguns experimentos podemos descobrir que as diferenças nas variáveis resposta entre os níveis de um fator não são as mesmas para todos os níveis de outro fator. Quando isto ocorre, podemos dizer que existe interação entre os fatores. Por exemplo, considerando o experimento

fatorial com dois fatores mostrado na Tabela 2.7, no nível “baixo” do fator B (B-), o efeito de A, seria:

$$A = 50 - 20 = 30$$

E no nível “alto” do fator B (B+), o efeito de A seria:

$$A = 12 - 40 = -28$$

Tabela 2.7 – Experimento 2^2 com interação entre os efeitos

<i>Ensaio</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>	<i>Interação AB</i>	<i>Resposta</i>
1	1	1	+	12
2	-1	1	-	40
3	1	-1	-	50
4	-1	-1	+	20

Como o efeito de A depende do nível escolhido do fator B, podemos observar que existe interação entre A e B. A magnitude do efeito da interação é a diferença média entre esses dois efeitos, ou seja:

$$AB = \frac{(-28 - 30)}{2} = -29$$

Outra forma de calcular o efeito da interação entre as variáveis é atribuir o sinal da interação multiplicando-se os sinais das linhas do planejamento conforme tabela 2.7. E o cálculo dos efeitos ocorre da mesma forma que para os efeitos principais, sendo a média dos resultados com sinal + menos a média dos resultados com sinal – ou seja:

$$AB = \frac{12 + 20}{2} - \frac{40 + 50}{2} = -29$$

Estes conceitos podem ser ilustrados graficamente. A Figura 2.9 mostra os dados das variáveis resposta do experimento mostrado anteriormente na Tabela 2.6. Observa-se que as

linhas B-, o efeito no nível baixo de B, e B+, o efeito no nível alto de B, são paralelas, indicando ausência de interação entre os fatores A e B. Similarmente, a Figura 2.10 mostra os dados das variáveis resposta do experimento mostrado anteriormente na Tabela 2.7, mas neste caso, as linhas B- e B+ não são paralelas, indicando interação entre os fatores A e B.

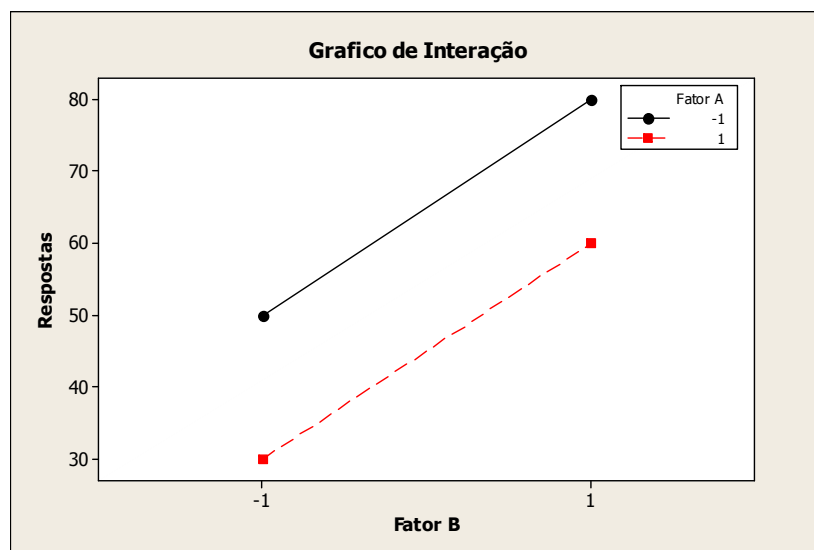


Figura 2.9 – Experimento fatorial sem interação
Fonte: Rodrigues, 2011.

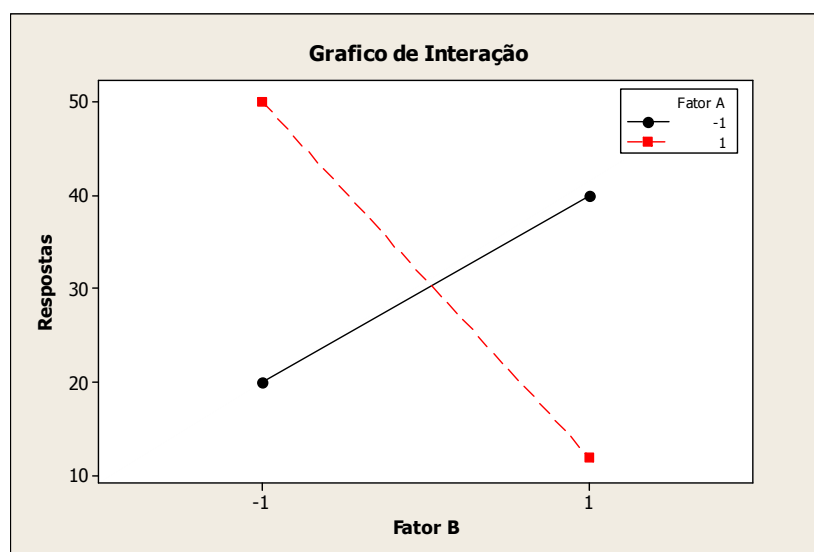


Figura 2.10 – Experimento fatorial com interação
Fonte: Rodrigues, 2011.

Existe outra maneira de ilustrar o conceito de interação utilizando uma representação via modelo de regressão, onde, para os dois fatores mencionados nos gráficos ter-se-ia:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \varepsilon,$$

Onde y é a variável resposta, os b s são os parâmetros cujos valores serão determinados, X_1 é a variável que representa o fator A, X_2 é a variável que representa o fator B, onde ε é o termo que representa o erro aleatório. As variáveis X_1 e X_2 são definidas em uma escala codificada de -1 a +1 (equivalente aos níveis “baixo” e “alto” dos fatores A e B), e $X_1 X_2$ representa a interação entre X_1 e X_2 .

Para o experimento ilustrado na Tabela 2.7, encontramos os efeitos principais de A e B como sendo $A = 1$ e $B = -9$. As estimativas de b_1 e b_2 são metade dos valores dos efeitos principais correspondentes, ou seja, $b_1 = 1/2 = 0.5$ e $b_2 = -9/2 = -4.5$.

Então, o valor do coeficiente da interação no modelo de regressão é $b_{12} = -14.5$. O parâmetro b_0 é estimado pela média das quatro respostas, ou seja:

$$b_0 = \frac{12+40+50+20}{4} = 30.5$$

Portanto, o modelo de regressão ajustado é:

$$y = 30.5 + 0.5x_1 - 4.5x_2 - 14.5x_1x_2$$

2.14 Cálculo da significância dos efeitos quando os experimentos possuem réplicas

Quando os ensaios realizados possuem réplicas é possível se estimar o erro experimental e, a partir daí, avaliar significância estatística dos efeitos (BARROS NETO *et. al.* 2007).

A Tabela 2.8 apresenta um experimento fatorial 2^3 com uma réplica para que seja mostrado o cálculo da significância dos efeitos.

Tabela 2.8 - Resultados de um planejamento fatorial 2^3 para estudar a significância dos efeitos

<i>Ensaio</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
1	-1	-1	-1	56	52	54
2	1	-1	-1	85	88	86,5
3	-1	1	-1	49	47	48
4	1	1	-1	64	62	63
5	-1	-1	1	65	61	63
6	1	-1	1	92	95	93,5
7	-1	1	1	57	60	58,5
8	1	1	1	70	74	72

Fonte: BARROS NETO et. al. 2007

A partir da matriz do planejamento pode-se formar a tabela de coeficientes de contraste, multiplicando-se os sinais das colunas apropriadas para obter as colunas correspondentes as interações conforme Tabela 2.9 (BARROS NETO *et.al.* 2007).

Tabela 2.9 – Coeficientes de contraste

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>	<i>Resposta</i>	<i>Réplica</i>	<i>Média</i>
-	-	-	+	+	+	-	56	52	54
+	-	-	-	-	+	+	85	88	86,5
-	+	-	-	+	-	+	49	47	48
+	+	-	+	-	-	-	64	62	63
-	-	+	+	-	-	+	65	61	63
+	-	+	-	+	-	-	92	95	93,5
-	+	+	-	-	+	-	57	60	58,5
+	+	+	+	+	+	+	70	74	72

A Tabela 2.10 mostra os valores dos efeitos para este planejamento.

Tabela 2.10 – Valores dos efeitos

<i>Fator</i>	<i>Efeito</i>
A	22,88
B	-13,88
C	8,88
AB	-8,63
AC	-0,88
BC	0,88
ABC	-0,13

Após o cálculo dos efeitos inicia-se o cálculo da estimativa do erro, em primeiro lugar calcula-se a estimativa conjunta da variância de uma observação individual:

$$\hat{V}(y) = s^2 = \sum di^2 / 2N$$

Onde di é a diferença entre duas observações correspondentes ao i-ésimo ensaio e N é o número de ensaios distintos, feitos em duplicata.

Desta forma tem-se:

$$s^2 = \frac{(56-52)^2 + (85-88)^2 + (49-47)^2 + (64-62)^2 + (65-61)^2 + (92-95)^2 + (57-60)^2 + (70-74)^2}{2 * 8}$$

$$s^2 = 5,2$$

Tirando a raiz quadrada deste valor chega-se a uma estimativa de erro de observação ou do erro experimental do planejamento (BARROS NETO et.al.2007).

$$s = 2.28$$

Com base nestes dados pode-se obter a variância de cada efeito conforme a seguir:

$$V(efeito) = \hat{V}(\bar{y}_+ - \bar{y}_-) = \hat{V}(\bar{y}_+) + \hat{V}(\bar{y}_-) = \frac{s^2}{N} + \frac{s^2}{N}$$

Para qual $\hat{V}(\bar{y}_+)$ é a estimativa de variância das respostas com sinal positivo, e $\hat{V}(\bar{y}_-)$ é a estimativa de variância da média das respostas com sinal negativo.

Portanto tem-se:

$$V(efeito) = \frac{s^2}{8} + \frac{s^2}{8} = \frac{s^2}{4} = \frac{5,2}{4} = 1,30$$

O erro padrão do efeito é obtido extraindo-se a raiz quadrada do $V(\text{efeito})$ e, portanto é:

Erro padrão do efeito (EP_{ef}) = 1,14

Agora é necessário calcular o intervalo de confiança para os valores do efeito:

$$IC = Ef \pm t_v(EP_{ef})$$

Para qual IC é o intervalo de confiança, Ef é o valor do efeito, t_v é o valor da distribuição t Student para um nível de 95% de confiança, e v é o número de graus de liberdade igual ao número de ensaios e EP_{ef} é o erro padrão dos efeitos.

Tem-se então para $v = 8$, $t_8 = 2,306$ e $IC = Ef \pm 2,306 * (1,14) = Ef \pm 2,63$

De posse de todos estes valores pode-se verificar a significância estatística dos efeitos. Na prática só deve-se considerar estatisticamente significativos os efeitos cujas estimativas forem superiores em valor absoluto ao produto do erro padrão pelo ponto crítico da distribuição de Student (BARROS NETO et.al.2007).

Neste exemplo pode-se observar que os efeitos com significância estatística no nível de 95% são os efeitos dos fatores A, B, C e a interação AB.

2.15 Verificação da significância dos efeitos quando os experimentos não possuem réplicas

Nestes casos o pesquisador pode realizar a análises por meio de gráficos normais, que são uma técnica alternativa para distinguir, nos resultados de um planejamento, os valores que correspondem aos efeitos significativos daqueles valores que ocorrem devido apenas ao erro experimental (BARROS NETO et.al.2007).

Para a construção destes gráficos, a probabilidade acumulada de uma distribuição normal é projetada no eixo das ordenadas e os valores dos efeitos são projetados nas abscissas. Os efeitos com valores devido ao erro experimental ficam posicionadas próximos a uma reta centrada em zero.

A identificação dos efeitos significativos se faz de forma a observar quais são os efeitos que estão mais distantes desta linha de referência, sendo os mais significativos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do ensaio, foi escolhido o motor Diesel, do fabricante MWM, com as principais características construtivas indicadas conforme a tabela 01 (abaixo). Já a figura 01 é um desenho do motor em questão.

Tabela 3.1 – Especificação do motor Diesel utilizado no experimento

Fabricante	MWM
Número de cilindros e arranjo	6 – em linha
Diâmetro / curso [mm]	105 / 137
Cilindrada [l]	7.2 l
Potencia máxima (HP @ RPM)	210 - 325 @ 2200
Torque máximo (Nm @ rpm)	760 - 1300 @ 1200-1600
Pressão de combustão máxima [bar]	180 bar
Sistema de injeção de combustível	Eletrônico (common rail)
Pressão de injeção máxima [bar]	1800 bar
Circuito de recirculação de gases	Aberto
Sistema de sobre alimentação	Turbo com waste gate & Intercooler
Nível de emissões	Euro5
Taxa de compressão	16.9: 1
Ordem de ignição	1-5-3-6-2-4
Sentido de rotação – Vista lado Volante	Anti horário
Volume máximo de óleo lubrificante (l)	21

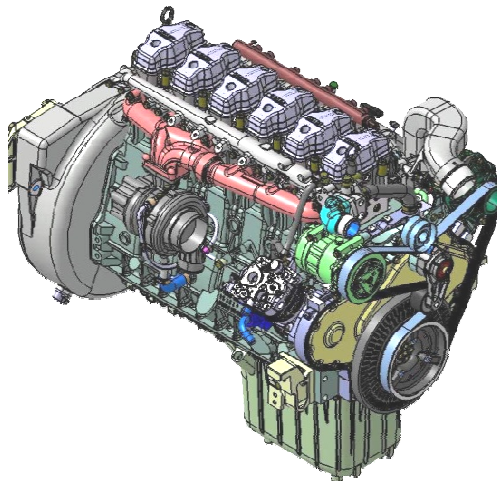


Figura 3.1 – Motor MWM Acteon 6.12TCE
Fonte: MWM, 2011.

Escolha da variável resposta:

Foram escolhidos como variável de resposta tanto para a fase 01 (escolha da melhor configuração de componentes) quanto para a fase 02 (avaliação de robustez) os seguintes parâmetros:

- A) Pressão de recirculação dos gases de combustão
- B) Consumo específico de óleo lubrificante

Escolha dos fatores e níveis:

Para a primeira fase do estudo, foram escolhidos os parâmetros que de acordo com experiência adquirida com o motor Diesel em estudo, tem o potencial de influenciar os resultados dos valores de pressão de recirculação dos gases de combustão e consumo específico de óleo lubrificante. Desta forma foram selecionados de acordo com a Figura 3.2:

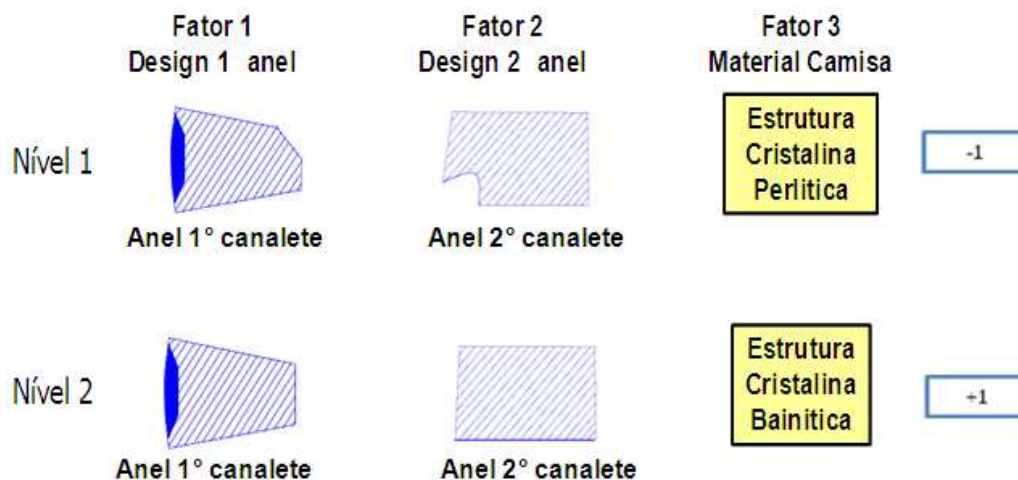


Figura 3.2 – Fatores e Níveis da fase 01 do experimento

Anel de primeiro canaleta: Optou-se por esta avaliação devido a resultados encontrados em motores similares de grande influencia do chanfro do anel nos resultados de pressão de carter do motor. Para motores que trabalham com pressão de combustão acima de 180bar este fenômeno é mais pronunciado (MWM, 2011).

Anel de segundo canaleta: Os dois perfis de anel escolhido estão entre os mais utilizados em toda a gama de produtos oferecida pelo fabricante (MWM, 2011).

Material da camisa: Com a utilização de motores cada vez mais solicitados tanto termicamente como mecanicamente, existe a demanda na industria de utilização do material da camisa de cilindros com a estrutura cristalina do tipo Bainitica, em substituição ao material Perlitico. Com isso deseja-se estudar também se esta alteração de material gera alguma diferença significativa no funcionamento do motor, que possa afetar consumo de óleo ou pressão de carter. Essa modificação também é muito utilizada quando se usa o conceito de motorização com EGR. (MWM, 2011).

Na segunda fase do trabalho, também utilizando a experiência nos componentes críticos do motor e também nas características geométricas significativas, optou-se pelos seguintes fatores:

- A) Distância entre pontas (GAP) – anel primeiro canaleta
- B) Distância entre pontas (GAP) – anel segundo canaleta
- C) Distância entre pontas (GAP) – anel terceiro canaleta
- D) Diâmetro do pistão na região de guia no cilindro
- E) Diâmetro da camisa de cilindros
- F) Pressão no coletor de admissão
- G) Tipo do óleo lubrificante do motor
- H) Design do retentor de haste de válvulas

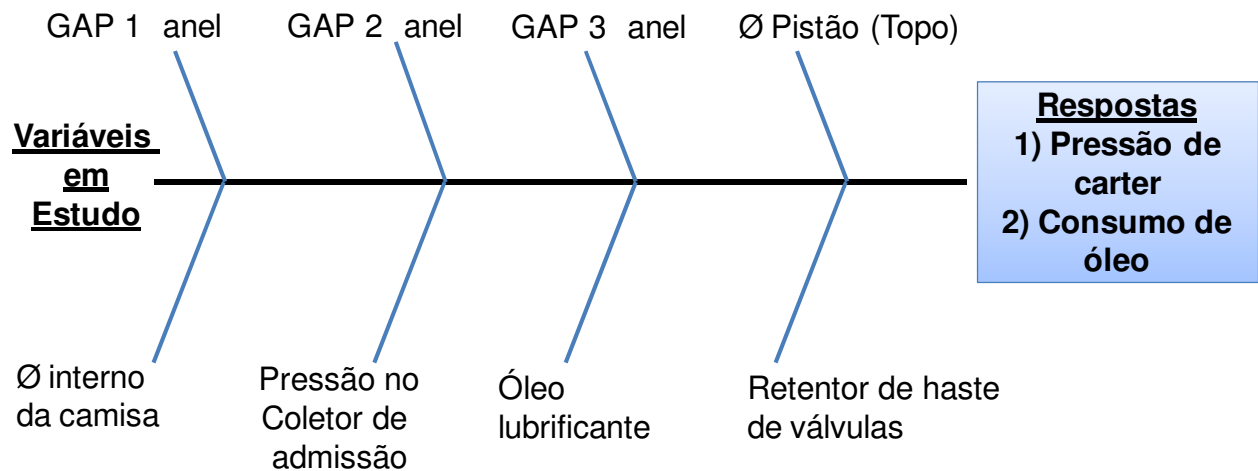


Figura 3.3 – Escolha do planejamento experimental

Fase 01 do experimento: Foi escolhido um planejamento de experimentos do tipo fatorial completo, devido ao reduzido número de fatores a serem estudados e a necessidade de identificar a influência das interações entre as variáveis estudadas. Com todas estas informações será possível identificar o melhor design entre as opções estudadas para este motor. É possível realizar o experimento avaliando todas as configurações disponíveis dentro de um intervalo de tempo considerado adequado.

Fase 02 do experimento: Devido ao elevado número de variáveis em estudo, se fosse utilizado um planejamento do tipo fatorial completo seria necessário a utilização de 128 experimentos. Essa atividade demandaria um tempo muito grande, e por este motivo, decidiu-se por utilizar um planejamento fatorial fracionado.

Para não correr o risco de excluir fatores que podem vir a ser importantes, deve-se estudar, neste estágio, o maior número possível de variáveis. Podemos fazer isso sem aumentar o número de ensaios, utilizando o procedimento fatorial fracionado em vez de fatoriais completos (Box, Hunter e Hunter, 1978, capítulo 12.)

Execução dos experimentos:

Para fazer um levantamento de valores de consumo de óleo, deve-se ter muito cuidado com o procedimento deste tipo de ensaio. É muito comum a ocorrência de erros durante esta medição, por isso é muito importante seguir uma metodologia adequada. Para evitar este tipo de problema, foi seguido o procedimento desenvolvido pelo fabricante do motor Diesel em estudo.

O primeiro passo é a instalação do motor em dinamômetro. Durante este estágio, é realizado todo o trabalho de instrumentação do motor nos pontos de temperatura e pressão, nos circuitos de admissão, escape, combustível e arrefecimento. Esta instrumentação é fundamental para o correto acompanhamento do ensaio.

Na medição em dinamômetro, são simuladas as condições de operação do motor, como se ele estivesse sendo utilizado em um veículo. Por isso é muito importante a instrumentação do motor, pois cada um destes parâmetros tem influência direta no funcionamento e desempenho do motor.

Após a realização da instalação do motor no banco de provas e também do trabalho de instrumentação, deve ser realizado o abastecimento do óleo lubrificante.

O motor em estudo possui como especificação de volume de óleo lubrificante 21 litros. Para aumentar a precisão do ensaio de medição de consumo de óleo, este volume é convertido para um valor correspondente em massa. É importante também a utilização de uma balança com precisão de 1 grama.

Como o motor está sem óleo lubrificante em todo o sistema de lubrificação (bomba de óleo, galerias, filtro, modulo de óleo) é necessário a realização de um procedimento para preenchimento de todos estes componentes com óleo lubrificante, antes de medir o consumo. Esta parte do ensaio é denominada “padrão de óleo”.

Nesta fase, o motor é abastecido com seu volume máximo (21 litros), após isso, o motor é colocado em funcionamento (condição de marcha lenta) onde são verificados sinais de vazamento.

Após isso é realizado o aquecimento do motor, onde o mesmo tem um aumento crescente da rotação e da carga do dinamômetro até a temperatura de óleo lubrificante ultrapassar 70°C.

Com o óleo lubrificante nesta condição, já é possível submeter o motor a operação em regime de potência máxima.

Em regime de potência máxima, devem ser observados todos os parâmetros instrumentados obedecendo as especificações do fabricante. Todos estes parâmetros, que podem ser controlados no banco de teste, são de fundamental importância para que o ensaio se aproxime ao máximo possível da utilização do motor em um veículo.

Após a regulagem de todos os parâmetros, deve-se rodar o motor por uma hora em regime de plena carga, na condição de potência máxima.

O próximo passo é voltar com o motor na condição de marcha lenta e analisar novamente se não existe nenhum tipo de vazamento. Se for encontrado algum vazamento, o mesmo deve ser corrigido e o procedimento deve ser repetido.

Com a certeza de que o motor não apresenta nenhum vazamento, deve-se desligar o mesmo para a drenagem do óleo lubrificante. Essa é a fase mais crítica do ensaio. O fabricante do motor especifica a seguinte sequência de trabalho nesta fase do ensaio:

- 01) Limpeza e pesagem do recipiente em que se deseja armazenar o óleo a ser retirado do motor;
- 02) Abertura do bujão do carter, para remoção do óleo
- 03) Após o início do gotejamento do óleo, aguardar mais 15 minutos
- 04) Instalar novamente o bujão do carter de óleo do motor
- 05) Medir a massa de óleo retirada do motor.

De posse do valor de massa de óleo, deve-se reabastecer o motor com o óleo lubrificante e após o abastecimento deve-se guardar o mesmo recipiente para utilização no término do ensaio. Em hipótese alguma se deve limpar o recipiente.

O próximo passo é realizar o condicionamento do motor, novamente obedecendo a rampa de aquecimento até atingir a condição de potência máxima.

Quando o motor atingir a condição de plena carga em rotação de máxima potência, deve-se manter o mesmo neste regime de operação por 8 horas consecutivas.

O fabricante do motor especifica como tempo mínimo para o ensaio o período de 8 horas para uma medição de consumo confiável.

Durante o período de 8 horas de teste, também deve ser verificada a pressão de recirculação dos gases de combustão, através da instrumentação feita no carter do motor.

A cada 30 minutos deverá ser feito um registro da medição de todos os parâmetros que estão sendo controlados no ensaio

Ao término das 8 horas de teste, o motor deve ser desligado e o óleo lubrificante drenado novamente seguindo o mesmo procedimento realizado na fase anterior. É importante a utilização do mesmo recipiente utilizado na fase anterior do ensaio.

Com a verificação da massa de óleo retirada do carter, deve-se fazer o calculo para obtenção do valor de consumo de óleo

Para o valor de pressão de carter, deve-se considerar o valor máximo registrado no período de 8 horas, enquanto o motor estava condicionado em potência máxima.

Este procedimento foi realizado para cada uma das configurações de montagem da matriz experimental.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.

4.1 Escolha da melhor configuração entre componentes

Para a fase 01 do experimento, verificam-se na tabela 4.1 (abaixo) os resultados para as medições de consumo de óleo lubrificante e pressão de recirculação dos gases de combustão (pressão de carter).

Tabela 4.1 – Dados referentes à primeira fase do trabalho: escolha da melhor configuração entre componentes / fatorial completo.

Ordem	Anel 1° Canaleta	Anel 2° Canaleta	Camisa	Pressão de carter (mbar)	Consumo de óleo (g/cv.h)
1	-1	-1	-1	32	0,10
2	1	-1	-1	14	0,13
3	-1	1	-1	15	0,09
4	1	1	-1	6	0,08
5	-1	-1	1	30	0,13
6	1	-1	1	17	0,11
7	-1	1	1	11	0,10
8	1	1	1	6	0,07
9	-1	-1	-1	35	0,12
10	1	-1	-1	26	0,12
11	-1	1	-1	11	0,11
12	1	1	-1	5	0,08
13	-1	-1	1	30	0,11
14	1	-1	1	18	0,10
15	-1	1	1	16	0,10
16	1	1	1	4	0,10
17	-1	-1	-1	31	0,12
18	1	-1	-1	12	0,10
19	-1	1	-1	15	0,09
20	1	1	-1	4	0,07
21	-1	-1	1	31	0,10
22	1	-1	1	25	0,13
23	-1	1	1	9	0,08
24	1	1	1	5	0,09

Com os dados obtidos na Tabela 4.1, vê-se que sempre quando se tem os níveis altos (+1) para as variáveis 1 e 2 (anéis 1° e 2° canaleta), se tem os menores valores de pressão de carter. Também é possível verificar que a mudança de nível da 3° variável é inerte, isto é, não tem influencia para os resultados de pressão de carter.

Já para os resultados de consumo de óleo, vê-se uma tendência de a variável 2 (anel 2° canaleta) influenciar os resultados. Neste caso, a mudança de nível tanto da variável 2 quanto da variável 3 é inerte para os resultados obtidos em consumo de óleo.

Para uma melhor análise dos dados da Tabela 4.1, os dados estão reorganizados nas Tabelas 4.2 (resultados para pressão de carter) e 4.3 (resultados para consumo de óleo), com os cálculos de média e desvio padrão para cada uma das configurações avaliadas e também suas respectivas réplicas.

Tabela 4.2 – Reorganização dos dados – resultados fase 1 – Resposta: Pressão de carter

Ordem	Anel 1C	Anel 2C	Camisa	Pressão de carter (mbar)		
				Medição 1	Replica 1	Replica 2
1	-1	-1	-1	32	35	31
2	1	-1	-1	14	26	12
3	-1	1	-1	15	11	15
4	1	1	-1	6	5	4
5	-1	-1	1	30	30	31
6	1	-1	1	17	18	25
7	-1	1	1	11	16	9
8	1	1	1	6	4	5

Tabela 4.3 – Reorganização dos dados – resultados fase 2 – Resposta: Consumo de óleo

Ordem	Anel 1C	Anel 2C	Camisa	Consumo de óleo (g/cv.h)		
				Medição 1	Replica 1	Replica 2
1	-1	-1	-1	0,10	0,12	0,12
2	1	-1	-1	0,13	0,12	0,10
3	-1	1	-1	0,09	0,11	0,09
4	1	1	-1	0,08	0,08	0,07
5	-1	-1	1	0,13	0,11	0,10
6	1	-1	1	0,11	0,10	0,13
7	-1	1	1	0,10	0,10	0,08
8	1	1	1	0,07	0,10	0,09

Com a análise das Tabelas 4.2 e 4.3 vê-se que a variação dos resultados obtidos para testes realizados com a mesma configuração (medição 1 versus réplica 1 e réplica 2) é muito pequena.

Tabela 4.4 Valores dos coeficientes dos efeitos e do erro padrão para as respostas

Variáveis em estudo	Resposta: Pressão de Carter	Resposta: Consumo de óleo
Anel primeiro canaleta (A)	-10,333	-0,006
Anel segundo canaleta (B)	-16,167	-0,026
Anel terceiro canaleta (C)	-0,333	0,001
Interação entre A e B	2,500	-0,008
Interação entre A e C	1,667	0,003
Interação entre B e C	-0,500	0,003
Interação entre A, B e C	-0,833	0,004
<u>Erro padrão do efeito</u>	<u>0,727</u>	<u>0,003</u>

Na Tabela 4.4 verificam-se os efeitos significativos com 95% de confiança (em negrito) para as duas variáveis de resposta em estudo (pressão de carter e consumo de óleo).

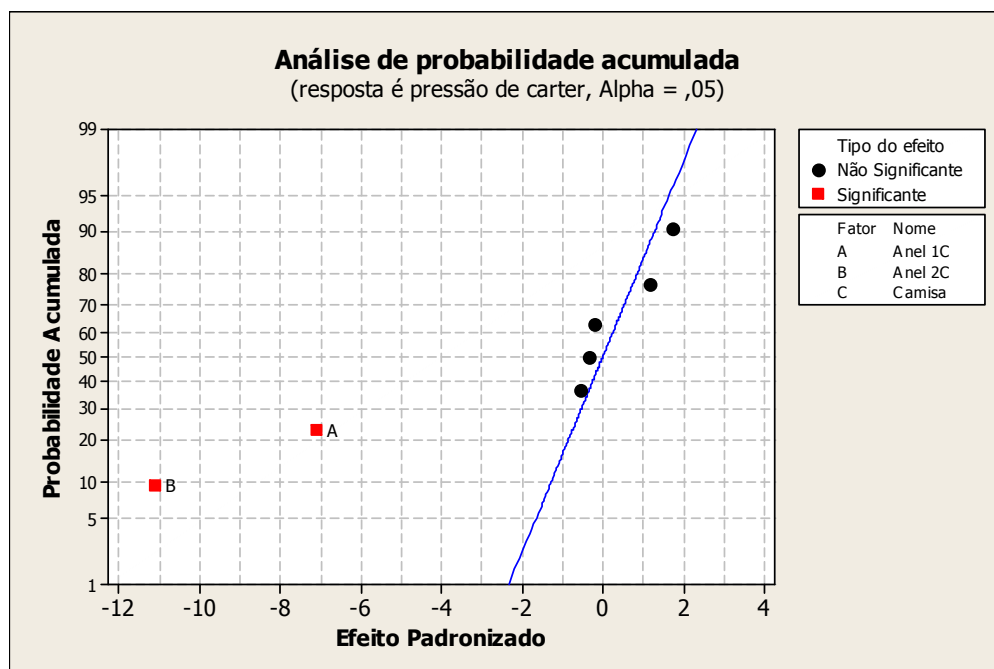


Figura 4.1 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: pressão de Carter

A Figura 4.1 mostra a análise de probabilidade acumulada para a variável pressão de carter. Vê-se que a reta indica uma distribuição normal. Verifica-se também que os efeitos das variáveis apresentam valores tanto antes quanto depois do zero, o que mostra que o procedimento de teste utilizado não influenciou o resultado. A análise também mostra que as variáveis A e B (anel de primeiro canaleta e também o anel de segundo canaleta) têm influência direta nos resultados de pressão de carter. A análise também comprova que a variável C (camisa) e assim como as interações entre todas as variáveis estudadas não influenciam os resultados de pressão de carter, portanto, podem ser consideradas inertes.

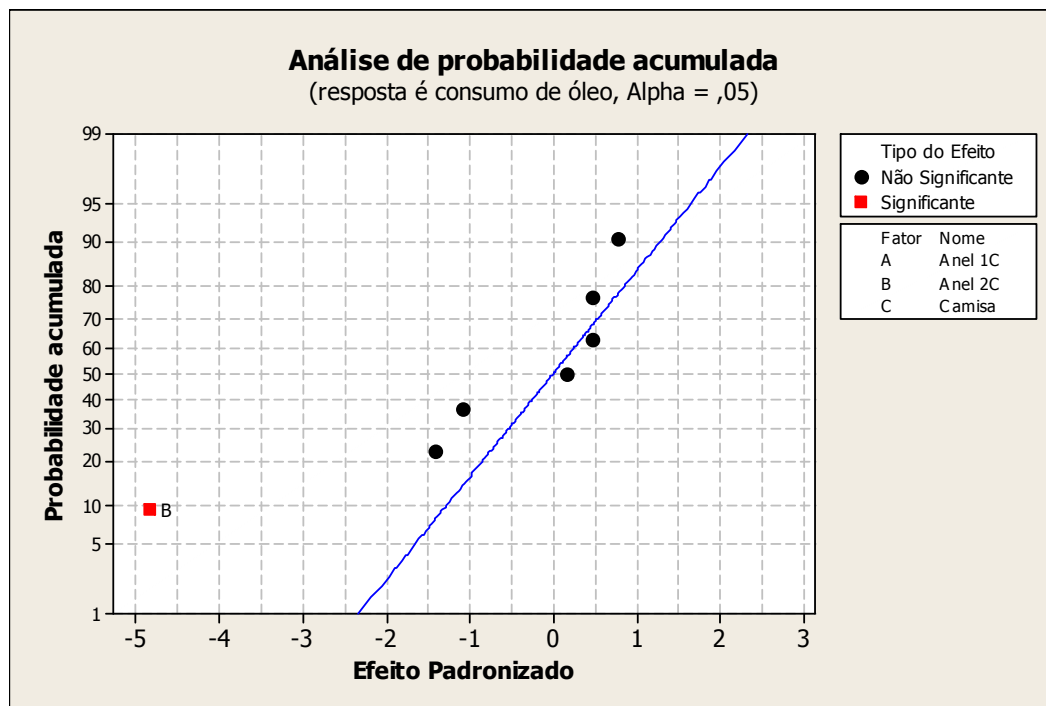


Figura 4.2 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: consumo de óleo.

Já a Figura 4.2 mostra a análise de probabilidade acumulada para a variável consumo de óleo. Vê que a reta indica uma distribuição normal, e os efeitos das variáveis estão tanto antes quanto depois do zero, o que mostra que o procedimento de teste utilizado não influenciou o resultado. Os resultados da análise também mostram que a variável B tem influência direta sobre os resultados de consumo de óleo, ao passo que as demais variáveis A e C, como também suas interações, também podem ser consideradas inertes para a resposta consumo de óleo.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, pode-se verificar uma estimativa do tempo necessário para se desenvolver um hardware de motor básico (no caso pistões e anéis), considerando dois cenários distintos:

Cenário número 1: realização do desenvolvimento não utilizando planejamento multivariado (figura 4.3)

Cenário número 2: realização da mesma atividade aplicando a técnica de planejamento multivariado (figura 4.4)

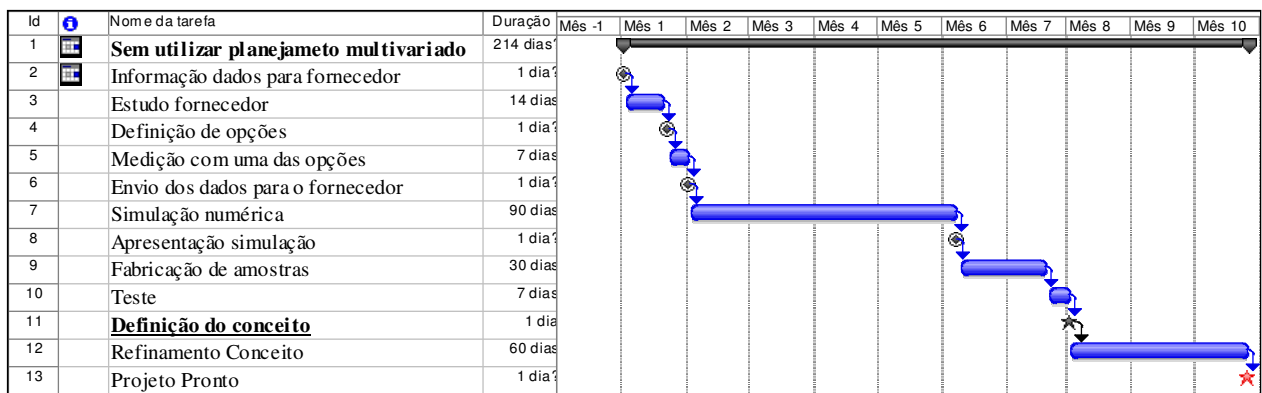


Figura 4.3 – Desenvolvimento de pacote de anéis de pistão sem a utilização de ferramentas baseadas em estatística.

Fonte: MWM (2011)

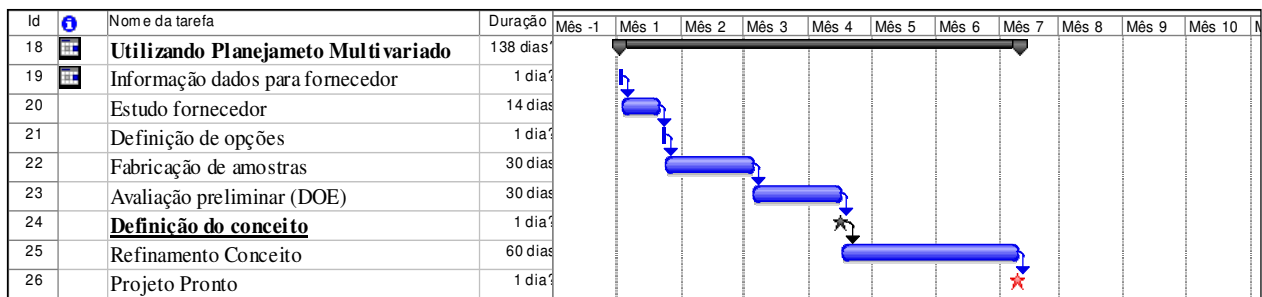


Figura 4.4 – Desenvolvimento de pacote de anéis de pistão com a utilização de ferramentas baseadas em estatística.

Fonte: MWM (2011)

Analisando as Figuras 4.3 e 4.4 verifica-se que com a aplicação do planejamento multivariado é possível um ganho de aproximadamente 3 meses para realização da mesma tarefa. Isso se deve ao fato de não ser necessária a realização da etapa de simulação numérica antes do início da fase experimental. O planejamento fatorial é realizado na fase inicial do trabalho, gerando dados que podem ser utilizados futuramente na própria simulação numérica, que pode ser realizada em paralelo com a fase de refinamento do projeto, com o objetivo de identificar alguma outra condição de funcionamento do motor não avaliada durante o planejamento fatorial.

4.2 Estudo de robustez

Para a fase 02 do experimento, observam-se na tabela 4.5 os resultados para as medições de consumo de óleo lubrificante e pressão de recirculação dos gases de combustão (pressão de carter).

Tabela 4.5 - Dados referentes à segunda fase do trabalho - estudo de robustez / fatorial fracionado

Referencia	A	B	C	D	E	F	G	H	Respostas	
Ordem	Anel 1	Anel 2	Anel 3	Ø Pistão	Ø Camisa	Pressão Coletor	Tipo óleo	Retentor Válvula	Pressão de carter (mbar)	Consumo óleo (g/cv.h)
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5	0,20
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	40	0,15
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	30	0,15
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	50	0,30
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	30	0,20
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	45	0,15
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	10	0,15
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	35	0,35
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	31	0,08
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	40	0,20
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	11	0,24
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	45	0,25
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	6	0,10
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	42	0,20
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	30	0,25
16	1	1	1	1	1	1	1	1	25	0,25

Referência

- A) Distância entre pontas (GAP) – anel primeiro canaleta
- B) Distância entre pontas (GAP) – anel segundo canaleta
- C) Distância entre pontas (GAP) – anel terceiro canaleta
- D) Diâmetro do pistão no Top Land
- E) Diâmetro da Camisa de cilindros
- F) Pressão no coletor de admissão
- G) Tipo do óleo lubrificante do motor
- H) Design do retentor de haste de válvulas

Com os dados obtidos na Tabela 4.5, vê-se que sempre quando temos os níveis baixos (-1) para as variáveis A e E (anéis 1 canaleta e diâmetro do cilindro respectivamente), temos os menores valores de pressão de carter. Já para os resultados de consumo de óleo, vê-se que as variáveis A, B e H têm influência nos resultados. Nas tabelas 4.6 (resultados somente para pressão de carter) e 4.7 (resultados somente para consumo de óleo) verifica-se individualmente o resultado para cada variável resposta.

Tabela 4.6 – Resultados para pressão de carter (em amarelo as variáveis significativas)

Referencia	A	B	C	D	E	F	G	H	Respostas
Ordem	Anel 1	Anel 2	Anel 3	Ø Pistão	Ø Camisa	Pressão Coletor	Tipo óleo	Retentor Válvula	Pressão de Carter
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	40
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	30
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	50
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	30
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	45
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	10
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	35
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	31
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	40
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	11
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	45
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	6
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	42
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	30
16	1	1	1	1	1	1	1	1	25

Tabela 4.7 – Resultados para consumo de óleo (em verde as variáveis significativas)

Referencia	A	B	C	D	E	F	G	H	Respostas
Ordem	Anel 1	Anel 2	Anel 3	Ø Pistão	Ø Camisa	Pressão Coletor	Tipo óleo	Retentor Válvula	Consumo de Óleo
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,20
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0,15
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0,15
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,30
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	0,20
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0,15
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0,15
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0,35
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	0,08
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	0,20
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0,24
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0,25
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0,10
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	0,20
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	0,25
16	1	1	1	1	1	1	1	1	0,25

Mas mesmo analisando e comparando os dados fica complexo analisar todas as combinações de testes realizadas e a influência no resultado, como também se a interação entre as variáveis em estudo influencia os resultados das variáveis de resposta, por isso, é adequada a utilização da ferramenta dos gráficos de probabilidade acumulada.

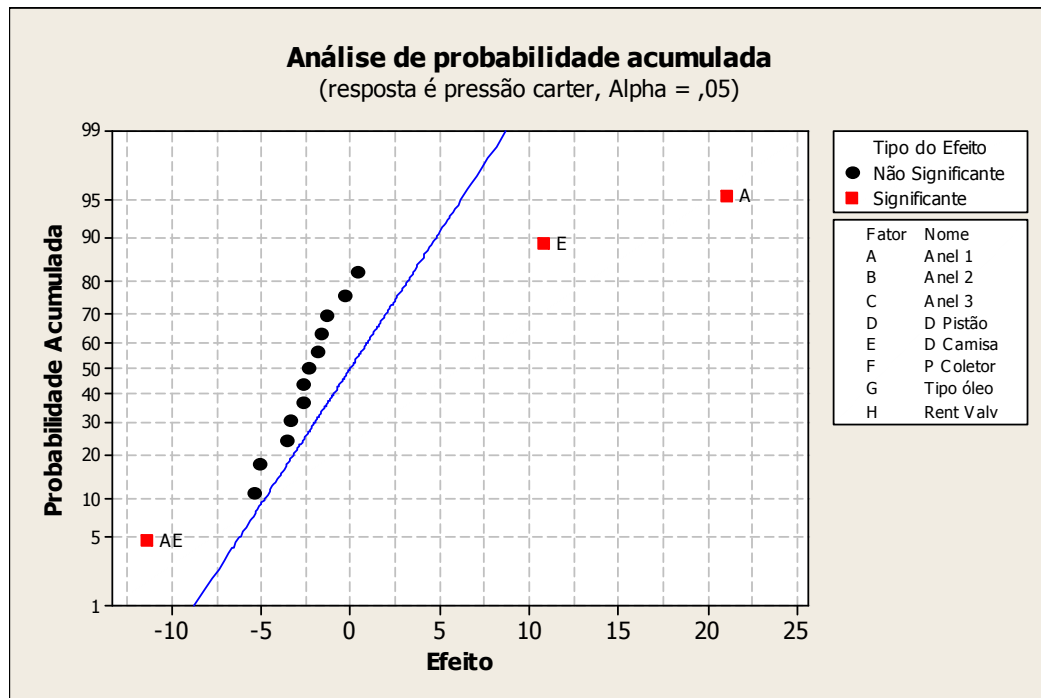


Figura 4.5 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: pressão de carter.

Na Figura 4.5 (acima), temos um gráfico de probabilidade acumulada para a variável de resposta pressão de carter. Vê-se que a reta indica uma distribuição normal e também se verifica a significância das variáveis A e E. Verifica-se também que a interação entre essas duas variáveis gera um efeito significativo na resposta (pressão de carter). Outro fator importante é que a maioria dos valores dos efeitos das outras variáveis está antes do valor zero do eixo dos efeitos, deixando a reta descentralizada, o que mostra que o procedimento de teste possa ter uma leve influência sistemática nos resultados obtidos.

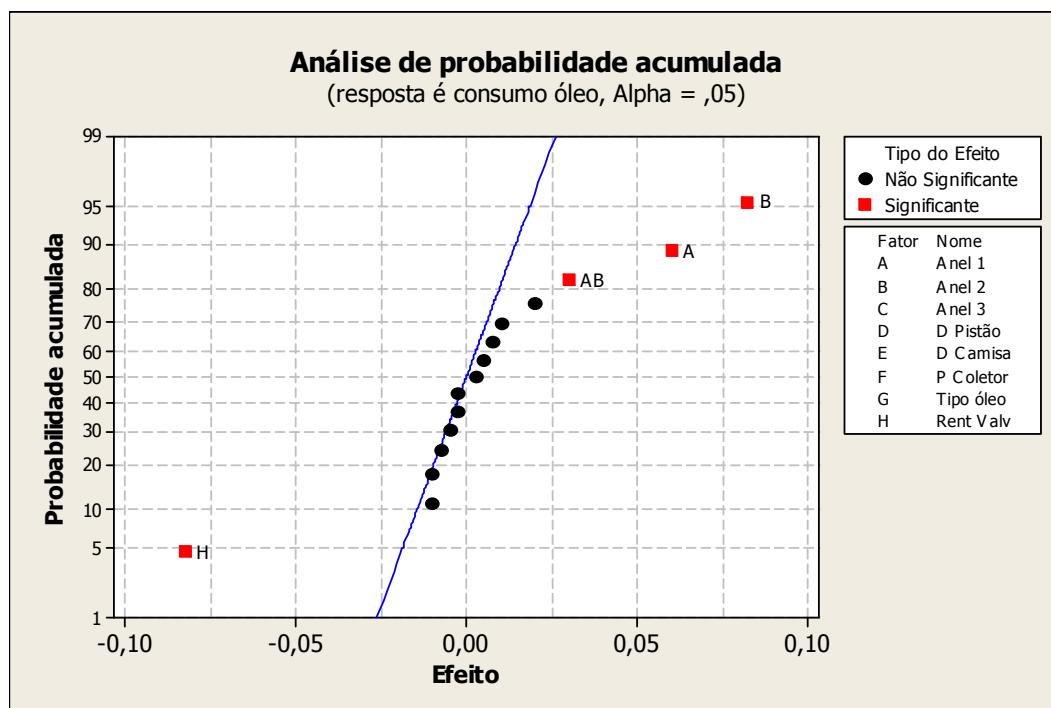


Figura 4.6 – Análise de probabilidade acumulada - variável de resposta: consumo de óleo.

Já na análise de probabilidade acumulada para a resposta consumo de óleo, vê-se que a reta também indica uma distribuição normal. A reta encontra-se centralizada, isto é, vê-se que os valores dos efeitos encontram-se divididos antes e depois do valor zero do eixo dos efeitos, o que evidencia que o procedimento de teste não interferiu nos resultados obtidos. Verifica-se também que além das variáveis A, B e H, que têm influência nos resultados de consumo de óleo, a interação entre as variáveis A e B também é importante.

5 CONCLUSÕES.

Com base no conhecimento gerado durante todo o trabalho conclui-se que o método de planejamento fatorial multivariado de experimentos se mostrou uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento dos componentes do sistema de transmissão de potencia do motor Diesel em questão.

Conforme mostram os cronogramas do capítulo 4 (Figura 4.3 e 4.4), utilizando o planejamento multivariado, verifica-se um ganho de aproximadamente três meses no cronograma do projeto, ao em relação a metodologia que não utiliza esta ferramenta.

Outra vantagem do planejamento multivariado é que em uma fase inicial do projeto é feito uma triagem de fatores. Essa massa de dados pode identificar uma série de necessidades e características do motor em questão, e podem ser utilizadas durante todo o projeto.

Outro fator positivo é que a chance de erro, ou a necessidade de refazer o projeto, utilizando a metodologia de planejamento multivariado é muito pequena, comparando com a metodologia normalmente usada, porque a escolha do melhor hardware (configuração dos componentes) é feita baseada em dados reais do motor.

Mas o planejamento multivariado de forma nenhuma elimina a necessidade da simulação numérica. Pelo contrário. Com uma massa de dados maior, é possível realizar um trabalho de simulação numérica mais preciso que pode identificar vulnerabilidades que os testes não encontraram. Esta atividade pode ser feita em paralelo à fase de refinamento do projeto.

Para as situações onde é necessário fazer uma melhoria de projeto, quer seja para resolver um problema de campo, ou uma redução de custos, troca de fornecedor, refinamento de um requisito de desempenho (como consumo de óleo) para uma determinada aplicação, por exemplo, o planejamento multivariado se mostra como uma ótima opção, devido ao ganho de tempo e a confiabilidade dos dados para definição dos componentes. Este tipo de situação ocorre com

frequência na indústria, sendo a maior demanda de trabalho para as áreas de pesquisa e desenvolvimento de componentes.

Porém existem situações em que não é possível partir para um planejamento multivariado logo no início de um projeto. Por exemplo, quando o motor a ser estudado é ainda um conceito, onde não é possível executar os ensaios em banco de teste devido à falta de componentes. Neste tipo de situação deve-se utilizar a simulação numérica, e mais adiante avaliar a necessidade de fazer o planejamento multivariado.

Para a fase 02 do trabalho, verificou-se que o planejamento multivariado do tipo fatorial fracionado foi eficaz para identificar entre os fatores estudados, quais os de maior relevância no comportamento das variáveis de saída (consumo de óleo e pressão de carter). O fato de ser um experimento fracionado, onde não são realizados testes com todas as configurações possíveis entre os componentes estudados, não prejudicou a análise dos dados.

Após a realização do estudo, é possível alterar as especificações do projeto para garantir que mesmo com a combinação de fatores, que vai acontecer dentro do ambiente de produção, tanto o consumo de óleo quanto a pressão de carter (variáveis de resposta) não vão apresentar valores fora do especificado dos limites de projeto.

Este tipo de estudo se mostra uma ferramenta eficaz para o controle dos processos de produção, pois a interação de características de diferentes componentes dos sistemas do motor (fatores) pode gerar uma série de respostas diferentes nas características de desempenho do mesmo.

É possível através do estudo realizado a identificação de quais são as características críticas para as respostas estudadas. Com isso pode-se alimentar o desenho destes componentes com essa informação de característica crítica de projeto, e exigir um controle maior destes fatores no processo produtivo, quer seja na planta do fornecedor do componente ou então na planta do fabricante do motor.

O mesmo estudo também pode ser aproveitado para verificar o comportamento de outras características do motor, devido à massa de dados levantada.

6 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Repetição do estudo de planejamento multivariado (fase 1 do trabalho) analisando também as condições em carga parcial (outra condição de utilização do motor na aplicação).

Estudo direcionado para cada um dos componentes estudados na fase 2 do trabalho, buscando melhorias de processo dos fornecedores para diminuir a dispersão durante o processo fabril, evitando assim aumento de consumo de óleo ou excesso de pressão de carter nos motores montados no processo fabril.

Estudo utilizando a metodologia de Monte Carlo, para verificação da possibilidade em prever o que acontecerá no processo fabril com a variação construtiva dos componentes, tomando como base do trabalho o levantamento de dados obtido na fase 1 do trabalho.

Aprimoramento da metodologia de simulação de anéis de pistão de motores, buscando maior sinergia entre os parâmetros considerados para levantamento dos dados de cálculo versus os resultados medidos em motor.

Ampliar a utilização da metodologia de planejamento multivariado para outros tipos de situações dentro do processo de desenvolvimento de produtos, como uma ferramenta de otimização de resultados, redução de tempo e redução de custos.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, P. **Measurements on piston ring friction**: current trends in Tribology. Poland: Institute for Terotechnology – National Research Institute, 2003.

ANDERSSON, P.; TAMMINEN, J.; SANDSTÖM, C.E. **Piston ring tribology**: a literature survey. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2178. Finlândia: Helsinki University of Technology, 2002.

BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 3. ed. Campinas, SP: UNICAMP, 2007. 480 p.

BASSHUYSEN, R. V.; SCHÄFER F. **Internal combustion engines handbook**: basics, components, systems, and perspectives. Warrendale, PA: SAE International, 2004.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. Experimental design for the exploration and exploitation of response surfaces. In: CHEW, V. **Experimental design in industry**. New York: John Wiley & Sons, 1978, capítulo 12.

CALVITI, C. M. A. **Estudo do processo de desenvolvimento de motores de combustão interna**. 2008. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DOWSON, D; PRIEST M.; DALMAZ G.; LUBRECHT A.A. Tribological research and design for engineering systems. **Tribology Series**, 41, Elsevier, 2003

FERGURSON, C. **Internal combustion engines applied thermo sciences**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1985.

FEUGA, L.; BURY, C. **Piston and ring mechanical losses**. Warrendale, PA: SAE International, 1984 (SAE Technical Papers SAE 841296).

GAHR, K. Z. **Microstructure and wear of materials**. North Holland: Elsevier Science Publishers, 1987.

GALDAMEZ, E. V. C. **A aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GLYNIADAKIS, G. V. **Análise de redução do ruído de batida de dentes da engrenagem do compressor do motor Diesel**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GUIBET, J. C. **Fuels and engines: technologies, energy, environment**. Paris: Editions Technip, 2000

HEISLER, H. **Advanced engine technology**. Londres: SAE International, 1995.

INFORMAÇÕES sobre legislação de emissões de poluentes. Disponível em: <www.dieselnet.com>. Acesso em: jan. 2010.

JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. **Controle da qualidade: handbook**. São Paulo: McGraw Hill, 1991. v. 1.

KS PISTÕES GRUPO KOLBENSCHMIDT. Pistões para motores de automóveis utilitários: projeto do pistão. São Paulo, 2001.

LIGIER, J. L.; BARON, E. **Acyclic and vibration**: application to combustion engines and transmissions, Volume 1. Paris: Editions Technip, 2002.

LOURENÇO, A. A. M. **Planejamento de experimentos aplicados ao desenvolvimento de combustão em motores Diesel**. 2008. 41f. (Monografia de pós-graduação) - Universidade Metodista de São Paulo, São Bernardo do Campo, SP, 2008.

MAHLE METAL LEVE. Manual Técnico Motores de Combustão Interna. São Paulo, 2003.

MAHLE. Manual de Pistões. São Paulo, 1997.

McGEEHAN, J. A.; **A literature review of the effects of piston and ring friction and lubrication oil viscosity on fuel economy**. Warrendale, PA: SAE International, 1978. (SAE Technical Papers 780673).

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997.

MUNRO, R.; **Blow-By in relation to piston and ring feature**. Warrendale, PA: SAE International, 1981. (SAE Technical Papers 810932)

PRIEST M.; TAYLOR C. M. **Automotive engine tribology – approaching the surface wear**, London: Elsevier, v. 241, n. 2, p.193-203, July 2000.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

RABUTÉ, R.; TIAN, T. Challenges involved in piston top rings designs for modern SI engines. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, Dayton, v. 123, n. 2, p. 448-460, April 2001.

RICARDO, H. R. **The high speed internal combustion engines**. Londres: Blackie & Son Limited, 1952.

RIKEN. **Piston ring museum**. Disponível em: <<http://www.riken.co.jp/e/piston/index.html>>. Acesso em: 19 ago. 2010.

RODRIGUES, M. C. Estudo da influência dos parâmetros de injeção de combustível no ruído emitido por motores Diesel, fazendo uso do planejamento multivariado de experimentos. 2010. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011.

ROGOWSKI, A. R. **Elements of internal combustion engines**. Estados Unidos, McGraw-Hill, 1953.

SABURI, S.; SAITOH, Y.; YAMADA, T. Tribology between piston rings and cylinder liners of marine Diesel engines. **IHI Engineering Review**, v. 38, n.1. February 2005. Disponível em:<http://www.ihl.co.jp/ihl/file/technologygihou2/10003_3.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2010.

TAGUCHI, G. **Taguchi on robust technology development**: bringing quality upstream by Genichi Taguchi. New York: ASME, 1993

TAYLOR, C. M. **Engine tribology**. Amsterdam: Elsevier, 1993. (Tribology Series, 26).

TOMANIK, E. **Modelamento do desgaste por deslizamento em anéis de pistão de motores de combustão interna**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

TOMANIK, E.; ZABEU, C.; ALMEIDA, G. **Abnormal wear on piston top groove**. Warrendale, PA: SAE International, 2003. (SAE Technical Paper 2003-01-1102).

TRUHAN, J.; QU J.; BLAU P.; A rig test to measure friction and wear of heavy duty Diesel engine piston rings and cylinder liners using realistic lubricants. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 211-218. Mar. 2005.

TUNG, S. C.; McMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. **Tribology International**, v. 37, n. 7, p. 517-536, 2004.

TUNG, S. C; HONG, G. Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energy-conserving oils and 98 ethanol fuels. **Wear**, v. 255, n.7-12, p.1276-1285, 2003.

VOLCI, G. A. **Comportamento tribológico do anel de primeiro canaleta em motores operando em sistemas Flex Fuel**. 2007. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

YOSHIDA, H.; KUSAMA, K.; SAGAWA, J. **Effects of surface treatments on piston ring friction force and wear**. Warrendale, PA: SAE International, 1990. (SAE Technical Paper 900589).

YÜKSEL, F.; YÜKSEL, B. The use of ethanol–gasoline blend as a fuel in an SI engine, **Renewable Energy**, v. 29, n. 7, p. 1181-1191. June 2004.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BLACK, N. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008. 601p.

BUTTON, S.T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. Campinas: FEM, Universidade Estadual de Campinas, 2001. Apostila (IM 317) não publicada.

COSTA, L. C. **Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de fornos de coque da COSIPA**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GARCIA, O. BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. São Paulo: Faculdade de Engenharia Industrial, 1992.

GUEDES, T. A. **Procedimentos de otimização no planejamento e controle da qualidade de produtos e processos**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996

LICHTY, L. C. **Internal combustion engines**. Estados Unidos: Universidade Cornell, McGraw-Hill, 1951.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

MWM INTERNATIONAL MOTORES. **Consumo de óleo lubrificante em dinamômetro**. Procedimento IT 76203598. São Paulo, 2008.

MWM INTERNATIONAL MOTORES. **Limites de operação do motor**. Procedimento IT 76203687. São Paulo, 2008.

MWM INTERNATIONAL MOTORES. **Obtenção de desempenho em dinamômetro**. Procedimento IT 76203624. São Paulo, 2007.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1995.

PERINI, R. **O uso da difração de raios X para determinação da tensão residual induzida pelo processo de roleteamento de uma camisa de cilindro de motor Diesel**. 2008. 125f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROSS, P. J. **Aplicações das técnicas de Taguchi na engenharia da qualidade**. São Paulo: McGraw Hill, 1991.

SANCHES, R. A. **Procedimento para o desenvolvimento de tecidos de malha a partir de planejamento de experimentos**, 2006. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2006.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, A. E.; HSING, T.C. **Engenharia da qualidade em sistemas de produção**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

TAYLOR C.F. **The internal combustion engine in theory and practice**. Cambridge: M.I.T., 1985. v. 2.

WERKEMA, M.C.C., AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos**: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: UFMG ; Fund. Christiano Ottoni, c1996. (Ferramentas da qualidade; v.8).