

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR... *Leandro Lafiandre Nahas*...  
E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *15.07.2010*

*[Assinatura]*  
ORIENTADOR

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

Autor: Leandro Lafiandre Nahas

**Identificação da causa de falha de camisa de  
cilindro de um motor de combustão interna**

Campinas, 2010.

Leandro Lafiandre Nahas

# **Identificação da causa de falha de camisa de cilindro de um motor de combustão interna**

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: Dinâmica

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Menezes

Campinas  
2010

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

N164i Nahas, Leandro Lafiandre  
Identificação da causa de falha de camisa de cilindro  
de um motor de combustão interna / Leandro Lafiandre  
Nahas. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: João Carlos de Menezes.  
Dissertação de Mestrado (Profissional) -  
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Elétrica  
e Instituto de Química.

1. Motores de combustão interna - Cilindros. 2.  
Automóveis - Motores - Cilindro. I. Menezes, João  
Carlos de. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Mecânica, Faculdade de  
Engenharia Elétrica e Instituto de Química. III. Título.

Título em Inglês: Identification of the cause of failure of cylinder line of an  
engine of internal combustion

Palavras-chave em Inglês: Internal combustion engines - Cylinders, Cars -  
Engines - Cylinder

Área de concentração: Dinâmica

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Alfredo Rocha de Faria, Flavio Luiz de Silva Bussamra

Data da defesa: 15/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

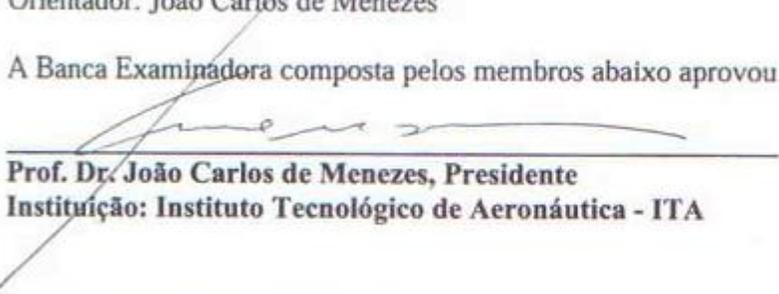
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL**

**Identificação da causa de falha de camisa de  
cilindro de um motor de combustão interna**

Autor: **Leandro Lafiandre Nahas**  
Orientador: **João Carlos de Menezes**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João Carlos de Menezes, Presidente**  
**Instituição: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Alfredo Rocha de Faria**  
**Instituição: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA**

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Flávio Luiz de Silva Bussamra**  
**Instituição: Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA**

Dedico este trabalho à minha família que me apoiou, incentivou e compreendeu minha ausência durante o tempo dedicado a este trabalho.

## **Agradecimentos**

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

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores da Unicamp e ITA

A todos os colegas de departamento da empresa, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A MWM International que me proporcionou a oportunidade de realizar este importante curso de mestrado profissional.

“Existem mais pessoas que desistem do que pessoas que fracassam”.  
Henry Ford

## Resumo

Este projeto originou-se quando a família de motores objeto deste estudo foi introduzida no mercado e já os primeiros lotes de motores produzidos apresentaram esta falha, vulgarmente conhecida como degola da camisa.

Esta falha compreende a trinca e propagação por todo o perímetro da camisa de cilindro e consequentemente a descida da camisa para a parte inferior do bloco do motor. Durante a descida, a camisa choca-se com elementos girantes do motor e vem por sua vez colapsar por completo.

Este trabalho tem como base a extrapolação dos limites especificados em projeto da camisa de cilindro do tipo seca. Veremos que mínimas variações dimensionais no projeto da camisa de cilindro podem ter consequências gravíssimas para o conjunto.

Analisaremos um caso real onde a mínima variação no projeto foi fatal para o componente e suas consequências, catastróficas para o motor.

Para a determinação da causa raiz e consequentemente a solução do problema, foi utilizada a metodologia “Six Sigma “.

### *Palavras Chave*

- Camisa de Cilindro, Motor de combustão interna.

## **Abstract**

This project has been started as a consequence of repeated failures reported by users of a family of diesel engines introduced in the Brazilian market. The reported imperfections were investigated and in all cases a failure of the engine sleeve could be observed as the main cause of the engines breakdown. Cracks propagations have been in the region of the flange of cylinder sleeves. As the cracks propagate at the inner region of the flanged of the sleeve, where high stresses can be anticipated, a rupture of the flange, separating this part from the sleeve, used to occur. This occurrence is vulgarly named as the "decapitation of the sleeve". As a consequence of this phenomenon, the sleeve descends to the lower part of the engine block crashing against the moving parts of the engine, causing a complete collapse of the internal parts of the engine.

The present work reports all phases of the investigation which revealed the main cause of the failures. In order to accomplish this research, the "Six Sigma" method has been employed as a supporting methodology.

### *Key Words*

Flanged sleeve, internal combustion engine

## Lista de Ilustrações

Figura 1	Motor Wankel	11
Figura 2	Motor 2 Tempos Detalhes da primeira fase de operação.	13
Figura 3	Motor 2 Tempos Detalhes da segunda fase de operação	14
Figura 4	Motor 4 Tempos Otto Detalhes da primeira fase de operação	16
Figura 5	Motor 4 Tempos Otto Detalhes da segunda fase de operação	17
Figura 6	Motor 4 Tempos Otto Detalhes da terceira fase de operação	18
Figura 7	Motor 4 Tempos Otto Detalhes da quarta fase de operação	19
Figura 8	Motor 4 Tempos Diesel Detalhes da primeira fase de operação	20
Figura 9	Motor 4 Tempos Diesel Detalhes da segunda fase de operação	21
Figura 10	Motor 4 Tempos Diesel Detalhes da terceira fase de operação	22
Figura 11	Motor 4 Tempos Diesel Detalhes da quarta fase de operação	23
Figura 12	Disposição de cilindros em linha	24
Figura 13	Disposição de cilindros em “ V “	24
Figura 14	Disposição de cilindros opostos	25
Figura 15	Detalhe de um motor em corte	26
Figura 16	Detalhes de um bloco de cilindros	27
Figura 17	Detalhes de cabeçotes individuais	28
Figura 18	Detalhes de cabeçote único	29
Figura 19	Detalhes de um carter	30
Figura 20	Detalhes de um sistema com camisas úmidas	32
Figura 21	Detalhes de um sistema com camisas secas	33
Figura 22	Detalhes de um virabrequim	34
Figura 23	Detalhes de um volante de motor	35
Figura 24	Detalhes conjunto pistão anéis e biela	37
Figura 25	Detalhes de Válvulas e Eixo Comando de Válvulas	38
Figura 26	Ilustração do motor	40
Figura 27	Detalhes de um motor falhado	42
Figura 28	Gráfico com o histórico das falhas	43
Figura 29	Gráfico com as falhas divididas – Campo / Internas	44
Figura 30	Detalhes da aplicação do bissulfeto e prensagem da camisa no bloco	51
Figura 31	Detalhes da medição da altura das camisas	55
Figura 32	Diagrama de causa e efeito – Ishikawa	58
Figura 33	Gráfico com as causas priorizadas - Pareto	59
Figura 34	Detalhes dos pontos de medição nas camisas	62
Figura 35	Detalhes da região de fratura da camisa	66
Figura 36	Detalhes do corpo de provas da camisa	67
Figura 37	Detalhes do dispositivo de	determinação da tensão na camisa

Figura 38	Detalhes do dispositivo real de determinação da tensão na camisa	69
Figura 39	Detalhes do modelo de elementos finitos usado para determinação das tensões reais nas camisas	71
Figura 40	Detalhes do modelo de elementos finitos usados nas análises	74
Figura 41	Modelo de elementos finitos – Flat Contact	75
Figura 42	Resultados do modelo de elementos finitos – Flat Contact	75
Figura 43	Modelo de elementos finitos – Mínimo Ângulo	76
Figura 44	Resultados do modelo de elementos finitos – Mínimo Ângulo	76
Figura 45	Modelo de elementos finitos – Máximo Ângulo	77
Figura 46	Resultados do modelo de elementos finitos – Máximo Ângulo	77
Figura 47	Modelo de elementos finitos – Ângulo Fora do especificado	78
Figura 48	Resultados do modelo de elementos finitos – Ângulo Fora do especificado	78
Figura 49	Modelo de elementos finitos – Ângulo Proposto	79
Figura 50	Resultados do modelo de elementos finitos – Ângulo Proposto	79
Figura 51	Detalhes da especificação do ângulo de assentamento da camisa no bloco	81
Figura 52	Detalhes do motor após a comprovação do DOE	87

## Lista de Tabelas

3.1	Estatísticas das falhas internas	37
3.2	Estatística Histórica das falhas internas	41
4.1	Causas potenciais levantadas	59
4.2	Medições do ângulo de assentamento do bloco M1A 335514	62
4.3	Medições do ângulo de assentamento do bloco M1A 336223	63
4.4	Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 2	64
4.5	Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 3	64
4.6	Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 4	65
4.7	Medições da carga de ruptura dos corpos de prova ( camisas Acabadas )	72
4.8	Medições da carga de ruptura dos corpos de prova ( camisas Semi acabadas )	72
4.9	Resultados das análises de elementos finitos ( Tensão de ruptura )	80
5.1	Tabela com os fatores e níveis do DOE	86
5.2	Tabela com os resultados do DOE	87

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Termos em Inglês*

- Six Sigma** – Seis Sigmas – Metodologia de análise de falhas  
**Heavy Duty** – Motor de alto torque  
**Power Kit** – Kit de Potência do motor ( Pistões, anéis, biela )  
**High Speed** – Motores de Alta rotação  
**Hot Test** – Teste de produção em Dinamômetro  
**Cost Avoidance** – Custo de Imagem do produto  
**Define** – Etapa de Definição do projeto seis sigmas  
**Measure** - Etapa de Medição dos parâmetros do projeto seis sigmas  
**Analyze** - Etapa de Análise dos dados do projeto seis sigmas  
**Improve** - Etapa de Implementação das melhorias do projeto seis sigmas  
**Control** - Etapa de Controle dos parâmetros do projeto seis sigmas  
**Design** - Etapa de Projetar do projeto seis sigmas  
**Verify** - Etapa de Verificação do projeto seis sigmas  
**Champions** – Responsáveis pela implementação do seis sigmas  
**Black Belts** – Operam abaixo dos Master Black Belts para aplicar a metodologia em projetos  
**Green Belts** – Executam o projeto seis sigmas  
**Master Black Belts** – Especialistas internos para o seis sigmas na organização  
**Failure Modes Effects Analysis** - Análise de Efeitos de Modos de Falha  
**Cost Benefit Analysis** - Análise Custo-Benefício  
**Customer Output Process Input Supplier Maps** - Mapa de processos Fornecedor / Cliente  
**Measurements** – Métricas  
**Material** – Materiais  
**Personnel** – Pessoas  
**Environment** – Meio Ambiente  
**Methods** – Métodos  
**Machines** – Maquinas  
**Lessons Learned** – Lições Aprendidas  
**Stress** - Tensões  
**Flat Contact** – Contato sem angulação  
**Gap Elements** – Folgas entre os elementos  
**Assembly load** – Carga de prensagem

**Radius** – Raio  
**Imposed Displacement** – Carregamento  
**Press Fit** – Carga  
**Maximum Interference** – Interferência Máxima  
**Minimum Interference** - Interferência Mínima  
**Maximum Assembly load** – Máxima carga de prensagem  
**Situation** – Situação  
**Proposed Angle** – Ângulo Proposto  
**Step** - Etapa

.....

### *Subscritos*

3 - número de fatores envolvidos na análise

.....

### *Abreviações*

**MIM** - MWM International Motores  
**HCS 485** – Máquina de Usinagem Heller  
**MS 555** – Máquina de Usinagem Mori Seki  
**DOE** – Delineamento de experimentos  
**CEO** - Chief Executive Officer / Presidente da Empresa  
**PMI** – Ponto morto inferior ( ponto mais baixo que o pistão chega durante as revoluções )

### *Siglas*

**DETF** - Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos  
**DMAIC** – Define, Measure, Analyze, Improve e Control  
**DMADV** – Define, Measure, Analyze, Design, Verify

.....

### *Letras Latinas*

V – Disposição dos cilindros

.....

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
3 MATERIAL E MÉTODOS	5
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
6 CONCLUSÕES	92
7 REFERÊNCIAS	95

## **Capítulo 1**

### **Introdução**

Com a competitividade no setor industrial, particularmente no setor automobilístico, se faz necessário que as empresas sejam cada vez mais competitivas e capacitadas, forçando a elevação da qualidade com o menor custo possível.

Analisando este paradigma, um fator essencial é a minimização das falhas em seus produtos, buscando sempre a falha zero, pois além dos custos de garantia, a imagem do produto perante o mercado é um fator prioritário.

Assim como a competitividade interna, a globalização impulsiona a indústria a se modernizar e galgar índices cada vez maiores de qualidade.

Com a competitividade no setor industrial, particularmente no setor automobilístico, se faz necessário que as empresas sejam cada vez mais competitivas e capacitadas, forçando a elevação da qualidade com o menor custo possível.

Este projeto se faz muito importante para a empresa, pois a imagem do produto no mercado esta enfraquecida devido ao alto índice de falhas e alto custo de reparo. Todos os recursos e esforços da companhia foram disponibilizados e utilizados para a análise e definição da sua causa raiz. Utilizou-se a metodologia “ Six Sigma ” como roteiro para as análises deste problema.

## **1.1 Objetivos do Trabalho:**

Este projeto tem como objetivo avaliar as causas potenciais geradoras de uma falha específica desta família de motores, cujo projeto prevê a utilização de camisas de cilindros do tipo seca. Definir as causas potenciais e sanar o problema, esta que afeta esta família de motores desde sua introdução no mercado, gerando alto custo de garantia e perda da imagem do produto. Esta falha consiste na trinca da camisa de cilindro, sua propagação durante o funcionamento do motor e o choque com as partes moveis levando a sua completa destruição.

Tendo em vista a importância da cobrança que os clientes e usuários finais dos veículos fazem para que os componentes dos motores tenham uma vida maior, este trabalho tem como objetivo a eliminação de um modo de falha exclusivo desta família de motor, tendo como causa a fratura da camisa de cilindro, trazendo consequências catastróficas ao motor e com grande risco de acidentes.

A empresa conta com inúmeras famílias de motores, desde motores agrícolas, estacionários, veiculares e até motores maiores chamados de “Heavy Duty”. Cada família de motores tem sua particularidade e cada projeto é específico para a designação final de uso do componente.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

O funcionamento dos motores de combustão interna baseia-se na compressão do combustível por um pistão dentro de um cilindro juntamente com ar aspirado do ambiente. A mistura formada entre o combustível e o ar é queimada, produzindo pressões elevadas, e então se expande. A expansão da mistura queimada gera o movimento do pistão, que é transmitido para as rodas do veículo. [4]

Os motores de combustão interna de êmbolos são constituídos, basicamente, por um cilindro fechado, contendo em seu interior um êmbolo acoplado a um mecanismo biela manivela.

Os motores de combustão interna podem funcionar segundo dois ciclos termodinâmicos teóricos, denominados ciclo Otto e ciclo Diesel. [4]

Os motores de combustão interna podem apresentar números de cilindros que variam de 3 até 12 cilindros que variam dependendo da potência esperada. Usualmente tem-se motores de no máximo 8 cilindros onde sua disposição pode ser alinhada ou em V, permitindo menor espaço.

Para a obtenção de velocidades mais elevadas e ou para uma maior capacidade de carga, emprega-se um projeto de sistema de transmissão, que é um grupo de peças e equipamentos que transfere a potência do motor para as rodas.

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

#### Metodologia 6 Sigmas

**Seis Sigmas** ou *Six Sigma* (em inglês) é um conjunto de práticas originalmente desenvolvidas pela Motorola, para melhorar sistematicamente os processos ao eliminar defeitos. Um defeito é definido como a não conformidade de um produto ou serviço com suas especificações. Seis Sigmas também é definido como uma estratégia gerencial para promover mudanças nas organizações, fazendo com que se chegue a melhorias nos processos, produtos e serviços para a satisfação dos clientes.[6]

Diferente de outras formas de gerenciamento de processos produtivos ou administrativos, o Six Sigma tem como prioridade, a obtenção de resultados de forma planejada e clara, tanto de qualidade como principalmente financeiros.[7]

## APLICAÇÃO E SUCESSO

Começando pela manufatura, hoje o 6-Sigmas é usado através de uma ampla gama de indústrias como bancos, telecomunicações, seguradoras, construtoras, saúde e software. Alguns exemplos não ligados à manufatura são:

### **Saúde**

O Hospital Batista da Carolina do Norte diz, "A adoção do sistema 6-Sigma de melhoria de processos está começando a mostrar os resultados que transformam os céticos em crentes." e "Um time de melhoria 6-Sigma encarregado de reduzir o tempo do transporte de um paciente com infarto da área de emergência ao laboratório de cateterização cortou 41 minutos do tempo médio do hospital".

### **Bancos**

O Bank of America tem usado o 6-Sigma para redução da avaliação do risco de crédito, prevenção de fraudes e melhoria da satisfação do cliente. Esta iniciativa resultou em benefícios de mais de 2 bilhões de dólares, e aumentou a satisfação do cliente em 25%.

### **Seguradoras**

Companhias de seguro têm usado 6-Sigmas para várias tarefas críticas como redução dos tempos de atendimento. Por exemplo, a CIGNA Dental reporta que houve uma redução em processos pendentes em mais de 50%.

## **Construção**

Na engenharia e construção da conexão ferroviária no túnel do Canal da Mancha, o time de projetos da Bechtel descobriu uma maneira de economizar centenas de horas de trabalho em um dos trabalhos de escavação. [9]

## **METODOLOGIA**

O 6-Sigmas tem duas metodologias chave - DMAIC e DMADV. DMAIC é usado para melhorar um processo de negócios existente. DMADV é usado para criar um novo design de produto ou processo de forma a obter uma performance mais previsível, madura e livre de defeitos.[8]

### **DMAIC**

**A metodologia básica consiste nos cinco estágios seguintes:**

Definir (Define) formalmente os objetivos de melhoria do processo que sejam consistentes com as demandas do cliente e a estratégia da empresa.

Medir (Measure) para definir as medições base no processo atual para comparação futura. Mapear e medir o processo em questão e coletar os dados necessários do processo.

Analisar (Analyze) para verificar o relacionamento e causalidade dos fatores. Qual é o relacionamento? Há outros fatores que não foram considerados?

Melhorar (Improve) e aperfeiçoar o processo em base à análise usando técnicas como desenho de experimentos.

Controlar (Control) o processo com testes piloto, realizar a transição para a produção e depois medir continuamente o processo para garantir que as variações são corrigidas antes de se transformarem em defeitos. [9]

## **DMADV**

### **A metodologia básica consiste nos cinco estágios seguintes:**

Definir (Define) formalmente os objetivos de melhoria do processo que sejam consistentes com as demandas do cliente e a estratégia da empresa.

Medir (Measure), identificando os CTQs, capacidades do produto, capacidade do processo produtivo, avaliação de risco, etc.

Analisar (Analyze), desenvolvendo alternativas de design, criando um design de alto nível e avaliando sua capacidade, para selecionar o melhor design.

Desenhar (Design), desenvolvendo o detalhe do desenho, otimizando e planejando sua verificação. Esta fase pode precisar de simulações.

Verificar (Verify) o desenho, realizar testes piloto e implementar processos produtivos. Esta fase também pode precisar de simulações. [9]

## **EXEMPLOS DE ALGUMAS FERRAMENTAS UTILIZADAS**

- Failure Modes Effects Analysis (Análise de Efeitos e Modos de Falha)
- Cost Benefit Analysis (Análise Custo-Benefício)
- Customer Output Process Input Supplier Maps
- Mapas de Processos
- Gráficos
- Histogramas
- ANOVA Gage R&R
- Diagrama de Causa e Efeito ("Espinha de Peixe", ou Ishikawa)
- Anova
- Homogeneidade da Variância
- Modelo Linear Geral
- Regressão
- Correlação
- Desenho de Experimentos
- Taguchi
- Gráficos de Controle

### **3.1 Motores de Combustão Interna:**

Os motores de combustão utilizados nos veículos automóveis atualmente são do tipo “endotérmico”, transformam a energia térmica gerada pela combustão da mistura ar/combustível em energia mecânica. [4]

Os motores podem ser construídos de diversas formas e funcionamento, podendo classificar-se segundo o tipo de movimento em:

- **Motores de movimento rotativo**
- **Motores de movimento alternativo**

### 3.1.1 Motores de movimento rotativo

Motor de Wankel:

Este motor, de movimento rotativo, menos usual do que os anteriores realizam em cada rotação do rotor, uma sequência de quatro operações – admissão, compressão, explosão e escape.

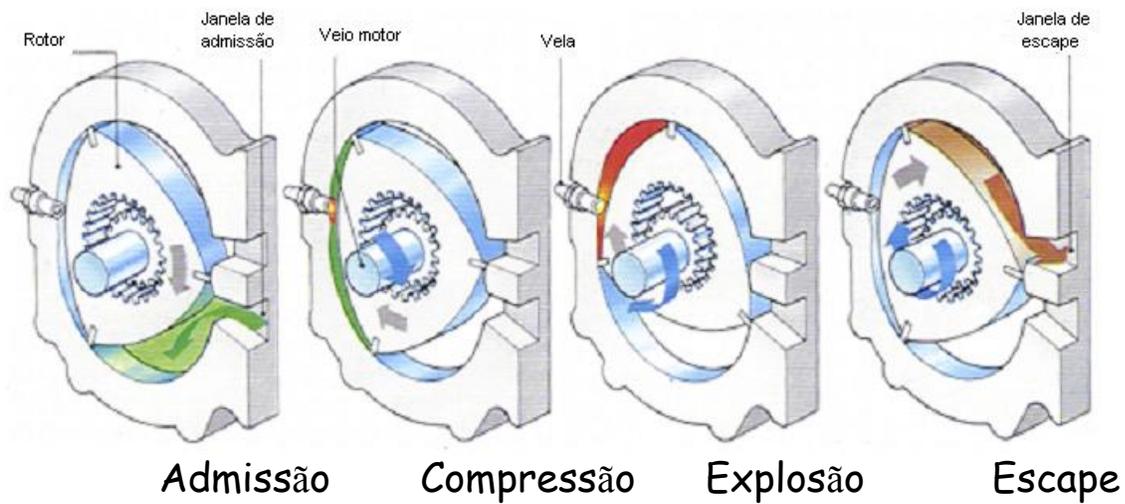


Figura 1 – Motor Wankel  
Detalhes das quatro fases de operação

### **3.1.2 Motores de movimento alternativo**

Os motores de movimento alternativo, geralmente utilizados nos veículos automóveis, têm como princípio de funcionamento o movimento alternativo do pistão no interior do cilindro, que transmite, através da biela, um movimento circular ao virabrequim, os quais iremos concentrar nossos estudos.

Classificam-se segundo o combustível empregado em:

- Motores de gás
- Motores de gasóleo ou fuel-óleo
- Motores de gasolina

Classificam-se segundo a forma como se realiza a combustão em:

- Motores Otto
- Motores Diesel

#### **3.1.2.1 Motores de 2 Tempos:**

A seqüência de operações – admissão, compressão, expansão e escape, realizam-se num ciclo de 2 movimentos do pistão.

## 1ºTempo – Expansão/Admissão

A mistura gasolina-ar explode e empurra o pistão para baixo e uma nova mistura entra no cárter pela janela de admissão. O pistão empurra a mistura nova para a janela de transferência e começa a abrir a janela de escape.

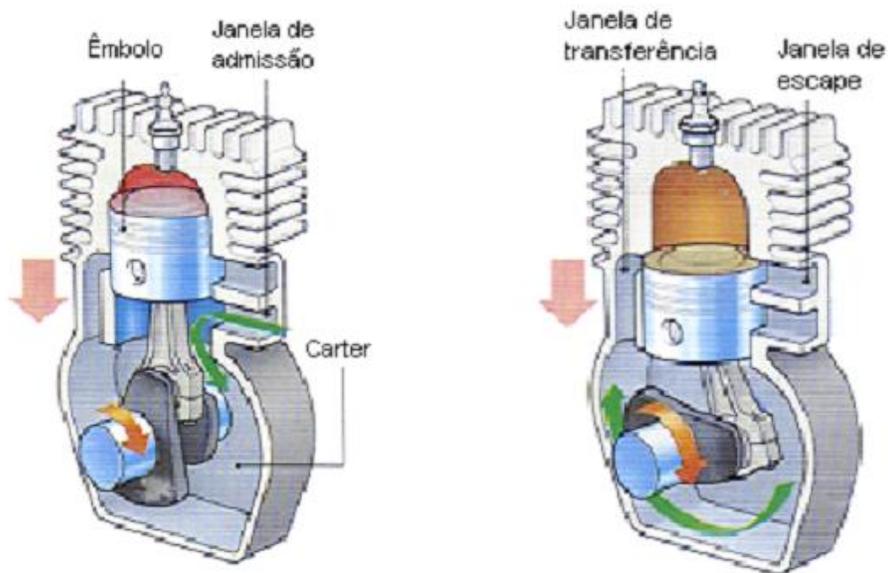


Figura 2 – Motor 2 Tempos  
Detalhes da primeira fase de operação

## 2º Tempo – Compressão/Escape

A janela de transferência é aberta, passando a mistura para a parte superior do cilindro, o que ajuda a expulsar os gases. O pistão sobe, fechando a janela de escape e comprimindo a mistura e na vela salta a faísca.

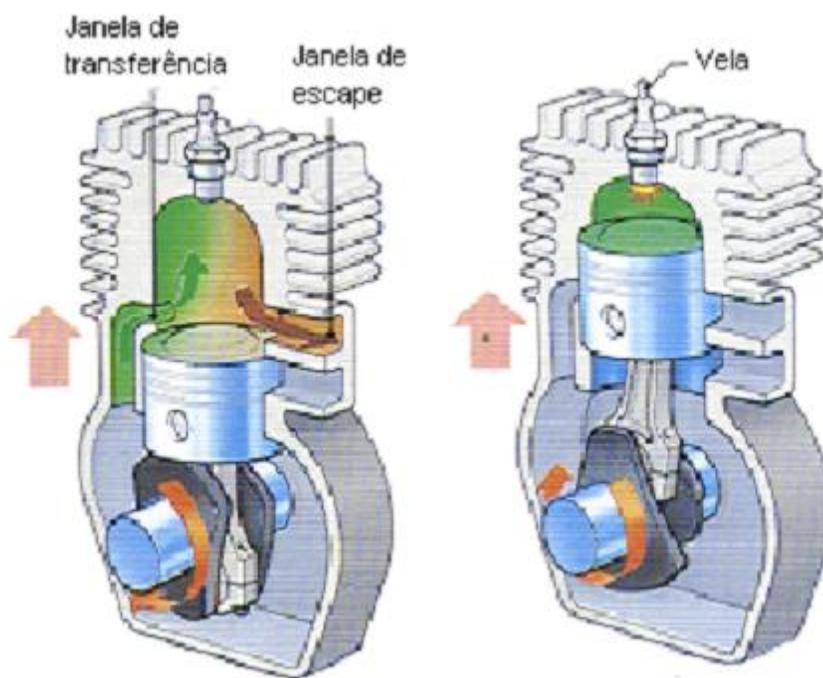


Figura 3 – Motor 2 Tempos  
Detalhes da segunda fase de operação

### **3.1.2.2 Motores de 4 Tempos:**

A seqüência de operações – admissão, compressão, expansão e escape – realizam-se num ciclo de 4 movimentos do pistão, e se dividem em dois subgrupos:

#### **3.1.2.2.1 Ciclo de 4 Tempos - OTTO**

Motores movidos à gasolina ou a álcool são exemplos de motores com ignição por centelha ( OTTO ). Neste caso, a queima de combustível é iniciada com uma centelha fornecida pela vela de ignição, que é um componente instalado na superfície superior do cilindro, na parte chamada cabeçote do cilindro.

## 1ºTempo-admissão

O pistão ao descer, aspira a mistura gasolina-ar para o cilindro através da válvula de admissão aberta.

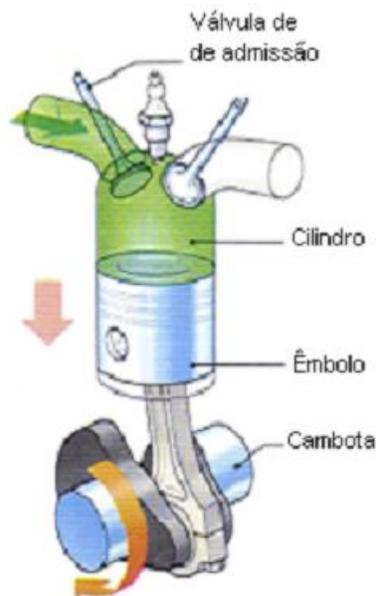


Figura 4 – Motor 4 Tempos Otto  
Detalhes da primeira fase de operação

## 2º Tempo-compressão

A válvula de admissão fecha-se e o pistão sobe, comprimindo a mistura, saltando uma faísca na vela

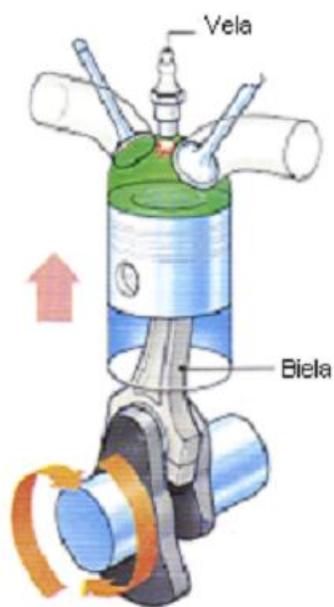


Figura 5 – Motor 4 Tempos Otto  
Detalhes da segunda fase de operação

### 3ºTempo-expansão

A mistura inflamada pela faísca da vela, explode e empurra o pistão para baixo

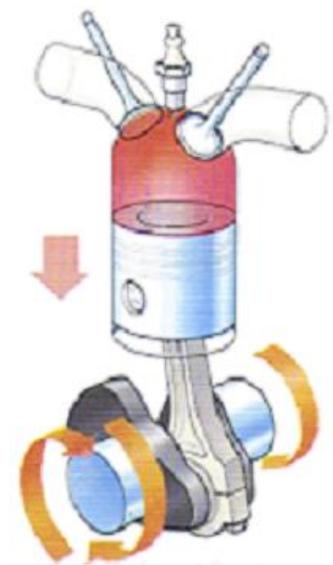


Figura 6 – Motor 4 Tempos Otto  
Detalhes da terceira fase de operação

#### 4ºTempo-escape

A válvula de escape abre-se, e o pistão ao subir expelle do cilindro os gases de combustão.

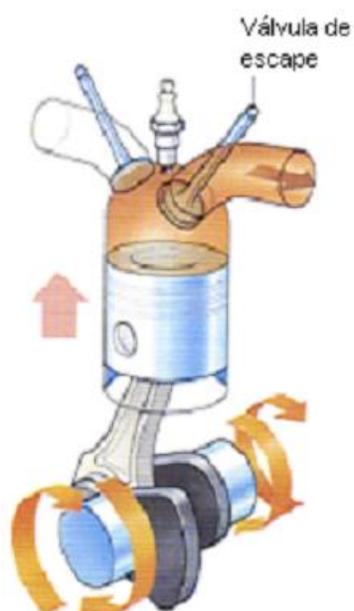


Figura 7 – Motor 4 Tempos Otto  
Detalhes da quarta fase de operação

### 3.1.2.2.2 Ciclo de 4 Tempos - DIESEL

Este motor inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, é do ponto de vista estrutural, igual ao motor ciclo OTTO. Nestes motores de ignição por compressão, a mistura ar/combustível é feita na câmara de combustão.

O ar que entra na câmara de combustão na fase de admissão é submetido a uma elevada compressão, seguindo-se a entrada de combustível que inflama ao contatar com o ar quente comprimido.

#### 1ºTempo-admissão

O pistão ao descer, aspira ar para dentro do cilindro através da válvula de admissão aberta.

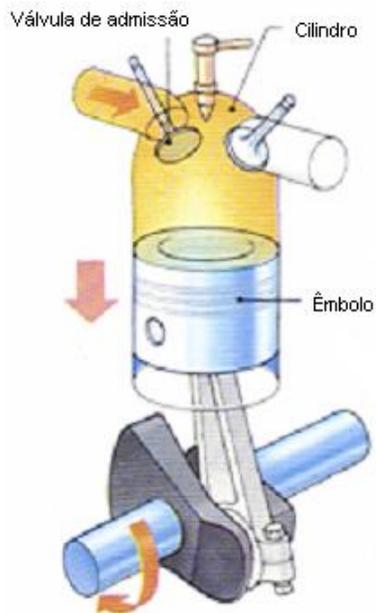


Figura 8 – Motor 4 Tempos Diesel  
Detalhes da primeira fase de operação

## 2ºTempo-compressão

A válvula de admissão fecha-se, e o pistão ao subir, comprime o ar, aquecendo-o e o combustível é injectado.

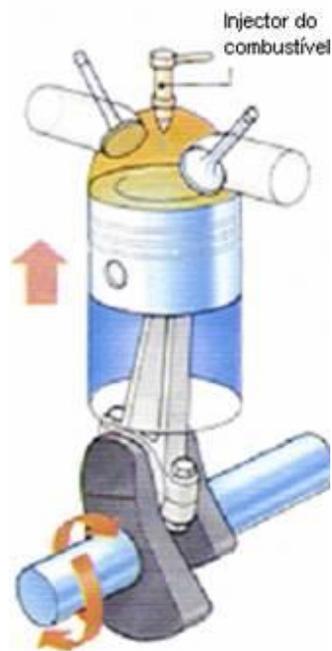


Figura 9 – Motor 4 Tempos Diesel  
Detalhes da segunda fase de operação

### 3ºTempo-expansão

O combustível inflamado pelo ar que aqueceu, explode e empurra o pistão para baixo.

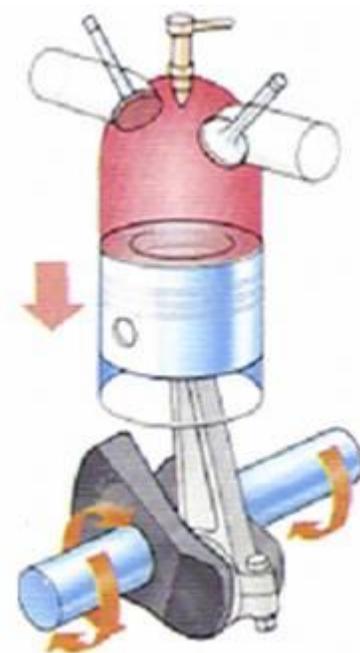


Figura 10 – Motor 4 Tempos Diesel  
Detalhes da terceira fase de operação

#### 4ºTempo-escape

A válvula de escape abre-se, e o pistão ao subir expelle do cilindro os gases de combustão.

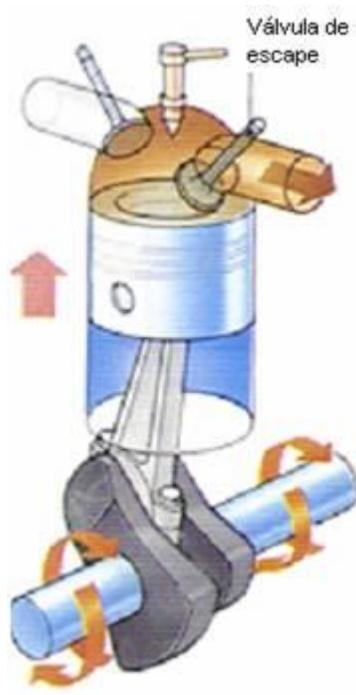


Figura 11 – Motor 4 Tempos Diesel  
Detalhes da quarta fase de operação

Os cilindros dos motores de movimento alternativo podem ter disposições diferentes

### Cilindros em linha

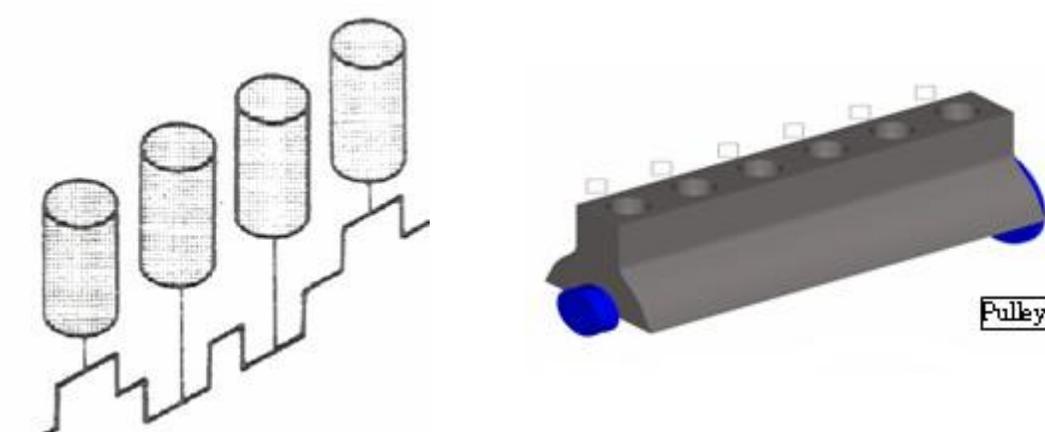


Figura 12 –Disposição de cilindros em linha

### Cilindros em V

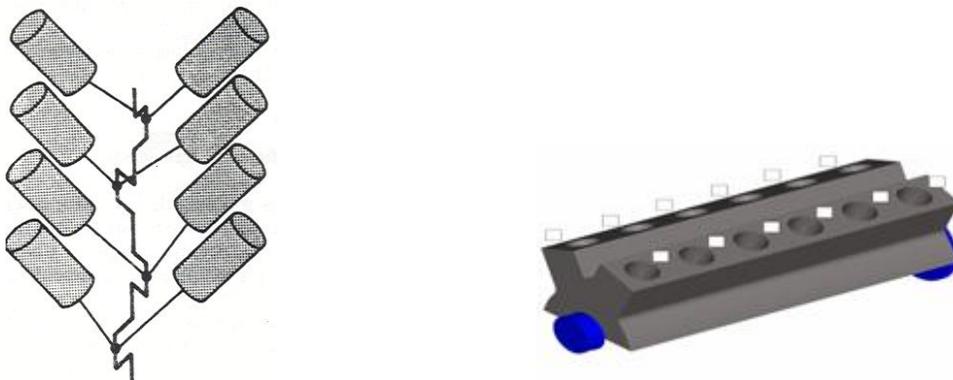


Figura 13 – Disposição de cilindros em “V”

## Cilindros opostos

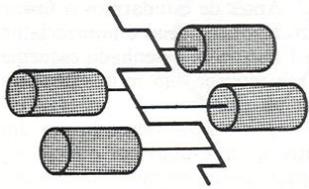


Figura 14 – Disposição de cilindros opostos

### 3.2 Principais componentes do motor

Podemos dividir os principais componentes do motor em Fixos e Moveis:

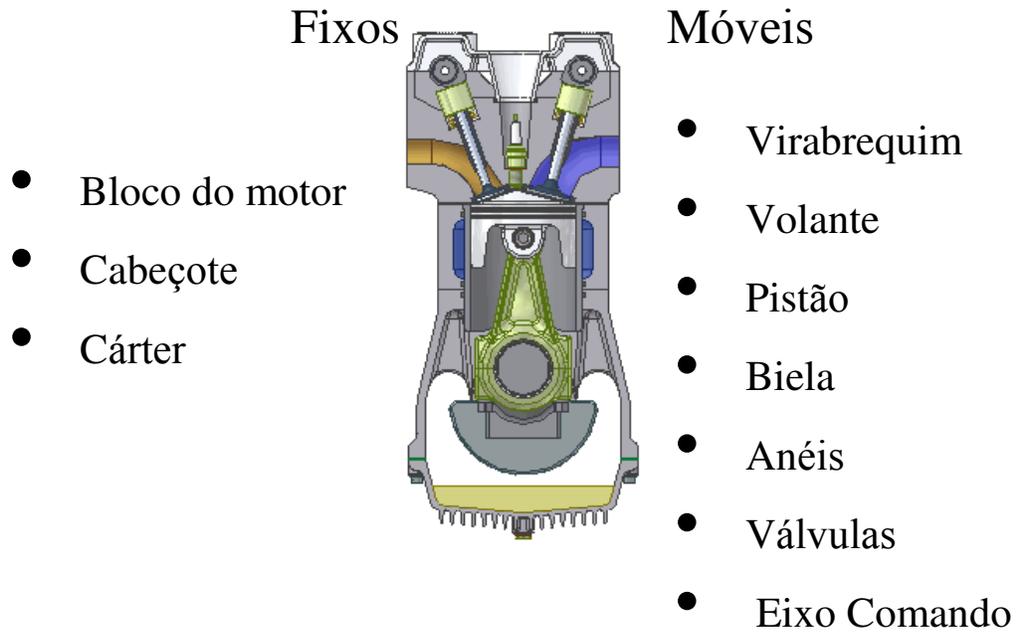


Figura 15 – Detalhe de um motor em corte

### 3.2.1 Componentes Fixos

#### 3.2.1.1 Bloco de cilindros

Responsável pela estruturação de todo o motor, o bloco de cilindros é o maior e principal componente do motor. Praticamente todas as partes do motor são direta ou indiretamente ligadas ao bloco que é feito de metal fundido, normalmente uma liga de ferro ou alumínio.

Dentro do bloco há galerias e orifícios para a circulação do óleo lubrificante nos componentes móveis internos do motor, sendo que há também câmaras internas para circulação da fluido de arrefecimento. Os cilindros podem ser fixos no bloco ou removíveis, chamados de camisas.[5]

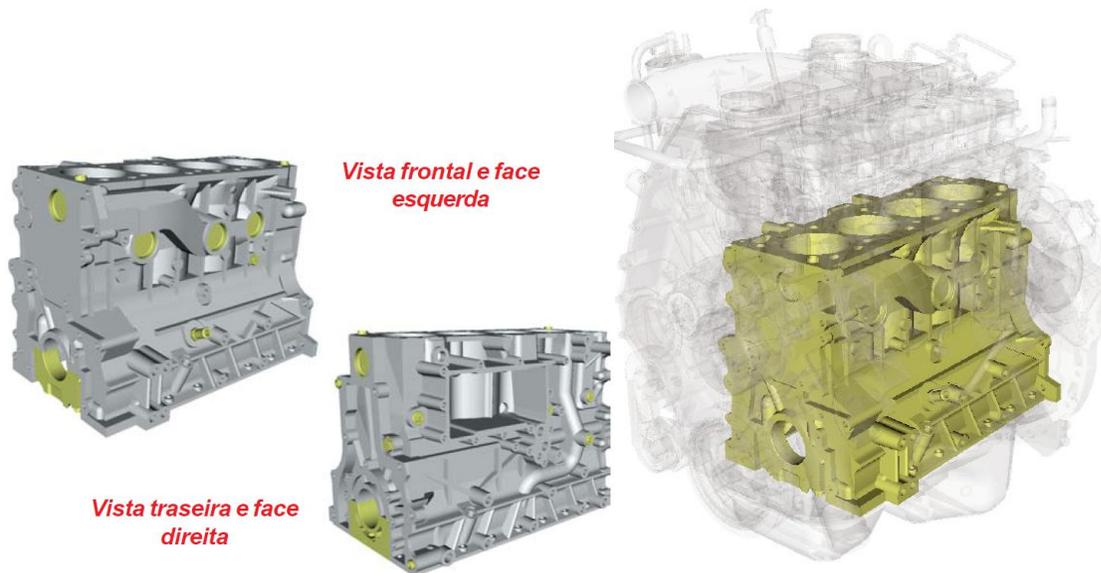


Figura 16 – Detalhes de um bloco de cilindros

### 3.2.1.2 Cabeçote do motor

No cabeçote são instaladas as válvulas, todo o sistema de acionamento, os bicos injetores e os dutos de admissão e escape dos gases do motor. Alguns projetos de cabeçotes únicos contemplam o comando de válvulas. Os motores podem ter cabeçotes individuais ou únicos, dependendo do projeto de cada fabricante. [4]

#### Cabeçotes Individuais

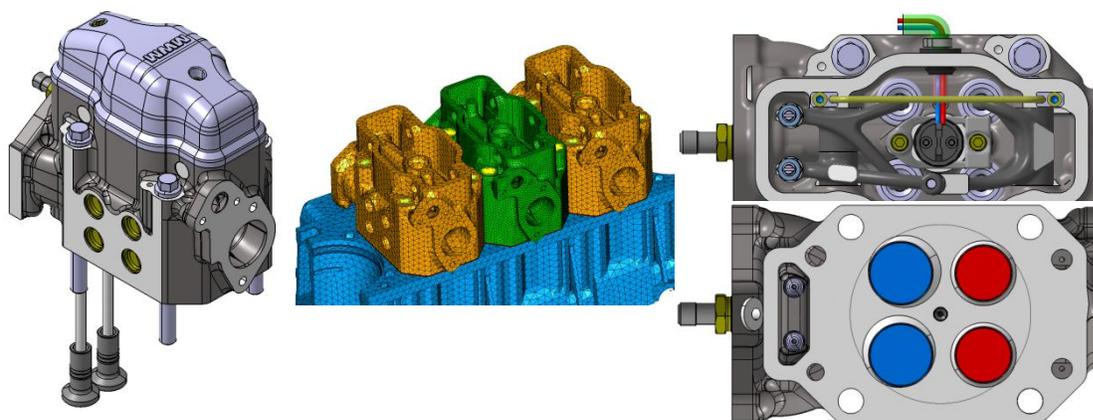


Figura 17 – Detalhes de cabeçotes individuais

**Cabeçote Único**

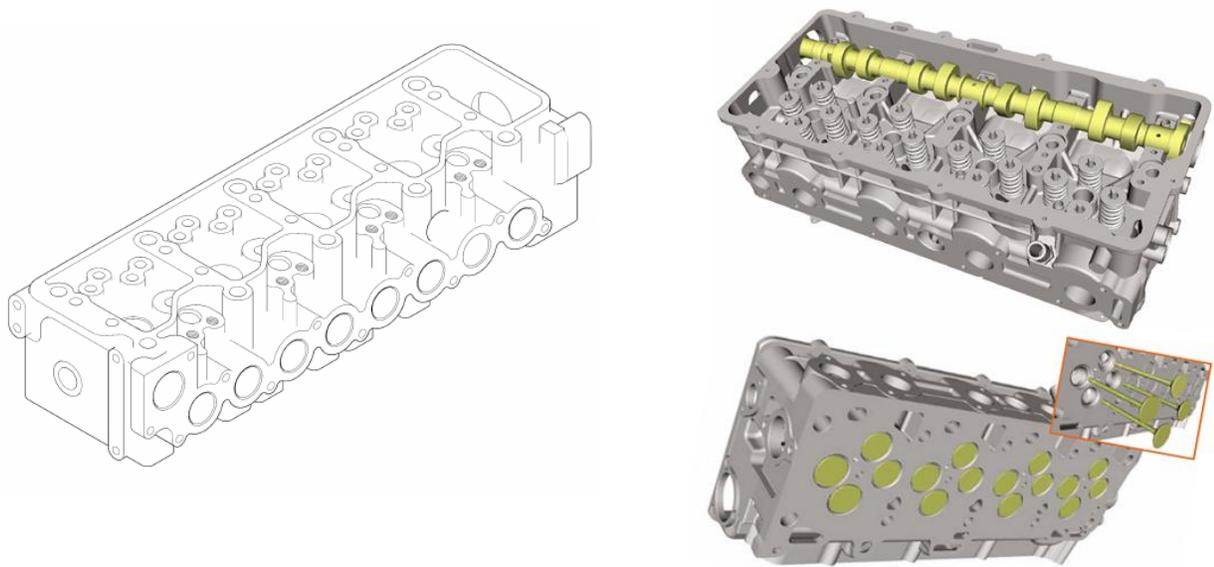


Figura 18 – Detalhes de cabeçote único

### 3.2.1.3 Carter

O carter, posicionado na parte inferior do bloco é responsável pelo armazenamento de óleo lubrificante do motor e em algumas aplicações geralmente agrícolas, tendo também função estrutural do veículo.

“Esse reservatório, ajuda também a resfriar o óleo através da superfície de contato com o ar ambiente,” A superfície do carter pode apresentar palhetas para facilitar o arrefecimento do motor[1]. O volume e geometria variam de acordo com cada motor e aplicação ao veículo.

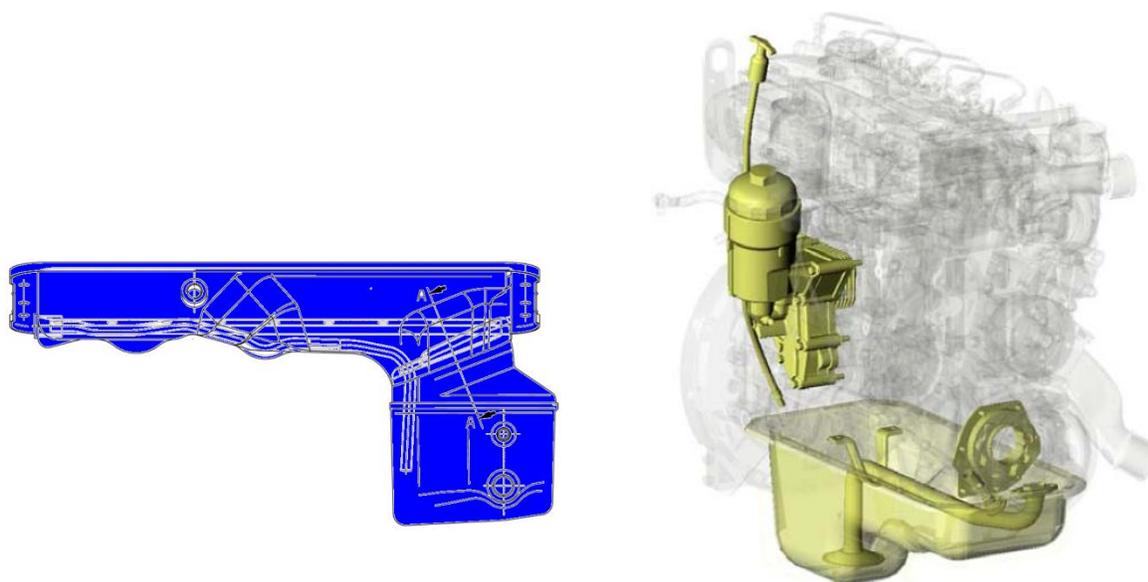


Figura 19 – Detalhes de um carter

#### **3.2.1.4 Camisa de cilindro**

Para diminuir os encargos resultantes do desgaste acentuado provocado pelo atrito dos êmbolos nos cilindros, alguns fabricantes utilizam camisas secas (delgadas) ou úmidas, que são facilmente substituídas e têm um custo muito inferior ao que resultaria da retificação dos cilindros do bloco, e aumento da vida útil do motor. [1]

Os cilindros são largos furos arredondados feitos através do bloco e os pistões se ajustam nos cilindros que são ligeiramente mais largos que os pistões, permitindo a estes últimos deslizarem-se livremente para cima e para baixo.

Em muitos blocos de liga de alumínio, luvas de aço são colocadas nos cilindros e os pistões deslizam em sua superfície.

## Camisa de Cilindros – Úmida

As camisas úmidas, utilizadas nos motores de potência mais elevada, permitem a transferência direta de calor para a água e este tipo de refrigeração é bastante eficiente, tendo no entanto como principais problemas a dificuldade de se manter a estanqueidade de forma a evitar a passagem da água para o carter e a degradação a que estão sujeitas devido à corrosão e cavitação[1].

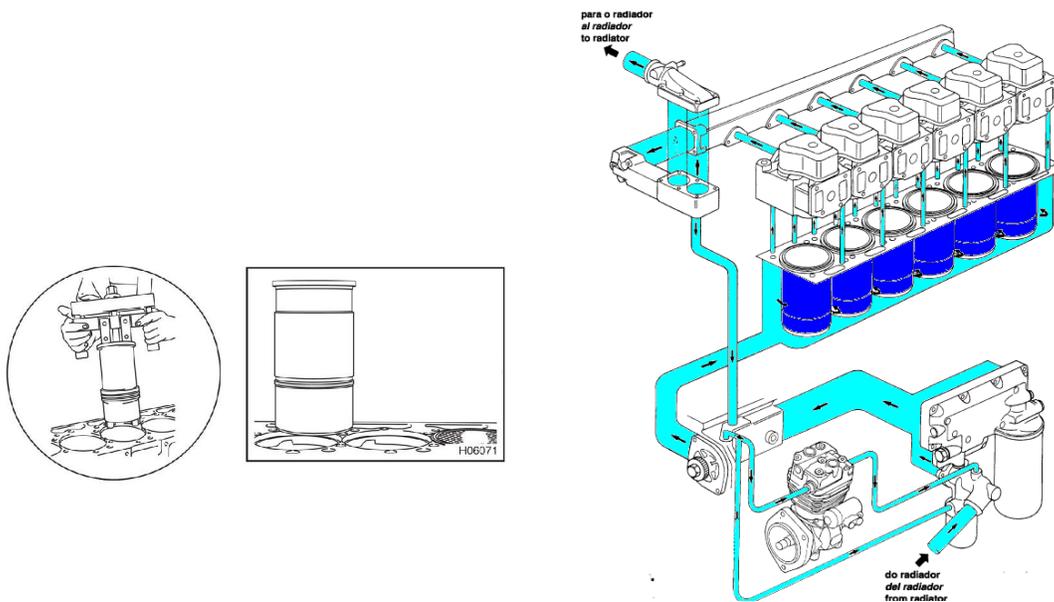


Figura 20 – Detalhes de um sistema com camisas úmidas.

## Camisa de Cilindros - Seca

As camisas secas, que são a solução mais cara, devem ser colocadas de forma a manterem o contacto com o bloco, visando assegurar a transferência de calor do cilindro para o circuito de Refrigeração [1].

Seu processo produtivo é mais elaborado e complexo devido ao alto controle produtivo.

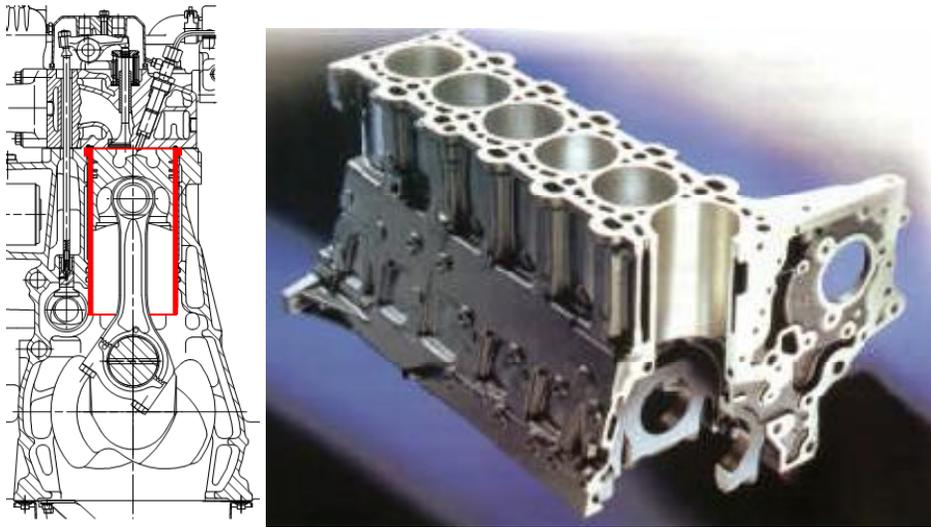


Figura 21 –Detalhes de um sistema com camisas secas.

## 3.2.2 Componentes Móveis

### 3.2.2.1 Virabrequim

O eixo de manivelas, também conhecido como virabrequim ou girabrequim, é responsável por converter o movimento vertical do pistão em movimento de rotação. O eixo de manivelas gira na parte inferior do bloco, sendo projetado de acordo com o número de cilindros do motor e apresentando partes descentralizadas, onde as bielas são fixadas e determinam a distância entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior para o balanceamento dinâmico do motor.

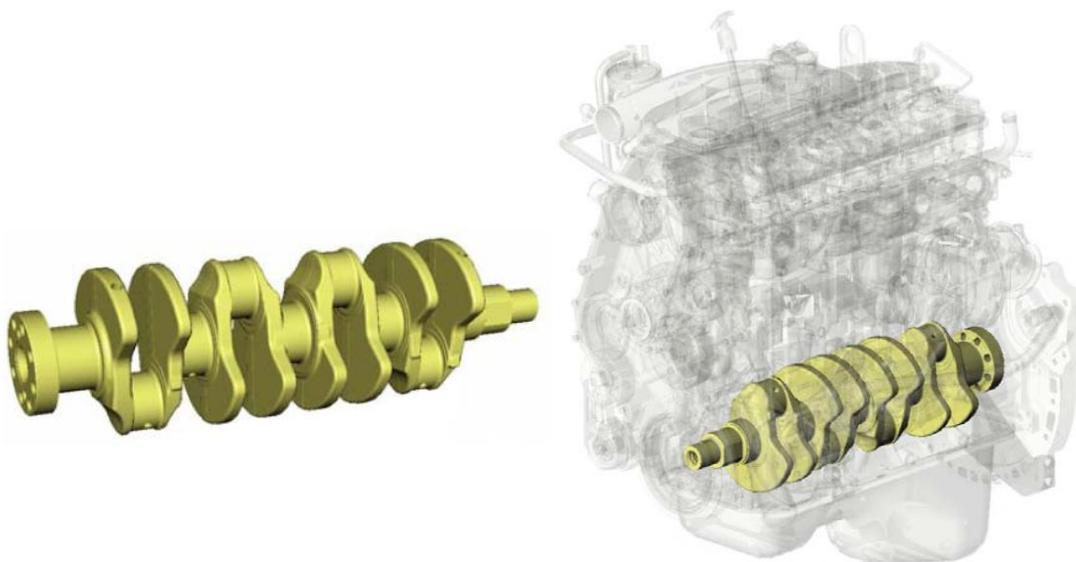


Figura 22 – Detalhes de um virabrequim.

### 3.2.2.2 Volante do motor

#### Existem dois tipos de volantes para motores “Single Mass” Dupla Inércia

##### Volante Single Mass

O volante é um componente caracterizado por ser muito pesado e projetado para executar funções importantes:

A energia proveniente da combustão é recebida pelo volante e é utilizada para manter o eixo do motor girando nos intervalos, nos quais não há explosão nos cilindros, sendo este trabalho necessário para executar os demais tempos do motor. [5]

O tamanho do volante é proporcional à defasagem de queima, e quanto menor o número dos cilindros, maior será o peso do volante que é calculado conforme a aplicação em função da quantidade de inércia.

Esta peça que se encontra montada na parte posterior do virabrequim, apresenta dentes na sua periferia, aonde se vem engrenar o pinhão de ataque do motor de arranque.

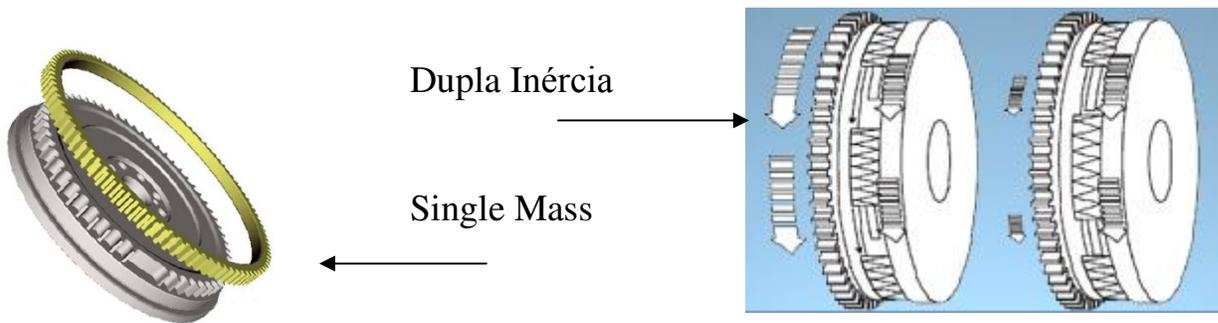


Figura 23 – Detalhes de um volante de motor.

## **Volante Dupla Inércia**

Este tipo de volante, possui um conceito moderno de construção e além das funções usuais de um volante, a dupla inércia tem como finalidade reduzir as vibrações e ruídos do sistema motor transmissão para o veículo, através de um sistema de molas de amortecimento integradas.

Com este conceito, o volante de dupla inércia oferece as seguintes vantagens:

- 1 - Arrancada mais suave do veículo;
- 2 - Eliminação do sistema de amortecimento do disco de embreagem, reduzindo sua inércia e proporcionando mais conforto na troca de marchas;
- 3- Menor desgaste dos anéis sincronizadores do câmbio;
- 4- Maior conforto na dirigibilidade.

### 3.2.2.3 Pistão, Anéis e Biela

A biela é a peça que transmite o movimento do pistão e a potência gerada pela combustão ao eixo de manivelas, geralmente emprega-se na fabricação deste componente ligas de aço muito resistente devido aos grandes impactos e esforços torcionais.

Os pistões transferem a potência gerada pela combustão para a biela e ao eixo de manivelas e são unidos às bielas através de pinos. O contato com a parede lateral do cilindro é feito através de anéis e o topo do pistão é a parte mais exposta ao calor e à pressão da combustão, sendo que seu formato, reto, côncavo ou convexo, combina com a geometria do cabeçote do cilindro para formar a câmara de combustão ou pode apresentar outra geometria dentro de uma variedade, sempre visando facilitar o processo de combustão. Os pistões são normalmente feitos de ferro fundido ou de ligas de alumínio.

Os anéis do pistão são fixados em ranhuras feitas nas laterais dos pistões, na parte superior e apresentam três segmentos de anéis. Os dois anéis superiores têm a incumbência de evitar perdas da potência gerada na combustão e impedir a passagem da mistura ar-combustível para o carter através do espaçamento entre o pistão e o cilindro. O terceiro anel tem a tarefa de selar a passagem de óleo do cárter para a câmara de combustão e controlar a lubrificação das paredes do cilindro, do êmbolo e dos anéis. [1]

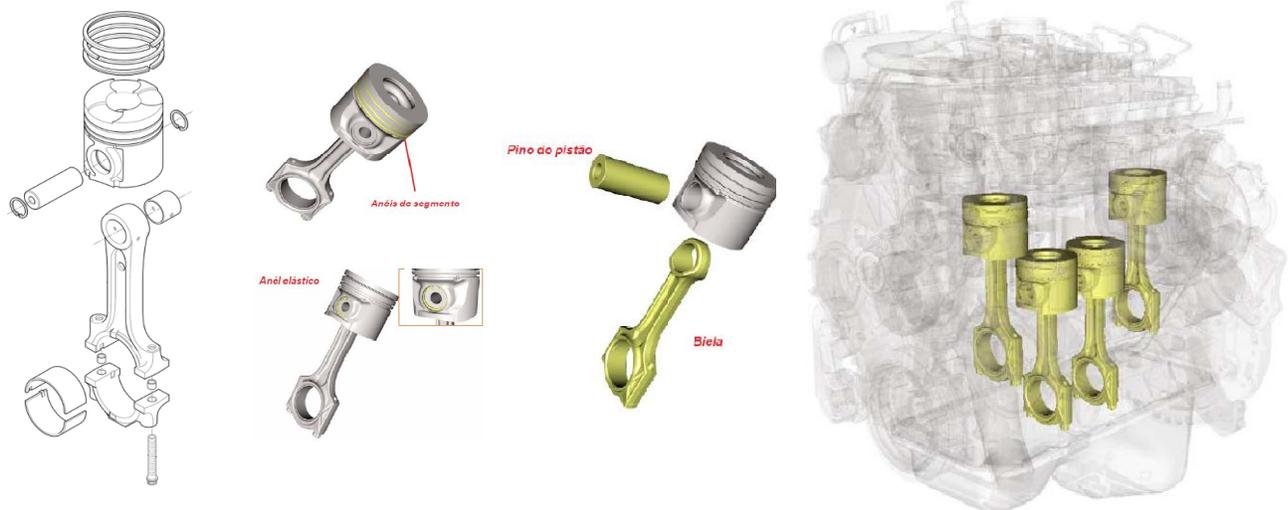


Figura 24 – Detalhes conjunto pistão anéis e biela

### 3.2.2.4 Válvula, Eixo Comando

Eixo Comando, responsável pelo sincronismo de abertura e fechamento das válvulas, admissão e escape, apresenta tantos pares de ressaltos quantos o número de cilindros. Os ressaltos do comando de válvula permitem a transformação do movimento rotativo em alternativo, necessário à abertura das válvulas.

Relativamente ao acionamento do sistema de distribuição, o eixo Comando recebe movimento do virabrequim, que é transmitido por rodas dentadas montadas nas extremidades anteriores daqueles veios, ou através de uma corrente; caso os carretos se encontrem bastante afastados, monta-se um carreto intermédio. Considerando que o ciclo operativo de um motor de quatro tempos se efetua em duas voltas do virabrequim, a velocidade de rotação da árvore de cames é metade do virabrequim.

Válvulas, responsáveis pela admissão e escape dos gases da combustão, tanto da admissão do Ar quanto no escape dos gases resultantes da combustão, tem a função de vedar e separar a entrada e saída dos gases e conseqüentemente a vedação do cilindro durante a compressão. Sistemas multiválvulas tem como objetivo a melhoria da queima do combustível o que torna os motores mais limpos.[3][5]

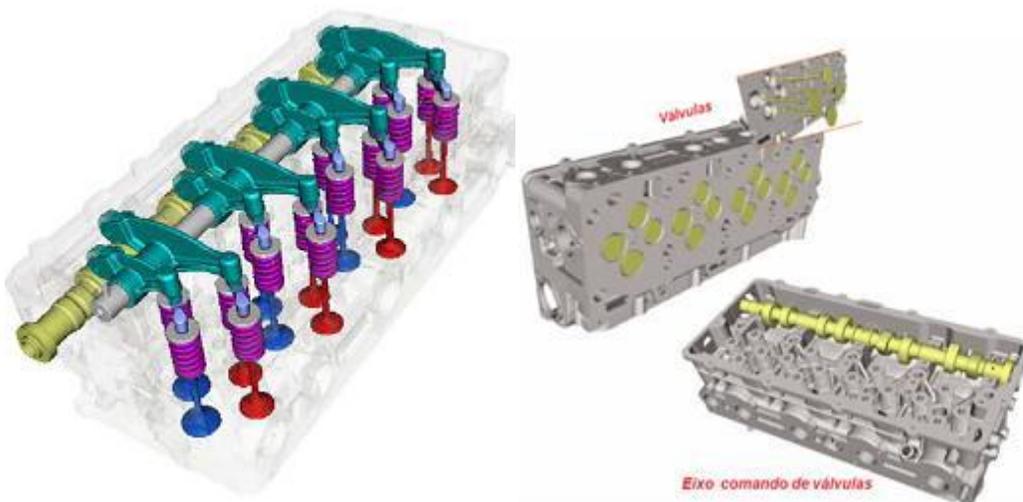


Figura 25 – Detalhes de Válvulas e Eixo Comando de Válvulas

### 3.3 Motor de Estudo:

Este estudo foi baseado na família de motores HIGH SPEED de quatro cilindros, em linha, de quatro tempos, ciclo Diesel. Este motor utiliza camisas do tipo seca, como vimos as mesmas não tem contato direto com o líquido de arrefecimento do motor, e são prensadas ao bloco de cilindro.

#### 3.3.1 Dados gerais do motor

Ciclo	Diesel - 4 tempos
Tipo de injeção	Direta com Gerenciamento Eletrônico
Aspiração	Turbo alimentado Pós-arrefecido
Número de cilindros e tipo	4 - em linha
Diâmetro / curso dos pistões	93 mm / 103 mm
Cilindrada unitária	0,700 dm <sup>3</sup>
Cilindrada total	2,800 dm <sup>3</sup>
Taxa de compressão	17,2 : 1
Ordem de injeção	1 - 3 - 4 - 2 (cil. nº 1 lado volante)
Sentido de rotação (visto do volante)	anti-horário
Pressão de compressão	motor novo 28 bar (mínimo)
Peso seco	270 kg
Válvulas por cilindro	3 sendo 2 válvulas de admissão e 1 válvula de escape



Figura 26 – Ilustração do motor

Utilizando-se a metodologia Six Sigma, esta fase do projeto compreende a etapa do **Define**, que define formalmente os objetivos de melhoria do processo que sejam consistentes com as demandas do cliente e a estratégia da empresa.

Esta etapa compreende as seguintes fases:

- Descrever o problema;
- Definir a meta;
- Levantar o histórico do problema;
- Levantar o retorno econômico-financeiro;
- Decidir se vale à pena continuar o projeto;
- Montar a equipe e cronograma;
- Levantar restrições e suposições;
- Descrever sucintamente o processo envolvido;

### **3.3.2 Descrição do problema**

O motor de estudo tem com característica de projeto, a utilização de camisas de cilindro do tipo seca e como visto anteriormente, a camisa do tipo seca é prensada ao bloco do cilindro e não tem contato direto com o líquido de arrefecimento do motor.

O projeto desta camisa prevê uma região de assentamento da camisa ao bloco, que vulgarmente chamamos de “colarinho”. Esta região absorve toda a carga de prensagem e também é a região onde ocorrem as trincas.

Após serem nucleadas durante o processo de prensagem e com a dinâmica do motor, pressões e temperaturas de trabalho, propagam-se por todo o perímetro da camisa destacando-a e a parte inferior da camisa destacada, desce pelo cilindro chocando-se com as partes móveis do motor, levando o mesmo ao colapso total.

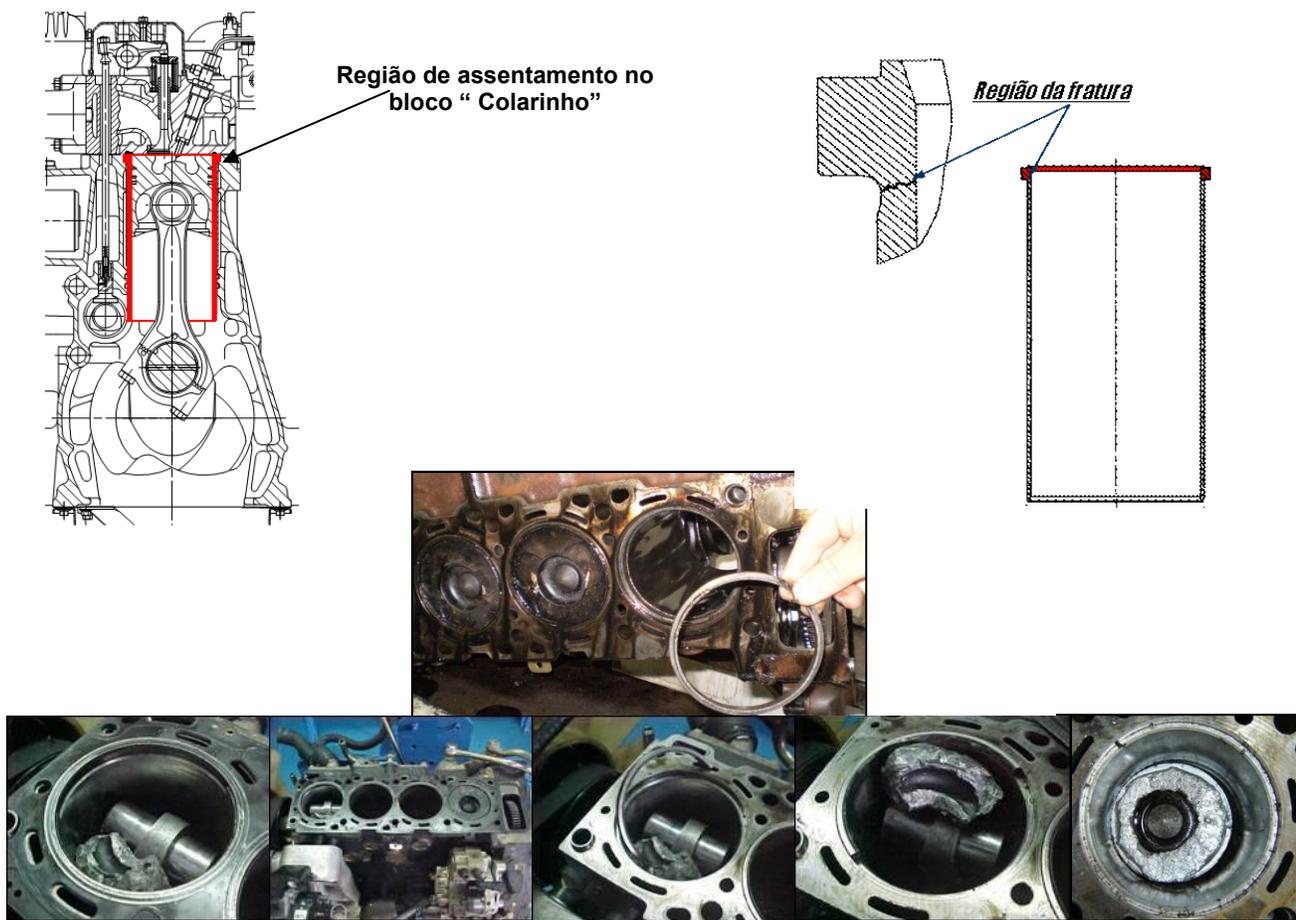


Figura 27 – Detalhes de um motor falhado

### 3.3.3 Histórico do problema:

Observando os históricos de falhas, tanto internas, quanto no campo, pode-se perceber que o problema tem um alto índice de ocorrência, gerando uma média mensal de 3,5 falhas. Considerando as estatísticas descritivas para a quantidade de falhas, observa-se uma amplitude de 9, sendo que a menor ocorrência foi Zero falha em Outubro de 2006 e o valor máximo foi de 9 falhas em janeiro de 2007.

### 3.1 Estatísticas das falhas internas

Considerando um desvio padrão de aproximadamente 2,3 falhas por mês, podemos dizer que o problema é recorrente para os dados históricos, apesar de a variabilidade parecer estável ao longo do tempo, o cliente apontou uma falha no zero km e a investigação dessa falha mostrou um índice de ocorrências internos acima do comum, o que desencadeou o desenvolvimento desse projeto.

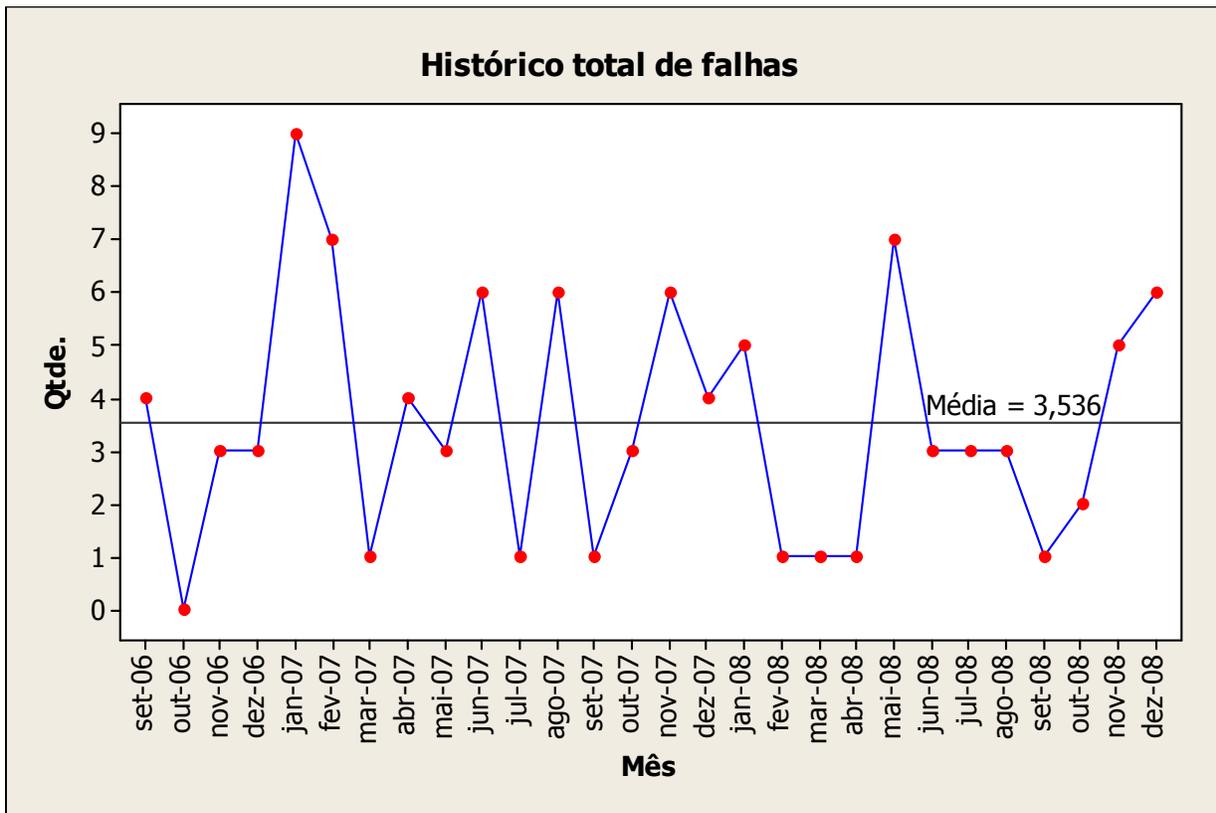


Figura 28 – Gráfico com o histórico das falhas

Podem-se dividir as falhas de duas maneiras distintas, tal qual o momento em que a mesma ocorre; temos falhas que aparecem após o motor estar em “campo”, isto é, veículos vendidos sendo que as mesmas ocorrem no consumidor final, como também as falhas denominadas “internas”, falhas estas que são prematuras e ocorrem dentro da fábrica durante o teste, ou até no próprio teste do veículo, teste final de linha.

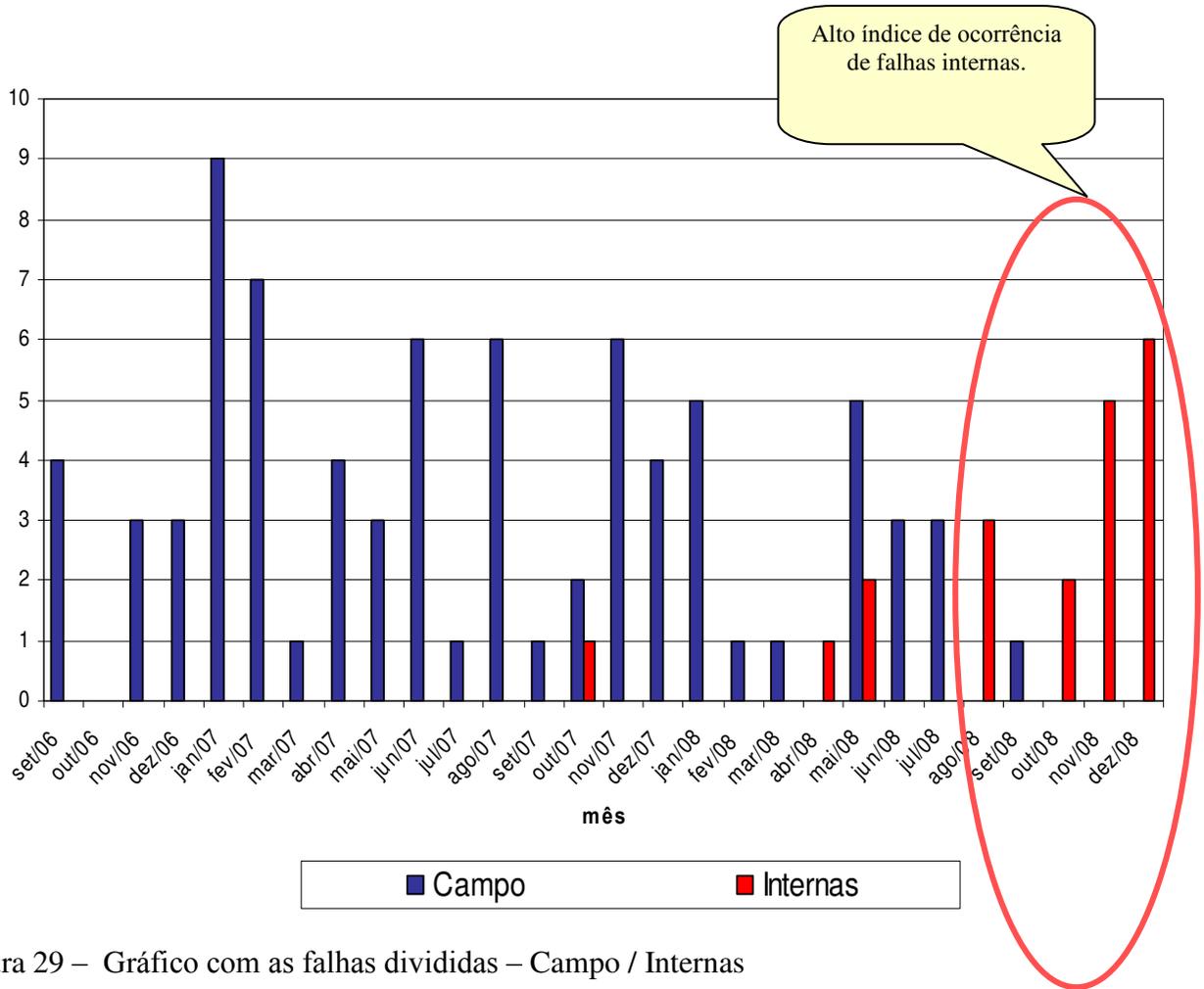


Figura 29 – Gráfico com as falhas divididas – Campo / Internas

Observando o histórico de falhas internas, pode-se perceber que o ano de 2008 apresenta 19 das 20 falhas geradas internamente, em quanto em 2007 tivemos apenas uma falha.

### 3.2 Estatística Histórica das falhas internas

A média de 2008 apresentou um acréscimo de 1.800% com relação à média de 2007, enquanto o desvio padrão saltou de 0,28 falhas/mês para 2,11 falhas/mês, o que representa um aumento significativo tanto da quantidade, quanto da sua variabilidade do processo.

Sendo assim, justificada a preocupação e início deste projeto, haja vista que essa falha é crítica e pode causar um colapso no funcionamento do motor, é notório que há um ganho associado à “*cost avoidance*” nesse projeto, porém, nesse momento, não temos informações suficientes para estimar os valores envolvidos.

Além disso, temos um ganho associado à melhora da imagem do produto e da empresa perante o cliente.

## Capítulo 4

### Análise Experimental

Conforme metodologia Six Sigma, esta fase do projeto compreende a etapa do MEASURE, onde a mesma compreende em Medir (Measure) para definir as medições base no processo atual para comparação futura. Mapear e medir o processo em questão e coletar os dados necessários do processo.

Esta etapa compreende as seguintes fases:

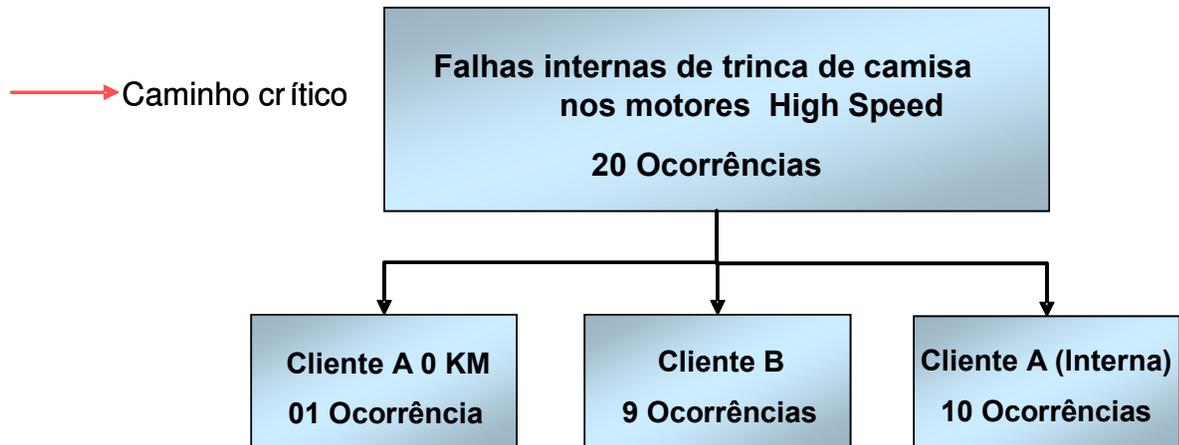
- ◆ Definir se os dados são confiáveis;
- ◆ Caso os dados não sejam confiáveis, torná-los;
- ◆ Definir a forma de estratificação do problema;
- ◆ Quantificar a estratificação;
- ◆ Escolher os estratos mais significativos;
- ◆ Definir as metas específicas;
- ◆ Verificar se as metas específicas atendem a meta geral;
- ◆ Alocar as metas aos responsáveis;

#### 4.1 Estratificação dos Dados:

Apesar da quantidade de falhas do campo ser maior do que a quantidade de falhas internas, o foco do projeto serão as análises das falhas internas, pois não se tem como adotar medidas corretivas para os motores de campo, porém, sabe-se que, se o problema das falhas internas for resolvido, necessariamente o índice de ocorrências no campo deverá cair como consequência da melhoria da confiabilidade do produto.



## Estratificação dos dados – Falhas internas ( Prematura )



Estratificando as falhas internas por aplicação, percebemos que o índice de ocorrência é muito parecido entre o cliente A e o cliente B, o que nos leva a conclusão de que a falha independe da aplicação, pois está relacionada ao motor básico.

Desta forma a meta específica deverá considerar todos os motores High Speed que utilizam camisas seca.

## 4.2 Verificação do Mapa de processo:

Conforme metodologia Six Sigma, esta fase do projeto compreende a etapa do **ANALYZE**, onde a mesma compreende em Analisar (Analyze) para verificar o relacionamento e causalidade dos fatores. Qual é o relacionamento? Há outros fatores que não foram considerados?

Esta etapa compreende as seguintes fases:

- Detalhar o estudo do processo (Mapa de processo);
- Levantar TODAS as causas potenciais;
- Priorizar as causas potenciais;
- Estudar cada causa potencial para ter certeza de quais são as causas reais;
- Listar as causas reais encontradas

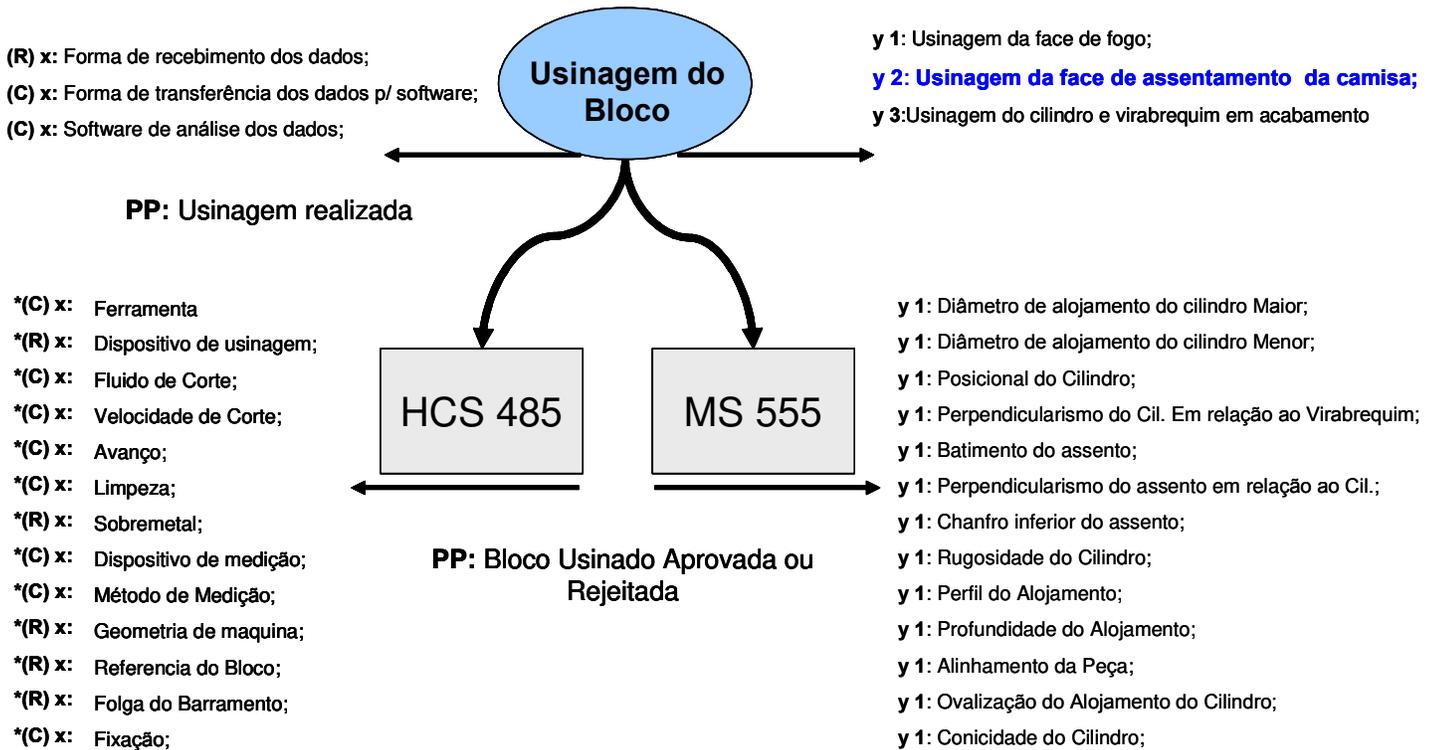
Para início das análises do projeto, foram analisadas todas as etapas de usinagem do bloco, até a verificação da camisa no mesmo.

O processo de montagem dos demais componentes do motor, não serão levados em consideração, pois os mesmos não influenciam na falha. Iremos verificar o final do processo, onde os motores passam pelo teste de funcionamento, sendo esta etapa fundamental ao projeto, pois nela é detectada a falha do motor.

Analisaremos somente a usinagem dos alojamentos de assentamento da camisa ao bloco, esta etapa é realizada por duas máquinas distintas, porém executam a mesma operação. Esta operação é muito importante pois deve garantir com muita precisão os diâmetros do cilindro e o ângulo de assentamento da camisa ao bloco.

**● Mapa de Processos – Usinagem do Bloco – Operação 80:**

(R) = Parâmetro de Ruído      (C) = Parâmetro Controlável      (\*) = Parâmetro crítico



A aplicação de bissulfeto (lubrificante sólido) é realizada por uma máquina que garante a quantidade exata de lubrificante e a dispersão dentro do alojamento da camisa.

A prensagem da camisa ao bloco é uma operação realizada por uma prensa automática e com controles das cargas de prensagem, caso à carga de prensagem saia dos limites pré-estabelecidos a operação é rejeitada. Na figura 30 observamos a aplicação de bissulfeto na região de assentamento da camisa, prensagem da camisa ao bloco e controle da carga de prensagem.

### ● Mapa de Processos – Aplicação de Bissulfeto / Prensa da Camisa – Operação 90:

(R) = Parâmetro de Ruído      (C) = Parâmetro Controlável      (\*) = Parâmetro crítico

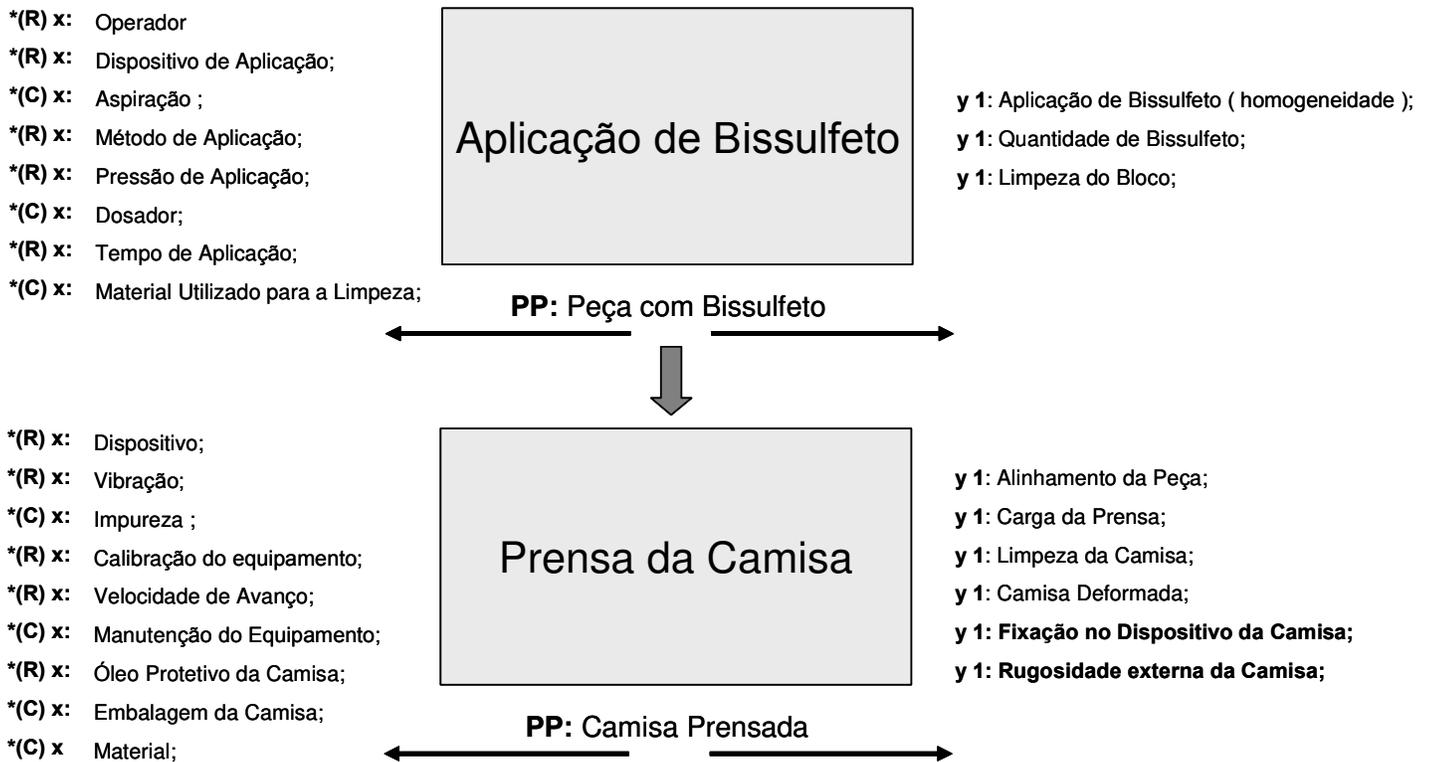
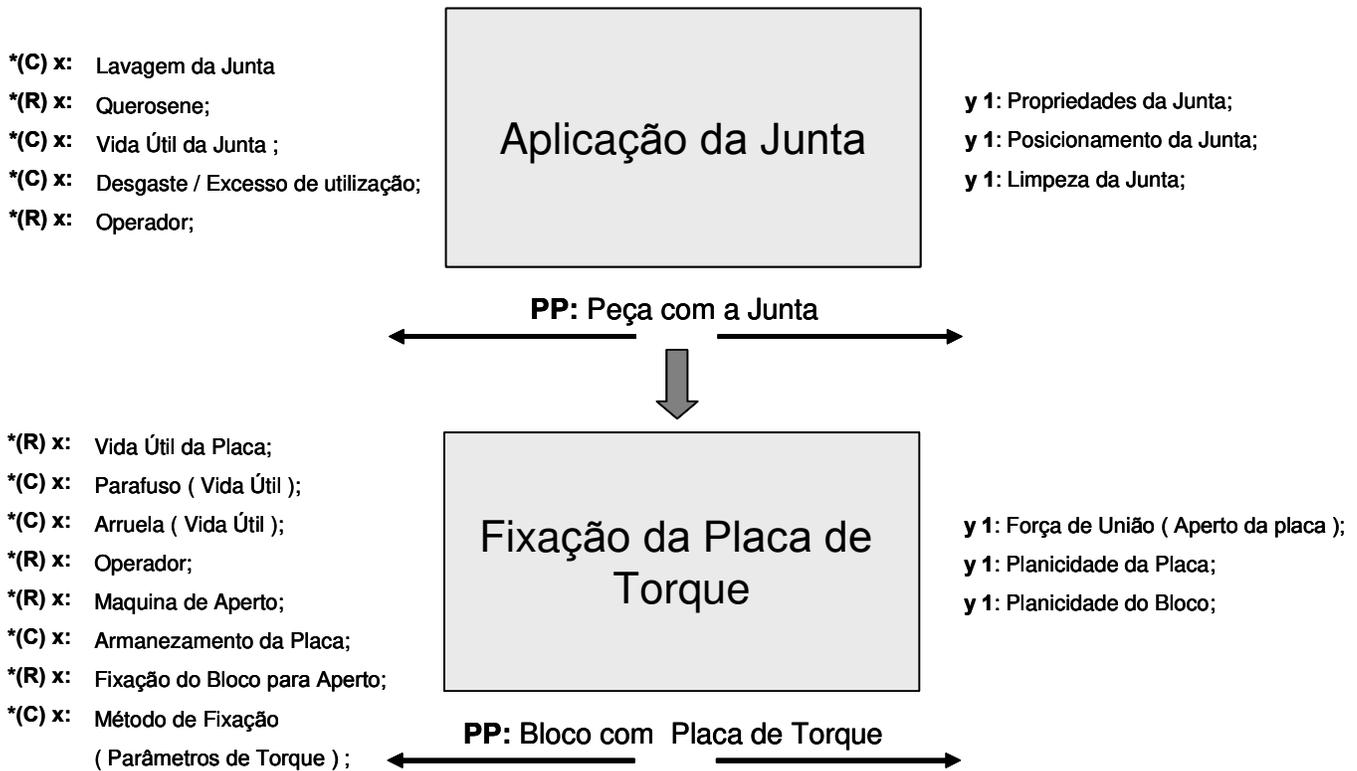


Figura 30 – Detalhes da aplicação do bissulfeto e prensagem da camisa no bloco

Após as camisas serem prensadas ao bloco, as camisas que são recebidas do fornecedor semi-acabadas (com sobre metal e sem brunimento), estas devem ser finalizadas depois de prensadas ao bloco e para evitar que as distorções provenientes do torqueamento do cabeçote ao bloco influam no brunimento da camisa, utiliza-se uma placa de torque a qual simula o cabeçote do motor torqueado, e utiliza-se também juntas do cabeçote e parafusos, iguais ao do motor, além de aplicar-se o mesmo torque de fixação do cabeçote ao bloco.

### ● Mapa de Processos – Aplicação da Junta / Fixação da Placa de Torque – Operação 95:

(R) = Parâmetro de Ruído      (C) = Parâmetro Controlável      (\*) = Parâmetro crítico



Depois de fixar a placa de torque e aplicar o torque, as camisas serão desbastadas até o diâmetro correto do cilindro e brunidas.

**● Mapa de Processos – Brunimento da Camisa – Operação 120:**

(R) = Parâmetro de Ruído (C) = Parâmetro Controlável (\*) = Parâmetro crítico

- \***(C)** x: Ferramenta
- \***(R)** x: Dispositivo de usinagem;
- \***(C)** x: Fluido de Corte;
- \***(C)** x: Velocidade de Corte;
- \***(C)** x: Avanço;
- \***(R)** x: Limpeza;
- \***(R)** x: Material;
- \***(C)** x: Dispositivo de medição;
- \***(R)** x: Método de Medição;
- \***(R)** x: Geometria de maquina;
- \***(R)** x: Referencia do Bloco;
- \***(R)** x: Folga da Maquina;
- \***(C)** x: Fixação;



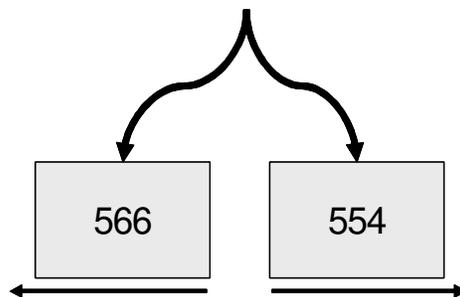
- y 1: Diâmetro do cilindro Maior;
- y 1: Diâmetro do cilindro Menor;
- y 1: Ovalização do Cilindro;
- y 1: Conicidade do Cilindro;
- y 1: Alinhamento da Peça;

**● Mapa de Processos – Desbaste da Camisa – Operação 100:**

(R) = Parâmetro de Ruído (C) = Parâmetro Controlável (\*) = Parâmetro crítico

- \***(C)** x: Ferramenta
- \***(R)** x: Dispositivo de usinagem;
- \***(C)** x: Fluido de Corte;
- \***(C)** x: Velocidade de Corte;
- \***(C)** x: Avanço;
- \***(R)** x: Limpeza;
- \***(R)** x: Material;
- \***(C)** x: Dispositivo de medição;
- \***(R)** x: Método de Medição;
- \***(R)** x: Geometria de maquina;
- \***(R)** x: Referencia do Bloco;
- \***(R)** x: Folga da Maquina;
- \***(C)** x: Fixação;

**Desbaste da Camisa**



- y 1: Diâmetro do cilindro Maior;
- y 1: Diâmetro do cilindro Menor;
- y 1: Posicional do Cilindro;
- y 1: Perpendicularismo do Cil. Em relação ao Virabrequim;
- y 1: Alinhamento da Peça;

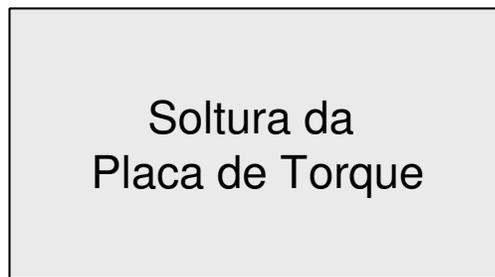
Após as camisas serem desbastadas e brunidas, a placa de torque é retirada do bloco e o mesmo é limpo.

### ● **Mapa de Processos – Soltura da Placa de Torque – Operação 130:**

(R) = Parâmetro de Ruído      (C) = Parâmetro Controlável      (\*) = Parâmetro crítico

\***(R)** x: Operador;

\***(C)** x: Método de Desaperto



y 1: Distribuição de Força;



**PP:** Bloco sem Placa de Torque

Para a conclusão do processo, todas as camisas devem ser medidas, quanto a sua altura em relação a face bloco, esta altura é muito importante pois caso esteja acima ou abaixo dos limites de projetos, podemos ter como consequências vazamento de combustão, ou quebra da camisa de cilindros.

### ● Mapa de Processos – Medição da Altura de Camisa – Operação 135:

(R) = Parâmetro de Ruído      (C) = Parâmetro Controlável      (\*) = Parâmetro crítico

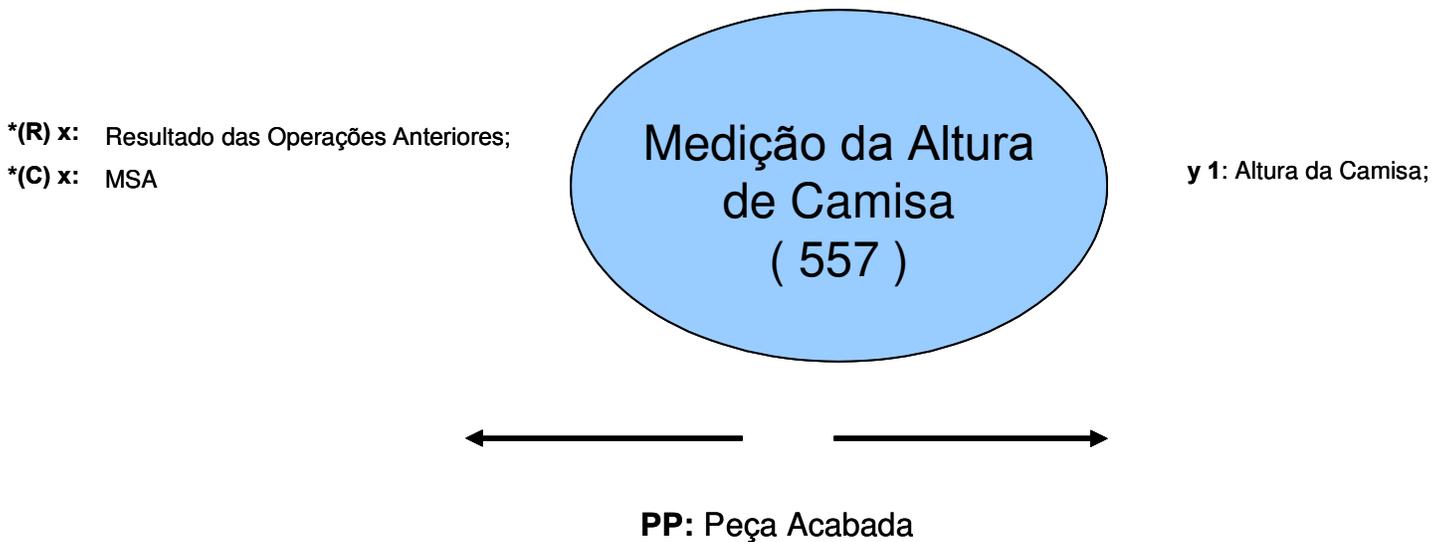
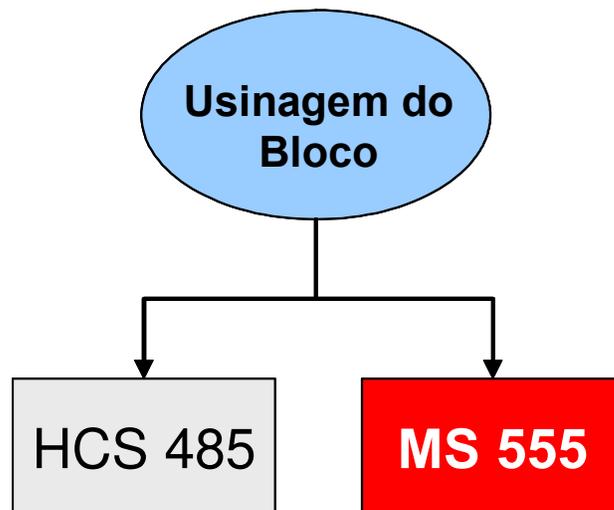


Figura 31 – Detalhes da medição da altura das camisas

### 4.3 Verificação dos fatores significativos

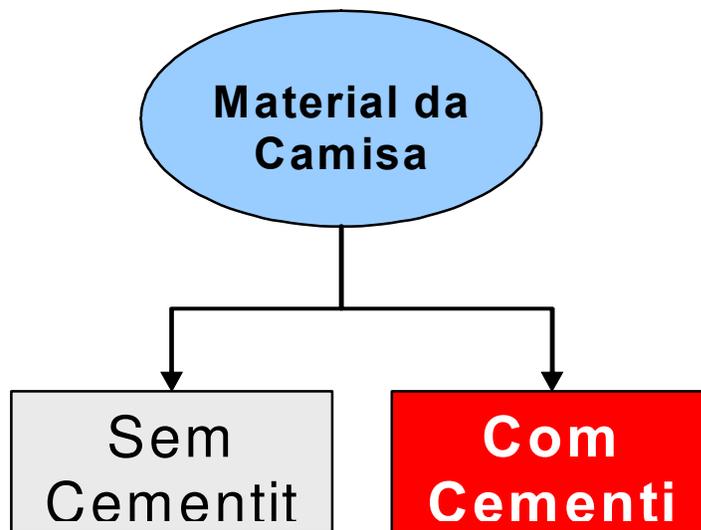
Após a realização do mapa de processos, algumas análises prévias revelaram informações significativas, que foram:

**Usinagem do assentamento da camisa no bloco:** Percebemos que 18 Motores falhados internamente ocorreram com blocos usinados pela máquina Mouri Seike 555 e somente 01 motor falhado, foi usinado pela HCS 485. Essas são as duas únicas máquinas que realizam este processo;



**Microestrutura da camisa:** As análises de laboratório das camisas falhadas constataram que em 100% dos casos de falhas internas (Hot Test) e na falha detectada no cliente A 0KM, a camisa apresentou Cementita em sua Microestrutura. A cementita são formações de carbonetos que enrijecem a estrutura da camisa, podendo fragilizá-la e a concentração de cementita encontrada nos itens falhados, era superior a 1% , o que é considerado acima da especificação.

**Cementita** ou carboneto de ferro é um composto químico de fórmula química  $Fe_3C$  e estrutura em forma de cristal ortorrômbico, contém 6,67% de carbono e 93,33% de ferro e é um material duro e quebradiço. Apesar de ser comumente classificado como cerâmica em sua forma pura, é mais utilizado na metalurgia e formado diretamente pelo derretimento do ferro fundido branco.



Com base nos dados analisados, foi realizada a priorização dos fatores e iniciada por um diagrama de causa e efeito conforme abaixo:

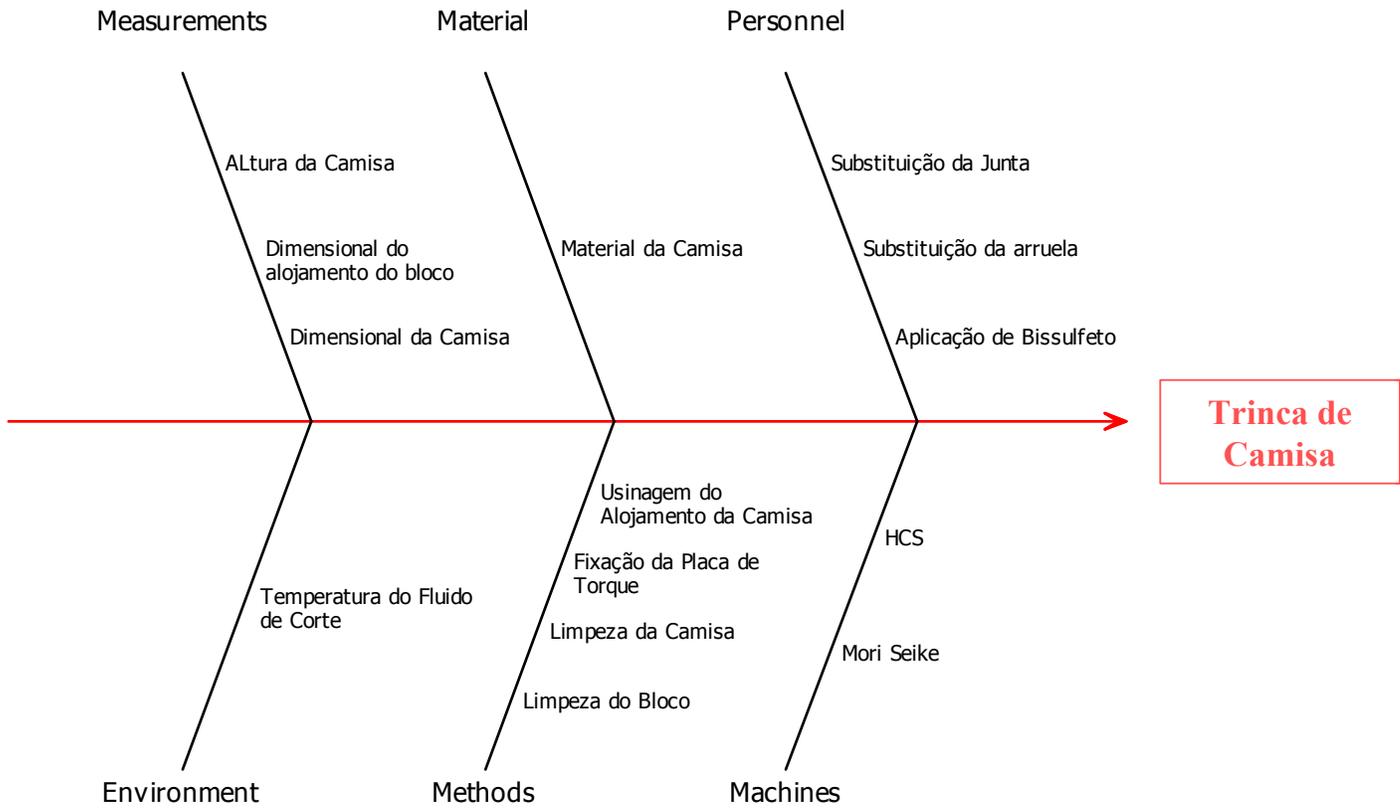


Figura 32 – Mostra Diagrama de causa e efeito

Após a identificação dos principais fatores feita pelo diagrama de causa e efeito, priorizou-se os fatores considerados mais significativos para a análise da falha. Por consenso da equipe de trabalho, decidimos estudar todos os itens que obtiveram notas superiores à 25 na matriz de priorização.

#### 4.1 Causas potenciais levantadas no brainstorm

Item	CAUSAS POTENCIAIS LEVANTADAS NO BRAINSTORMING	TOTAL GERAL OBTIDO
1º	Material da Camisa	31
2º	Ângulo de assentamento do alojamento da camisa no bloco	28
3º	Dimensional da Camisa	25
4º	Prensagem da Camisa no Bloco	25
5º	Fixação da Placa de Torque ( Método de Aperto )	21
6º	Substituição da Junta na utilização da placa de torque	20
7º	Altura da Camisa em relação a face do bloco	19
8º	Substituição da arruela na utilização da placa de torque	18
9º	Operação de Desbaste da Camisa	17
10º	Limpeza da Camisa	16
11º	Limpeza do Bloco	16
12º	Operação de Brunimento da Camisa	16
13º	Aplicação de Bissulfeto para a prensagem da camisa ( Operação Manual )	15
14º	Temperatura do Fluido de Corte	10

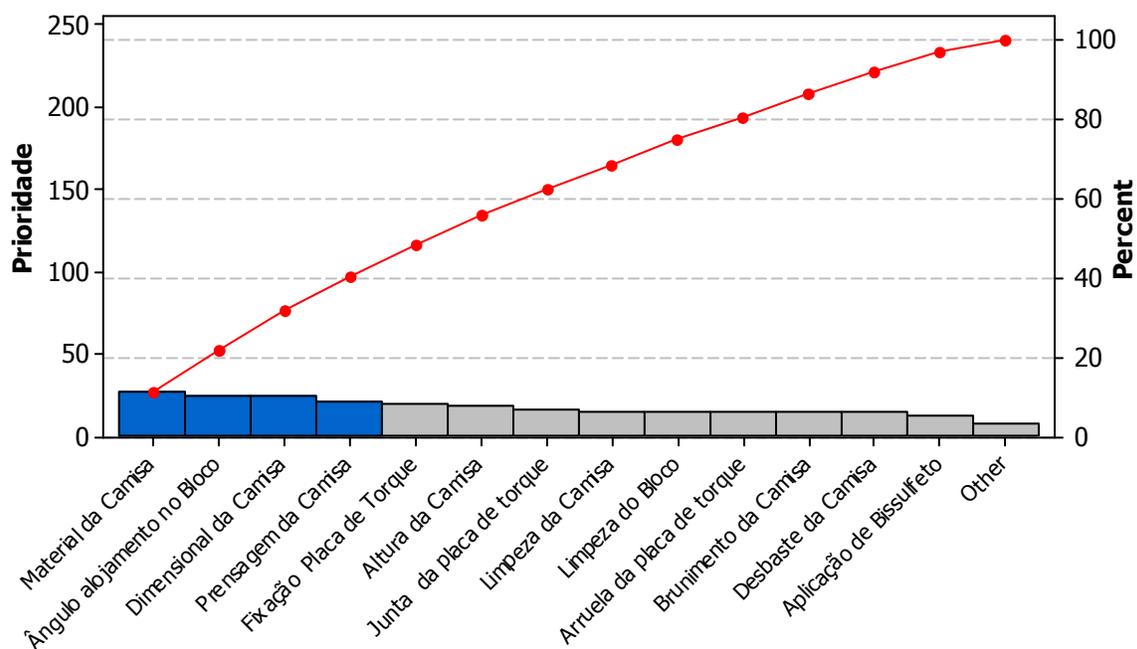


Figura 33 – Gráfico com as causas priorizadas

Pareto

## **4.4 Estudo dos fatores priorizados**

### **4.4.1- Medições de Camisas (Dimensional)**

Para início das investigações, foi determinado que fosse medido um lote de 32 peças, para a verificação do dimensional das camisas de cilindro recebidas do fornecedor. O importante é saber se o dimensional das camisas obedece às características de projeto, para identificarmos possíveis fragilidades no produto. Caso o dimensional encontrado nas camisas divergir das especificações de engenharia, a equipe de trabalho deve voltar-se às análises dos fatores de processo, que poderiam causar as irregularidades nas características da camisa.

Todas as medidas consideradas significativas pelo grupo foram inspecionadas e para isso foram utilizadas camisas pertencentes aos lotes existentes na empresa, que eram considerados de risco devido às falhas recorrentes.

Nenhuma medida significativa que poderia causar a trinca ou a quebra da camisa foi encontrada fora das especificações de desenho, conforme mostrado nas medições a seguir. Com isso, chegou a conclusão de que o dimensional da camisa não poderia gerar a falha, já que anteriormente as camisas obedeciam às mesmas especificações de desenho e não apresentavam falhas.

#### 4.4.2 Ângulo do assentamento da camisa no bloco

O segundo item proveniente da priorização a ser estudado, é o ângulo do assentamento da camisa no bloco. Essa característica é importante, pois se não houver um assentamento perfeito entre a camisa e o bloco, poderá gerar uma força pontual na região que durante a prensagem gera um momento, fragilizando o colarinho da camisa e nucleando trincas.

Inicialmente analisaram-se dois motores falhados; o primeiro deles apresentou falha no cliente e o segundo apresentou falha dentro da empresa.

Até o presente momento, o ângulo do assentamento do bloco era medido por acúmulo do batimento na própria linha de produção e todos os blocos analisados por este método, atendiam as especificações, neste momento decidi realizar as medições utilizando uma máquina tridimensional, de forma a aumentar a precisão.

Desta forma, os blocos falhados foram enviados à área de inspeção de recebimento, onde foram medidos conforme os padrões da tridimensional. Os resultados da medição mostraram que todos os ângulos de assentamento das camisas de todos os cilindros, estavam fora do especificado, o que poderia causar a falha.

**Especificação do ângulo =  $90^{\circ} + 44'$**

### Definição dos Pontos de medição nas camisas

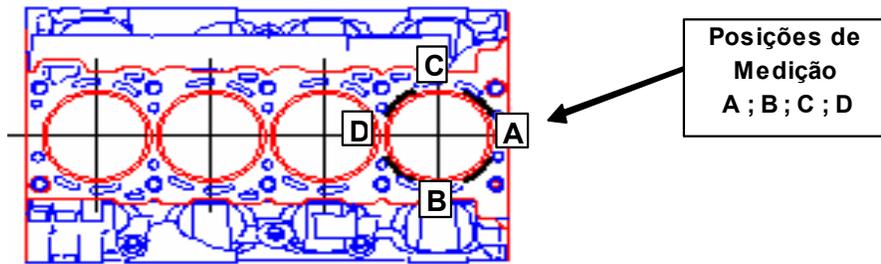


Figura 34 Detalhes dos pontos de medição nas camisas

Medições do motor que apresentou falha no cliente

### 4.2 Medições do ângulo de assentamento do bloco falhado no cliente

<b>Ângulo</b> <b>Especificação: 90° + 44'</b> <b>Bloco Falhado Cliente A</b>								
Medição	1°Cilindro		2°Cilindro		3°Cilindro		4°Cilindro	
Ponto / Unidade	graus	minutos	graus	minutos	graus	minutos	graus	minutos
<b>A</b>	91	18	91	20	91	18	91	17
<b>B</b>	91	20	91	16	91	20	91	23
<b>C</b>	91	18	91	17	91	19	91	19
<b>D</b>	91	22	91	20	91	20	91	16

Todos os ângulos do assentamento das camisas estavam fora da especificação para o motor em questão.

Medições do motor que apresentou falha dentro da empresa.

#### 4.3 Medições do ângulo de assentamento do bloco falhado na empresa

<b>Ângulo</b>			
<b>Especificação: 90° + 44'</b>			
<b>Bloco - M1A 336223</b>			
<b>Mori Seike 555</b>			
<b>Cilindro / Unidade</b>	<b>graus</b>	<b>minutos</b>	<b>Laudo</b>
<b>1°</b>	91	11	<b>R</b>
<b>2°</b>	91	10	<b>R</b>
<b>3°</b>	91	10	<b>R</b>
<b>4° (Trincado)</b>	91	22	<b>R</b>

Foi selecionado um motor falhado internamente na empresa e dimensionado, aonde fora constatado que o cilindro onde a camisa trincou, também apresentava um ângulo do assentamento da camisa no bloco fora do especificado.

Nota – se que somente foi medido um lado de cada cilindro, pois conforme as análises anteriores foram verificadas que as medidas não variavam significativamente, e portanto, somente foi medido um ponto por cilindro.

Após a análise das medições dos blocos falhados, notou-se que ambos haviam sido usinados por uma mesma máquina, já que existem duas máquinas que fazem este processo e foi solicitada a produção de 3 blocos usinados, pelas duas máquinas, com o objetivo de podermos avaliar a influência das máquinas na usinagem.

Como os dados medidos pela produção eram feitos pelo acúmulo do batimento, e os mesmos diferiam dos resultados da tridimensional, não tínhamos como fazer uma análise de capacidade para cada máquina, isso porque precisaríamos medir pelo menos 20 blocos na tridimensional e não havia tempo de equipamento disponível para essas medições. De qualquer forma, sabe-se que há a necessidade de melhorar o sistema de medição desse ângulo no processo de usinagem.

Após a análise das medições dos blocos, foi constatado que os blocos usinados pela máquina HCS 485, tinham uma variação menor comparados aos usinados pela MS 555, porém, para os blocos selecionados, as medições obedeciam à especificação do ângulo.

Medições do bloco N° 2

#### 4.4 Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 2

Ângulo								
Especificação: 90° + 44'								
Bloco Usinado HCS 485								
Medição	1°Cilindro		2°Cilindro		3°Cilindro		4°Cilindro	
Ponto / Unidade	graus	minutos	graus	minutos	graus	minutos	graus	minutos
<b>A</b>	90	28	90	24	90	25	90	29
<b>B</b>	90	24	90	19	90	24	90	18
<b>C</b>	90	28	90	29	90	23	90	29
<b>D</b>	90	21	90	28	90	28	90	36

Todos os ângulos do assentamento das camisas estavam conforme especificação.

Medições do bloco N° 3

#### 4.5 Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 3

Ângulo			
Especificação: 90° + 44'			
Bloco n°03			
Mori Seike 555			
Cilindro / Unidade	graus	minutos	Laudo
1°	90	2	<b>A</b>
2°	90	6	<b>A</b>
3°	90	9	<b>A</b>
4°	90	12	<b>A</b>

Medições do bloco N° 4

4.6 Medições do ângulo de assentamento do bloco N° 4

Ângulo			
Especificação: 90° + 44'			
Bloco n°04			
Mori Seike 555			
Cilindro / Unidade	graus	minutos	Laudo
1°	90	53	<b>A</b>
2°	90	56	<b>A</b>
3°	90	56	<b>A</b>
4°	90	56	<b>A</b>

#### 4.4.3 Prensagem da camisa no bloco

##### **Verificação das Solicitações na Camisa por Elementos Finitos**

Para a verificação das conseqüências na prensagem das camisas ao bloco, foi elaborado um dispositivo para determinação da máxima tensão de ruptura das camisas de cilindro, este dispositivo comparou as camisas semi-acabadas (conforme recebidas do fornecedor – com sobremetal e sem brunimento) e camisas acabadas (desbastadas e brunidas).

Com a determinação das tensões máximas, pôde-se comparar ao modelo matemático e verificar as condições críticas para o projeto.

Para a determinação das tensões de ruptura das amostras, o dispositivo aplica uma carga a 30mm de distancia da região de assentamento da camisa ao bloco, que esta engastada. Com a carga necessária para a ruptura do corpo de provas pode-se determinar qual a tensão de ruptura e assim prever as conseqüências ao conjunto durante a montagem.

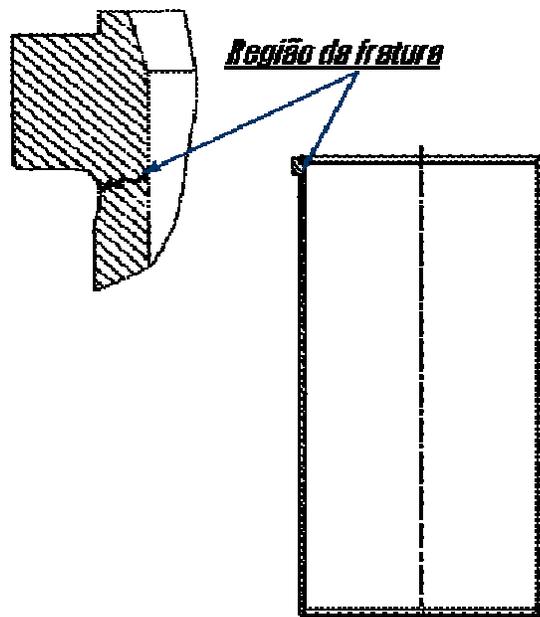


Figura 35 Detalhes da região de fratura da camisa

Corpo de Prova para determinação da tensão de ruptura da camisa

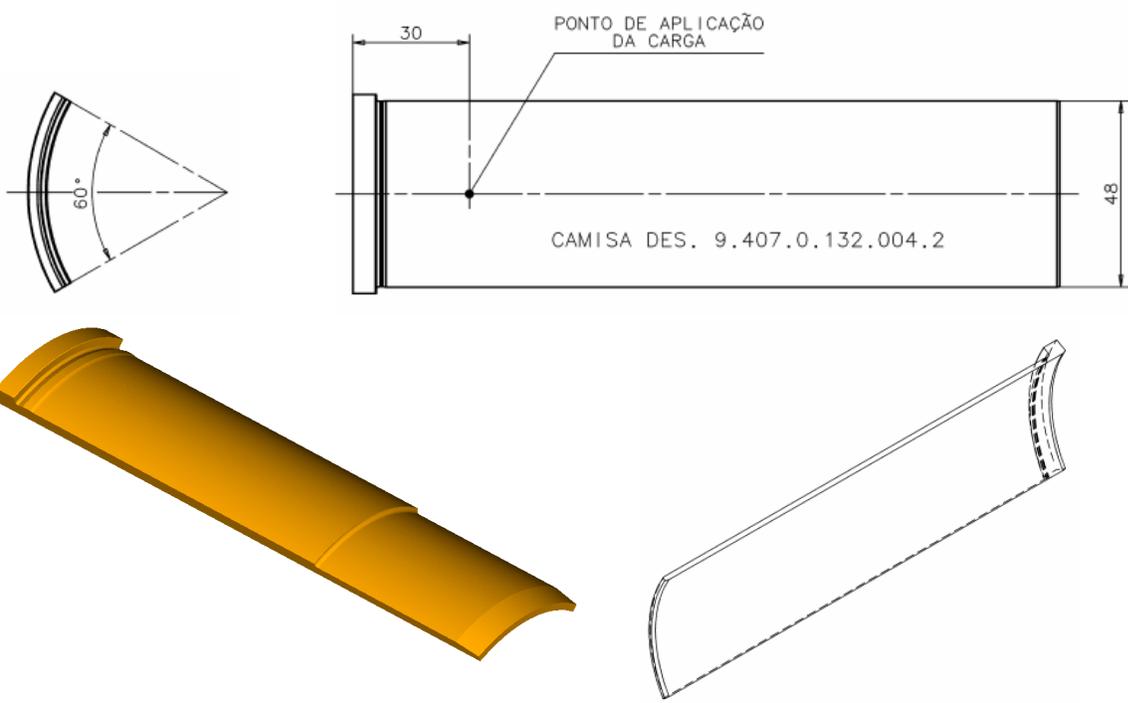


Figura 36 Detalhes do corpo de provas da camisa

Ilustração do dispositivo para determinação da tensão de ruptura da camisa

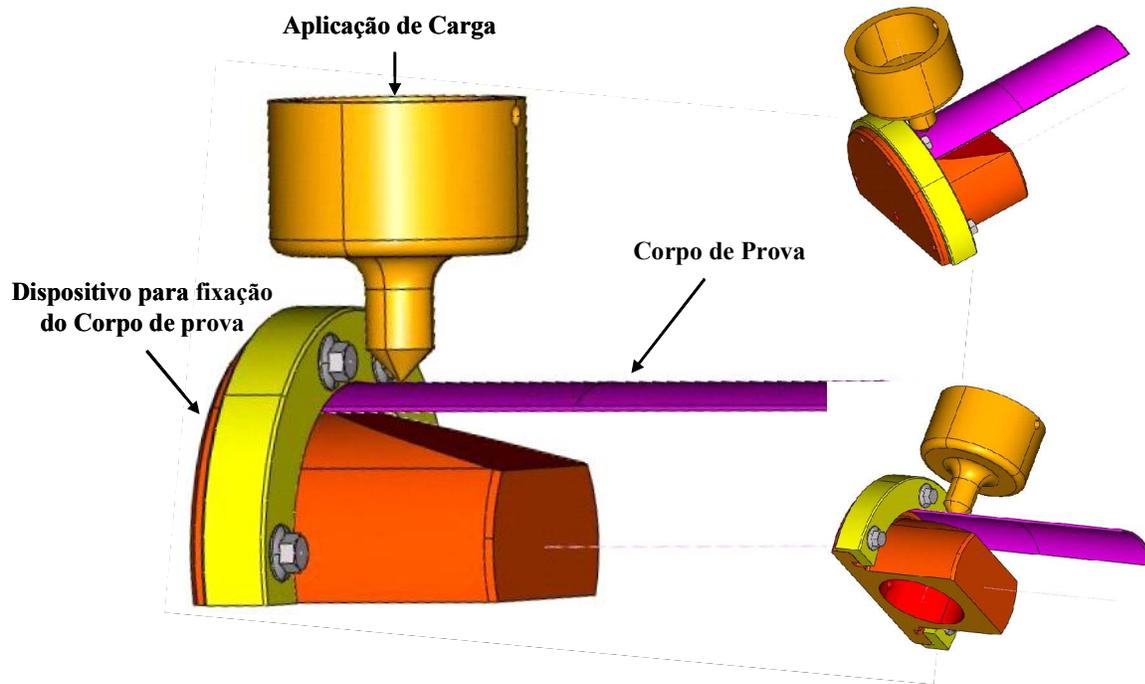


Figura 37 Detalhes do dispositivo de determinação da tensão na camisa

Dispositivo real utilizado para determinação da tensão de ruptura da camisa.

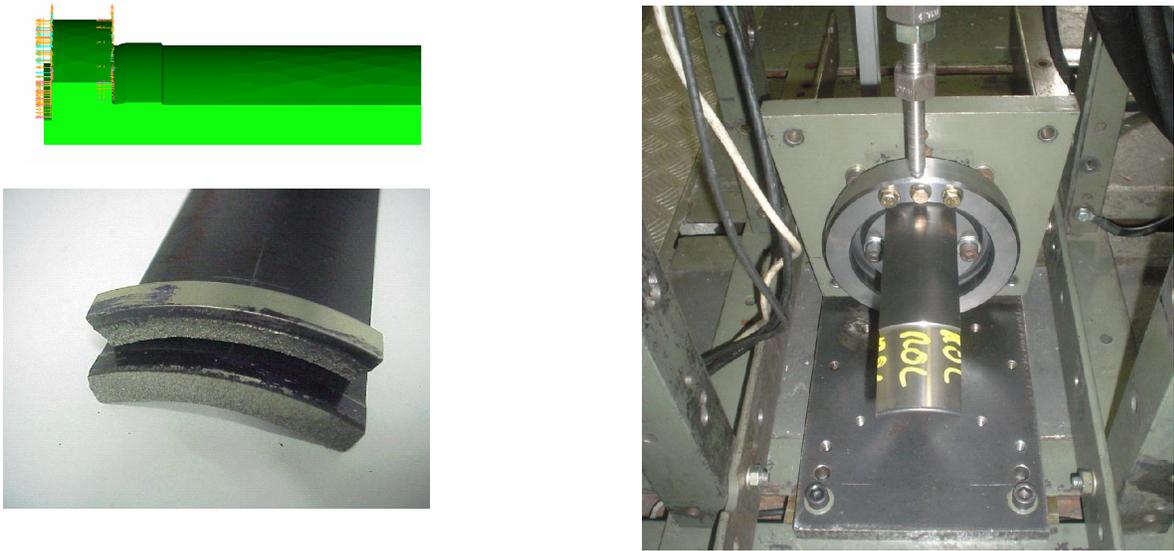


Figura 38 Detalhes do dispositivo real de determinação da tensão na camisa e corpo de prova

## **Análise de elementos finitos**

### **Modelamento**

Software Utilizado:

Para análise de elementos finitos foi utilizado o software da simulação das IDEAS 12 NX.

Modelo:

Foi criado um modelo assimétrico para analisar todos os casos da situação. Este modelo simula o processo de prensagem da camisa ao bloco de cilindros e a fase crítica desta etapa, é a carga compressiva final, para garantir o contato completo entre o colar e o balcão.

Foi utilizada a carga total máxima ao conjunto 32830 N.

Para determinar o limite da força de dobra do material da camisa, amostras similares à peça mostrada no item anterior, foram desenvolvidas e testadas até a falha no laboratório. A carga aplicada à fratura foi registrada e este valor foi usado em um modelo do 3D de Elementos Finitos, para calcular a tensão atuante.

Para a determinação dos valores de tensão no raio das camisas, foram utilizados 10 corpos de prova de camisas conforme recebido do fornecedor; camisas semi acabadas (sem usinagem e brunimento) e também foram utilizados 10 corpos de prova de camisas acabadas ( prensadas + usinadas + brunidas ) e sacadas do bloco.[10]

## Modelo de elementos finitos para correlação.

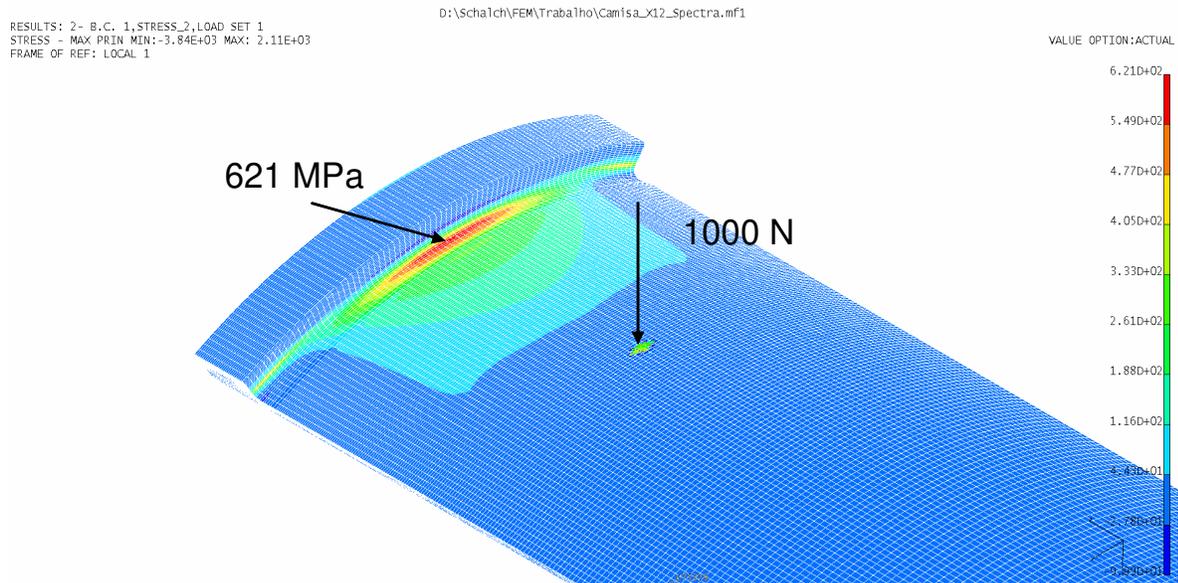


Figura 39 Detalhes do modelo de elementos finitos usado para determinação das tensões reais na camisa

O modelo considera uma carga pontual a uma distância de 30 mm do raio da camisa, que foi estabelecida tal qual o modelo real. No modelo experimental, aplicamos uma carga pontual (respeitando a distância do modelo matemático), até que o corpo de provas se rompa com a carga necessária para o rompimento do corpo de provas. Utilizando o modelo 3D de elementos finitos é possível determinar a tensão de ruptura real da peça.

Utilizaremos os dados obtidos para o novo modelo matemático, o qual representará a condição de montagem das peças.

Resultados obtidos experimentalmente

### Camisas Acabadas

4.7 Medições da carga de ruptura dos corpos de prova ( camisas Acabadas )

Camisas Acabadas					
Amostra	Carga ( N )	Lote de Fabricação	Amostra	Carga ( N )	Lote de Fabricação
1	689	08M08	1	787	08M11
2	671	08M08	2	698	08M11
3	698	08M08	3	819	08M11
4	701	08M08	4	801	08M11
5	765	08M08	5	753	08M11

### Camisas Semi acabadas

4.8 Medições da carga de ruptura dos corpos de prova ( camisas Semi acabadas )

Camisas Semi Acabadas					
Amostra	Carga ( N )	Lote de Fabricação	Amostra	Carga ( N )	Lote de Fabricação
1	970	08M10	1	1064	08M12
2	964	08M10	2	896	08M12
3	990	08M10	3	971	08M12
4	980	08M10	4	987	08M12
5	1021	08M10	5	1083	08M12

Descrição do lote de fabricação



Com os valores obtidos experimentalmente, o modelo de elementos finitos foi alimentado para a determinação das cargas atuantes.

## **Modelo de Elementos Finitos**

### **Interação entre camisa e bloco durante a prensagem da camisa**

Para as análises de elementos finitos, foram investigadas algumas hipóteses, conforme abaixo:

- Situação 1: Flat contact – Ângulo de assentamento da camisa no bloco  $0^0$
- Situação 2: Mínimo ângulo de assentamento da camisa no bloco (projetos)
- Situação 3: Máximo ângulo de assentamento da camisa no bloco (projetos)
- Situação 4: ângulo de assentamento da camisa no bloco fora do especificado (caso encontrado)
- Situação 5: Mínimo ângulo de assentamento da camisa no bloco proposto

**Modelo usado nas análises:**

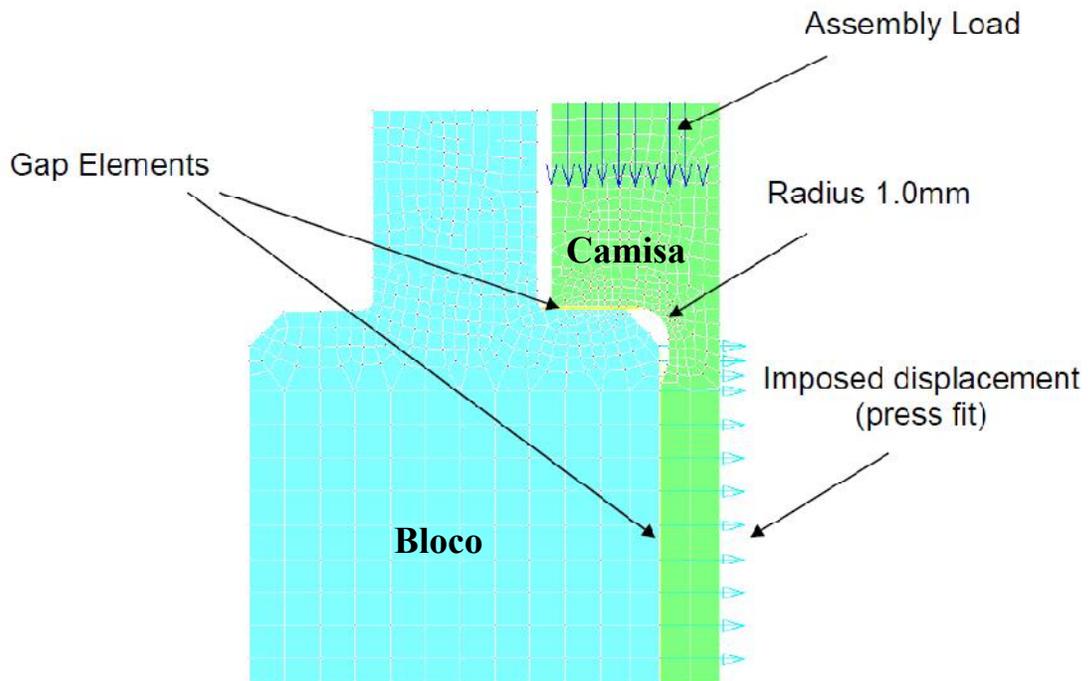


Figura 40 – Detalhes do modelo de elementos finitos usado nas análises

**Situação 1: Flat contact – Ângulo de assentamento da camisa no bloco 0**

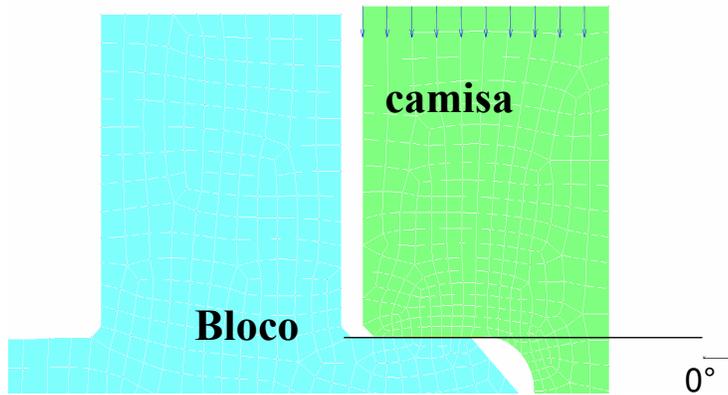


Figura 41 – Modelo de elementos finitos – Flat Contact

**Resultados obtidos:**

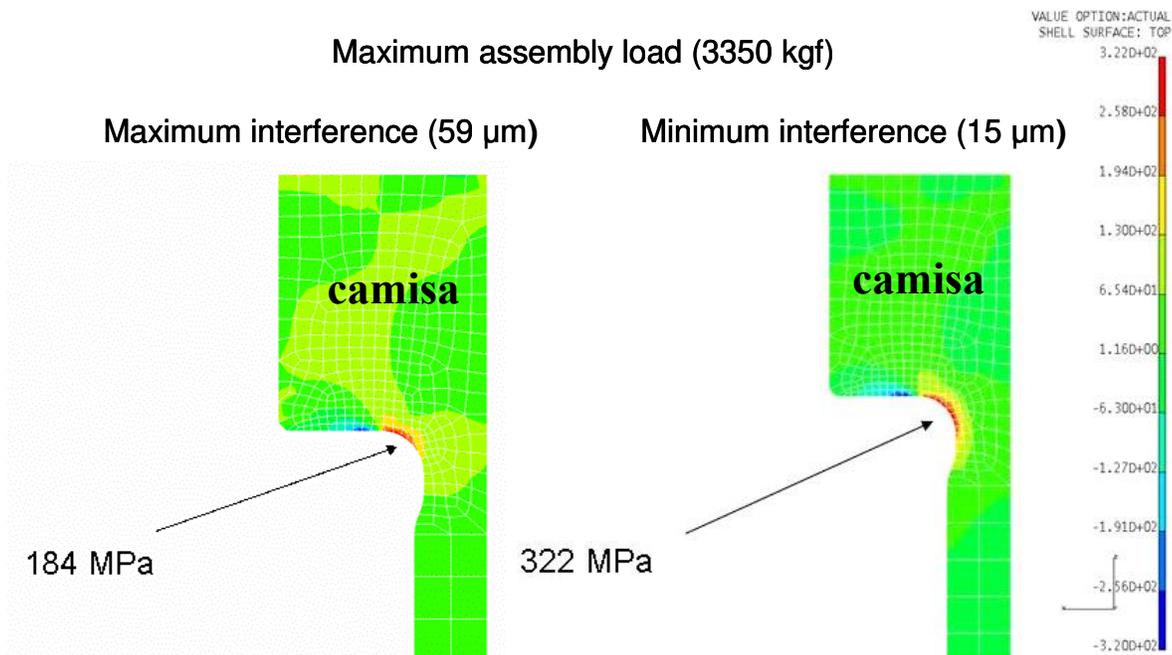


Figura 42 – Resultados do modelo de elementos finitos – Flat Contact

**Situação 2: Mínimo ângulo de assentamento da camisa no bloco (projetos)**

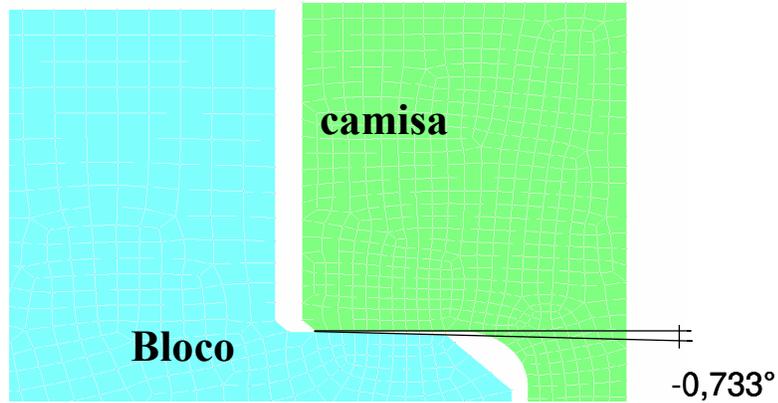


Figura 43 – Modelo de elementos finitos – Mínimo Ângulo

**Resultados obtidos:**

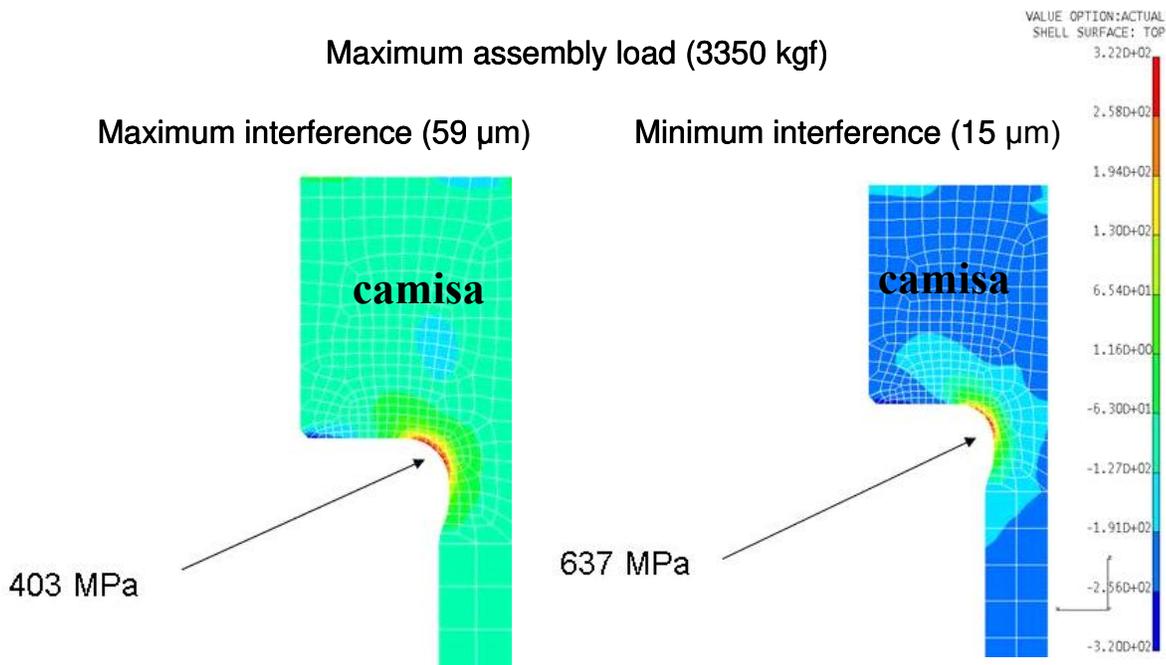


Figura 44 – Resultados do modelo de elementos finitos – Mínimo Ângulo

**Situação 3: Máximo ângulo de assentamento da camisa no bloco (projetos)**

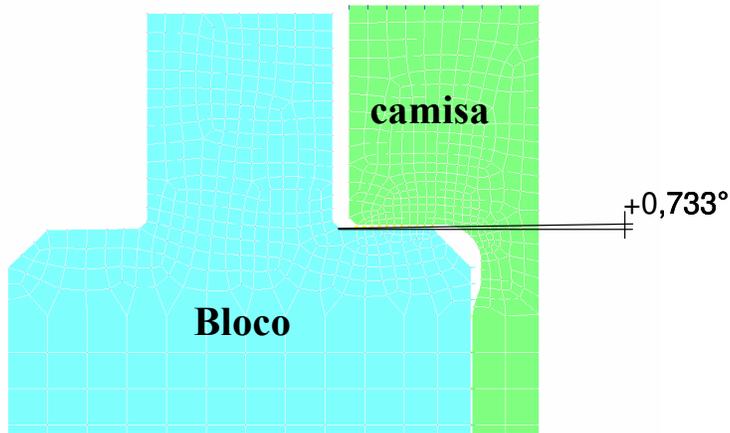


Figura 45 – Modelo de elementos finitos – Máximo Ângulo

**Resultados obtidos:**

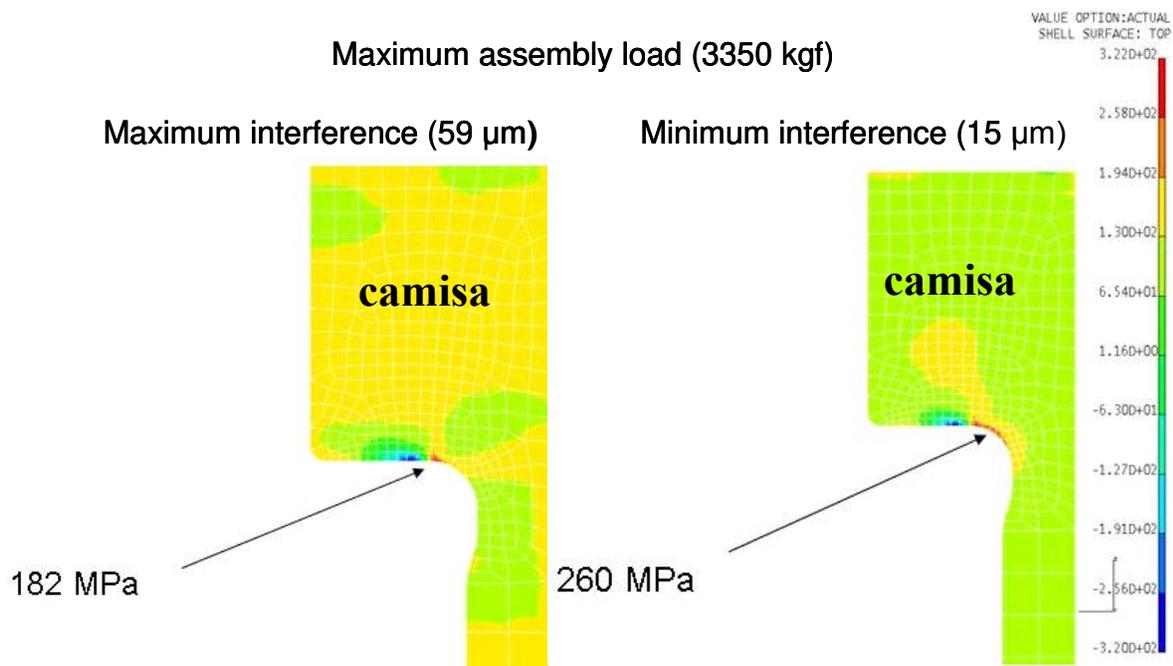


Figura 46 – Resultados do modelo de elementos finitos – Máximo Ângulo

**Situação 4: ângulo de assentamento da camisa no bloco fora do especificado ( caso encontrado )**

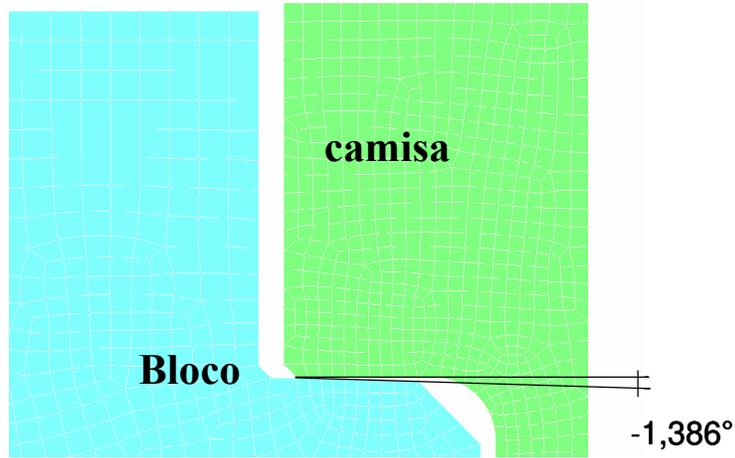


Figura 47 – Modelo de elementos finitos – Ângulo Fora do Especificado

**Resultados obtidos:**

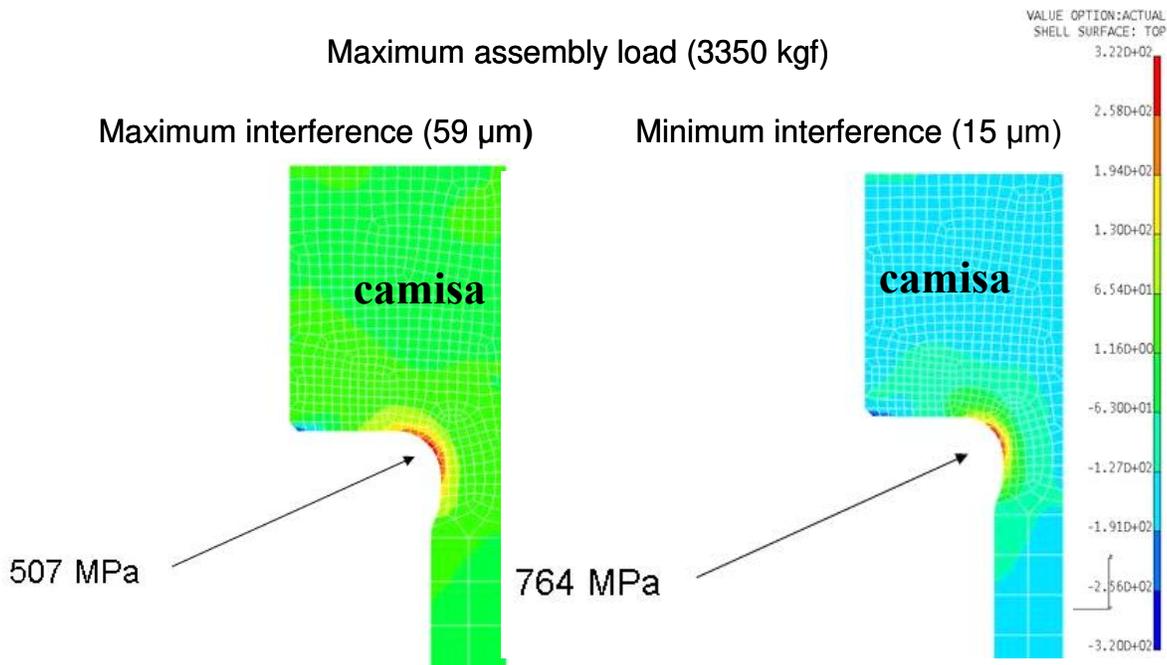


Figura 48 – Resultados do modelo de elementos finitos – Ângulo Fora do Especificado

**Situação 5: Mínimo ângulo de assentamento da camisa no bloco proposto**

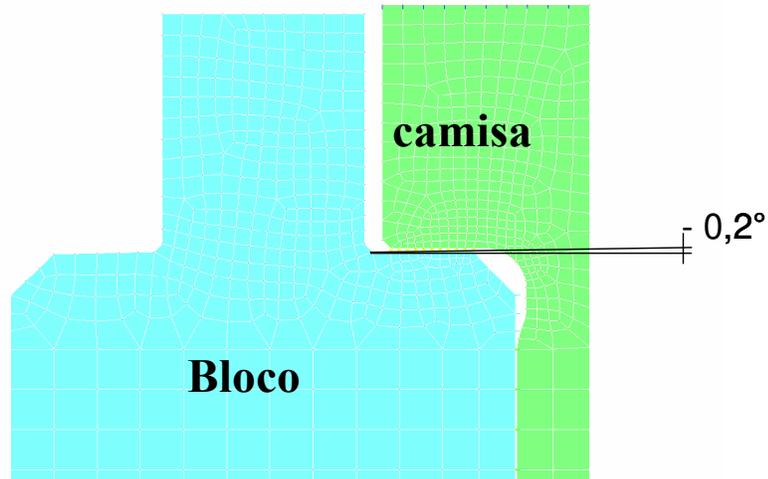


Figura 49 – Modelo de elementos finitos – Ângulo Proposto

**Resultados obtidos:**

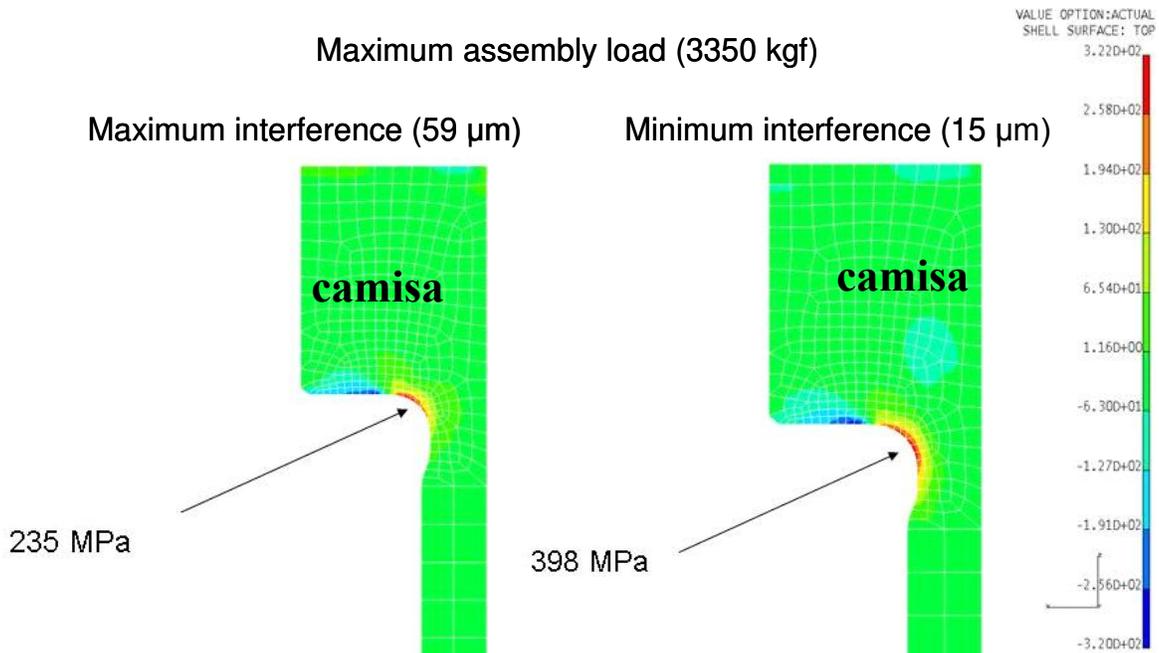


Figura 50 – Resultados do modelo de elementos finitos – Ângulo Proposto

## Sumario dos resultados:

### 4.9 Resultados das análises de elementos finitos (Tensão atuante - MPa)

Situation	Maximum Interference	Minimum Interference
1	184	322
2	403	637
3	182	260
4	507	764
Proposed angle	235	398

A média de dez amostras do teste de bancada para determinação da tensão de ruptura foi:

Mínimo: 556 MPa

Nominal: 616 MPa

Maximo: 672 MPa

A mínima tensão de ruptura da camisa de cilindros, obtida experimentalmente foi de 556MPa, analisando os resultados do modelo de elementos finitos vimos que na condição de mínima interferência e ângulo de assentamento acima ou abaixo do atual especificado, a tensão atuante no conjunto durante a prensagem da camisa ao bloco ultrapassa a tensão de ruptura da camisa.

## Conclusões / Considerações:

- As análises consideraram o ângulo de assentamento da camisa no mínimo - 90°.
- A mínima interferência e máxima carga de montagem foram determinadas como condição crítica de montagem.
- A mínima tensão de prensagem do material foi 556 Mpa e todas as condições de montagem apresentam alta concentração, ocasionando falha durante a prensagem da camisa.

Conforme análise dos resultados deve-se reduzir o mínimo ângulo de assentamento do bloco, garantido assim um fator de segurança durante o processo de montagem.

Redução de  $90^\circ \pm 44'$  para  $90^\circ + 0,2^\circ$

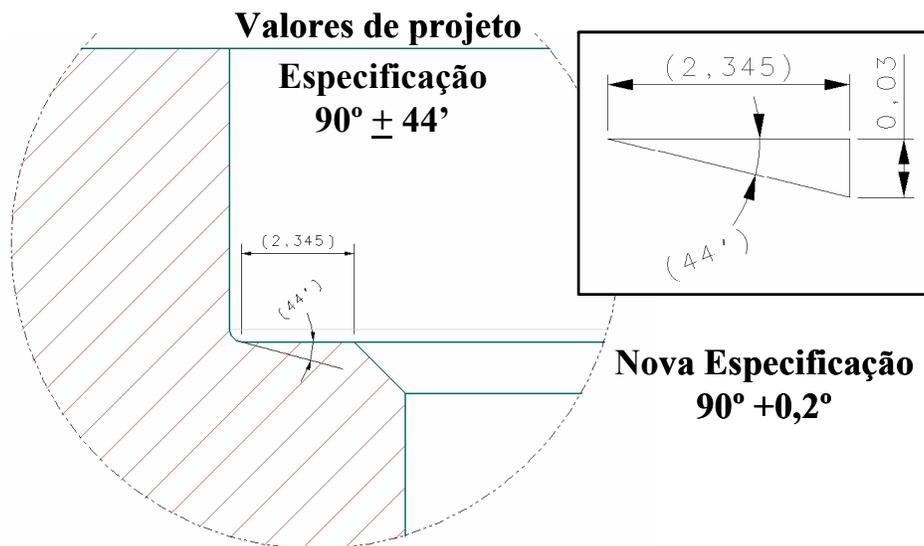


Figura 51 - Detalhes da especificação do ângulo de assentamento da camisa no bloco

### **Material da Camisa (microestrutura)**

Com base nas camisas falhas e outras camisas encontradas aleatoriamente em nossos estoques, foi gerado o relatório de laboratório de materiais nº 0915/08. Que concluiu o seguinte:

“O material das camisas não atende as especificações metalúrgicas conforme solicitadas em desenho MIM no item 1.3.”

”Diante dos resultados obtidos, podemos concluir que a presença de carbonetos na estrutura do material contribuiu com a falha do componente sendo que tais constituintes atuam como concentradores de tensões, fragilizando o material.”

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

#### Resumo das análises e formalização das causas potenciais

##### 5.1 Causa 1 – Usinagem do Alojamento de assentamento da Camisa no Bloco

A especificação do ângulo de alojamento da camisa no bloco é de  $90^\circ + 44'$ . Foram efetuadas medições deste ângulo nos motores falhados, e verificou-se que o processo não está centralizado com pontos fora do limite de especificação. Nota-se que quando o bloco é usinado em uma máquina específica, a variação é maior e a quantidade de blocos com o ângulo fora é maior.

##### 5.2 Causa 2 – Camisa de Cilindro

Foi verificada nas camisas falhadas, a presença de Cementita em sua microestrutura, o que não é aceitável por projeto relatório, e pode causar a falha do componente.

##### 5.3 Causa 3 - Dimensional da Camisa

As Camisas foram dimensionadas e todas estavam de acordo com o projeto, iremos levar em consideração no DOE o ângulo de assentamento com o bloco.

##### 5.4 Causa 4 – Prensagem da Camisa

Conforme revelado pelo modelo de elementos finitos, a carga de prensagem quando na condição de interferência mínima, levando-se em consideração a interação com o ângulo de assentamento da camisa no bloco, ultrapassa a capacidade de tensão à ruptura do material da camisa na região do colarinho, podendo nuclear uma trinca.

## **Hipóteses investigadas**

### **Ângulo de assentamento da camisa no bloco**

O ângulo de assentamento da camisa no bloco possibilita a montagem da camisa sem a distribuição de forças, já que o ângulo de assentamento pode variar conforme a usinagem - ângulo de alojamento da camisa no bloco  $90^{\circ} 44'$ . Foram efetuadas medições deste ângulo nos motores falhados e verificaram-se pontos fora do limite de especificação, e nota-se que quando o bloco é usinado em uma máquina específica, existe a variação e a quantidade de blocos com o ângulo fora é maior.

### **Camisa de Cilindro**

Foi verificada nas camisas falhadas, a presença de Cementita em sua microestrutura e como consequência, a diminuição do tamanho da grafita e sua classificação, o que não é aceitável por projeto. Foram Também analisadas peças em estoque e comprovada a falha em algumas peças, comprometendo um lote específico. (segregado e devolvido ao fabricante)

## Planejamento de experimentos (DOE)

Para a comprovação das causas reais do problema, foi elaborado um planejamento de experimento com base nos fatores correlacionados com as causas potenciais descritas anteriormente.

O DOE planejamento de experimentos foi elaborado conforme os dados abaixo:

Objetivo:

Verificar quais os fatores são significativos para a falha de trinca de camisa.

Variável resposta:

Motor com ou sem trinca de camisa.

Variáveis de ruído:

- Temperatura do banco de teste;
- Ciclagem do teste;
- Vibração do motor;
- Aplicação de bissulfeto.

Fatores selecionados:

- Ângulo de assentamento/alojamento da camisa no bloco;
- Material da camisa de cilindro;
- Interferência entre o bloco e a camisa.

Níveis selecionados:

- Ângulo de assentamento/alojamento da camisa no bloco:
  - 90° 00' (Especificado);
  - 92°50' (Fora do Especificado).
- Material da Camisa de Cilindro:
  - Presença de Cementita (20 < encontrado < 40%);
  - Ausência de Cementita (Encontrado < 1%).
- Interferência Bloco x Camisa:
  - Mínima;
  - Máxima.

Com isso temos um experimento  $2 \times 2 \times 2 = 2^3$ , o que totaliza 08 ensaios.

**$2^3 = 8$  Experimentos**

### 5.1 Tabela com os fatores e níveis do DOE

Fator	Níveis
Ângulo de alojamento Bloco	90° 00' ( Especificado )
	92°50' ( Fora do Especificado )
Material da Camisa de Cilindro	Presença de Cementita ( encontrado 40% )
	Ausência de Cementita ( Max. Permitido 1% )
Interferência Bloco x Camisa	Mínima
	Máxima

#### **Forma de condução do experimento:**

Como se tratava de um experimento com resultados atributivos e não contínuos, tivemos de fortalecer as hipóteses de teste, ou seja, considerar níveis um pouco mais afastados para gerar o evento significativo.

Para o caso do ângulo do bloco, foi solicitada à usinagem dois blocos especiais que quando medidos na tridimensional, apresentaram as medidas exatas dos níveis considerados no experimento.

A detecção da cementita nas camisas só era possível por ensaios destrutivos feitos em laboratórios. Como o teste era destrutivo, não tínhamos como saber se as camisas continham ou não os níveis de cementita desejados.

#### **Testes no dinamômetro da produção**

Como as falhas internas foram detectadas durante o teste final em dinamômetro de produção, todos os motores do experimento seriam submetidos ao mesmo padrão de teste, acrescidos um período de 20 minutos de teste onde o mesmo alterna entre as condições de potência e torque do motor, garantindo a detecção da falha.

## Resultados dos Experimentos

Após os testes, foram verificados os fatores críticos para a reprodução da falha.

Ângulo de assentamento do bloco e, interferência mínima entre bloco e camisa, comprovando os resultados obtidos em CAD.

A microestrutura da camisa não interferiu na reprodução da falha, mas como identificado, esta microestrutura fragiliza a camisa, sendo assim inadmissível a utilização de camisas nesta configuração.

### 5.2 Tabela com os resultados do DOE

Motor	Ângulo Bloco	Interferência Bloco x Camisa	Material Camisa	Resultado
DOE 1	90° 00'	Maxima	S / Cementita	Sem Falha
	90° 00'	Maxima	C / Cementita	Sem Falha
	90° 00'	Minima	C / Cementita	Sem Falha
	90° 00'	Minima	S / Cementita	Sem Falha
DOE 2	92° 50'	Maxima	C / Cementita	Sem Falha
	92° 50'	Minima	C / Cementita	<b>Camisa Trincada</b>
	92° 50'	Maxima	S / Cementita	Sem Falha
	92° 50'	Minima	S / Cementita	<b>Camisa Trincada</b>

Comprovação dos Resultados:

Para a comprovação dos resultados foi produzido outro motor, repetindo os fatores de ângulo do bloco e interferência mínima entre bloco e camisa em todos os cilindros. Como esperado foram reproduzidas as falhas em todos os cilindros, comprovando que a interação do ângulo de assentamento da camisa no bloco e interferência mínima entre bloco e camisa, fatalmente teremos nucleação de trinca na região do colarinho da camisa.

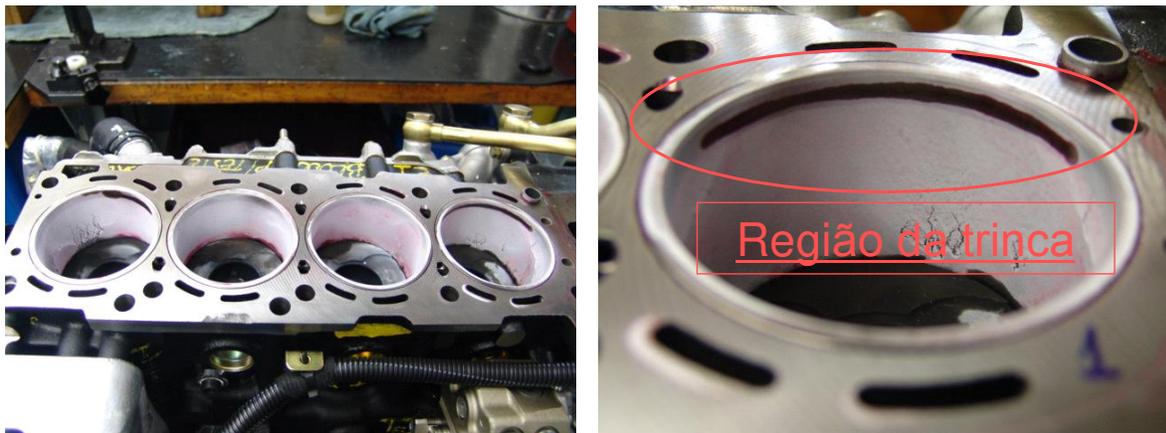


Figura 52 - Detalhes do motor após a comprovação do DOE

## Capítulo 6

### Conclusões

Com a determinação da mínima tensão de ruptura da camisa de cilindros, obtida experimentalmente de 556MPa, comparada aos resultados do modelo de elementos finitos vimos que na condição de mínima interferência e ângulo de assentamento acima ou abaixo do atual especificado, a tensão atuante no conjunto durante a prensagem da camisa ao bloco ultrapassa a tensão de ruptura da camisa.

Verificamos que a causa raiz da falha era a usinagem feita pela maquina Moure Seike, cujo porta ferramenta com formato triangular e apenas um ponto de fixação central permitia a variação do posicional consequentemente a usinagem de ângulo de assentamento da camisa não atendia ao especificado em projeto.

A combinação do ângulo de assentamento da camisa ao bloco, com a mínima interferência entre camisa e alojamento, resultava em tensões residuais acima das tensões de ruptura da camisa, ocasionando assim a trinca da camisa na região do seu “colarinho”.

Esta trinca possivelmente era nucleada durante a prensagem da camisa ao bloco, e durante a fase de tese do motor, onde o mesmo era submetido aos esforços dinâmicos, pressão e temperatura de de combustão, se propagava e consequentemente descia em direção as partes móveis do motor, levando-o ao colapso total.

O projeto não seria considerado concluído e o problema resolvido se a causa raiz não fosse eliminada, portando conforme a metodologia seis sigmas deve-se propor ações que garantam a eliminação da causa raiz. portanto as considerações abaixo fizeram com que a falha não fossem mais apresentadas.

Desde a implementação das ações de controle propostas por este trabalho as falhas decorrentes deste modo de falha não voltaram a acontecer. (janeiro/2009 – agosto/2010).

Conforme metodologia Six Sigma, esta fase do projeto compreende a etapa do IMPROVE, onde a mesma compreende em Melhorar (Improve) e aperfeiçoar o processo em base à análise usando técnicas como desenho de experimentos.

**Esta etapa compreende as seguintes fases:**

- Propor soluções para eliminar as causas reais encontradas;
- Escolher as soluções com melhor custo / benefício;
- Avaliar os riscos das soluções escolhidas;
- Testar as soluções escolhidas e fazer os ajustes necessários;
- Implantar as soluções (em pequena escala, se necessário);
- Verificar se a meta foi alcançada;
- Preparar a implantação em larga escala.

**Causas reais da trinca**

A interação do ângulo de assentamento da camisa no bloco e interferência mínima entre bloco e camisa gerava a falha, ou seja, quando o ângulo estiver acima do especificado e a interferência no mínimo, a falha fatalmente ocorrerá.

Não foi evidenciado que a estrutura da camisa gera a falha, porém, não é possível quantificar a fragilização do material decorrente da presença de cementita. Desta forma, é inadmissível a utilização de camisas nesta configuração.

O processo de usinagem do assentamento da camisa no bloco era feito por duas máquinas mencionadas anteriormente, uma das máquinas, justamente a que ocorria o maior índice de falhas, possui um sistema de porta ferramentas vulnerável que devido ao desgaste, possibilita o deslocamento da ferramenta, gerando uma variação no ângulo de assentamento da camisa no bloco acima do especificado.

Como o processo produtivo trabalha com parâmetros que conduziam a uma interação entre mínima interferência e ângulo acima da especificação, os motores produzidos nessas condições falhavam.

Apesar da interferência entre o bloco e a camisa ser significativa para a falha, ela só será fator gerador em interação com o ângulo de assentamento da camisa no bloco acima do especificado, portanto, uma vez garantido a especificação do ângulo, a probabilidade de ocorrer a falha, é nula.

### **Soluções para as causas reais da trinca**

Conforme metodologia Six Sigma, esta fase do projeto compreende a etapa do CONTROL, onde a mesma compreende em controlar (Control) o processo com testes piloto, realizar a transição para a produção e depois medir continuamente o processo para garantir que as variações são corrigidas antes de se transformarem em defeitos.

Esta etapa compreende as seguintes fases:

- Implantar a solução em larga escala, se for o caso;
- Verificar se a meta continua sendo atingida;
- Documentar e padronizar as novidades vindas do projeto,
- Divulgar e treinar os envolvidos;
- Preparar um plano de monitoramento dos resultados, ou seja, dizer quais os indicadores devem ser gerenciados;
- Elaborar um plano de ação preventivo;
- Elaborar um plano de ação corretivo;
- Sumarizar o aprendido e recomendar novos projetos.

Dada a impossibilidade de modificação do porta ferramentas, sem que a máquina fosse trocada, a única forma de evitar que os blocos fossem usinados com um ângulo superior à especificação, era montar um plano de verificação do desgaste do inserto da ferramenta, de forma a evitar a grande variabilidade do processo.

Antes do início de cada turno, é checado o ângulo do inserto da ferramenta para certificar que a produção ocorrerá nas condições ideais.

O primeiro bloco usinado por cada turno é retirado da linha e enviado à auditoria, onde ele é medido em tridimensional, para a verificação do ângulo de assentamento da camisa e isso permite a identificação da progressão de desgaste da ferramenta, possibilitando a troca da mesma, antes que sejam produzidos blocos fora do especificado.

A cada troca de ferramenta também é enviada uma peça usinada para a medição na auditoria.

Devido às conclusões do modelo de elementos finitos, a especificação para a usinagem do ângulo foi alterada para  $90^\circ +$  ou  $- 22'$  e isso garante uma maior segurança para o processo de usinagem, evitando ângulos que possam gerar a falha. O estudo de capacidade de processos ainda não foi concluído, porém, tem previsão para conclusão até 30 de maio de 2009.

A interferência entre bloco e camisa, que também foi verificado como fator crítico, não receberá um plano específico, pois conforme visto este fator sem a combinação do ângulo do bloco não surte efeito quanto à falha.

Desde a implementação das ações corretivas no processo produtivo até a data de conclusão deste trabalho (Agosto/2010), não foram registradas reincidência de falhas de mesma natureza.

## Referências Bibliográficas

- [1]Castro, M. (1969). Afinação de motores. Sintra. Gráfica Europam.
- [2]Estevez, S. (1976). Tecnologia do automóvel. Barcelona. Plátano Editora
- [3]Imperial, J. (1980). Sobrealimentação de motores. Sintra. Tito Lyon de Castro.
- [4]Pugliesi, M. (1976). Manual completo do automóvel. S.Paulo. Hemus
- [5]Sully, F.; Unstead, P. (1978). Motores de automóvel. Vila da Feira. Editorial Presença
- [6]LINDERMAN, K. et al. Six Sigma: a goal-theoretic perspective. Journal of Operations Management, v. 3, n. 21, p. 193-203, 2003.
- [7]HAN, C.; LEE, Y. H. Intelligent integrated plant operation system for six sigma. Annual Reviews Control, v. 26, p. 27-43, 2002.
- [8]WESSEL, G.; BURCHER, P. Six Sigma for small and medium-sized enterprises. The TQM Magazine, v. 16, n. 4, p. 264-272, 2004.  
BREYFOGLE III F. W.; CUPELLO J. M.; MEADOWS, B. Managing Six Sigma: a practical guide to understanding, assessing, and implementing the strategy that yields bottom-line success. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [9]ANTONY, J.; BAÑUELAS, R. A strategy for survival. Manufacturing Engineer, v. 80, n. 3, p. 119-121, 2001.
- [10] SCHALCH, ALEXANDRE . Eng. Report MWM 046/09