

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automotiva**

MARCELO FERNANDES

**CILINDROS PARA ÊMBOLOS EM MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA**

Santo André – São Paulo
2018

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ
Tecnologia em Mecânica Automotiva**

MARCELO FERNANDES

**CILINDROS PARA ÊMBOLOS EM MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA**

Monografia apresentada ao Curso de Tecnologia em Mecânica Automotiva da FATEC Santo André, como requisito parcial para conclusão do curso em Tecnologia em Mecânica Automotiva.

*Orientador: Prof. Msc. Cléber Willian Gomes.
Co-Orientador: Mestrando Alvaro Cesar Garcia.*

Santo André – São Paulo
2018

F363c

Fernandes, Marcelo

Cilindros para êmbolos em motores de combustão interna /
Marcelo Fernandes. - Santo André, 2018. – 70f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Msc. Cleber Willian Gomes

1. Mecânica. 2. Cilindros. 3. Motores a diesel. 4.
Manutenção. 5. Processo. 6. Produção. 7. Mercado. 8.
Veículos. 9. Brasagem. I. Cilindros para êmbolos em motores
de combustão interna.

621.43



Faculdade de Tecnologia de Santo André

CENTRO PAULA SOUZA

GOVERNO DO ESTADO
DE SÃO PAULO

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 25 DE JUNHO DE 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA
"CILINDROS PARA ÊMBOLOS EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA" DO ALUNO DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. CLEBER WILLIAN GOMES

MEMBROS:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO

PROFª CARLA KORPS MAUERBERG GERULAITIS

SENHOR ALVARO CESAR GARCIA

ALUNO:

MARCELO FERNANDES

À minha esposa e filha, aos parceiros de trabalho de toda a minha carreira, com toda a minha dedicação.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores dos quais tive o prazer e a satisfação de conviver ao longo destes anos. Talento, Dedicção e Compreensão foram melhor exemplificados por vocês docentes, servindo como pilares para minha atuação profissional.

“Engenharia é a transformação dos recursos naturais em facilitadores para a humanidade”

Profº Msc. Luiz Vasco Puglia

RESUMO

Atualmente com o direcionamento das tecnologias de especialização nos materiais para fins automotivos, dentro das inovações invisíveis ao mercado consumidor, observamos o Estado da Técnica para revestimentos de cerâmica em cilindros, êmbolos e anéis pelo processo produtivo de compósitos Metal-Cerâmicos por brasagem. Este estudo trata do uso de cilindros removíveis em motores a Diesel e sua manutenção ao longo da vida útil do motor, seu processo produtivo e a tribologia do sistema.

Palavras-chave: Camisa de Pistão; Camisa Úmida; Brasagem.

ABSTRACT

Nowadays, with the targeting of specialization technologies in materials for automotive purposes, within innovations invisible to the consumer market, we observe the state of the art for ceramic coatings in cylinders, pistons and rings by the production process of metal – ceramic composites by brazing. This study deals with the use of removable cylinders in diesel engines and their maintenance over the life of the engine, its production process and the system's tribology.

Keywords : Piston shirt; Wet Shirt; Brazing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Vista explodida do motor diesel – Acteon – MWM [5].....	12
FIGURA 2. Motor Estacionario à GNV [38].....	14
FIGURA 3. Layout do sistema para motores estacionários à co.mbustão [39].....	16
FIGURA 4. Denominação das partes de um êmbolo [4].....	17
FIGURA 5. Nomenclatura de um êmbolo [4].....	18
FIGURA 6. Posicionamento dos anéis [4].....	20
FIGURA 7. Cilindros removíveis [6].....	21
FIGURA 8. Tipos de cilindros [2].....	23~24
FIGURA 9. Revestimento em cilindros [7].....	25
FIGURA 10. Forças atuantes nos cilindros [11].....	30
FIGURA 11. Deformações em cilindros [11].....	30
FIGURA 12. D FEMEA para cilindros [11].....	31
FIGURA 13. Cavitação em cilindros [13].....	33
FIGURA 14. Máquina de brunimento interno [11].....	35
FIGURA 15. Processo de brunimento [43].....	36
FIGURA 16. Tipos de brasagem [18].....	41
FIGURA 17. Representação esquemática da brasagem [18].....	42
FIGURA 18. Tribologia de anéis x cilindros[50].....	47
FIGURA 19. Efeitos nos componentes de um MCI [45].....	49
FIGURA 20. Efeitos termodinâmicos em MCI's [2].....	50
FIGURA 21. Circuitos de resfriamento em MCIs [45].....	52
FIGURA 22. Circuitos auxiliares de resfriamento em MCI's. [45].....	53
FIGURA 23. Fluxo de energia em cilindros [49].....	54
FIGURA 24. Transferência de calor nos cilindros [45].....	55
FIGURA 25. Transferência de calor nos cilindros [50].....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Rendimento entre GNV x Diesel [41].....	13
TABELA 2.	Evolução dos êmbolos [2].....	19
TABELA 3.	Quadro de características e propriedades mecânicas em cilindros [11].....	26
TABELA 4.	Evolução dos motores à Diesel [14].....	27~28
TABELA 5.	Diferenças de brunimento [11].....	35
TABELA 6.	Temperaturas de brasagem [18].....	43
TABELA 7.	Curva de dilatação na brasagem [18].....	45
TABELA 8.	Ligas em contato com fluídos em MCI's[48].....	60

LISTA DE FÓRMULAS

FÓRMULA 1. Cálculo para desgaste [33].....	37
FÓRMULA 2. Cálculo de forças hidrodinâmicas [44].....	48
FÓRMULA 3. 1º Lei da Termodinâmica para regimes permanentes[49].....	54
FÓRMULA 4. Transferência de calor no cilindro[45].....	55
FÓRMULA 5. Cálculo de troca de calor [48].....	58
FÓRMULA 6. Cálculo por condução [48].....	58
FÓRMULA 7. Cálculo de transferência de calor [48].....	59
FÓRMULA 8. Cálculo de Irradiação de calor [48].....	60

LISTAS DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. Evolução de Torque x Potência em motores à Diesel [14].....	29
GRÁFICO 2. Pressão x Tempo de brunimento[22].....	38~40

LISTA DE SIGLAS; ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial

MCI – Motor de combustão interna

MMC – Metal matrix composites (Compósitos metal cerâmicos)

PMS – Ponto máximo superior

PMI – Ponto mínimo inferior

AWS – American welding society (Sociedade americana de soldagem)

TIG – Tungsten inert gás (Solda em atmosfera de tungstênio)

T-SOLIDUS – Temperatura de fusão de ligas metálicas.

T-LIQUIDUS – Temperatura de término de fusão de ligas metálicas.

MQL – Processo de brunimento pela mínima quantidade de lubrificação.

CNOMO – Comitê de Normalização dos Meios de Produção.

h.ep - Espessura equivalente de corte.

Rmv - Taxa de material relativa.

SUMÁRIO

1. Introdução	9
1.1 Motivação	9
1.2 Conteúdo	10
2. Desenvolvimento	11
2.1 Revisão Bibliográfica	11
2.1.1 Motores de combustão interna	11
2.1.2 Motores estacionários	13
2.1.3 Êmbolos	17
2.1.4 Anéis de segmento	20
2.1.5 Cilindros	21
2.1.6 Manutenção de cilindros	29
2.1.7 Brunimento	34
2.2 Processos de Produção	41
2.2.1 Brasagem	41
2.2.2 Brasagem Metal-Cerâmica	44
3. Metodologia	46
3.1 Tribologia do Sistema	46
3.2 Termodinâmica	49
3.3 Transferência de calor	56
4. Conclusões	60
5. Propostas Futuras	61
Referências Bibliográficas	62~64

1 INTRODUÇÃO

Atualmente com o direcionamento das tecnologias de especialização nos materiais para fins automotivos, dentro das inovações invisíveis ao mercado consumidor, observamos o Estado da Técnica para revestimentos de cerâmica em cilindros, êmbolos e anéis comumente utilizados em motores de combustão interna de 1 (um) ou 2 (dois) cilindros, especificamente aplicados em motocicletas.

Esta pesquisa detalha o processo de produção de cilindros removíveis, sua manutenção e tribologia de sistema, para sua aplicação em motores à Diesel.

1.1 MOTIVAÇÃO

A necessidade da redução de emissões, o advento do downsizing em motores com sobre alimentação, os custos de manutenção para motores à Diesel e o ganho de torque para caminhões com cargas crescentes, motivou-me a esse estudo como pesquisa básica para um aperfeiçoamento de funcionalidade em cilindros úmidos removíveis.

1.2 CONTEÚDO

Este trabalho estará dividido da seguinte forma:

- ✓ Revisão bibliográfica para: motores de combustão interna; êmbolos; anéis de segmento; cilindros; manutenção em cilindros; brunimento; processo de produção por brasagem.
- ✓ Processo de produção de cilindros removíveis e sua viabilidade técnica.
- ✓ Vantagens e desvantagens técnicas e comerciais de cilindros removíveis.
- ✓ Eficiência energética de cilindros removíveis em motores à Diesel.
- ✓ Conclusões de viabilidade técnica e aplicação de cilindros removíveis.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Motores de Combustão Interna

É o transformador de energia mais usado para veículos automotores. Geram energia cinética através da conversão da energia química contida no combustível que quando em combustão passa a energia térmica; a energia do calor aumenta a pressão dentro de um meio, o cilindro, e na medida que se expande realiza o trabalho mecânico cíclico através dos êmbolos e árvore de manivelas.

É caracterizado por seu ciclo aberto, onde ocorre a troca de gases com adição de novo combustível a cada novo ciclo de combustão e se dividem em ciclo Otto e Diesel.

O ciclo Otto é o projeto de ignição externa, onde uma centelha elétrica inicia a combustão; ciclo Diesel é um projeto onde a mistura ar – combustível se inflama por auto – ignição na medida em que se aquece durante sua compressão.

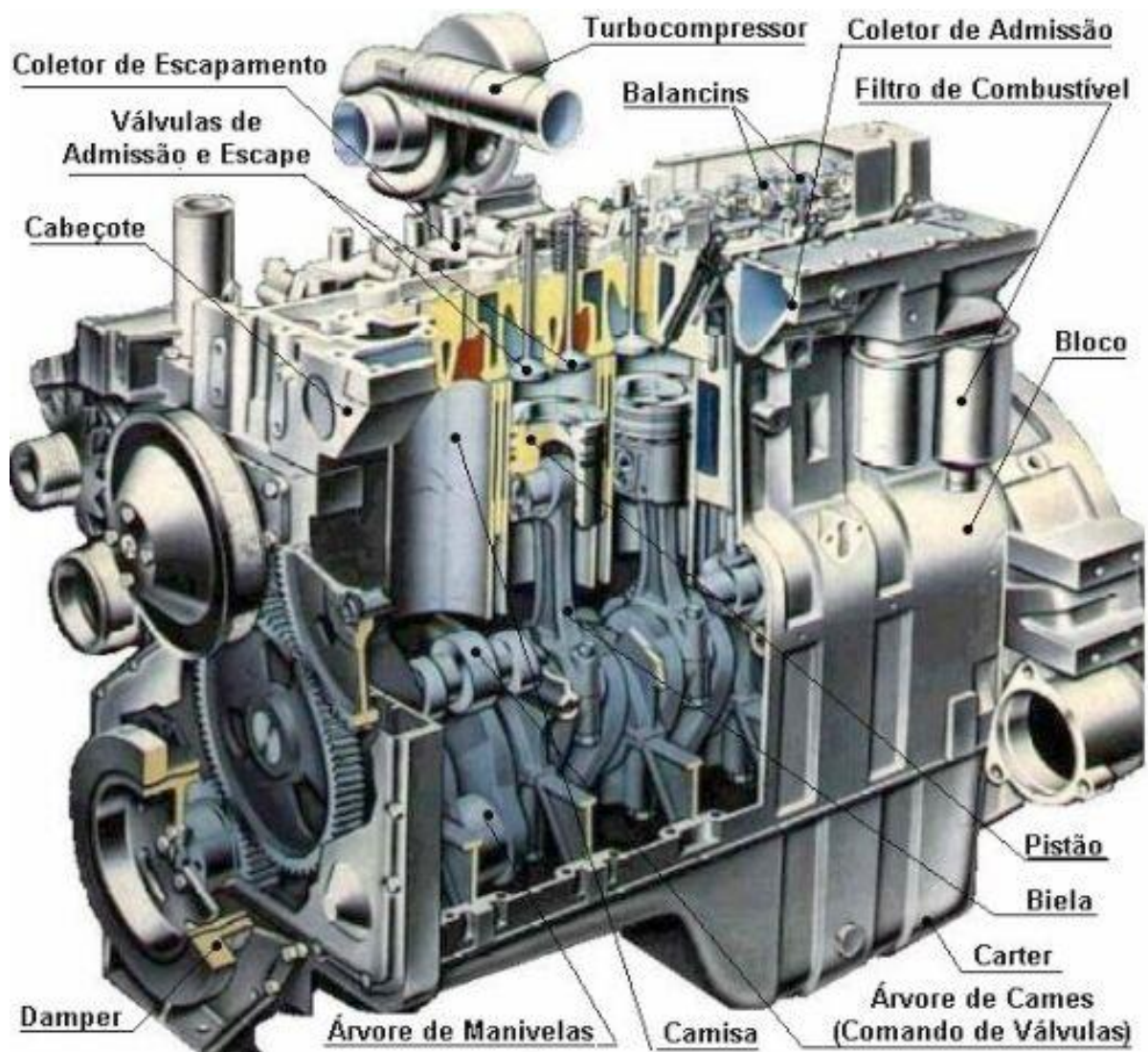
A maior parte da energia produzida pela combustão (energia potencial de combustão) é desviada ou perdida em um motor de combustão interna, por perdas do calor eliminado no sistema de escapamento, arrefecimento e lubrificação, além de perdas pelos atritos internos dos pneus, embreagem e transmissões.

Em aplicações veiculares são convertidos 17% de toda energia térmica da combustão em movimento quando em motores de ciclo Otto; e 25% quando para motores ciclo Diesel.

[1] [2].

Destacamos a seguir um modelo de motor de combustão interna de Ciclo Diesel, com seus componentes e agregados, na figura abaixo:

Figura 1 [5] – Vista de um MCI à ciclo Diesel.



Fonte : MWM

2.1.2 Motores Estacionários

São motores destinados ao acionamento de geradores, máquinas de solda, bombas e máquinas que operam em rotação constante.

Diesel – Gerador é o conjunto de MCI à Diesel e um gerador de corrente alternada, denominado Alternador, convenientemente montados e dotados de componentes de supervisão e controle necessários ao seu funcionamento autônomo e destinado ao suprimento de energia elétrica, produzida a partir do consumo de óleo diesel do MCI.

Moto – Gerador é o conjunto de MCI a gás natural e um gerador de corrente alternada que pode cobrir uma larga faixa de potência, variando de 1,0 hp até 80.000 hp.

A seguir destacamos uma tabela comparativa de rendimento de motores estacionários à Diesel e a Gás natural:

Tabela 1 [37] – Geradores a gás x geradores a diesel : Total de emissões de CO₂ e custo total.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Unidade kWe	Tipo de Comb.	Volume do Motor (litros)	RPM Motor	Potência (kWe)	Fluxo Comb. GN (m ³ /hr)	Fluxo Comb. Diesel (L/hr)	Custo/Hr(1)	Custo/kW-hr(1)	BTU/kWe	Emissão CO ₂ do Motor Únic. Escape (Kg/hr)	Energia Usada (BTUm/hr)	Emissão Total CO ₂ do Motor & Procesos (Kg/hr)(2)	Aumento % CO ₂ vs GN
100	Gás	6.8	2300	100	39,08	-	R\$50,02	R\$0,50	13.800	76,38	1.380	148,78	-
100	Diesel	6.7	1800	100	-	29,90	R\$83,42	R\$0,83	10.490	79,56	1.116	173,73	16,7%
200	Gás	13.3	1800	200	77,87	-	R\$99,67	R\$0,49	13.750	152,18	2.750	296,65	-
200	Diesel	8.7	1800	200	-	58,67	R\$163,68	R\$0,81	10.291	156,08	2.189	340,65	14,9%

1 Com base no uso de combustível e preço atual, carga de 100%. Gás natural: R\$ 1,28 / m³. Diesel: R\$ 2.79 / L.

Análise 2 GREET Transporte de combustível modelo de ciclo, desenvolvido pelo Argonne National Laboratory, 05 de setembro de 2008.

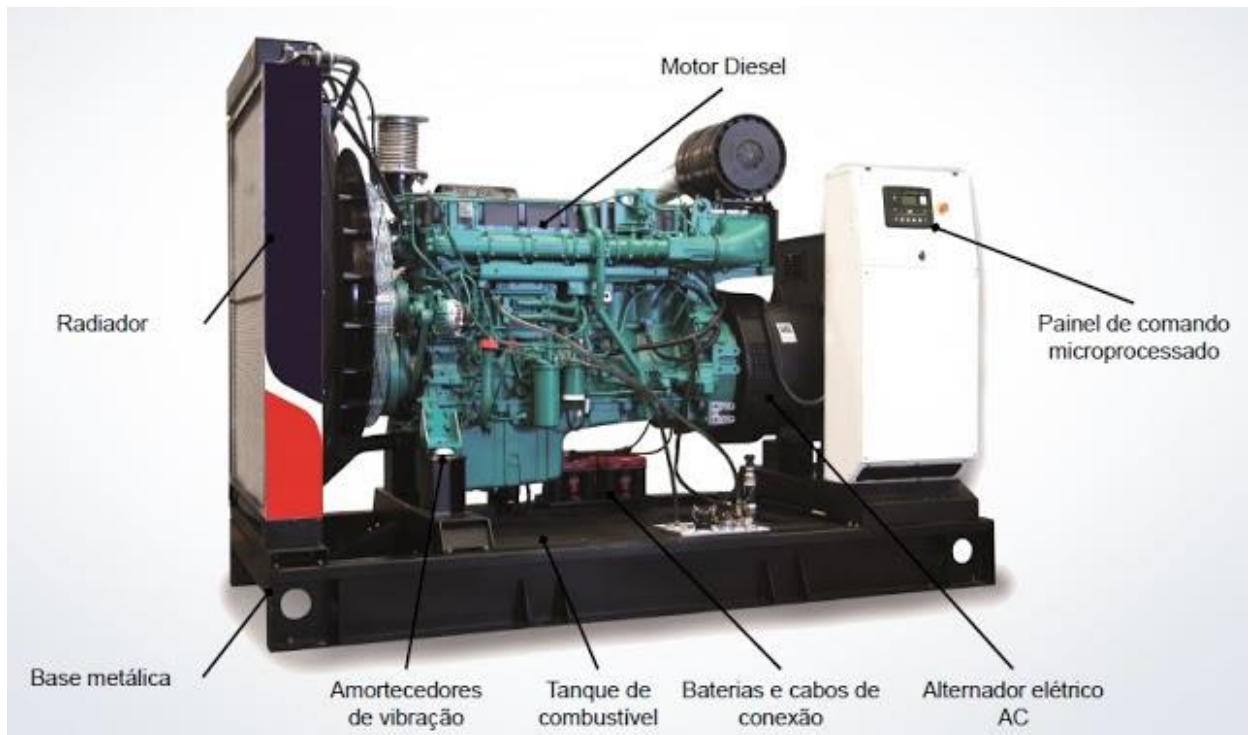
Fonte: Adaptado de www.josecludio.eng.br

Destacamos que para motores a Gás natural:

- Sua eficiência energética é inferior à do Diesel em média 34 a 38% menor;
- Tempo de partida longo, não sendo indicado para geração de energia de emergência;
- Sua relação peso x potência é maior que outros MCIs;
- Níveis de emissões semelhantes aos de qualquer outro MCI à hidrocarbonetos;
- É prejudicial às sedes de válvulas, por não possuir um bom fator de lubrificação;
- É prejudicial ao sistema de ignição, pois necessitam de uma tensão maior para romper o dielétrico e inflamar a mistura, causando flash over;
- Seu custo de investimento é maior por Kw de potência instalada;
- Recomendado para aplicações de Co-geração;
- Possui maior durabilidade que de outros MCIs;
- Quando alimentado por Gás de concessionárias, não há a necessidade de armazenamento[38].

Destacamos a seguir um modelo de motor estacionário a GNV na figura abaixo:

Figura 2 [38] – Motor estacionário à Gás – canalizado.



Como componentes indispensáveis ao funcionamento autônomo dos motores estacionários destacamos:

Governadores Mecânicos ou Eletrônicos: Atuam no mecanismo de aceleração, aumentando ou diminuindo o débito do combustível, sempre que a rotação do MCI se afastar do valor regulado. Podem ser instalados na haste de aceleração da bomba injetora ou em seu interior, regulando diretamente o fluxo de combustível.

Refrigeradores: São ventiladores tipo soprante para o motor e aspirante para o gerador, onde o fluxo de ar necessário varia em função da potência do grupo gerador. Já o radiador de óleo tem a finalidade de transferir calor do óleo lubrificante para o meio refrigerante utilizado no motor.

Acoplamento elástico: É a ligação entre os eixos do gerador e do motor, capaz de absorver desalinhamentos radiais e axiais e as vibrações provenientes das variações de carga e desbalanceamento admitido das massas girantes.

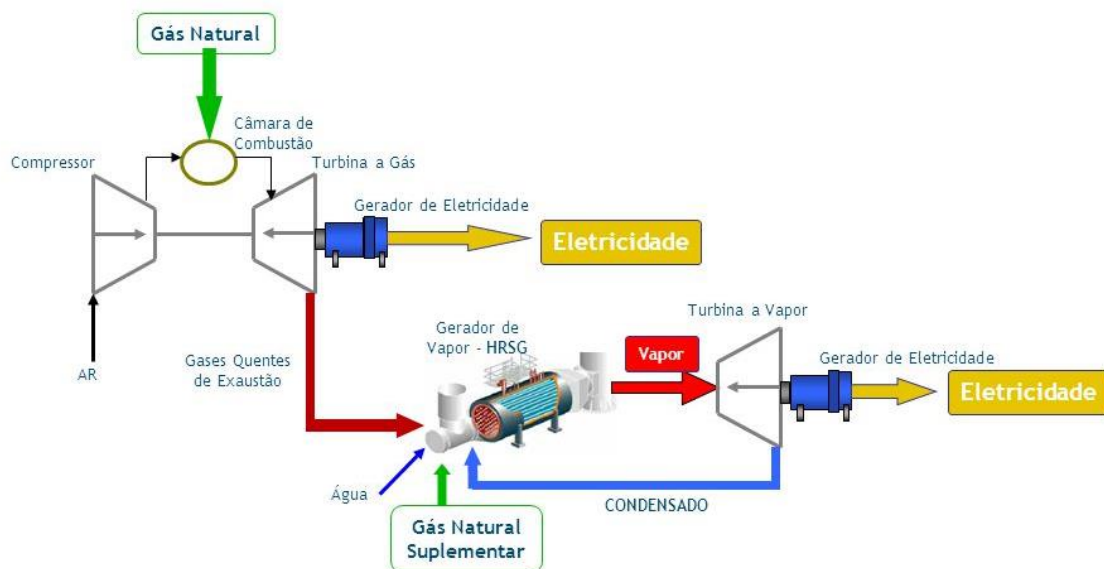
Sistemas de proteção:

- Pressostato e termostato de refrigeração;
- Sensores de nível de refrigerante, sobrevelocidade, ruptura de correias, frequência e tensão, nível de combustível, água no filtro e de bateria;
- Relê taquimétrico, para sobrerotações;
- Painel de instrumentos e Quadro de comando

Destacamos a seguir uma maquete de refrigeração para motores estacionários :

Figura 3 [39] – Sistema para motores estacionários à Gás.

Ciclo Combinado: Energia Elétrica



Fonte : Adaptado de: portal- energia.com

O dimensionamento do grupo gerador varia conforme:

- Tipo de carga necessária;
- Local de serviço;
- Características do local de instalação;
- Regime de operação;
- Tempo que consumidores podem ficar desligados;
- Riscos de interrupção.

O peso da base de sustentação do grupo gerador, deve ser igual ao peso do grupo gerador.

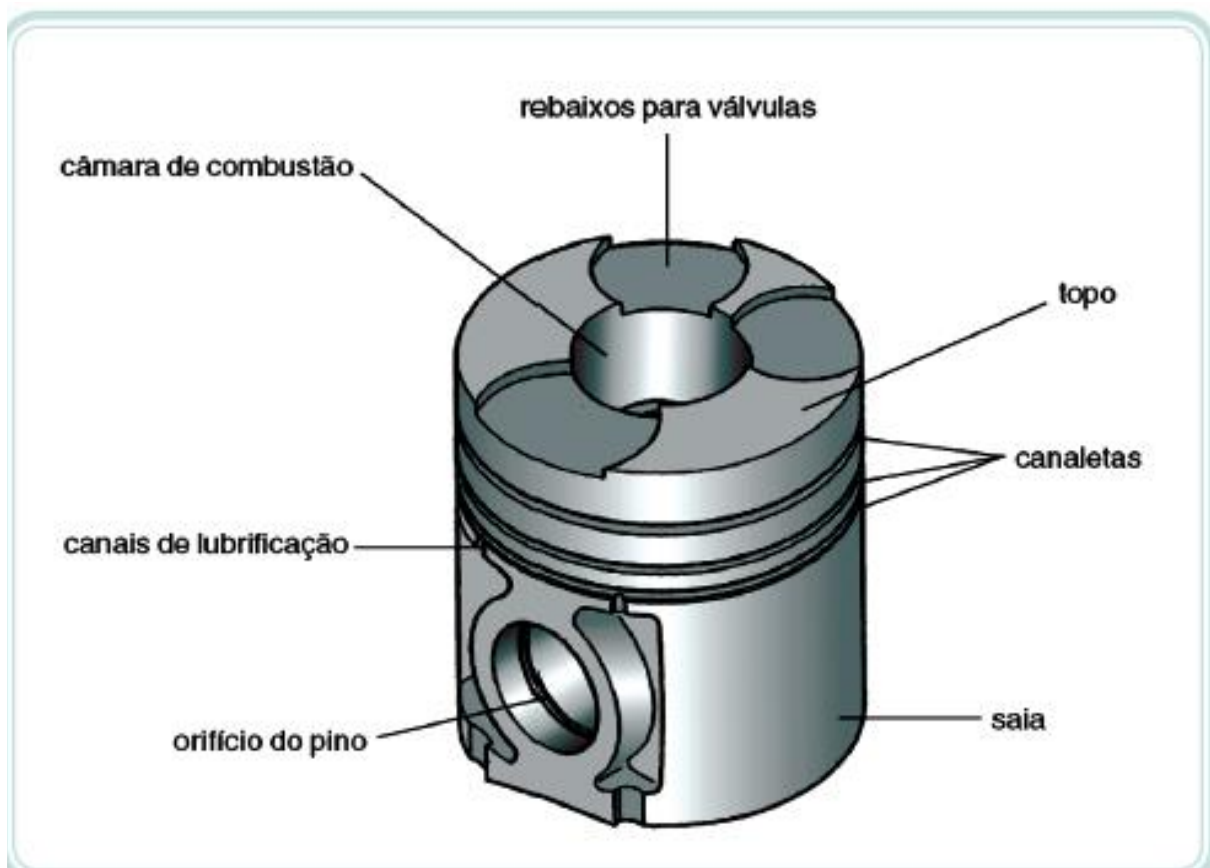
São utilizados amortecedores de borracha ou de molas para absorver as vibrações de funcionamento.

As potências efetivas contínuas limitadas e não limitadas dos grupos geradores são consideradas potências úteis se todos os dispositivos auxiliares necessários à operação do motor estiverem sendo acionados pelo próprio motor. A ajustagem dessa potência do motor, não permite uma sobrecarga elétrica[36].

2.1.3 Êmbolos para motores

Dentro do ramo automobilístico são comumente chamados de pistões; sua principal função é a de transmitir a força normal aplicada contra as paredes do cilindro, gerada pela pressão dos gases da combustão interna às bielas tratando-se de um prolongamento destas dentro do cilindro, e das bielas à árvore de manivelas transformando a energia térmica em trabalho; o êmbolo constitui uma parede móvel dentro da câmara de combustão do motor, vedando-a em conjunto com os anéis, aplicados longitudinalmente na sua lateral e absorvem o calor para transferência subsequente ao sistema de arrefecimento [1], conforme destacado na figura a seguir:

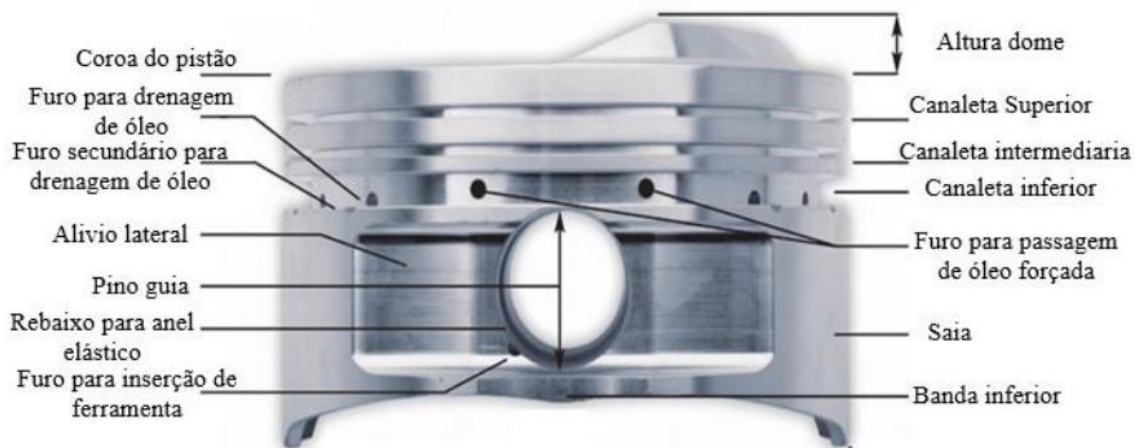
Figura 4 [4] – Denominação das partes constituintes de um êmbolo.



Fonte : MWM International, 2009.

Os êmbolos possuem um anel autotérmico engastado internamente com a finalidade de controlar sua dilatação térmica; seu formato ovalizado é para que sob condições normais de temperatura e carga de trabalho, mantenham o contato/ folga com o cilindro, variando seu raio ao longo do eixo, em forma de barril, conforme destacado na figura a seguir:

Figura 5[4] – Nomenclatura do pistão (êmbolo).



Fonte: MAHLE

A temperatura na câmara de combustão do motor pode chegar a mais de 2.000 °C, chegando nas cabeças dos êmbolos entre 460° a 420°C e em suas saias por volta de 200°C, a serem transmitidas aos anéis e cilindros para o sistema de arrefecimento.

Atualmente são utilizadas ligas de Alumínio na confecção de êmbolos para o Ciclo Otto e Ferro-fundido para êmbolos de Ciclo Diesel; para aumentar suas resistências ao desgaste e dilatação alguns modelos sofrem banhos de ligas hipereutéticas com maiores teores de Silício, proporcionando uma dureza superior à do Aço temperado. [2]

Destacamos abaixo a tabela de evolução dos êmbolos ao longo do tempo quanto a sua resistência e cargas solicitadas:

Tabela 2 - [2] – Evolução dos pistões.

QUADRO COMPARATIVO – EVOLUÇÃO DOS PISTÕES

	Motor Benz (1886) ø 90 mm (4 tempos)	Motor Ciclo Otto Atual ø 85 mm	Evolução
Material do pistão	ferro fundido	liga de alumínio	—
Peso do pistão, sem acessórios	2.200 g	320 g	85,5% ↓
Máxima rotação do motor	300 rpm	6.000 rpm	1.900% ↑
Peso do motor/potência	58 kg/cv	1,44 kg/cv	97,5% ↓
Relação de compressão	3,5 : 1	8,5 : 1	143% ↑
Potência de cada pistão	1,7 cv	20,5 cv	1.100% ↑
Peso do pistão/potência do cilindro	1.294 g/cv	15,6 g/cv	98,8% ↓
Folga na saia do pistão	0,2 mm	0,02 mm	90% ↓

	Motor Benz (1886) ø 90 mm (4 tempos)	Motor Ciclo Diesel Atual	Evolução
Material do pistão	ferro fundido	liga de alumínio	—
Peso do pistão, sem acessórios	2.200 g	1.040 g	52,8% ↓
Máxima rotação do motor	300 rpm	2.890 rpm	863% ↑
Peso do motor/potência	58 kg/cv	3,0 kg/cv	94,8% ↓
Relação de compressão	3,5 : 1	17,25 : 1	393% ↑
Potência de cada pistão	1,7 cv	30 cv	1.664% ↑
Peso do pistão/potência do cilindro	1.294 g/cv	34,7 g/cv	97,4% ↓
Folga na saia do pistão	0,2 mm	0,11 mm	45% ↓

Fonte : MAHLE

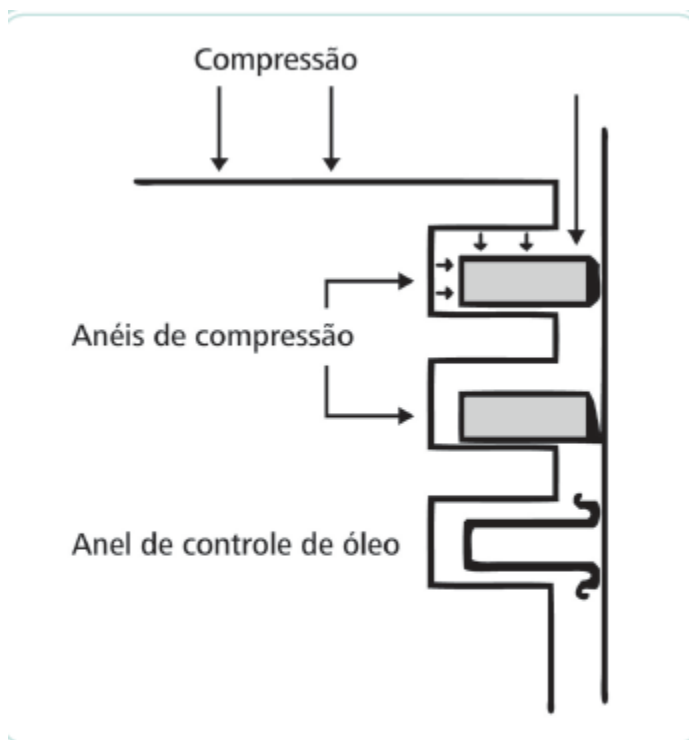
2.1.4 Anéis de segmento para êmbolos

Constituem o elemento de vedação entre a câmara de combustão do motor e a árvore de manivelas, visando transmitir o calor absorvido pela cabeça do êmbolo para as paredes do cilindro e subsequente para o sistema de arrefecimento do motor e também impedindo que os gases da combustão passem para o cárter do motor, evitando assim uma perda de rendimento.

Controlam também a lubrificação dos cilindros impedindo que o óleo lubrificante passe em excesso para a câmara de combustão e seja queimado, e ao mesmo tempo deixar que uma fina película de óleo permaneça sobre a parede do cilindro a fim de evitar o atrito seco entre anéis e cilindro.

Um conjunto de três anéis são instalados em torno dos êmbolos quando no ciclo Otto, onde os dois superiores asseguram a vedação dos gases, chamados de anéis de compressão, e o terceiro anel assegura a lubrificação correta dos êmbolos e cilindros, chamado de anel de controle de óleo, conforme destacado na figura a seguir: [1] [5]

Figura 6 [4] – Posicionamento dos anéis de segmento.



Fonte : Mercedes-Benz do Brasil, 2006.

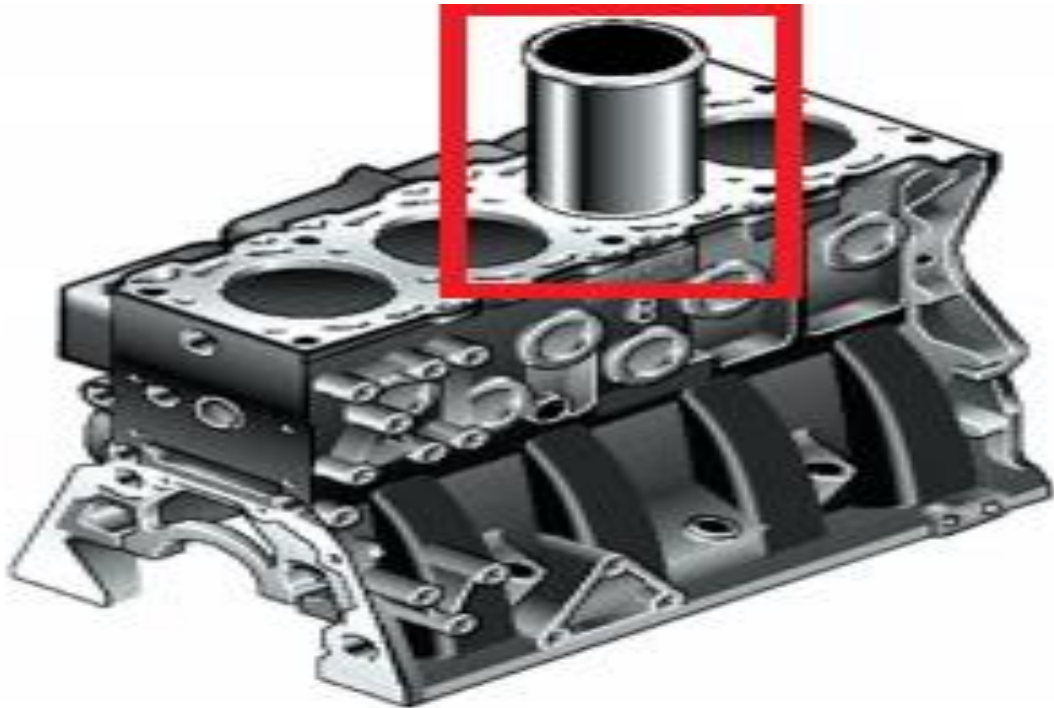
2.1.5 Cilindros

Trata-se de um elemento estático que compõe a estrutura do bloco do motor de combustão interna, proporcionando ao conjunto um sistema fechado para os gases em expansão e a condição necessária ao processo de transformação de energia, bem como a troca térmica do calor gerado na combustão através da água ou ar que circulam ao seu redor.

Os cilindros removíveis são produzidos através dos processos de fundição estática ou centrifugação. Suas paredes internas são brunidas a fim de removerem riscos horizontais deixados pela usinagem, com ângulos de brunimento entre 30° a 60° e rugosidade controlada, para assim auxiliar na rotação dos anéis e reter óleo lubrificante em toda a superfície interna do cilindro.[2]

Destacamos na figura a seguir cilindros removíveis incorporados ao bloco do motor:

Figura 7[6] – Cilindros removíveis.



Tipos de cilindros:

Cilindros úmidos, referem-se aos cilindros substituíveis onde sua parede externa tem contato com o líquido do sistema de arrefecimento do motor. Brunidas de fábrica, sua montagem é realizada sem nenhum ponto de interferência e sua vedação externa é realizada por anéis o'ring, posicionados na parte inferior e superior do cilindro em canaletas próprias, ficando apoiado no bloco somente por sua parte superior, o que pode gerar dificuldade de estanqueidade.

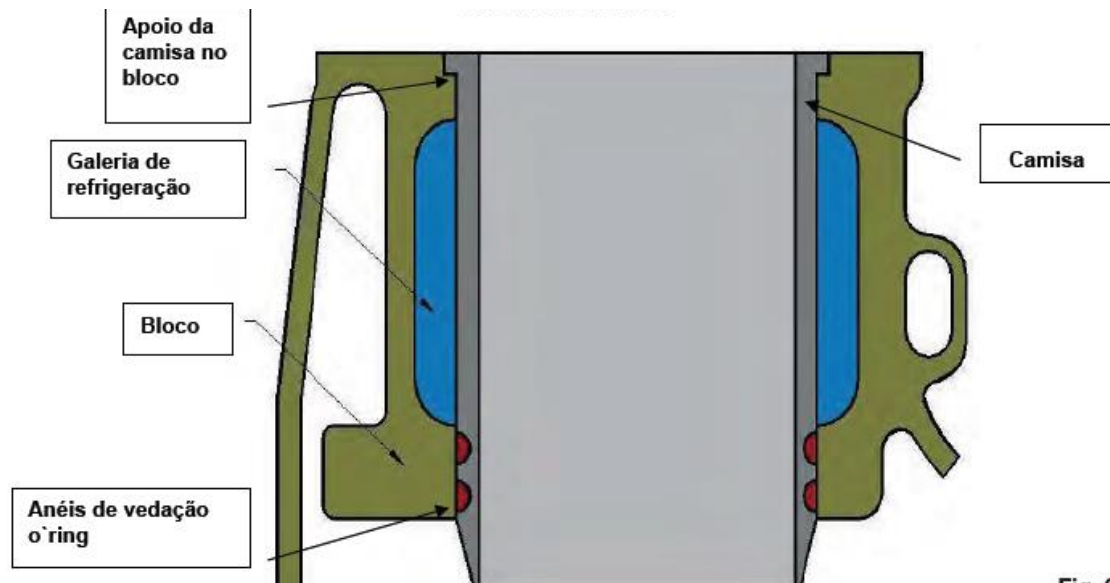
Utilizadas em motores de potência mais elevada, podem ser substituídas com a medida original e têm um menor custo de manutenção, podendo-se ainda ter diferentes cilindradas num mesmo bloco de motor.[8]

Cilindros secos substituíveis, onde sua parede externa não tem contato direto com a água do sistema de arrefecimento apesar de serem partes integradas ao bloco de motor. Para sua instalação é necessário que exista interferência entre o alojamento no bloco e a superfície externa do cilindro através da usinagem de sobremedida, onde sua região de assentamento (colarinho) absorve toda a carga de prensagem, podendo gerar trincas internas e descida para a parte inferior do bloco, chocando-se com elementos girantes do motor (degola de camisa). São brunidas posteriormente a instalação e não é necessária a utilização de anel o'ring para sua vedação.[9]

Cilindros aletados são os que contém aletas em sua parede externa, utilizados em motores refrigerados a ar. Para sua montagem é necessário que sua parte inferior se apoie no bloco e sua parte superior no cabeçote do motor, onde sua vedação se faz por esses apoios, sendo montadas sem interferência ou utilização de anéis de vedação.[2]

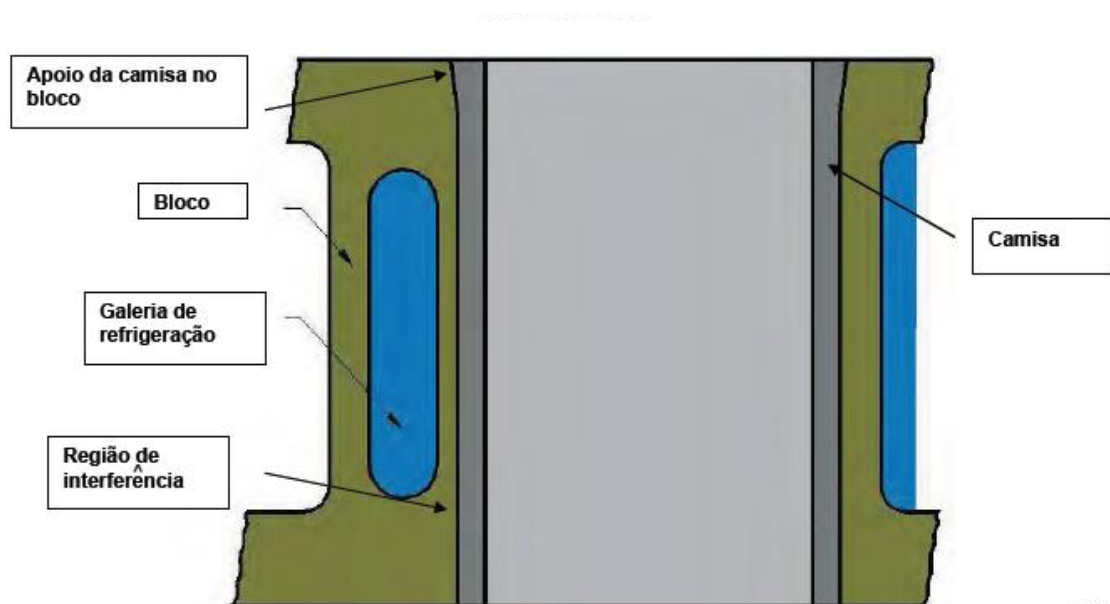
Destacamos a seguir os modelos de cilindros removíveis na figura 8:

Figura 8[2] – Tipos de Cilindros removíveis.



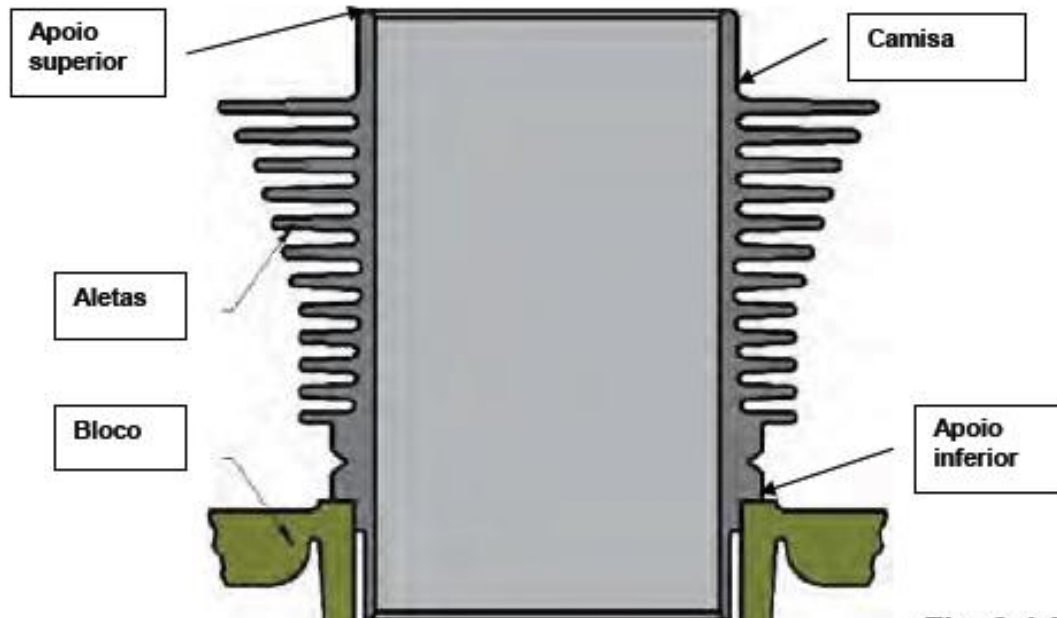
Cilindro removível úmido : Observa-se o contato direto do cilindro com as galerias de refrigeração do bloco do motor.

Fonte : MAHLE



Cilindro removível seco : Observa-se uma parede de distanciamento entre cilindro e galerias de refrigeração do bloco.

Fonte: MAHLE



Cilindro removível aletado : Específicos para motores refrigerados a ar, com aletas para refrigeração.

Fonte : MAHLE

Revestimento cerâmico

Atualmente em motores de alto giro de funcionamento, basicamente motocicletas, os cilindros são revestidos internamente por uma fina camada de material cerâmico, composto por partículas de Níquel e Fósforo, aumentando sua dureza e diminuindo o atrito com os anéis [6], onde destacamos seu modelo de projeto na figura a seguir :

Figura 9 [7] – Revestimento em cilindros.



Fonte : dicas engenharia.blogspot.

O uso de materiais cerâmicos em cilindros proporcionam dilatações menores com relação as ligas metálicas e ao ferro fundido mantendo uma folga entre êmbolo e cilindro mais ajustada, além de uma excelente dissipação de calor; melhor vazão de fluxos de lubrificantes; melhor vedação dos gases com menor turbulência; redução de depósitos de carvão da combustão e melhor proteção a ferrugem [6].

Compósitos Metal – Cerâmicos (MMC- Metal-Matrix Composites) são banhos de material cerâmico em cilindros, anéis de segmento e êmbolos, através de uma fina cobertura de 7 micro-milímetros, mas as dificuldades em sua produção advém da formação de carbeto metálicos durante a formação do compósito e a de se dar forma cerâmica (cristalina) a suas moléculas em baixas temperaturas, a fim de não danificar o metal base [10]. Destacamos a seguir a tabela do Estado da Técnica para revestimentos em cilindros:

Tabela 3 [11]- Características e Propriedades Mecânicas de Cilindros Revestidos.

Norma ABNT – NBR 16080 de: 05/2013.

	Ferro fundido		Alumínio	
	Grafita lamelar	Grafita esferoidal	Hipo-eutético	Hiper-eutético
Denominação	GJL-250	GJV-400	AlSi9Cu3	AlSi17Cu4Mg
Norma	EN 1561	VDG-W50	EN 1706	-
Carbono C [%]	3,0-3,5	3,4-3,9	-	-
Silício Si [%]	1,8-2,7	1,9-2,35	8,0-11,0	16,0-18,0
Cobre Cu [%]	< 0,8	0,7-1,0	2,0-3,5	4,0-5,0
Magnésio Mg [%]	-	-	0,05-0,55	0,5-0,6
Cromo Cr [%]	0,15-0,45	-	0,15	-
Manganês Mn [%]	0,3-1,0	0,25-0,6	0,1-0,5	0,15-0,2
Tensão última [N/mm ²]	250-350	400-475	240-310	280-370
Dureza Brinell [N/mm ²]	195-235	180-240	80-120	140-160
Revestimento da superfície de correr	nenhum		galvanização, plasma	nenhum
Revestimento do pistão	fosfatização		galvanização	

Fonte: CEFET – RJ.

Destacamos a seguir a evolução das cargas exigidas em motores ciclo Diesel, justificando a necessidade de avanço tecnológico para os cilindros, conforme tabelas a seguir:

Tabelas 4 [14] – Evolução de motores Diesel.

Ano	Motor	Potência (HP)	RPM	Torque (Nm)	RPM	Cilindrada (dm ³ /l)	Potência Específica (HP)	Torque Específico (Nm)
1958	DS10	165	2200	618	1200	10,26	16	60
1963	D11 R01	195	2200	746	1200	11	17	67
1963	DS11 R03	225	2200	883	1400	11	20	80
1965	DS11 R01	255	2200	971	1400	11	23	88
1972	D11 R01	202	2200	775	1200	11	18	70
1972	DS11 R01	275	2200	1060	1500	11	25	96
1976	DS11 L05	296	2200	1090	1400	11	26	99
1977	DS11 L03	203	2200	760	1200	11,02	18	68
1978	DS11 L03	296	2200	1090	1400	11	26	99
1981	DS11 15	305	2000	1235	1300	11,02	27	112
1983	DSC11 01	333	2000	1395	1300	11,02	30	126

Fonte: Scania/2014

Comparativo para demonstração do downsizing_2 – Brasil - 2014

Ano	Motor	Potência (HP)	Torque (Nm)	Nº de Cilindros	Cilindrada (dm ³ /l)	Potência Específica (HP)	Torque Específico (Nm)
1975	DS14 LB05	350	1245	8	14,20	24	87
2013	DC09 112	360	1700	5	9,30	39	183

Fonte: Scania.

Comparativo para demonstração do downsizing_1 – Brasil - 2014

Ano	Motor	Potência (HP)	Torque (Nm)	Nº de Cilindros	Cilindrada (dm ³ /l)	Potência Específica (HP)	Torque Específico (Nm)
1958	D10 R01	165	618	6	10,26	16	60
2011	ISF - Cummins	160	600	4	3,80	42	158

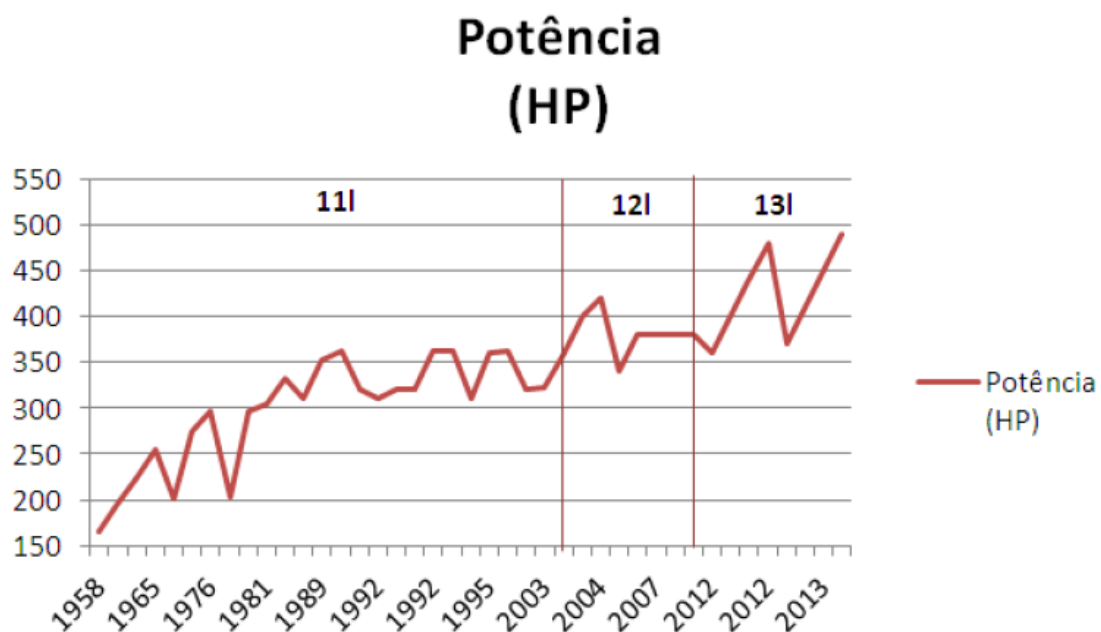
Fonte: Cummins.

Comparativo para demonstração do downsizing_3 – Brasil - 2014

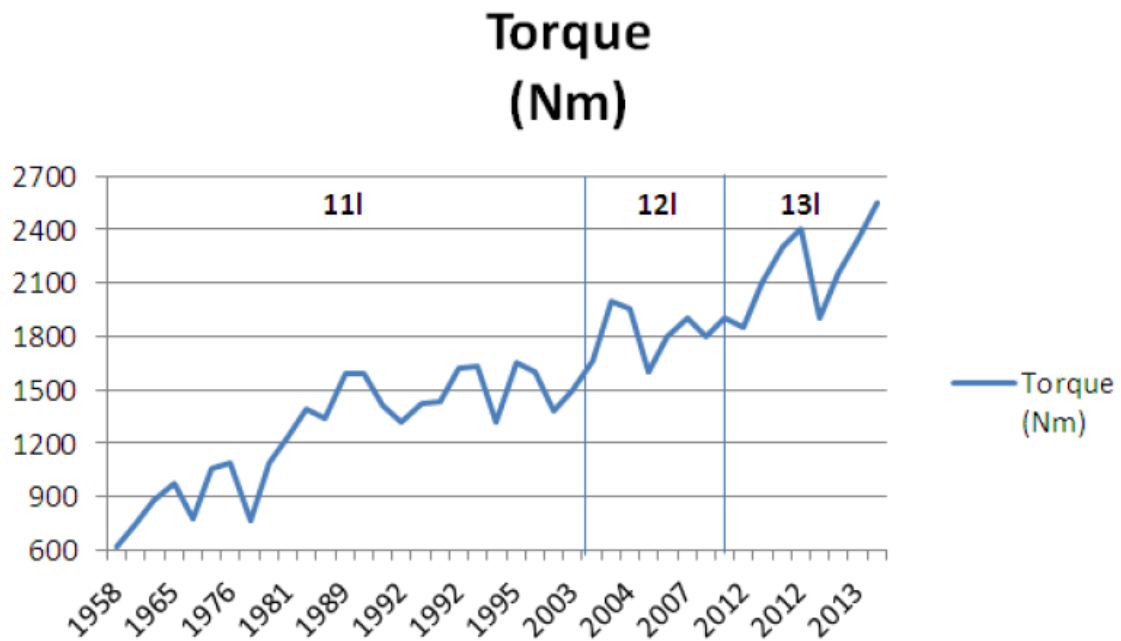
Ano	Motor	Potência (HP)	Torque (Nm)	Nº de Cilindros	Cilindrada (dm ³ /l)	Potência Específica (HP)	Torque Específico (Nm)
1975	DS14 LB05	350	1245	8	14,20	24	87
2013	ISL - Cummins	420	1850	6	8,90	47	208

Fonte: Duarte, Vinicius G. – Projeto de graduação (2014) [14]

Gráfico 1[14] – Evolução de torque X potência em motores Diesel.



Fonte: : Duarte, Vinicius G. – Projeto de graduação (2014) [14]



Fonte: : Duarte, Vinicius G. – Projeto de graduação (2014) [14]

Conforme destacado nos gráficos acima, as quedas de potência e torque em determinados anos referem-se aos ajustes de validação dos motores por emissões, reduzindo sua potência e torque conforme normas de emissões internacionais periódicas.

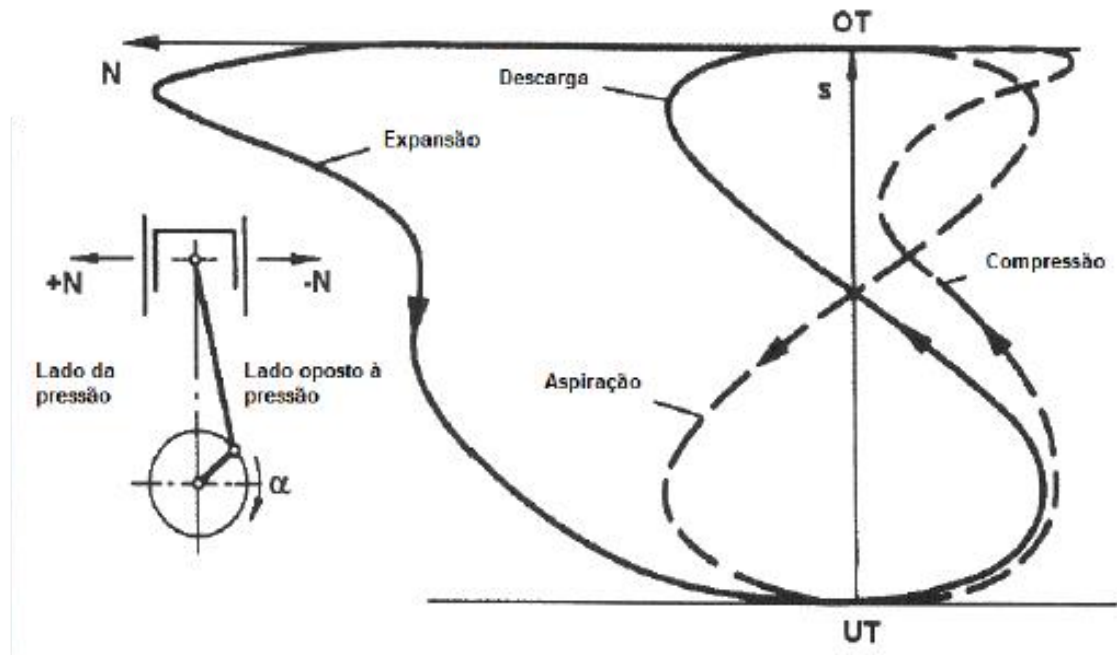
2.1.6 Manutenção de Cilindros

Cilindros exibem desgastes por carregamentos mecânicos e térmicos. Desgastes mecânicos geram aumento do seu diâmetro interno, onde o limite de uso é de no máximo 3% do diâmetro original, e ovalização e conicidade pelo movimento enviesado dos êmbolos em seu interior, sendo o maior desgaste em seu Ponto Máximo Superior (PMS), devido a lubrificação menos eficiente somada a uma maior temperatura e pressão de trabalho.

O desgaste térmico advém do depósito de carvão da combustão em suas paredes internas, gerando superaquecimento localizado, tendendo a deformar o cilindro com o espelhamento de sua face interna [11].

Destacamos a seguir os modos de falhas nos cilindros :

Figura 10[11] – Forças atuantes nos cilindros.



Fonte: CEFET – RJ.

Figura 11[11] – Gerando as seguintes deformações em cilindros.



Fonte: CEFET – RJ.

Figura 12[11] – D FEMEA para cilindros.

FU	FUNÇÃO	FA	FALHA	MO	MODO	EFEITO	C
2	Circulação Circular a água pelo motor	1	Água não circula na parte interna ao bloco do motor	1	Camisa suja	Aquecimento do motor	II
				2	Camisa furada	Aquecimento do motor	II
				3	Camisa entupida	Aquecimento do motor	II

FU	FUNÇÃO	FA	FALHA	MO	MODO	EFEITO	C
1	Combustão Explodir a mistura ar- combustível	1	Falta compressão no cilindro	1	Cilindros Desgastados	Motor com baixa compressão	III
				2	Cilindro sem vedação	Motor com baixa compressão	III
				3	Assento das válvulas desgastados	Torque deficiente e emissão de gases no ambiente e motor	III
				4	Cilindro Carbonizado	Torque deficiente e ruído externo	III
				5	Cilindro Ovalado	Torque deficiente, fumaça no escape e consumo de óleo	II
				6	Cilindro Cônico	Torque deficiente, fumaça no escape e consumo de óleo	II

Fonte: CEFET – RJ.

Não se deve confundir o fenômeno químico da corrosão com os fenômenos físicos da cavitação e abrasão.

Corrosão química: Resultado do ataque do oxigênio presente na água ao ferro, dando origem ao óxido de ferro (ferrugem).

Corrosão eletrolítica: Resulta da composição química do metal em contato com pequenas correntes elétricas que surgem quando dois metais diferentes, como o ferro e o cobre, entram em contato com a água. Esta corrente elétrica ataca as paredes externas do cilindro.

Formação de escamas : Se formam pela presença de minerais contidos no líquido de arrefecimento do motor, que vão se depositando sobre as paredes externas do cilindro criando pontos quentes causadores de escoriações.

O desgaste dos cilindros geram maior consumo de lubrificante e combustível, maior ruído de trabalho, depósito de carvão nas velas de ignição e queda da potência do motor[28]

Em motores do ciclo Diesel, devido a sua maior taxa de compressão (16:1 em média), utilizam-se materiais mais duros para um menor desgaste dos cilindros, com sua troca ou retífica após 300.000 km rodados em média.[12]

Em cilindros úmidos, largamente utilizados em motores ciclo Diesel devido ao seu menor custo de manutenção, podem ocorrer danos por cavitação.

Cavitação (do latim ‘Cavitar’ x ‘Escavar’), trata-se da formação de espaços ociosos dentro de líquidos que fluem com força cinética e se dissipam continuamente.

Devido as flutuações de pressão em MCI pela movimentação dos êmbolos, suas vibrações são transmitidas aos cilindros úmidos que também vibram, gerando um vácuo no líquido de arrefecimento e por consequente bolhas de vapor em seu interior. Quando tais bolhas de vapor implodem ao correr do líquido de arrefecimento jogam átomos da superfície externa do cilindro para fora, resultando em uma corrosão alveolar que pode perfurar a parede do cilindro e permitir que o líquido de arrefecimento entre na câmara de combustão, resfriando a câmara de combustão com consequente perda de potência do motor, até um calço hidráulico junto ao êmbolo e sua consequente quebra de biela de ligação com a árvore de manivelas.

Para evitar a cavitação em MCI, o líquido de arrefecimento deve ter em sua composição aditivos anti-congelantes suficientes e temperatura de trabalho do motor superior a 70°C, assim terá sua pressão do líquido de arrefecimento aumentada o que evita a cavitação por vaporização [13], conforme destacado na figura a seguir:

Figura 13 [13] – Exemplo de falha por cavitação em cilindro.



Fonte : MAHLE

2.1.7 Brunimento

É um processo de usinagem mecânico por abrasão que proporciona uma geometria precisa e acabamento superficial da peça após os processos de mandrilhamento; torneamento; fresamento ou retífica interna.

Teve sua origem por volta de 1500 dC, onde Leonardo da Vinci esboçou uma máquina de usinagem fina para peças em madeira.

Atualmente este tipo de usinagem se faz com uma ferramenta abrasiva versátil, formada por grãos combinados e sob contato constante entre a ferramenta e a peça, de forma a melhorar suas dimensões, formas e superfícies pré-usinadas, onde a superfície acabada é caracterizada pelo padrão de cruzamento dos sulcos, decorrente da escolha do tamanho do grão de desbaste e velocidade de trabalho.

Uma camada diamantada na ferramenta brunidora permite o trabalho com maior velocidade de corte e menor pressão de contato.

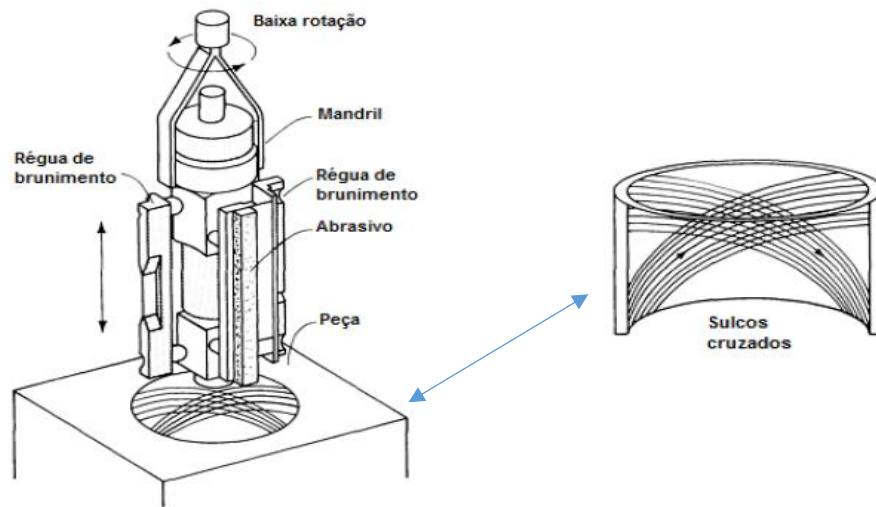
O ângulo de brunimento (cruzamento) é obtido conforme manipulação da rotação e do avanço do cabeçote brunidor, que quando em velocidades iguais formam ângulos de cruzamento de 90° e quanto maior a velocidade de rotação sobre o avanço do cabeçote brunidor, menor será o ângulo obtido.

A maioria dos materiais utilizados na engenharia podem ser brunidos.

O brunimento engloba uma máquina, um ferramental, uma ferramenta e um óleo, onde o maior custo do processo é a mão-de-obra. Realizado internamente em cilindros de motor, alojamento de êmbolos hidráulicos e canos de canhão, já o brunimento externo é aplicado na usinagem de eixos de árvores.[11] [22].

Destacamos uma máquina brunidora na figura a seguir:

Figura 14 [11] – Máquina brunidora.



Fonte : CEFET – RJ.

O processo de brunimento divide-se em Curso-longo e Curso-curto:

No Curso-longo o movimento de corte consiste na rotação e translação longos, sendo o processo mais comumente empregado.

Quando em Curso-curto, a peça é a que gira e o abrasivo é submetido a pequenas pressões de contato com cursos curtos [11], conforme destacado na tabela a seguir :

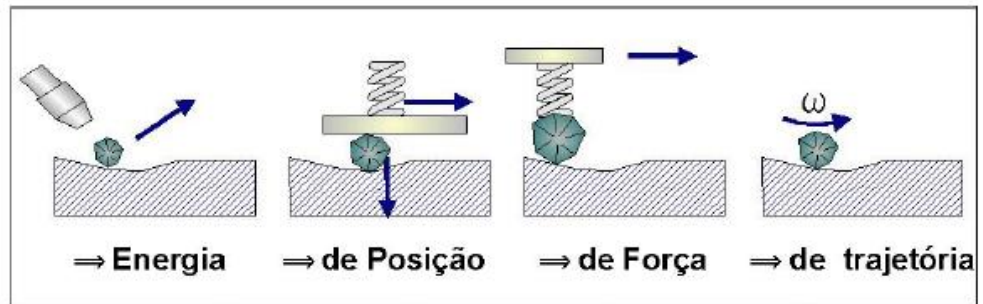
Tabela 5[11] – Diferenças entre tipos de brunimento.

Tipo de brunimento	Aplicações	Vantagens	Desvantagens
Brunimento de curso longo	Furos em bielas, camisas de cilindro, tambores de freios	Curto tempo de duração, alta taxa de remoção e possibilidade de correções de erros de forma e medida	Não é possível corrigir um erro de posição
Brunimento de curso curto	Eixos, guias e pinos para sistemas hidráulicos e pneumáticos	Tempos pequenos, centragem não necessária e possibilidade de automação	São necessários encostos laterais e defeitos dos cilindros de apoio podem ser transmitidos para a peça

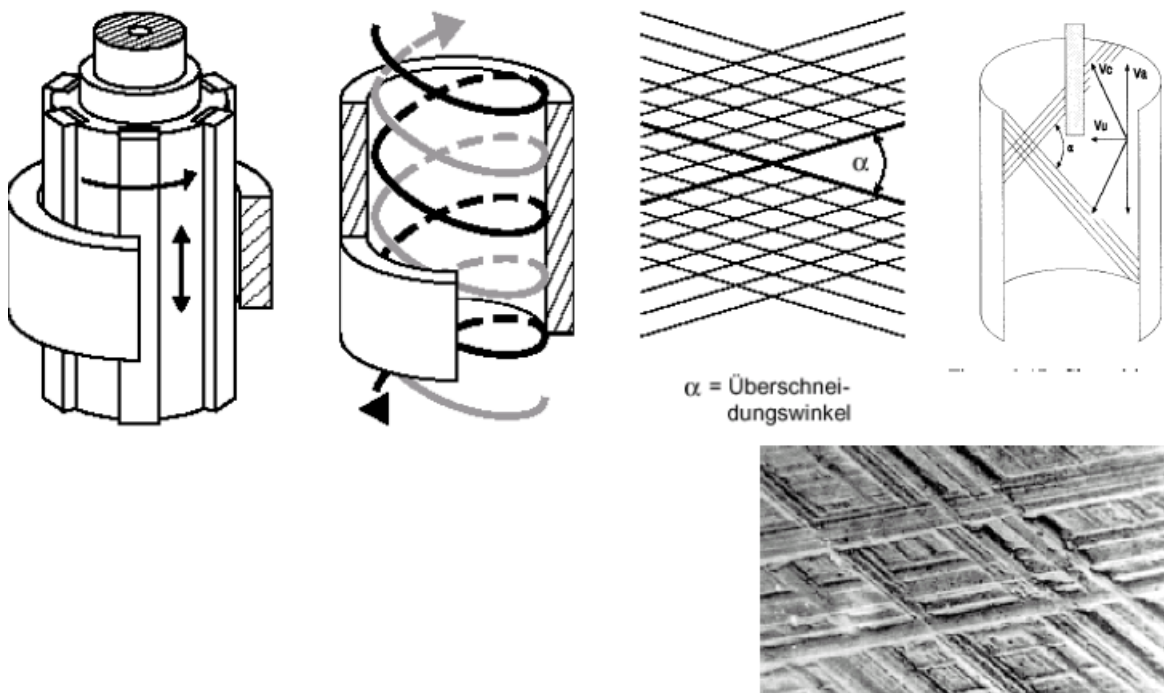
Fonte: CEFET – RJ.

Figura 15[43] – Processo de brunimento.

Princípios dos processos



Princípio cinemático do processo



Fonte: Usinagem GND.

A espessura equivalente de corte (h_{eq}), está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas: força de corte, rugosidade, vida da ferramenta. Um aumento do h_{eq} reflete no respectivo aumento das forças de corte e diminuição da vida do rebolo, deste modo utiliza-se rebolos com ligas que suportem elevadas rotações de trabalho a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir os esforços de corte.

O desempenho de um rebolo pode ser avaliado através da “Relação G”, que é definida como sendo a relação entre o volume de material removido (Z_w) e pelo volume de rebolo gasto (Z_s), conforme destacado abaixo:

Fórmula 1 [33] – Cálculo de desgaste.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{A \times V_w \times t}{\pi \times D_s \times \xi}$$

A = área de desgaste [mm²]

V_w = velocidade de corte [m/s]

t = tempo de retificação [s]

D_s = diâmetro do rebolo [mm]

ξ = desgaste radial do rebolo [mm]

O sistema de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), é onde o refrigerante é bombeado através de uma tubulação distinta da do ar-comprimido, somente no bocal este refrigerante é misturado ao fluxo de ar e direcionado a interface de contato peça-ferramenta. Permite assim um ajuste independente das vazões de ar e lubrificante, onde conta com o desempenho refrigerante e também do ar-comprimido, reduzindo o consumo de refrigerante. Utiliza-se o óleo de ester como lubrificante.

As vantagens do MQL são:

- Menor névoa e vapor na produção;
- Ajuste fácil da mistura;
- Redução de custo na limpeza da peça;
- Visualização do processo de retífica;
- Menos prejudicial ao meio-ambiente.

Os fatores que afetam a eficiência da aplicação do fluido de corte são:

- Tipo e velocidade do fluido;
- Posicionamento do bocal;
- Quebra da barreira de ar envolta do rebolo;
- Tamanhos dos grãos abrasivos.

A qualidade da peça e o custo estão intimamente relacionados com a forma de aplicação do fluido de corte na região de interface rebolo-peça.

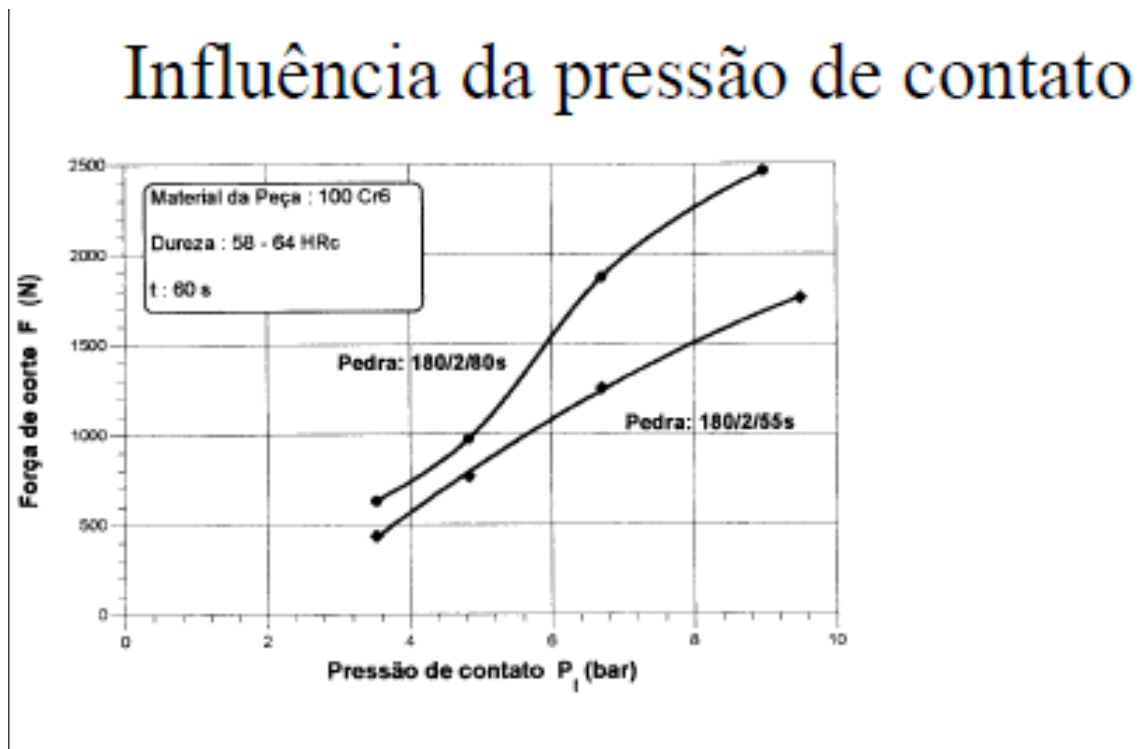
Com uma refrigeração otimizada, através de um bombeamento mais potente no processo MQL de retífica a dissipação térmica é maior e o ligante não perde sua resistência fazendo que o rebolo não se desgaste acentuadamente, o quê aumenta a sua relação G.

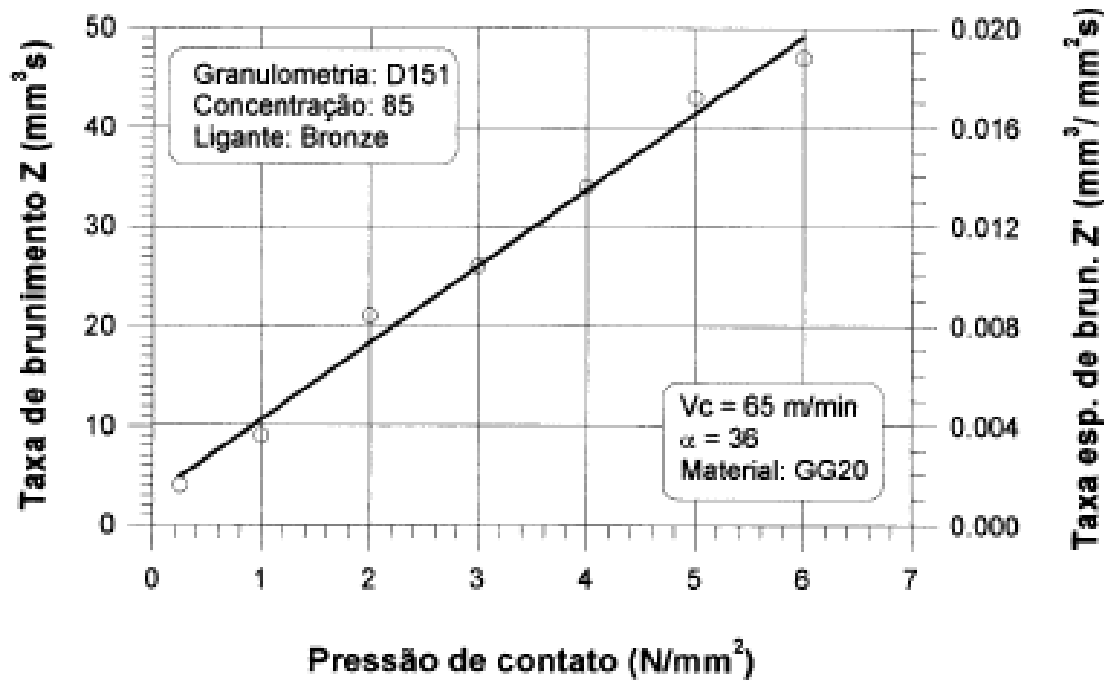
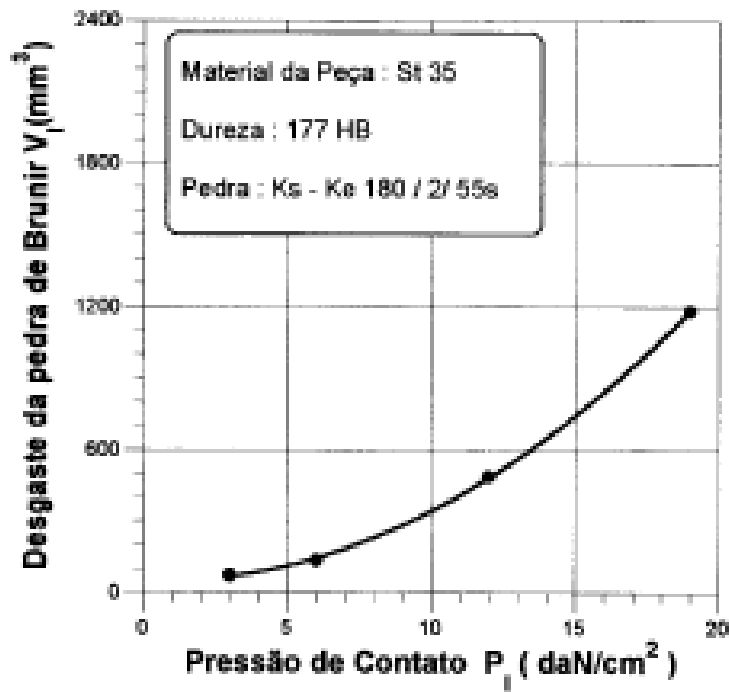
Quanto maior a espessura equivalente de corte maior o desgaste do rebolo, conseqüentemente menor será sua Relação G.

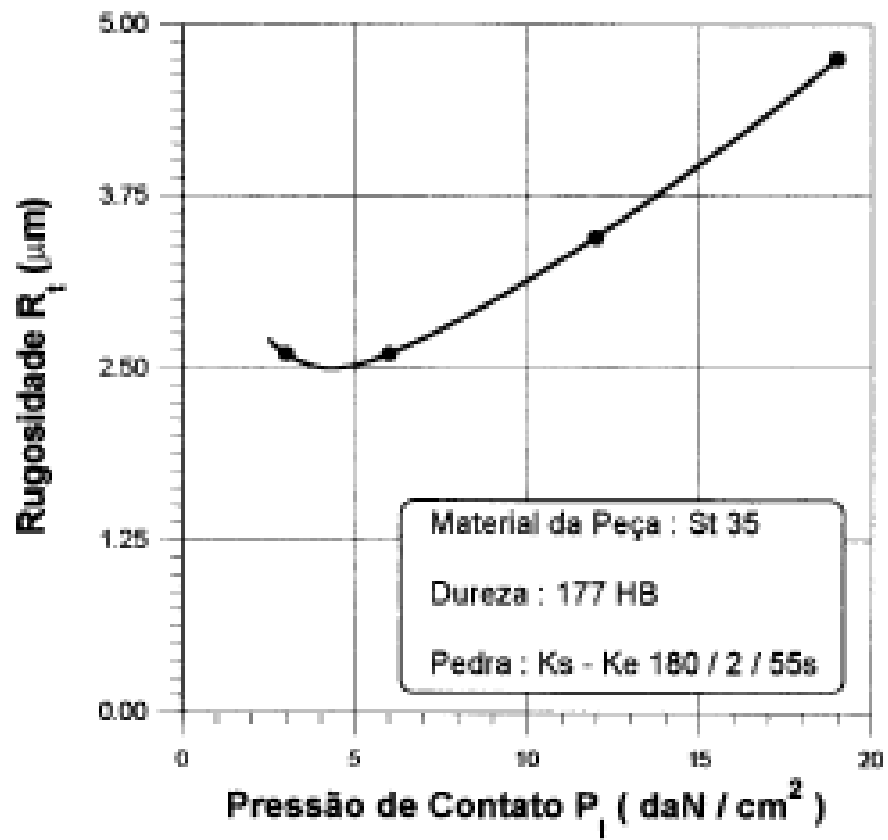
A refrigeração pela técnica MQL-Otimizada é a que garante melhores resultados em acabamento da peça e na economia da ferramenta de usinagem[33].

Destacamos a seguir os gráficos de efeitos de pressão de contato e tempo de brunimento abaixo:

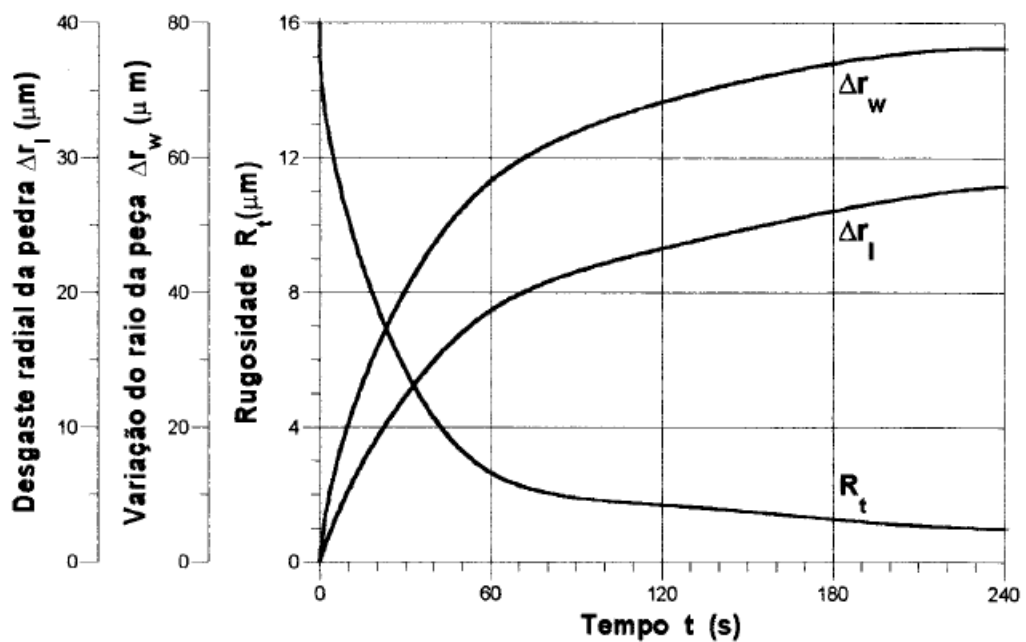
Gráficos 6 [22] – Pressão x Tempo de brunimento.







Influência do tempo de brunimento



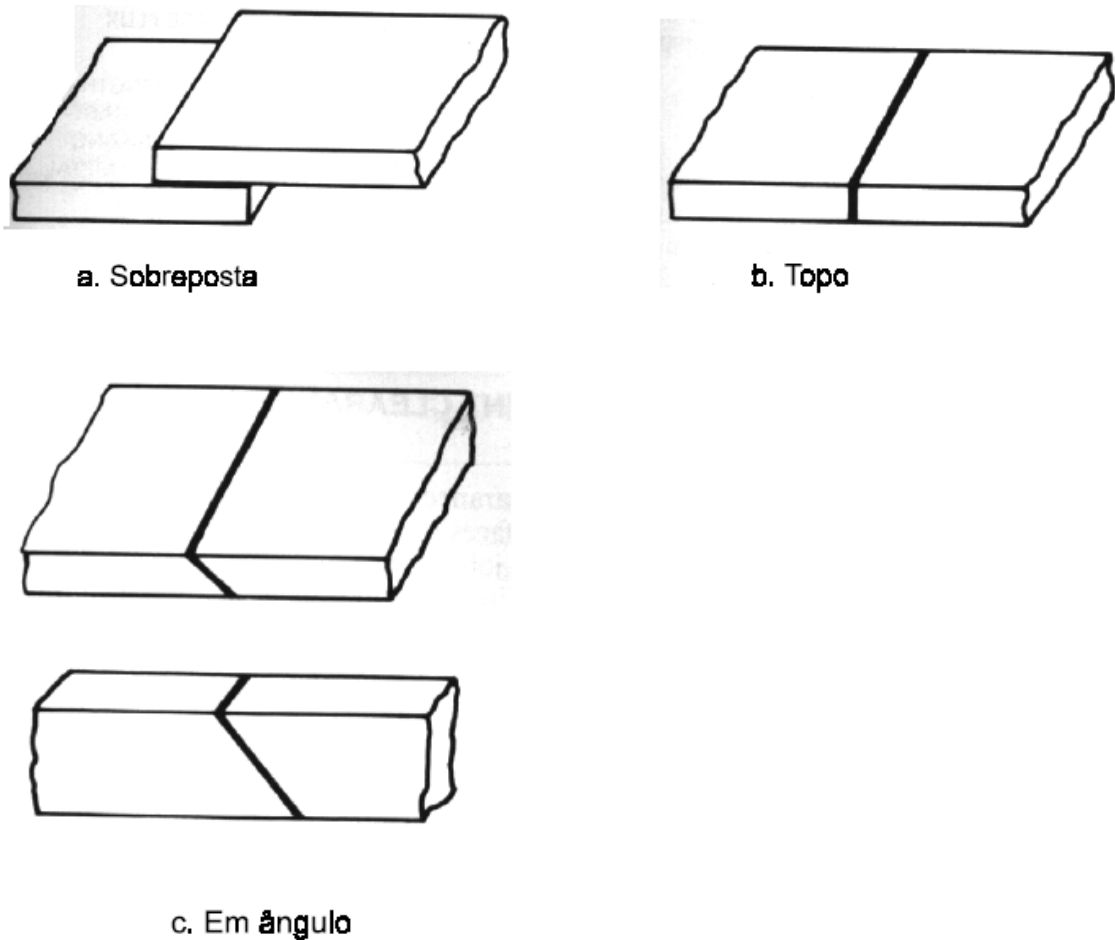
2.2 Processos de Produção

2.2.1 Processo de produção por Brasagem

Brasagem é a mais antiga forma de unir materiais da natureza. Ocorre através do enchimento de uma folga entre os materiais base por um metal de adição, por capilaridade, eliminando os espaços vazios entre as duas peças e solidificando em seguida. É desejável que ocorra pouca ou nenhuma interação entre o metal de adição e o material base para se evitar a erosão da base ou fragilidade da junta, por isso o metal de adição tem de estar a uma temperatura inferior a temperatura de fusão do material base (T_{Solidus}).[18]

Existem 3 tipos de juntas brasadas : sobreposta, de topo e em ângulo, conforme destacado na figura a seguir :

Figura 16 [18] – Tipos de juntas brasadas.



Uma boa junta brasada consiste de 4 aspectos:

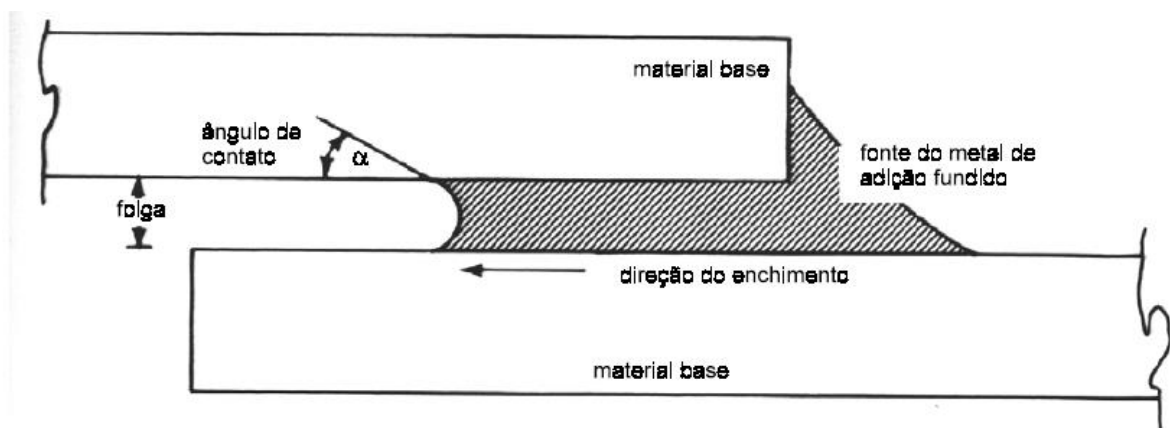
- Projeto da junta;
- Metal de adição;
- Uniformidade da distribuição do calor;
- Proteção com Fluxo ou Atmosfera.

O processo produtivo segue de :

- Limpeza da superfície dos materiais base com desengraxante;
- Eliminação de óxidos com agente fluxante para melhor molhabilidade, conforme materiais base utilizados;
- Soldagem por Oxicombustível, Arco de Plasma ou TIG (Tungsten Inert Gás);
- Retirar os resíduos do Fluxo após a brasagem a fim de se evitar a corrosão, com banhos de água quente.

A fluidez do material de adição é maior que a do fluxo, onde ele desloca o fluxo e o substitui na junta [19], conforme destacado na figura a seguir :

Figura 17 [18] – Representação esquemática da Brasagem.



Fonte: UFPR.

Suas aplicações são em :

- Reparos de trincas ou quebras;
- Em peças de pequena espessura;
- Em metais já tratados termicamente.

As vantagens de se utilizar a brasagem são :

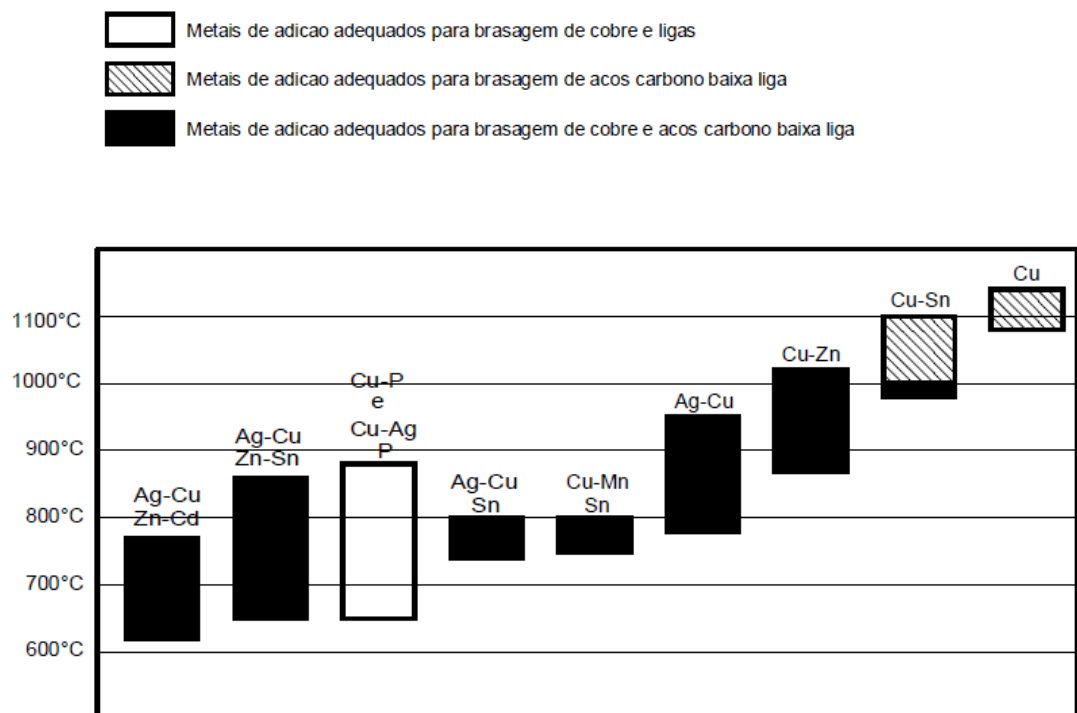
- Provocar menor empenamento da peça, por utilizar temperaturas mais baixas de fusão;
- Não alterar a microestrutura do material base, pois não ocorre a fundição;
- Ser mais rápida que a soldagem convencional;
- Utilizar equipamento simples.

Suas desvantagens estão em :

- Sua resistência ser limitada a resistência do material de adição;
- A ocorrência de corrosão galvânica na junta brasada.[21]

Existem famílias de metais de adição, conforme os materiais base aplicados, que diferem-se por suas temperaturas de fusão, conforme destacado na tabela a seguir :

Tabela 6 [18] -Temperaturas de Brasagem para as diferentes famílias de metais de adição.



Fonte: UFPR.

2.2.2 Brasagem Metal – Cerâmica

O componente cerâmico é utilizado apenas na região em que se necessita das propriedades da cerâmica, ficando o componente metálico responsável pela tenacidade e complexidade geométrica funcional. Comumente é utilizado em componentes de eletrônica de potência (diodos; transistores).

A soldagem direta de cerâmica é quase impossível, salvo exceções de Carbetto de Silício ou Nitreto de Silício, com feixe à laser.[20]

Suas técnicas de brasagem se dividem em:

Técnica da Metalização

Obtém-se uma camada metalizada sobre a Cerâmica-Alumina através do processo de:

- Aplicação de pastas – base de Molibidênio -Mo;
- Aplicação de placas de Níquel – Ni;
- Metal base é o Kovar (evita tensões no resfriamento);
- Metal de adição eutético é a liga Prata – Cobre (Ag-Cu);
- Sinterização sob atmosfera de Hidrogênio (H₂).

Técnica do Metal – Ativo

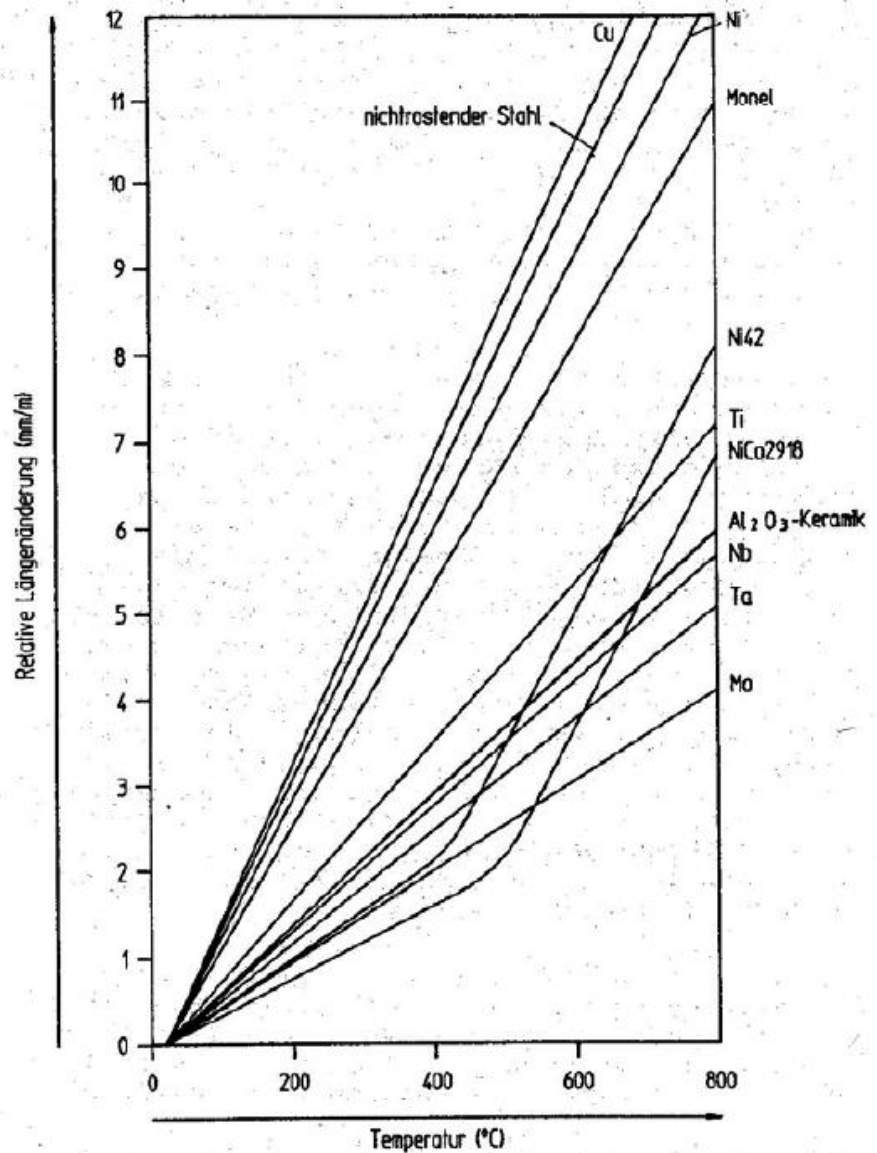
- Utiliza metal de adição contendo Tungstênio – Ti (mais caro que Ag-Cu).

Técnica da Metalização Mecânica

- Utiliza metal de adição comum.

No resfriamento, devido ao coeficiente de dilatação térmica, pode ocorrer a ruptura da cerâmica, por isso utiliza-se metais base com coeficiente próximo ao da cerâmica, como ligas de Fe-Ni-Co [18], conforme tabela a seguir :

Tabela 7 [18] – Curvas de Dilatação Térmica de diferentes materiais.



Relative Längeränderung – dilatação relativa (mm/m)

Nichtrostender Stahl – aço inoxidável

Fonte: UFPR.

3. METODOLOGIA

3.1 TRIBOLOGIA DO SISTEMA

O sistema tribológico do anel de êmbolo x cilindro é dos mais complexos, envolve superfícies não conformes e velocidades variáveis, atrito hidrodinâmico e misto, presença de partículas abrasivas, substâncias corrosivas resultantes da combustão, paradas e partidas do motor.

A geometria e a rugosidade das superfícies atritantes modificam-se com o desgaste e estas modificações por sua vez alteram a taxa e eventualmente os mecanismos de desgaste.

Os principais mecanismos de desgaste para este sistema são:[44]

- Por deslizamento;
- Por corrosão;
- Por cavitação;
- Por fadiga de contato;
- Por erosão.

A superfície do cilindro é uma superfície de múltiplos processos e é caracterizada por três etapas: furação do cilindro; brunimento da base (que origina os sulcos de armazenamento de óleo) e o brunimento de platô (reduzindo os picos de asperezas).

A durabilidade de um sistema mecânico depende fortemente da espessura mínima de filme de óleo lubrificante que separa as superfícies móveis. Pouco ou nenhum desgaste ocorre se a espessura do filme lubrificante é grande o bastante para separar completamente as duas superfícies em movimento.

A avaliação do brunimento de cilindro de MCI é descrita pela CNOMO (Comitê de Normalização dos Meios de Produção, 1988), descrevendo parâmetros para a aprovação do processo produtivo.

A avaliação de superfície pode ser baseada na norma ISO 4287, que apresenta a metodologia de análise conhecida como Taxa de Material Relativa (Rmv), que determina a taxa de material a partir de um nível de corte.[45]

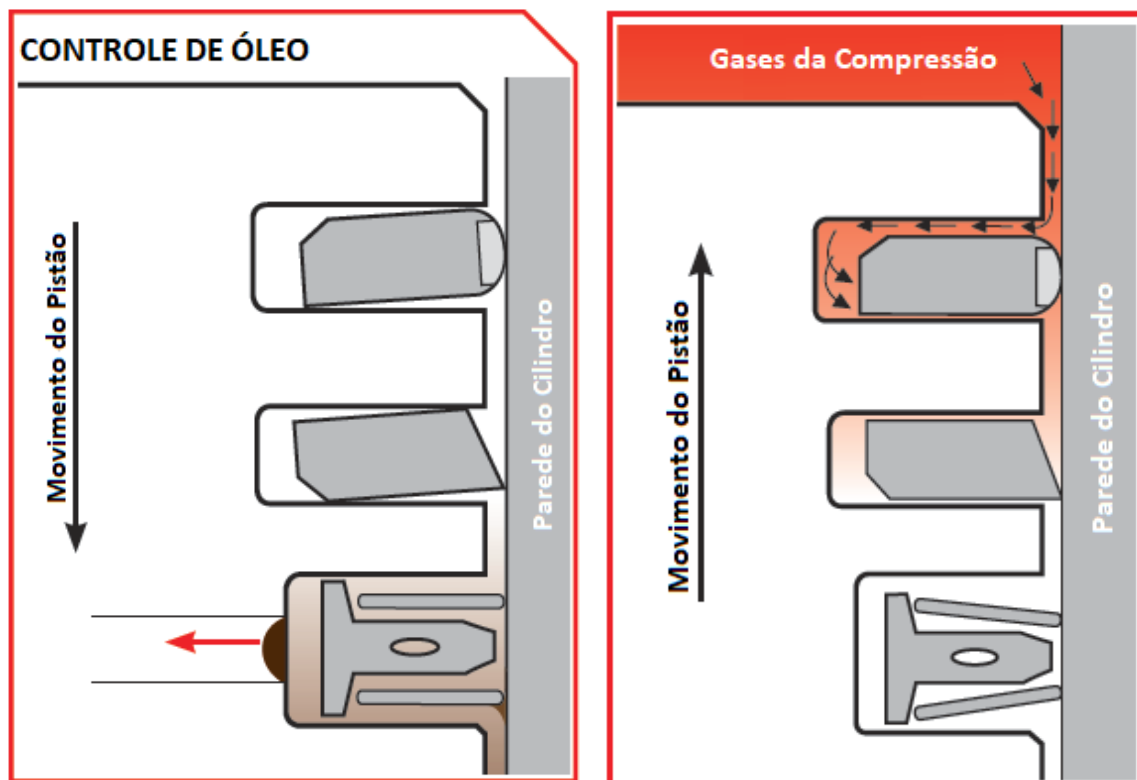
O ângulo que a face de contato do anel faz com a parede do cilindro é determinante para seu comportamento hidrodinâmico e tribológico.

Este ângulo é a soma de:

- Tilt(pist) – ângulo resultante do movimento do êmbolo em torno do seu pino;
- α' (can) – ângulo que o canaleta faz com o plano horizontal do êmbolo;
- α' (cil) – ângulo de deformação longitudinal do cilindro;
- α' (anel) – ângulo de torção do anel dentro do canaleta.

Destacamos abaixo o sistema tribológico entre anéis x cilindros:

Figura 18 [50] Tribologia anéis x cilindros.



Fonte: Adaptado de www.performancemotorsports.eu.

Atualmente o desgaste do cilindro é maior do que o do anel devido sua face de contato ser mais mole, mas por ter uma superfície de contato maior, a profundidade do desgaste é menor.

O cilindro apresenta ao longo de seu comprimento um típico perfil com deformações radiais de origem térmica, cujo o máximo ocorre um pouco abaixo do topo do cilindro.

As forças que surgem na face de contato do anel, são modeladas pelo modelo Greenwood-Willianson (uma determinada aspereza começará a se deformar plásticamente, quando a máxima tensão de cisalhamento atingir metade da tensão de escoamento unidimensional).

Se a espessura do filme lubrificante entre um determinado ponto da face de contato do anel e a parede do cilindro for menor que 3 (três) vezes a rugosidade local combinada anel / cilindro, começam a ocorrer interações entre as asperezas e surge naquele ponto uma pressão de contato.

As forças atuantes no sistema anel x cilindro são:[44]

- Dos gases de combustão sobre as laterais do anel;
- Do atrito axial na face de contato;
- Do atrito radial (hidrodinâmicas e de contato rugoso), determinado por:

Fórmula 2[44] – Cálculo de Forças hidrodinâmicas.

E – módulo de elasticidade combinada [Mpa]

$$M = \frac{E \times b^3 \times \ln(D_n/D_i)}{3 \times (D_n + D_i)} \times u \times \alpha'_{anel}$$

b – altura do anel [mm]

D_n - diâmetro nominal [mm]

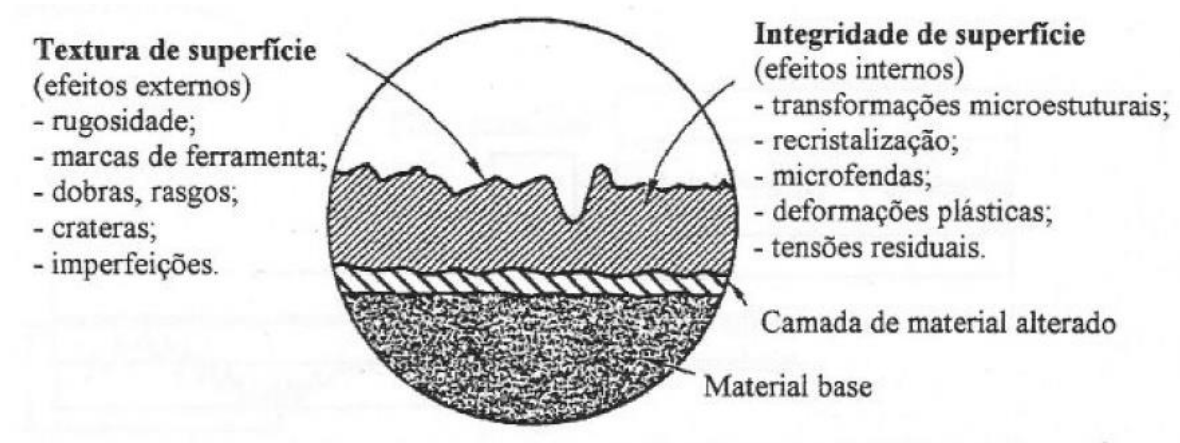
D_i – diâmetro interno [mm]

u – perímetro do anel [mm]

α'_{anel} – ângulo de torção do anel [rad]

Abaixo destacamos figura de microestrutura do sistema tribologico anel x cilindro:

Figura 19[45] – Texturas de superfícies de contato.



Fonte: Schimidt – 1999.

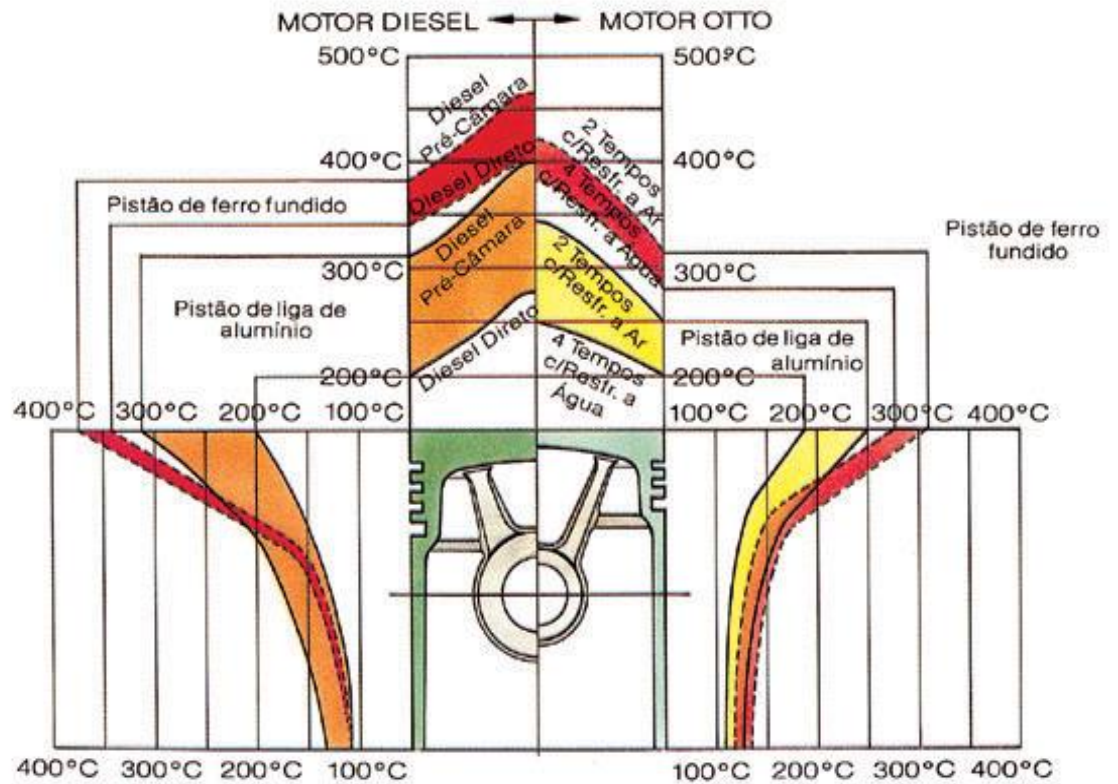
3.2 TERMODINÂMICA

A transferência de calor afeta o desempenho, a eficiência e as emissões dos MCIs através dos parâmetros de:[48]

- Temperatura e pressão dos gases de combustão (Potência-útil);
- Consumo específico de combustível;
- Detonação (troca de calor para os gases não queimados, que limita a taxa de compressão);
- Aquecimento da válvula de exaustão (eficiência volumétrica de admissão);
- Emissões de CO e HC;
- Temperatura dos gases de exaustão (turbocompressores recuperadores – EGT);
- Aquecimento do óleo (maior atrito);
- Expansão térmica dos componentes;
- Sobrecarga do sistema de arrefecimento.

Abaixo demonstramos os efeitos termodinâmicos nos MCIs.

Figura 20[2] – Efeitos termodinâmicos em MCIs.



Fonte: Adaptado de Manual MAHLE .

Efeitos das variáveis de operação de motores à combustão interna.

- O parâmetro de calor total (100%), é a energia do combustível (massa de combustível injetada X poder calorífico inferior);
- A perda de calor relativa a energia total, diminui com o aumento da velocidade de rotação;
- A perda de calor absoluta, aumenta com o aumento da velocidade de rotação;
- O fluxo de calor é máximo para $\lambda = 0,91$ (mistura rica), para a gasolina;
- A perda de calor relativa(28%) é maior para $\lambda = 1,0$ (mistura estequiométrica);
- O aumento da razão de compressão diminui a perda de calor relativa, mas aumenta o fluxo de calor total;
- Aumentando o ângulo de avanço em relação ao ponto máximo superior (PMS), reduz-se a perda de calor relativa;
- O “swirl” (rotação) e o “squish” (estrangulamento) aumentam a perda de calor relativa, devido ao aumento da velocidade do gás no interior do cilindro;
- O aumento da temperatura do fluido de resfriamento, aumenta diretamente a temperatura dos componentes internos do motor;
- O aumento da temperatura de admissão, aumenta a perda de calor relativa;
- A ocorrência de detonação provoca um aumento da perda de calor relativa, em função da temperatura e pressão de queima. O fluxo é aumentado em 3 a 4 vezes;
- Os materiais mais comuns da parede do cilindro são o ferro-fundido e o alumínio, que restringem as temperaturas a faixa de 200° a 400°C;
- O revestimento cerâmico permite aumentar a temperatura de trabalho dos gases, contudo um aumento da temperatura das paredes prejudica a admissão da mistura e facilita a detonação;
- A carga térmica nos componentes é cíclica e provoca variações de temperatura de aproximadamente 20K, por ciclo.

Fluídos envolvidos

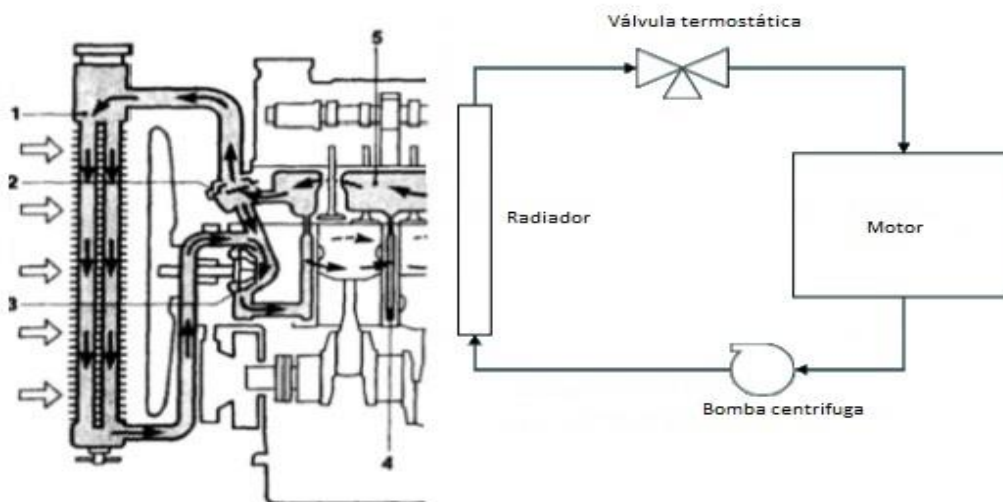
- Ar, deve ser tratado como uma mistura de N_2 , O_2 e Ar;
- Gases de combustão, devem ser tratados como uma mistura de gases de queima contendo no mínimo N_2 , O_2 , Ar, CO, CO_2 e H_2O , cuja composição foi calculada por um modelo de equilíbrio químico ou de cinética química;
- Água e aditivos (líquido), o aditivo a base de monoetilenoglicol (40 a 50% v/v), muda a temperatura de ebulição (+170°C) e solidificação (-35°C);
- Óleo lubrificante (líquido), usar valores de propriedades para uma composição base.[45]

A quantidade de calor que provém do processo de combustão e que não foi aproveitada para a geração de potência, é rejeitada em regime permanente para os gases de exaustão, para o sistema de arrefecimento e para o óleo lubrificante.

Embora seja desejável retirar a maior quantidade de calor residual das partes do motor com o propósito de melhorar sua eficiência volumétrica, um excesso de resfriamento pode provocar uma inconveniente mistura óleo e combustível não vaporizado. Portanto, somente em uma faixa apropriada de temperatura pode permitir resultados satisfatórios à operação do MCI.

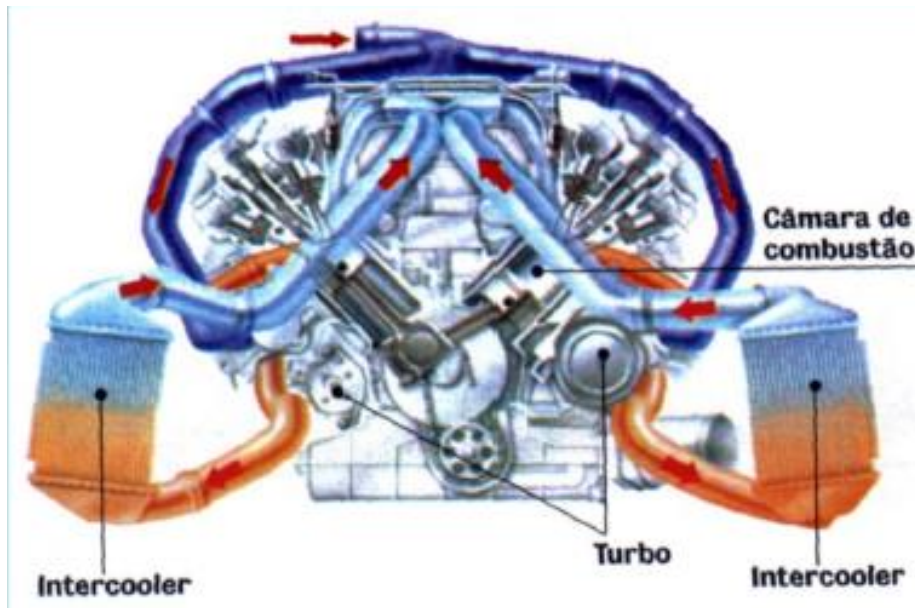
Abaixo representamos figura do sistema de resfriamento para MCIs:

Figura 21[45] – Circuitos de resfriamento para MCIs e Circuitos Auxiliares de Resfriamento.

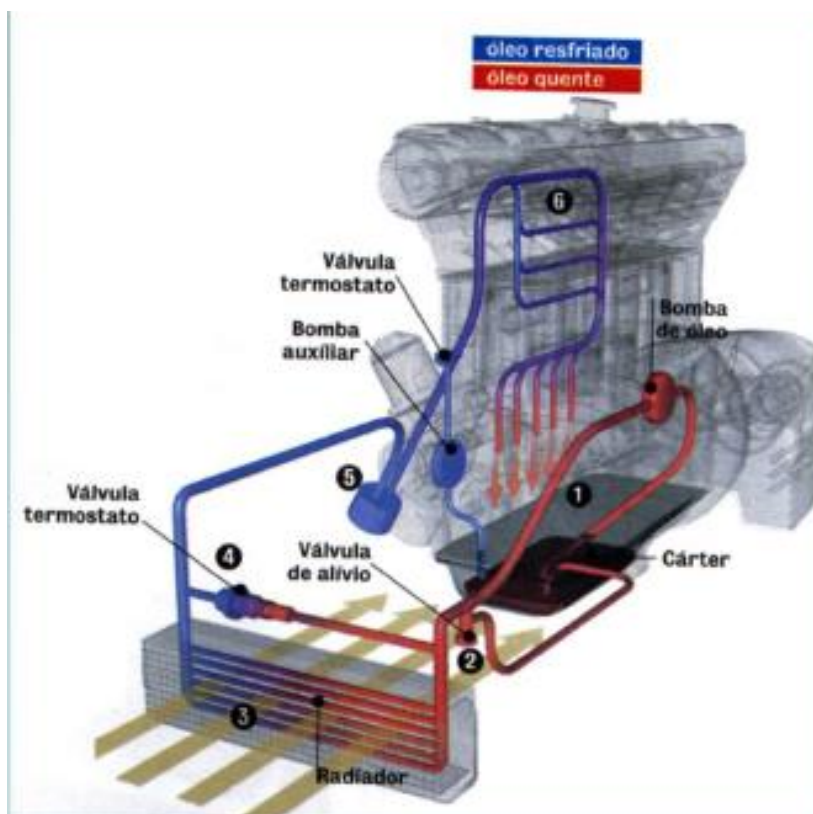


Fonte: Adaptado de www.autozine.org

Figura 22 [45] - INTERCOOLER



RADIADOR DE ÓLEO



Fonte PUC – RJ.

Fórmula 3[49] – 1ª Lei da Termodinâmica para regimes permanentes.

$$P_b + \dot{Q}_{cool} + \dot{Q}_{misc} + \dot{H}_{e,ic} + \dot{m}h_{e,s} = \dot{m}_f Q_{LHV}$$

Q_{cool} = taxa de transfência de calor ao fda

Q_{misc} = taxa de transferência de calor ao lubrif.

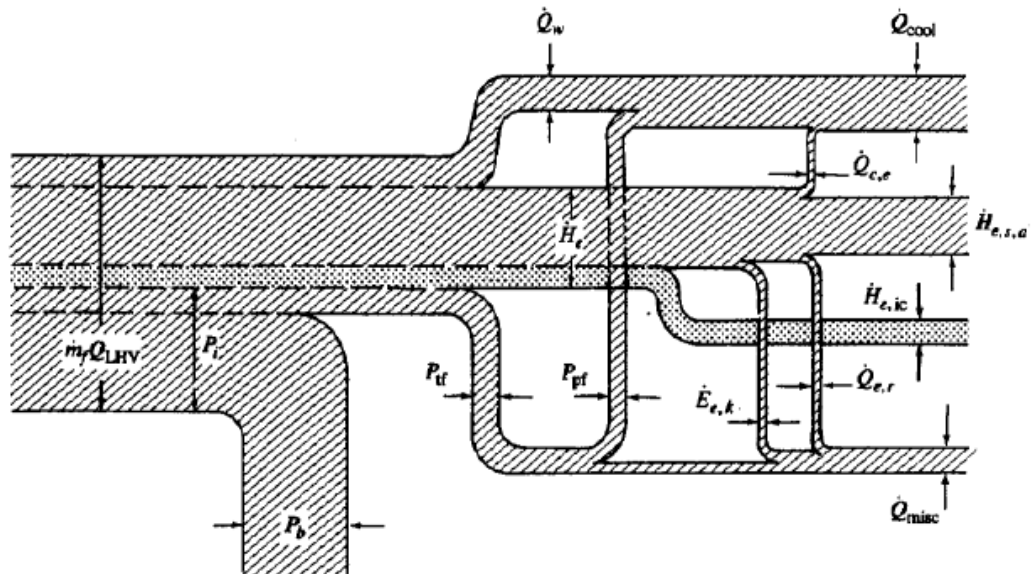
P_b = potência ao eixo

$H_{e,ic}$ = fluxo de entalpia da exaustão

$\dot{m}h_{e,s}$ = vazão mássica X entalpia de escape

$\dot{m}_f Q_{LHV}$ = vazão mássica do comb. X poder calorífico inf.

Figura 23[49] – Fluxo de Energia em MCI.



Fonte: Heywood – 1988.

Fórmula 4 / Figura 24 [45] – Transferência de calor no cilindro.

$$q'_{cvg} + q'_R = q'_{cn} = q'_{cvc}$$

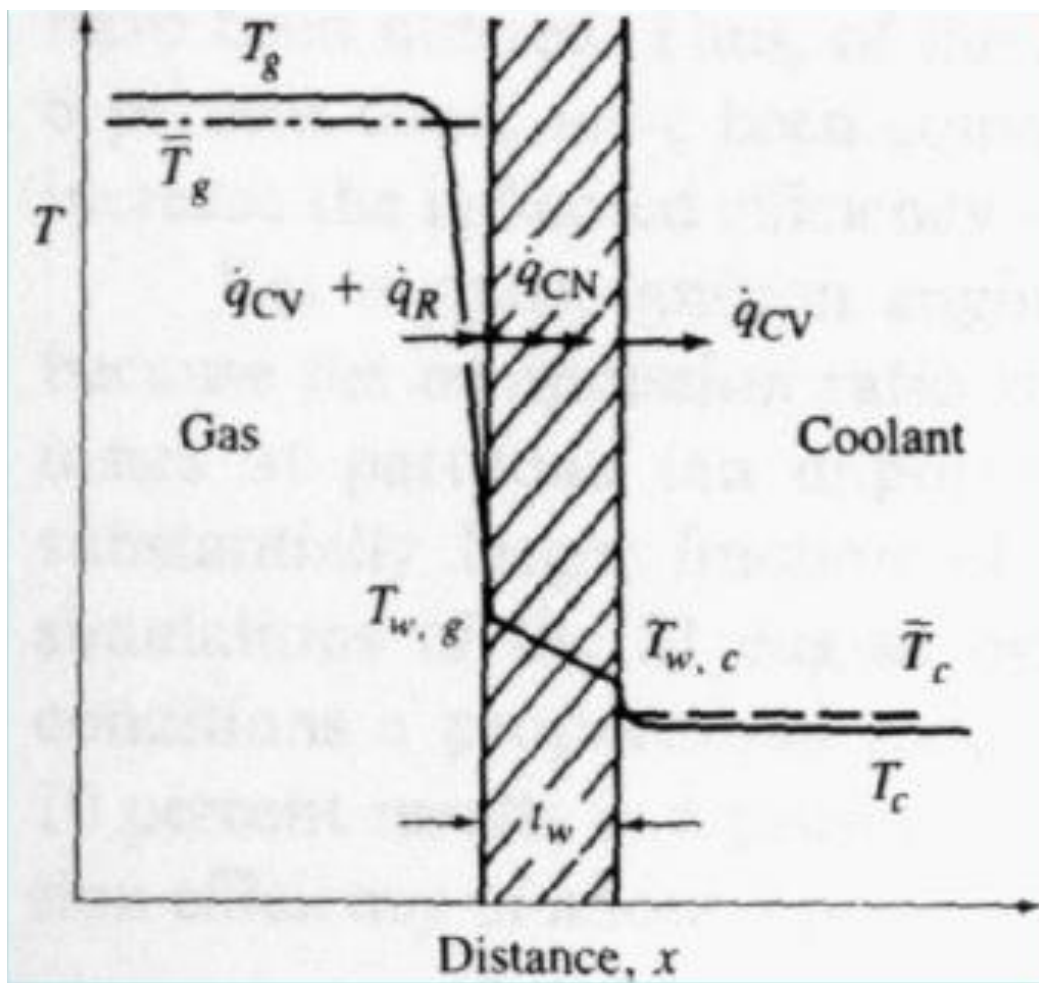
q'_{cvg} – derivada de convecção do calor dos gases

q'_R - derivada do calor relativo

q'_{cn} - derivada do calor por condução

q'_{cvc} – derivada do calor por convecção

- Na condição de regime transiente (quase – permanente)
- Em escoamento turbulento
- Tridimensional (aproximação unidimensional).



3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

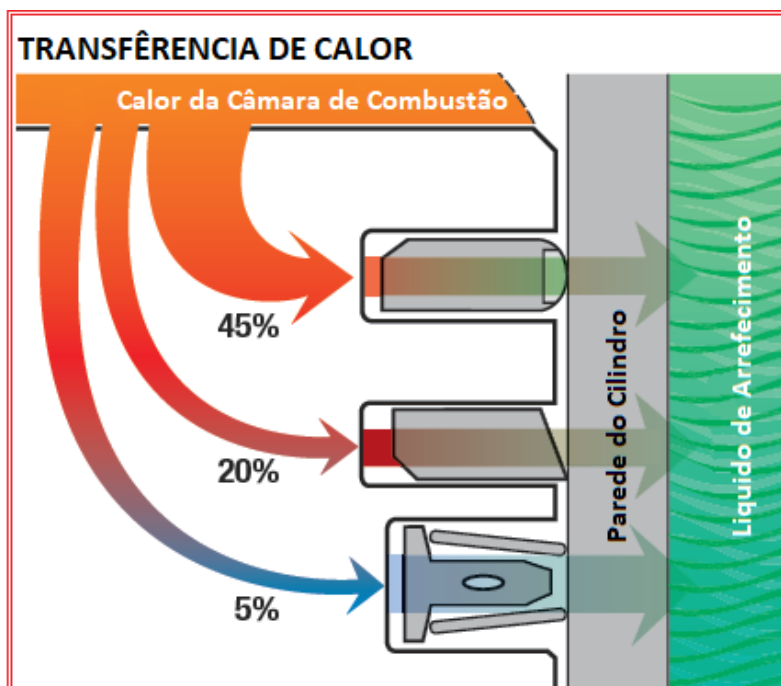
Os fluídos envolvidos no processo de troca de calor durante o funcionamento de um motor de combustão interna são três:

- Fluido de trabalho, que fornece a energia ao veículo, devido ao ciclo termodinâmico do motor;
- Fluido de arrefecimento que retira calor do bloco do motor e da cabeça dos cilindros, transferindo ao radiador;
- Ar que resfria o fluido de arrefecimento e óleo lubrificante, nos radiadores e admitido para a mistura.

A descrição da transferência de calor entre o gás na câmara de combustão e o fluido de arrefecimento pode ser avaliada se for conhecido o coeficiente de troca de calor.

Destacamos a seguir representação de transferência de calor dentro dos cilindros:

Figura 25 [50] – Transferência de calor interna no cilindro.



Taylor descreve o coeficiente geral de troca de calor da seguinte maneira:

Fórmula 5[48] – Cálculo de troca de calor.

$$\frac{U_{bc} D_{pst}}{K_g} = 10,4 \left[\frac{G_g D_{pst}}{M_g} \right]^{0,75}$$

Sendo:

U_{bc} , o coeficiente geral de troca de calor;

k_g , a condutividade térmica do gás na câmara de combustão, avaliada a T_g (temperatura média efetiva do gás);

G_g , a velocidade mássica do gás;

D_{pst} , o diâmetro do cilindro;

M_g , a viscosidade do gás medida em T_g .

Por Condução

É o modo de transferência de calor entre sólidos e líquido em repouso. A intensidade é em função do material aplicado e do gradiente de temperatura.

È o modo de transferência de calor no cabeçote, paredes do cilindro, êmbolos, bloco e coletores. Abaixo descrevemos a fórmula de transferência de calor por condução:

Fórmula 6[48] – Cálculo de transferência de calor por condução.

Onde :

$$q'_{CN} = \frac{Q}{A} = -k \nabla T$$

q' = fluxo de calor (W/m²)

k = condutibilidade térmica (W/m/K)

$$q'_{CNx} = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

A = área transversal de transferência (m²)

Por convecção

A taxa de transferência de calor ‘ Q ’, através da superfície de troca de calor ‘ A ’, é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o líquido escoando sobre ela.

Segundo a lei de Newton do resfriamento, esta taxa de transferência de calor pode ser expressa como:

Fórmula 7[48] – Cálculo de transferência de calor.

$$Q = \alpha A(T_w - T_\infty)$$

Sendo:

α o coeficiente de troca de calor por convecção, e T_w e T_∞ , as temperaturas da superfície e do fluido, respectivamente.

Variáveis envolvidas na transferência de calor por convecção.

$$f(h_c, q'_{ch}, D, L, y, T, k, \mu, p, c_p, v, N, \Theta) = 0$$

h_c – coeficiente de transferência de calor por convecção;

q'_{ch} – taxa de calor gerada por volume da queima do combustível;

D – diâmetro do cilindro

L – altura máxima do cilindro

y – altura instantânea do cilindro

k – condutibilidade térmica do fluido

μ - viscosidade do fluido

c_p – calor específico do fluido

p – densidade do fluido

v – velocidade média do fluido

N – velocidade de rotação

Θ – ângulo da árvore de manivelas

T – temperatura do fluido

Tabela 8 [48] – Ligas em contato com os fluídos.

	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/kg/K)	CONDUTIBILIDADE TERMICA (w/M/k)	DIFUSIDADE TERMICA (m ² /s)
ferro fundido	.7200.	.480.	.54.	1,57 x 10 ⁻⁵
Alumínio	.2750.	.915.	.155.	6,2 x 10 ⁻⁵
nitreto de silício	.2500.	.710.	.10.	2,8 x 10 ⁻⁶
revestimento de zirconia	.5200.	.732.	.1.2.	3,2 x 10 ⁻⁷

Fonte: UFMG.

Por radiação

A radiação é a transmissão de energia em forma de ondas eletromagnéticas, através do espaço, sem um meio físico de transmissão.

A taxa de transferência de calor está relacionada às potências quartas das temperaturas envolvidas e pode ser expressa como:

Fórmula 8[48] – Cálculo de irradiação de calor.

$$Q'_R = \frac{Q}{A} = F_f \epsilon \sigma (T_g^4 - T_{w,g}^4)$$

A

σ – constante de Stefan-Boltsmann = 5,67x10⁻⁸ W/m²/K⁴

ϵ - emissividade

F_f – fator de forma

T_w – Temperatura da superfície da parede sólida (K)

T_g – Temperatura média do fluído (K)

Subscrito **g** – gás.

4. CONCLUSÃO

A necessidade por reduções constantes de emissões em MCI's e a necessidade de ganhos em Torque x Potência para fins comerciais, nos leva ao desenvolvimento de inovações em todos os níveis de projeto para motores. Os cilindros removíveis têm se mostrado a melhor opção para estes componentes, uma vez que seu desgaste é maior do que de outros componentes fixos do bloco do motor, especificamente quando com cilindros úmidos, estes apresentam um ganho de até 30% maior que os cilindros secos na sua dissipação de calor, principalmente em motores de alta exigência de torque. Com o incremento do revestimento cerâmico interno em cilindros removíveis, obtém-se menores dilatações de trabalho e um consequente ganho de pressão interna, com menor fuga de gases para o cárter; menor turbulência dos gases de admissão e escape, devido a sua face menos rugosa e uma melhor dissipação de calor, devido a composição cristalina da cerâmica. Por fim os ganhos termodinâmicos e de tribologia do sistema no uso de cilindros revestidos de cerâmica, proporcionam menores níveis de emissões e ganho de desempenho do motor, contrapondo ao seu maior custo de produção.

5. PROPOSTAS FUTURAS

Uma proposta de avanço para cilindros removíveis são os estudos da aplicação de cerâmica avançada na total composição do cilindro, produzindo-os pela técnica da metalurgia do pó, e assim analisar em ensaios de:

- Corrosão química pela combustão;
- Carregamentos mecânicos de tração e compressão;
- Taxa de dissipação térmica;
- Alteração na turbulência dos gases de admissão e escape;
- Desempenho termodinâmico geral;
- Níveis de emissões;
- Ganhos de torque x potência;
- Riscos de detonação

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOSCH, Robert.(2005), Manual de Tecnologia Automotiva, 25° Ed.Blucher, São Paulo – SP.
- [2] MAHLE, Manual Técnico Mahle – Metal Leve.
- [4] TILLMANN, Carlos A.C.(2013), Motores de combustão interna e seus sistemas, Rede e-Tec Brasil, Pelotas – RS.
- [5] COFAP, Manual doutor em motores.
- [6] HUNE, Felipe S., Duarte, Matheus V.(2016), Estudo da evolução dos pistões de motores ciclo Otto, Projeto de graduação, FATEC, Santo André – SP.
- [7]http://www.dicasengenharia.blogspot.com.br/2008/04/cilindro_revestido.html, Acesso em: 10/ Mai/ 2017.
- [8] BRAGA, Estevão; Morais, Mateus; Matias, Luan;<http://www.fisica2motores.blogspot.com.br/2010.html>, Acesso em: 16/ Mai/ 2017.
- [9] NAHAS, Leandro L.(2010), Identificação da causa de falha de camisa de cilindro de um motor de combustão interna, Dissertação de mestrado, UNICAMP – Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas – SP.
- [10] TAVARES, Rodrigo; César, Bruno S.M. (2013), Materiais cerâmicos na indústria automotiva, Projeto interdisciplinar, UNILESTE – Curso de Engenharia Mecânica, Cel. Fabriciano – MG.
- [11] FERREIRA, Carla B.E.M.; Magalhães, Leandro L. (2009), Projeto mecânico de equipamento para brunimento de camisas de cilindro, Projeto de graduação, CEFET, Rio de Janeiro – RJ.
- [12]http://www.omecanico.com.br/como_recondicionar_um_motor_diesel/2015.html, Acesso em: 16/ Mai/2017.
- [13] <http://www.mahleaftermarketlatimamerica.camisas/2017.html>, Acesso em: 16 / Mai / 2017.
- [14] DUARTE, Vinicius G. (2014), Downsizing do motor diesel, Projeto de Graduação, FATEC, Santo André – SP.
- [15] KSPG, Kolbenschmidt Pierburg (2016), Lista de aplicações Motorservice.
- [16] <http://www.ceramtec.com.br/ceramicatecnica.html>, Acesso em: 16/ Mai/ 2017.
- [17] <http://www.motoesporte.com.br/revestimento-ceramico-em-cilindros-modernos/2011.html>, Acesso em: 16/ Mai/ 2017.

- [18] OKIMOTO, Prof^o, TM 116 – Soldagem – 3^a Aula, Universidade Federal do Paraná – Departamento de Eng^o Mecânica.
- [19] INFOSOLDA (1997), Soldagem, Coleção Tecnológica SENAI, 1^a Ed.
- [20] NASCIMENTO, Rubens M.; Martinelli, Antonio E.; Buschinelli, Augusto J.A. (2000), Novo método de metalização de superfícies cerâmicas para brasagem com ligas de adição, sem metal ativo, Congresso Brasileiro de Eng^o e Ciências dos materiais, São Paulo – SP.
- [21] FERNANDES, Viviane K.; Martendal, Caroline P.(2016), É possível soldar metal com cerâmica?, <http://www.engenheirodemateriais.com.br/2016/04/27/e-possivel-soldar-metal-com-ceramica/html>, Acesso em: 16/ Mai/ 2017.
- [22] <http://www.fdbdiamantados.com.br/brunimento.phd.html>, Acesso em: 26/ Mai/ 2017.
- [23] <http://www.essel.com.br/cursos/materiais/01/processosfabricacao/50proc3.pdf.html>, Acesso em 26/ Mai/ 2017.
- [24] <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/075.pdf>, (2005), Caracterização físico – química de massas cerâmicas e suas influências nas propriedades finais dos revestimentos cerâmicos, Dissertação (mestrado)- UFPR – Setor de tecnologia, Programa de pós-graduação de engenharia (PIPE), Curitiba, PR, Acesso em: 25/Jul/2017.
- [25] <http://www.3.fsa.br/mecanica/arquivos/04%20sinterizacao.pdf>, Acesso em 25/Jul/2017.
- [26] MORO, Norberto; Auras, André P. (2007), Metalurgia do pó e o futuro da indústria, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina – CEFETSC, Florianópolis, SC.
- [27] BENVENHO, Marcelle H.(2005), O processo da metalurgia do pó, <http://www.zemoleza.com.br/trabalho-acaemico/exatas/engenharia/o-processo-de-metalurgia-do-po>.
- [28] <http://www.retificadecabecotesliborio.com.br/blog/falhas-prematuras-em-camisas-de-cilindro-estao-paralisando-o-funcionamento-dos-motores>, Acesso em: 26/Jul/2017.
- [29] CARAM, Rubens, Estrutura e propriedades dos materiais cerâmicos, UNICAMP – SP.
- [30] CALLISTER Jr, W.D.(2002), Ciência e engenharia de materiais: uma introdução LTC – 5^a Ed.
- [31] <http://www.wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/imagens/0/od/aula19.pdf>, Acesso em: 27/Jul/2017.
- [32] ALVES, Lucas M. (2013), Materiais cerâmicos – uma abordagem moderna, UEPG – Ponta Grossa – PR – Departamento de engenharia de materiais.
- [33] OIKAWA, M.H.; Bianchi, E.C.; Destro, R.S.;Souza, R.M.;Camarim, R.C.;Simões, R.P.; Aguiar, P.R. (2011), Cerâmicas avançadas no processo de retificação cilíndrica externa de

mergulho com rebolos diamantados, com a técnica da mínima quantidade de lubrificação e refrigeração otimizada, UNESP – Bauru – SP.

[34] MARCHI, Juliana (1999), Estudo de sinterização de cerâmicas à base de nitreto de silício, utilizando-se como aditivos óxidos de cério e alumínio, IPEN – USP – SP.

[35] PEREIRA, José C., <http://www.mecanica.UFRGS.br/mmotor/apostila.pdf>, Acesso em: 08/Ago/2017.

[36] MELLO Jr, Antonio G.; Faga, Murilo T.W. (2005), Substituição de motores elétricos por motores de combustão interna de ciclo Otto à gás natural, em instalações de bombeamento de petróleo e seus derivados, IBP – Salvador – BA.

[37] PEREIRA, José C.; http://www.josecludio.eng.br/geradores/diesel_versus_gas, Acesso em: 08/Ago/2017.

[38] <http://www.newpulse.ru>, Estacionario à GNV, Acesso em: 06/Out/2017.

[39] <http://www.portal-energia.com>, Maquete de alimentação para motores estacionarios, Acesso em: 03/Jan/2018.

[40] <http://www.brunitec.com.br>, Acesso em: 06/Out/2017.

[41] Usinagem GND.com.br, Acesso em: 06/Out/2017.

[42] Curso de tecnologia em manutenção industrial (2014), UTFPR – PR.

[43] TOMANIK, Eduardo(2000), Modelamento do desgaste por deslizamento em aneis de pistão em motores de combustão interna, Tese de doutorado, Politécnic USP – SP.

[44] MATOS Jr, Raimundo F.(2009), Análise topográfica da superfície de cilindro de motores à combustão interna, Tese de mestrado, UTFPR – Curitiba – PR.

[45] BOFF, Cristiano R. (2003), Metodologia de análise de blocos de motores, Tese de mestrado, UFSC – Florianópolis – SC.

[46] MARREIRO, Letícia A.(2016), Projeto de máquina para investigação tribológica do par anel de segmento – camisa de cilindro, TCC, - UFRJ – RJ.

[47]<http://www.pruebaderuta.com>, Acesso em: 04/Jan/2018.

[48] BARROS, José E.M.; Baêta, José G.C. (2006), Estudo da transferência de calor em motores, - UFMG – MG.

[49] Estado da arte do sistema de arrefecimento automotivo, Certificado Digital n° 0721405/C.A. – PUC – RJ.

[50] <http://www.performancemotorsports.eu>. Acesso em: 09/Jun/2018.