

COMPARATIVO ENTRE PISTÃO DE AÇO SOLDADO POR FRICÇÃO E PISTÃO DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÃO EM MOTORES DIESEL

Rafael Almeida Martins¹

Manoel Carreira Neto²

RESUMO

Os requisitos de menor consumo de combustível e emissão de poluentes para motores diesel motiva a indústria automobilística a buscar projetos e processos de fabricação cada vez mais desafiadores. Os pistões de alumínio, largamente utilizados nesta aplicação, tendem a serem substituídos por pistões mais complexos, fabricados em aço, graças a estas novas exigências. O pistão fabricado através de duas peças de aço soldadas por fricção apresentou uma economia de combustível de 3% em testes realizados por SCHREER, Kai et al, 2014. O objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade técnica na utilização de pistões fabricados em aço aplicados em motores ciclo Diesel para veículos leves, bem como comparar o desempenho de um pistão fabricado em alumínio com um pistão fabricado em duas partes de aço e soldado pelo processo de fricção.

Palavras-chave: Pistões de aço, pistão de alumínio, motores diesel, soldagem por fricção.

¹ Engenheiro Mecânico, Universidade Salvador (Unifacs) – Engenheiro de Manufatura Pleno.
E-mail: rafalmeidam@gmail.com

² Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais; Escola Politécnica da USP. E-mail:
manoelc@fieb.org.br

ABSTRACT

The less fuel consumption and pollution emissions requirements for diesel engines motivate the automobilist industry to look for challenging projects and manufacturing process. The aluminum piston, widely used for this application, tend to be replaced for more complex pistons, made of steel, thanks to new requirements. The piston manufactured through two steel parts welded by friction demonstrated 3% of fuel consumption economy in tests made by SCHREER, Kai et al, 2014. This paper objective is to demonstrate the technical viability to use steel piston in light vehicle diesel engine, as well compare the performance of aluminum piston and piston manufactured in two steel parts welded by friction.

Keywords: Steel piston, aluminum piston, diesel engine, friction welding.

1. INTRODUÇÃO

É crescente a demanda global para que os motores a combustão interna consumam menos combustível e emitam taxas menores de poluentes, o que requer avanços tecnológicos cada vez mais desafiadores no que diz respeito aos materiais e projetos dos componentes empregados nos motores, trazendo também consequências para o design dos pistões.

O pistão é o elemento móvel da câmara de combustão dos motores ciclo Otto e Diesel responsável pela conversão da energia de explosão da mistura ar / combustível em energia mecânica, quando associado à biela e ao virabrequim. Além disso, em conjunto com os anéis de vedação, possuem a importante função de assegurar a estanqueidade da câmara de combustão, garantindo as taxas de compressão necessárias para o funcionamento adequado do motor. Em consequência, está sujeito a altas temperaturas, pressões de trabalho e esforços mecânicos, o que requer projetos e materiais avançados para atender os requisitos técnicos de trabalho.

De acordo com MAHLE 2012, para funcionar corretamente, os pistões devem atender os seguintes requisitos: resistência estrutural, adaptabilidade às condições de operação, baixo atrito com os cilindros, baixo desgaste, peso reduzido com suficiente estabilidade de forma, resultando em motores com baixo consumo de óleo e baixo valor de emissão de poluentes.

As penalidades iminentes para o excedente das emissões de CO₂ pré-estabelecidas parecem tornar os pistões de aço uma alternativa viável nos dias atuais, apesar do seu alto custo de fabricação. Até o momento, os benefícios na redução da emissão de CO₂ utilizando pistões de aço foram atribuídos principalmente à redução do atrito entre o pistão e o cilindro devido a menor interferência térmica [3].

O objetivo deste trabalho consiste em uma revisão bibliográfica demonstrando a viabilidade técnica na utilização de pistões fabricados em duas partes de aço e soldado pelo processo de fricção, comparando com pistões de alumínio, para aplicação em motores ciclo Diesel.

2.FUNIONAMENTO DOS MOTORES CICLO DIESEL QUATRO TEMPOS

De acordo com Brunetti 2012, “os motores de combustão interna a pistões têm uma cinemática que parte de um movimento de translação alternativo para gerar movimento rotativo, por meio de um eixo de manivelas. A geração de potência nesses motores é intermitente e os regimes de trabalho são variáveis”.

Os motores de combustão interna podem ser classificados como de ignição por centelha ou ignição por compressão. Os motores movidos a diesel fazem parte da classificação dos motores de ignição por compressão. O criador do motor diesel, Rudolf Diesel, desenvolveu o primeiro motor no período entre 1893 e 1898. Desde sua criação, o princípio de funcionamento continua praticamente o mesmo, porém houve muitas evoluções tecnológicas nos seus componentes, principalmente dos materiais empregados nas peças dos motores.

Quanto ao seu funcionamento, o motor diesel quatro tempos aspira o ar, que após ser comprimido (cerca de 35 - 50 bar) no interior dos cilindros, aquece a temperatura aproximada de 650 °C, e em seguida recebe o combustível sob pressão superior aquela em que o ar foi comprimido. A combustão ocorre por autoignição, quando o combustível entra em contato com o ar aquecido pela elevada pressão.

O ciclo de trabalho de um motor diesel quatro tempos compreende duas voltas do virabrequim ou quatro cursos completos do pistão, que são: admissão, compressão, expansão e exaustão (figura 01).

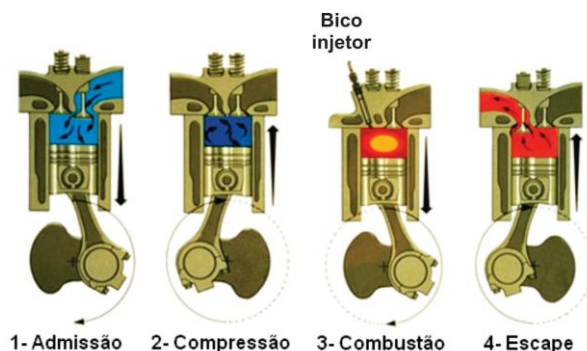


Figura 1: Os quatro tempos do motor ciclo Diesel (BRAIN, Marshall)

A admissão inicia-se quando o pistão se encontra no Ponto Morto Superior ou PMS (posição do pistão na parte superior extrema do cilindro; caracteriza o mínimo volume do cilindro). Abre-se a válvula de admissão e o pistão move-se para o Ponto Morto Inferior ou PMI (posição do pistão na parte inferior extrema do cilindro; caracteriza o máximo volume do cilindro), permitindo a entrada de ar devido a baixa pressão que o pistão provoca ao se movimentar para baixo. Quando o pistão chega ao PMI, fecha-se a válvula de admissão. O virabrequim girou meia volta.

Na compressão, o pistão sobe até o PMS, enquanto as válvulas de admissão e exaustão estão fechadas, comprimindo todo o ar na câmara de compressão. Pouco antes de o pistão completar o curso, ocorre a autoignição com a injeção do diesel na câmara de compressão. O virabrequim completa o giro da primeira volta.

O tempo da expansão ocorre logo após a autoignição do diesel. Os gases da explosão começam a expandir, produzindo uma alta pressão que atua sobre a cabeça do pistão, empurrando-o para baixo até o PMI. Neste momento, o virabrequim gira meia volta, completando até o momento uma volta e meia.

Na exaustão, o pistão inicia o movimento do PMI para o PMS, abrindo-se a válvula de exaustão, permitindo a saída dos gases de combustão para fora do cilindro. Ao chegar no PMS, fecha-se a válvula de exaustão, e o ciclo inicia-se novamente. O virabrequim gira meia volta, completando as duas voltas que compreendem um ciclo de trabalho.

3. MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE PISTÕES

Desde o início da busca do material ideal para os pistões, ficou muito claro que a busca pelo melhor material de liga leve para a aplicação em pistões seria um desafio muito grande e esta busca deveria levar em conta as seguintes características: peso específico baixo (para a obtenção de pistões leves), condutibilidade térmica elevada, resistência à fadiga elevada, dilatação volumétrica reduzida, dureza alta (principalmente a quente), coeficiente de atrito baixo e resistência ao engripamento alta (*scuffing*) [2].

Um material que reúna todas estas propriedades em níveis satisfatórios e viáveis economicamente não existe, haja vista que algumas das características citadas não conseguem coexistir no mesmo material. Porém, com a crescente evolução na tecnologia de materiais e nos processos de fabricação, é possível obter materiais com um bom equilíbrio entre as propriedades mecânicas desejadas.

Os materiais e processos de fabricação usuais utilizados no desenvolvimento de pistões, para motores de combustão interna, são: ligas de alumínio e aço, fundidos ou forjados. Alguns pontos relevantes devem ser levados em consideração no momento da escolha do material adequado para o pistão:

- Uma vez que o coeficiente de dilatação térmica do alumínio é cerca de 2,5 vezes maior que o do aço, deve-se prever uma folga maior entre o pistão e a parede do cilindro, para prevenir o travamento do pistão quando submetido a dilatação térmica. Porém, se for permitida uma folga excessiva, o pistão poderá não ser guiado corretamente no cilindro, causando colisões do mesmo, tendendo a aumentar os níveis de desgaste e de atrito.
- Como as ligas de alumínio utilizadas na fabricação dos pistões têm uma condutividade térmica elevada (algo em torno de quatro vezes a do aço), estes pistões asseguram uma taxa elevada de transferência de calor, e assim mantêm a diferença de temperatura menor entre o centro e as arestas no topo do pistão.

O motor Diesel trabalha sob alto carregamento térmico, o que requer, mesmo em pistões de alumínio, galerias de refrigeração. Estas galerias captam o óleo do cárter que é injetado através de bicos localizados na parte inferior do bloco. O óleo circula nos pistões dissipando o calor gerado durante a combustão através das paredes da galeria. A figura 2 (a) apresenta exemplo de um pistão de motor diesel, em alumínio, com galeria de refrigeração.

Quando os carregamentos térmicos e mecânicos ultrapassam os valores daqueles suportados pelas ligas de alumínio, torna-se necessário adotar pistões compostos, onde a parte superior é feita em aço e a parte da saia em alumínio (figura 2 (b)).

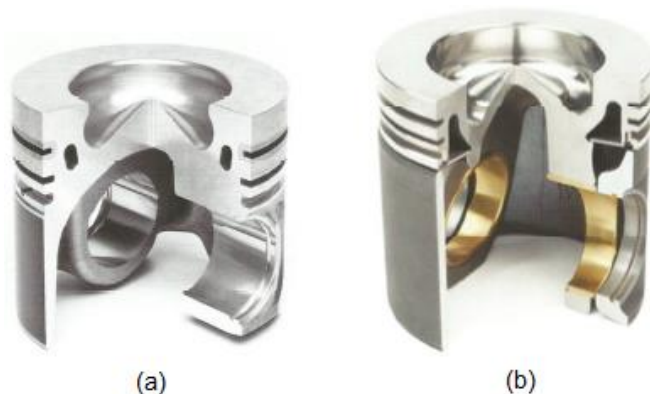


Figura 2: (a) Pistão de motor Diesel em alumínio, com canal de refrigeração / (b) Pistão com topo em aço e saia em alumínio, com canal de refrigeração (YAMAWAKI, Marcio, 2013)

Com a evolução dos motores e o conseqüente aumento das cargas mecânicas e térmicas sofridas pelos pistões, foram desenvolvidos pistões completamente feitos em aço, em uma única peça forjada. Este novo design permitiu uma redução da altura de compressão e com isso uma redução do peso total do pistão, tornando-o bastante similar ao do pistão de alumínio (figura 3). Uma chapa posicionada na parte inferior da cabeça do pistão forma uma galeria necessária para refrigeração.



Figura 3: Pistões de aço forjados, com canal de refrigeração (YAMAWAKI, Marcio, 2013)

O gráfico representado na figura 4 apresenta a utilização de alumínio e aço na fabricação de pistões para motores diesel, correlacionando a pressão de trabalho nos cilindros com o período de início da fabricação.

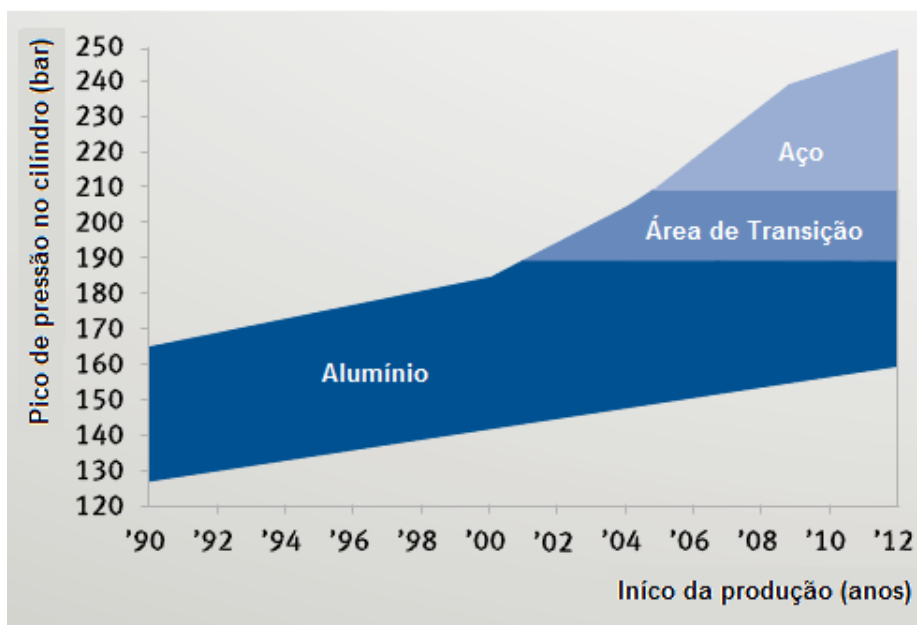


Figura 4: Evolução na utilização de alumínio e aço na fabricação de pistões. (KSPG Automotive, adaptado)

Cilindros projetados com pressões acima de 230 bar em conjunto com experiências de desenvolvimento avançada levaram a uma otimização adicional do pistão monobloco fabricado em aço [6]. Para conseguir atender os requisitos de pressões superiores, economia de combustível, emissões de poluentes e redução de peso, foram desenvolvidos pistões de aço, onde são fabricadas a coroa e a saia em partes distintas e posteriormente soldados por fricção (figura 5).

O pistão soldado por atrito também é forjado em aço. Dois componentes são soldados juntos para formar um canal de refrigeração grande e fechado. O aço tipicamente usado para fabricar o pistão é o 42CrMo4, que fornece força e resistência significativamente maiores que o alumínio. Sendo assim, a altura do pistão pode ser reduzida em 30%. Como resultado, a superfície de contato entre o pistão e as paredes do cilindro é menor, assim como as perdas por atrito, o que leva a economias mensuráveis no consumo de combustível [7].



Figura 5: Pistão em aço monobloco soldado por fricção. MAHLE TopWeld (MAHLE GmbH, 2012).

A utilização do aço na fabricação de pistões para motores diesel de alto desempenho só foi viabilizada pelo emprego de novas tecnologias de processo em sua fabricação. Mesmo possuindo densidade maior, utilizando as tecnologias atuais de forjamento, soldagem por fricção e usinagem, é possível fabricar um pistão em aço, menor, mais leve e mais resistente mecanicamente do que os pistões em alumínio. Ainda que o processo de fabricação seja muitas vezes mais caro, os pistões em aço soldados por fricção (como exemplo o MAHLE TopWeld) são uma excelente solução para os motores diesel, por conta do seu melhor desempenho nos quesitos economia de combustível, menor emissão de poluentes, motores mais compactos e como consequência menor peso.

3.1 Aço Utilizado na Fabricação de Pistões

Os aços utilizados na fabricação de componentes normalmente possuem um teor de carbono menor que 0,8% na sua composição. Após conformação a quente ou fundição, se resfriados lentamente, os aços formam uma estrutura metálica ferrítica / perlítica. Neste estado, o aço normalmente possui resistência e dureza insuficiente para serem aplicados na fabricação de pistões. Portanto, são utilizados

diferentes métodos para aumentar a resistência do material, sendo o mais comum a têmpera.

De acordo com DE FREITAS 2014, A têmpera é o tratamento térmico bastante utilizado para se obter um aumento da resistência mecânica do aço. Ele consiste em resfriar a peça rapidamente após o aquecimento a temperaturas superiores a 850°C. Diferente do resfriamento lento, a conversão da austenita em perlita e ferrita não ocorre mais devido limitação repentina da movimentação livre dos átomos de carbono na matriz de ferro. O carbono permanece forçadamente dissolvido na rede cristalina, embora não tenha solubilidade suficiente em condições de equilíbrio. Isto leva a grandes distorções na rede cristalina, que são expressas macroscopicamente como altas dureza e resistência, em contrapartida com certa fragilidade do material. Esta estrutura endurecida, apresentando uma aparência tipicamente acicular, é denominada martensita. O tratamento de revenimento subsequente alivia ligeiramente as tensões da têmpera, melhorando a tenacidade do material.

Para aplicações de pistões que requerem propriedades mecânicas elevadas, utiliza-se a liga de cromo – molibdênio do aço tratado termicamente 42CrMo4. Além de melhorar a dureza, ambos elementos de liga promovem a formação de carbonetos, e o molibdênio também aumenta a resistência a temperaturas elevadas. No entanto, mesmo para esta liga, deve-se esperar uma diminuição da resistência quando se avança na direção do centro da peça, principalmente para secções transversais muito grandes. As grandes faixas de resistência para uma mesma temperatura, apresentadas na tabela 01, destacam este fato.

FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE
SOLDAGEM

Tabela 1: Aço utilizado na fabricação de pistões: composição química, propriedades mecânicas e físicas (MAHLE GmbH, 2012).

Descrição	42CrMo4	
Estado do tratamento térmico	Tratado termicamente	
Elementos de liga [Porcent. por peso]	C	0.38–0.45
	Si	max. 0.40
	Mn	0.60–0.90
	Cr	0.90–1.20
	Mo	0.15–0.30
	P	max. 0.035
	S	max. 0.035
	V N	
Dureza Brinell HBw 30	265–330	
Resistência a tração R_m [MPa]	20°C	920–980
	130°C	870–960
	300°C	850–930
	450°C	630–690
Limite de escoamento $R_{p0.2}$ [MPa]	20°C	740–860
	130°C	700–800
	300°C	680–750
	450°C	520–580
Alongamento na fratura A_5 [%]	20°C	12–15
	130°C	8–13
	300°C	10–13
	450°C	15–16
Resistência a fadiga σ_{1W} [MPa]	20°C	370–440
	130°C	350–410
	300°C	340–400
	450°C	280–340
Módulo de Young E [MPa]	20°C	212,000
	130°C	203,000
	300°C	193,000
	450°C	180,000
Condutividade térmica λ [W/mK]	20°C	44
	130°C	43
	300°C	40
	450°C	37
Média linear de expansão térmica α [10^{-6} m/mK]	20–300°C	13.2
	20–450°C	13.7
Densidade ρ [g/cm ³]	20°C	7.80

Outra tecnologia utilizada para aumentar a resistência de materiais metálicos é o endurecimento por precipitação. Os aços ferríticos / perlíticos endurecidos por precipitação exibem pequenas quantidades de vanádio ou nióbio adicionado a sua composição (cerca de 0,1% em peso). Por consequência são conhecidos como aços microligados. Quando o material é submetido a temperatura para forjamento, estes elementos microligados se dissolvem completamente na solução sólida “ γ ” (gama). A peça forjada é deixada esfriar ao ar a uma taxa controlada, imediatamente após a conformação a quente. A medida que a austenita se converte em ferrita e perlita, os carbonetos e carbonitretos destes elementos microligados precipitam em uma distribuição muito fina na ferrita e aumentam a resistência, particularmente o limite de escoamento. [13].

4.FABRICAÇÃO DE PISTÃO EM AÇO POR SOLDAGEM A FRICÇÃO

A melhor união entre materiais é aquela tão resistente quanto o material base. Este é o motivo da escolha do processo de soldagem por fricção para fabricação de pistões de aço com galeria de refrigeração. Isto significa que a coroa e a saia do pistão são atritadas sob uma enorme pressão até que formem uma junta inseparável. Bem simples, é verdade – se você tiver o equipamento correto para produzir as forças necessárias [11].

Quanto maior a temperatura dos motores de combustão interna, mais importante se torna a dissipação de calor. Nos pistões, isto significa que a geometria dos canais de refrigeração desempenha um papel primordial no arrefecimento dos mesmos, conservando a resistência mecânica do seu material. Assim, se o pistão for forjado em uma única peça de aço, um considerável trabalho seria requerido para fabricar os canais de arrefecimento entre a coroa e a saia. Então, criou-se o processo onde as duas partes do pistão são forjadas separadamente, com os canais de arrefecimento, e então unidas pelo processo de soldagem a fricção (figura 6).



Figura 6: Duas partes de um pistão em aço da Mahle prontas para a soldagem por fricção (MAHLE News Aftermarket, 2015)

Apesar do simples conceito no processo de união das peças, a soldagem por fricção é uma das poucas tecnologias que permitem produzir juntas que as propriedades mecânicas são bem parecidas com o material base. Característica essencial para aplicação em pistões para motores diesel de alta performance. Contudo, apesar da simplicidade do processo, é requerida uma máquina de alta potência e precisão para realizar a soldagem.

O processo pode ser resumido da seguinte forma: uma das partes do pistão fica fixa na máquina, enquanto a outra parte é encaixada no lado rotativo da mesma (figura 7 (a)). O processo é iniciado, e a peça em rotação é aproximada da estática. O atrito entre as duas partes eleva a temperatura naquela região, de tal forma que o material se torna plástico e flui em um processo de caldeamento, e por pressão, as peças se unem (figura 7 (b)). Então, o giro da peça é interrompido de maneira abrupta e as peças são mantidas seguras na posição durante alguns segundos para resfriar e permanecerem unidas (figura 7 (c)). A pressão exercida entre as duas peças quando o material está em alta temperatura, gera uma rebarba que é removida posteriormente por processo de usinagem.

O resultado satisfatório da soldagem por fricção para aplicações em pistões de aço requer um equipamento de alta precisão e potência. Para unir as partes dos pistões atritando as mesmas, é necessária uma máquina que desempenha uma força motriz da ordem de 750 kW. Segundo a MAHLE 2015, esta é a potência típica de um motor de trem.

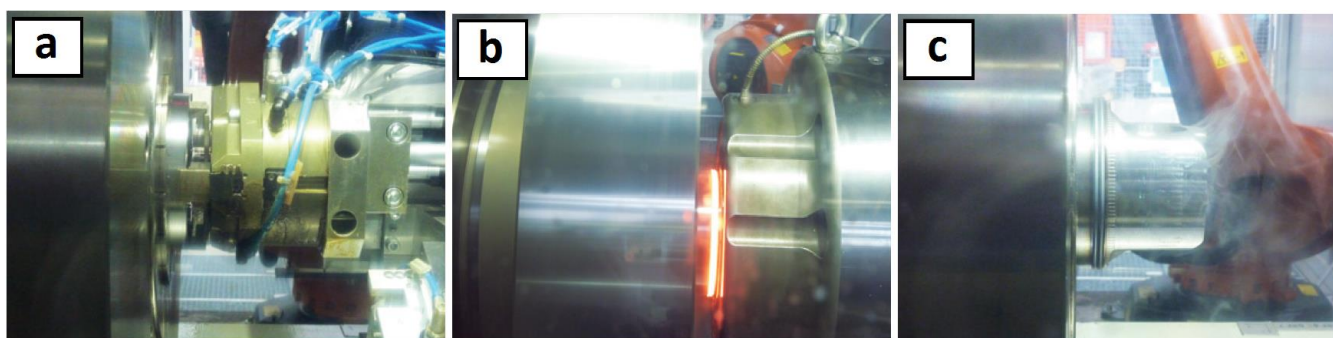


Figura 7: Processo de soldagem por fricção – Pistão de aço (MAHLE News Aftermarket, 2015, adaptado)

5.COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE PISTÃO DE ALUMÍNIO E AÇO

5.1. Perdas por Atrito

A maior resistência do aço torna possível, não apenas igualar, mas até mesmo ficar abaixo do peso dos pistões em alumínio utilizados hoje em dia (SCHREER, Kai, et al, 2014). Esta otimização em peso nos pistões de aço permite que sejam desenvolvidos pistões mais compactos, com alturas menores, e como consequência blocos de motor menor ou bielas com comprimentos maiores. Os pistões mais compactos possuem uma superfície de contato menor com as paredes do cilindro, resultando em menores perdas do conjunto por atrito. Em conjuntos pistão / biela onde se aumenta o comprimento da biela, é possível reduzir as forças laterais atuantes do pistão nas paredes do cilindro, causando um efeito positivo na diminuição do atrito deste sistema (figura 8).

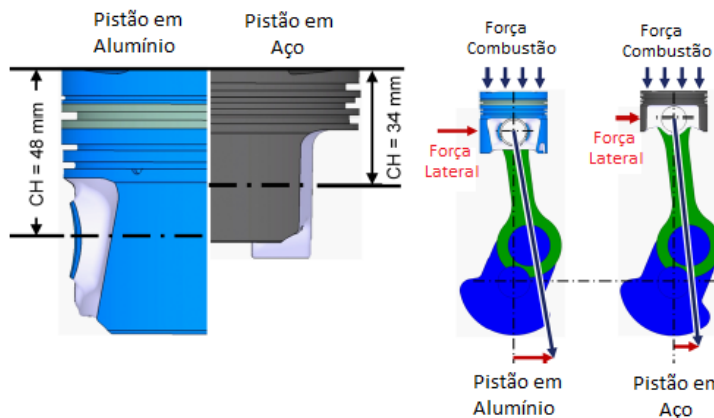


Figura 8: Redução na altura do pistão e influência na força lateral (SCHREER, Kai, et al, 2014, adaptado).

Em motores projetados com pistão de alumínio, por conta do coeficiente de dilatação térmica maior deste material quando comparado ao aço, é necessária uma folga maior entre o pistão e o cilindro para compensar alteração dimensional por dilatação térmica. Já nos pistões em aço, é possível conseguir uma maior estabilidade dimensional, mesmo em temperaturas mais elevadas, reduzindo perdas por atrito. A figura 9 demonstra graficamente a diferença do coeficiente de dilatação térmica para os pistões fabricados em alumínio e aço. A linha contínua azul representa o perfil do pistão quando o mesmo se encontra frio, assim como a linha tracejada azul representa o perfil do cilindro do bloco (motor desligado). Com o motor em funcionamento, ocorre a dilatação das peças (pistão e bloco). Pode-se notar que nesta condição o pistão de alumínio possui uma variação dimensional (expansão térmica) maior que o pistão em aço (linha contínua vermelha), podendo ocorrer o contato entre a saia do pistão e as paredes do cilindro.

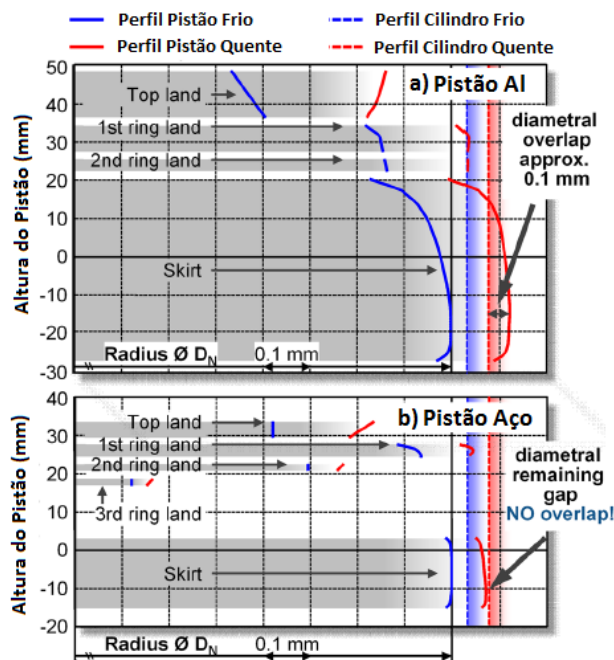


Figura 9: Comportamento de expansão térmica de um pistão de alumínio (a) e aço (b) (SCHREER, Kai, et al, 2014, adaptado).

5.2. Consumo de Combustível

Estudos realizados por SCHREER, Kai et al, 2014, concluíram que o consumo de combustível de um motor diesel com pistão em aço soldado por fricção foram significativamente melhores do que com pistão em alumínio. A vantagem no consumo de combustível na operação do motor com pistão de aço foi em torno de 4 a 8 g/kWh (gramas de combustível por potência gerada pelo motor). O menor consumo de combustível no pistão em aço pode ser atribuído aos seguintes fatores:

- O pistão em aço apresenta um nível de *blow-by* mais baixo do que o pistão em alumínio (de 15% a 45% melhor no pistão em aço), onde a vantagem é maior para velocidades moderadas e altas cargas no motor. O fenômeno conhecido como *blow-by* pode ser explicado como a passagem dos gases de combustão entre o pistão / anéis e a parede do cilindro para o cárter, o que causa uma perda de compressão no cilindro, resultando em uma perda de desempenho do motor. Estes gases de combustão que passam para o cárter carregam vapores de óleo

e são direcionados novamente para o cilindro para serem “queimados” e descartados na exaustão. Um menor nível de *blow-by* acarreta em maior compressão no cilindro, menor consumo de combustível e maior potência. Por apresentarem menor deformação térmica, os pistões em aço fornecem maiores possibilidades de otimização dos anéis em seu projeto, o que acarreta em menores perdas por *blow-by*.

- Redução no volume da câmara de combustão nos pistões em aço, devido a posição dos anéis de segmento, mais próximos ao topo do pistão, quando comparados ao pistão em alumínio (figura 8). Esta configuração contribui positivamente para a taxa de compressão e menores emissões de CO nos pistões de aço.

A figura 10 apresenta uma análise comparativa entre as perdas e a eficiência dos pistões em aço e alumínio nos testes realizados por SCHREER, Kai et al, 2014, para uma operação a 1500 rpm. Neste comparativo é possível observar que o pistão em aço tem melhor desempenho em todos os aspectos observados, acarretando em uma economia de 3% no consumo de combustível.

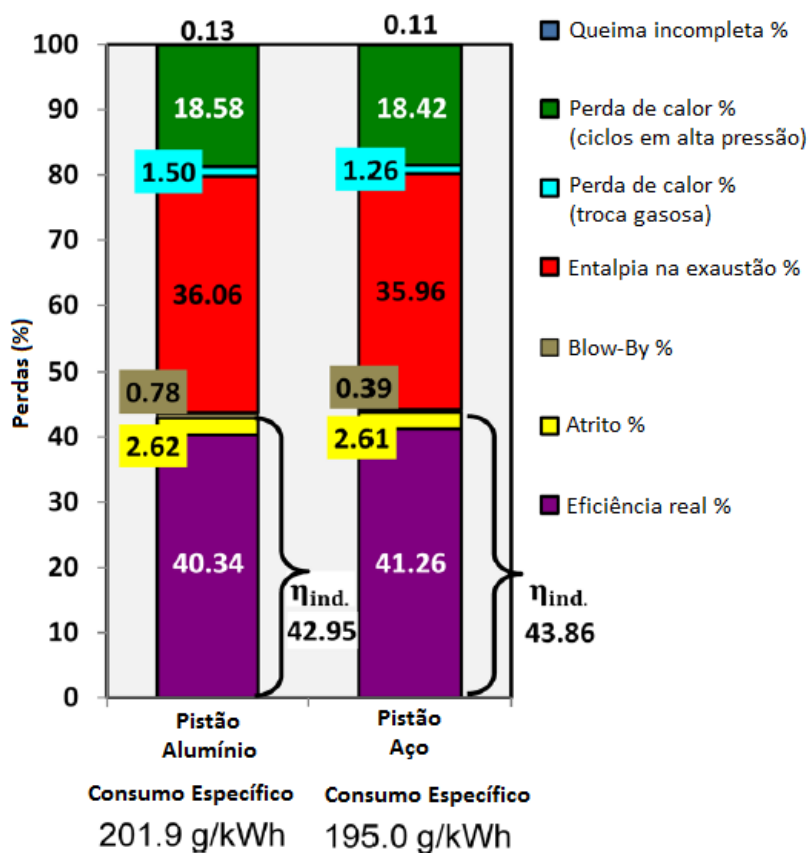


Figura 10: Comparativo de eficiência e perdas dos pistões em aço e alumínio para um motor diesel operando a 1500 rpm

6. CONCLUSÃO

Motivado pela demanda crescente para reduções de consumo de combustível e emissão de poluentes, a indústria automobilística trabalha para desenvolver novos projetos e métodos de fabricação com o objetivo de suprir esta demanda. O pistão de aço fabricado em duas peças distintas e posteriormente soldadas por fricção apresenta uma solução técnica promissora para atingir estes novos requisitos.

O novo método de desenvolvimento do pistão em aço, apesar de apresentar maior complexidade na sua fabricação, apresenta vantagens significativas de desempenho quando comparado aos pistões fabricados em alumínio. Dentre as vantagens pode-se destacar o menor peso, formato mais compacto, menor variação dimensional para altas pressões e temperaturas, projeto otimizado da folga entre o pistão e as paredes do cilindro, diminuindo assim os níveis de *blow-by* e atrito, acarretando em um consumo médio menor de 3% de combustível. De acordo com testes realizados por SCHREER, Kai et al, 2014, esta economia de 3% no consumo de combustível foi evidenciada de maneira consistente em todas as faixas de operação do motor testado, no comparativo entre o pistão de aço e o de alumínio.

REFERÊNCIAS

- [1] MAHLE GmbH. **Pistons and engine testing**. Stuttgart: Mahle GmbH, 2012.
- [2] YAMAWAKI, Marcio. **Evolução Tecnológica dos Materiais e Geometria de Pistões para Motores de Combustão Interna e um Estudo de Caso de Pistão para Aplicação em Motor Diesel com Trinca no Cubo**. Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2013.
- [3] SCHREER, Kai; ROTH, Ingo; SCHNEIDER, Simon; EHNIS, Holger. **Analysis of Aluminum and Steel Pistons – Comparison of Friction, Piston Temperature, and Combustion**. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 136, 2014.
- [4] ARJUNRAJ, P.; SUBRAMANIAN, M.; PRAKASH, N. Rathina. **Analysis and Comparasion of Steel Piston over Aluminium Alloy Piston in Four Stroke Multicylinder Diesel Engine**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Issue 12, 2015.
- [5] KSPG Automotive. **Steel pistons – The pressure rises**. MS Motorservice International GmbH. Disponível em:
<<http://mam.kspg.com/mc/epaper?guid=14c191931a36af2c>>. Acesso em: 14 Dezembro 2016.
- [6] KS Kolbenschmidt GmbH. **KS Mono-Block Steel Pistons for Commercial Truck Applications**. Disponível em: <http://cdn.rheinmetall-automotive.com/fileadmin/media/kspg/Broschueren/Produktbroschueren/KS_Kolbenschmidt/Kolben_Nkw/ko_pistonsteel_truck_e.pdf>. Acesso em: 14 Dezembro 2016.

[7] MAHLE. **TopWeld® steel pistons make passenger car diesel engines even more economical.** Stuttgart, 2011. Disponível em: <

<http://www.mahle.com/mahle/en/news-and-press/press-releases/topweld-steel-pistons-make-passenger-car-diesel-engines-even-more-economical.jsp>>. Acesso em: 14 Dezembro 2016.

[8] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna:** volume 1. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

[9] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna:** volume 2. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012.

[10] BRAIN, Marshall. **How Diesel Engines Work.** Disponível em: <<http://auto.howstuffworks.com/diesel.htm>>. Acesso em: 28 Dezembro 2016.

[11] MAHLE News Aftermarket. **Magazine for Trade, Workshop and Engine Repair.** 2015. Disponível em: < http://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-north-america/pdfs-&-thumbnails/aftermarket-news/issue1_2015.pdf>. Acesso em: 29 Dezembro 2016.

[12] WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio; DE MELLO, Fábio. **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2011.

[13] DE FREITAS, Paulo Sergio. **Tratamento Térmico dos Metais: Da teoria à prática.** São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.