

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE MOTORES CICLO OTTO SOB DIFERENTES REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO E TIPOS DE ÓLEO MULTIVISCOSO

Miguel Dias Brito¹, Rodolfo Alexandre Hildebrandt², Antonio Carlos Rodrigues³,
Adriana Giseli Leite Carvalho⁴

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise teórico-computacional dos fenômenos tribológicos em motores de combustão interna do ciclo Otto, com ênfase na influência da viscosidade do óleo lubrificante no desempenho do conjunto de mancais. O estudo baseou-se no motor Volkswagen EA827 1.8, considerando as condições típicas de operação e as propriedades físico-químicas de dois óleos multiviscosos amplamente utilizados: SAE 5W-30 e SAE 20W-50. Foram aplicados modelos clássicos da teoria da lubrificação hidrodinâmica, como o número de Sommerfeld e a equação de Petroff, para estimar parâmetros como espessura mínima do filme de óleo, excentricidade do eixo e regime de separação entre as superfícies metálicas. Os resultados indicaram que o aumento da viscosidade promove maior espessura do filme lubrificante e melhor capacidade de suporte de carga, reduzindo o risco de contato metal-metal, porém com aumento das perdas por atrito e redução da eficiência energética. Em contrapartida, óleos de menor viscosidade apresentam vantagens em eficiência mecânica e economia de combustível, embora com menor margem de segurança em condições extremas. Conclui-se que a escolha do lubrificante ideal deve equilibrar a proteção contra desgaste e a eficiência do sistema, considerando o estado do motor, as folgas operacionais, as condições térmicas e o regime de rotação predominante. O trabalho reforça a importância da aplicação dos conceitos tribológicos na engenharia automotiva como meio de otimizar desempenho, durabilidade e sustentabilidade dos motores modernos.

Palavras-chave: Tribologia; lubrificação hidrodinâmica; viscosidade; mancais; motores ciclo Otto.

¹ Autor: migueldb19@gmail.com

² Autor correspondente: rodolfo.hildebrandt@sistemafiep.org.br

³ Autor: antonio.rodrigues1@sistemafiep.org.br

⁴ Autor: adriana.carvalho@sistemafiep.org.br

Tribological Behavior of Otto Cycle Engines Under Different Lubrication Regimes and Types of Multigrade Oil

ABSTRACT

This work presents a theoretical-computational analysis of tribological phenomena in Otto cycle internal combustion engines, with emphasis on the influence of lubricant viscosity on the performance of the bearing assembly. The study was based on the Volkswagen EA827 1.8 engine, considering typical operating conditions and the physicochemical properties of two widely used multigrade oils: SAE 5W-30 and SAE 20W-50. Classical models of hydrodynamic lubrication theory, such as the Sommerfeld number and the Petroff equation, were applied to estimate parameters such as minimum oil film thickness, shaft eccentricity, and separation regime between metallic surfaces. The results indicated that increasing viscosity promotes greater lubricant film thickness and better load-bearing capacity, reducing the risk of metal-to-metal contact, but with increased friction losses and reduced energy efficiency. Conversely, lower viscosity oils offer advantages in mechanical efficiency and fuel economy, although with a smaller safety margin under extreme conditions. It is concluded that choosing the ideal lubricant should balance wear protection and system efficiency, considering the engine condition, operating clearances, thermal conditions, and prevailing engine speed. This work reinforces the importance of applying tribological concepts in automotive engineering as a means of optimizing the performance, durability, and sustainability of modern engines.

Key words: Tribology; Hydrodynamic lubrication; Viscosity; Bearings; Otto cycle engines.

1 INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna do ciclo Otto são amplamente utilizados em veículos leves devido à sua eficiência, desempenho e custo relativamente baixo. Esses motores operam por meio da queima controlada de uma mistura ar-combustível, acionando um conjunto de componentes mecânicos que trabalham em alta rotação e sob condições extremas de temperatura e pressão. Durante seu funcionamento, peças como pistões, anéis, cilindros, virabrequim e comando de válvulas estão em constante movimento relativo, muitas vezes em contato direto, o que pode gerar atrito excessivo, desgaste prematuro e perda de eficiência.

É nesse cenário que a tribologia — ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação entre superfícies em contato — desempenha um papel fundamental. A

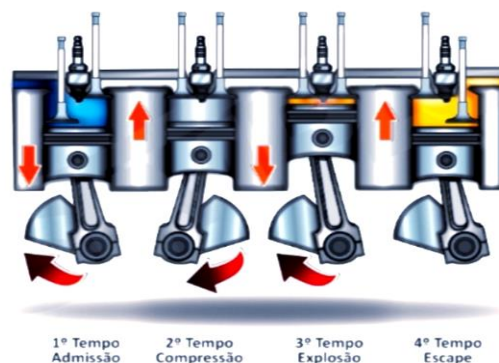
aplicação de conceitos tribológicos nos motores ciclo Otto permite otimizar o desempenho dos componentes móveis, reduzir perdas por atrito, minimizar o desgaste e aumentar a durabilidade do motor. Além disso, o uso adequado de lubrificantes e o desenvolvimento de materiais com melhores propriedades tribológicas são essenciais para garantir a confiabilidade e a eficiência energética dos motores modernos. O presente trabalho tem como objetivo geral analisar os impactos da utilização de óleos lubrificantes com especificações diferentes das recomendadas pelo fabricante no desempenho tribológico de motores de combustão interna do ciclo Otto, com ênfase no comportamento do tribossistema durante o momento da combustão, considerado o ponto mais crítico da lubrificação. Busca-se compreender de que forma variações na viscosidade, aditivação e classificação do óleo influenciam o regime de lubrificação, o atrito e o desgaste entre os componentes móveis, especialmente no conjunto de mancais, que está sujeito a elevadas cargas e temperaturas durante o funcionamento do motor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Funcionamento do motor ciclo Otto – os quatro tempos

Segundo Franco Brunetti (2012), nos motores de combustão interna que operam segundo o ciclo Otto, o pistão percorre seu curso total quatro vezes — correspondendo a duas voltas completas do virabrequim, ou seja, de 0° a 720° — para completar um ciclo termodinâmico completo. Esse ciclo é dividido em quatro fases distintas, conhecidas como tempos do motor: admissão, compressão, expansão e escape, os quais são representados na Figura 1.

Figura 1- Quatro tempos do motor ciclo Otto



Fonte: RABELO (2020)

Durante o tempo de admissão, que ocorre entre 0° e 180° do ciclo, o pistão se desloca do Ponto Morto Superior (PMS) para o Ponto Morto Inferior (PMI) com a válvula de admissão aberta. Esse movimento descendente gera uma região de baixa pressão no interior do cilindro, permitindo a entrada do ar ou da mistura ar-combustível, dependendo do sistema de alimentação do motor, seja por aspiração natural ou por injeção direta.

Em seguida, entre 180° e 360° , tem início o tempo de compressão, no qual ambas as válvulas permanecem fechadas enquanto o pistão retorna do PMI ao PMS. Esse deslocamento comprime a mistura presente na câmara de combustão, aumentando sua pressão e temperatura, preparando o ambiente para a ignição.

O terceiro tempo, conhecido como expansão ou explosão, ocorre entre 360° e 540° . Próximo ao PMS, inicia-se a combustão da mistura comprimida — através de uma faísca da vela de ignição nos motores a gasolina, ou por compressão seguida da injeção de combustível nos motores do ciclo Diesel. A rápida combustão libera grande quantidade de energia térmica, provocando um aumento brusco da pressão no cilindro, que empurra o pistão até o PMI. Este é o único tempo do ciclo no qual há conversão direta de energia térmica em trabalho mecânico útil.

Por fim, entre 540° e 720° , ocorre o tempo de escape. Com a válvula de escape aberta, o pistão se desloca novamente do PMI ao PMS, expulsando os gases resultantes da combustão através do coletor de escape, finalizando assim o ciclo.

2.2 Lubrificantes

De acordo com Carreiro e Belmiro (2005), os óleos para motor são desenvolvidos para desempenhar funções essenciais, como reduzir o atrito e o desgaste das peças móveis, possibilitar partidas rápidas em diferentes faixas de temperatura, evitar a formação de depósitos na câmara de combustão, prevenir ferrugem e corrosão, neutralizar os ácidos gerados durante a combustão, além de limpar o motor e colaborar com sua refrigeração. A eficácia com que essas funções são desempenhadas depende diretamente das propriedades físico-químicas do lubrificante, sendo a viscosidade uma das mais importantes. A introdução de aditivos químicos nos lubrificantes permite que essas propriedades sejam otimizadas, tornando o desempenho do óleo mais eficiente em condições variadas de operação. Para padronizar e facilitar a identificação e a escolha dos óleos por fabricantes, usuários e órgãos reguladores, foi criado um sistema de classificação que comunica de forma clara as informações sobre a qualidade dos óleos, possibilitando definições precisas para motores a gasolina e diesel, minimizando a necessidade de definições suplementares e permitindo a inclusão de novas categorias sem comprometer as já existentes.

Nesse contexto, a viscosidade, conforme descrito por Brunetti (2012), pode ser entendida como a força por unidade de área necessária para gerar um gradiente de velocidade unitário, ou, de maneira qualitativa, como a facilidade com que o óleo flui. Essa característica é fundamental para o desempenho do lubrificante, uma vez que influencia diretamente sua capacidade de formar uma película protetora entre as superfícies metálicas em movimento. Considerando duas superfícies paralelas separadas por uma camada de óleo lubrificante, a força requerida para manter uma delas em movimento constante depende da velocidade relativa, da área de contato e, inversamente, da espessura da película de óleo. Assim, o controle adequado da viscosidade é essencial para garantir o equilíbrio entre proteção contra o desgaste e eficiência energética, reforçando a importância da formulação correta dos óleos lubrificantes, conforme destacam os autores.

A película lubrificante pode apresentar múltiplas camadas com velocidades relativas distintas, variando da camada inferior, que adere à superfície inferior com velocidade nula, até a camada superior, que acompanha a velocidade da superfície

superior. Tendo isso em vista Carreteiro e Belmiro (2005), concluem que a viscosidade é uma das propriedades mais importantes dos lubrificantes e foi a base da primeira classificação de óleos de motor criada pela SAE em 1911. Desde então, o sistema evoluiu, incluindo revisões em 1923, 1933, 1950, 1955, 1962, 1967, 1974 e 1975, com a introdução de graus “W” para temperaturas baixas, óleos multiviscosos e ajustes nos métodos de medição, como o Cold Cranking Simulator (CCS), ou Simulador de Partida a Frio, e a HTHS (High Temperature, High Shear), traduzida como viscosidade em Alta Temperatura e Alto Cisalhamento. O CCS mede a viscosidade do óleo em baixas temperaturas e altas taxas de cisalhamento, simulando as condições de partida do motor em clima frio. Já a viscosidade HTHS avalia o comportamento do lubrificante sob altas temperaturas (em torno de 150 °C) e elevado cisalhamento, como ocorre nas regiões críticas do motor, como mancais e anéis de pistão. Esses dois indicadores são fundamentais para garantir que o óleo proporcione proteção adequada tanto durante a partida quanto em regime de operação contínua, assegurando desempenho, durabilidade e economia de combustível.

Essas modificações refletem a necessidade de garantir filmes de óleo estáveis em condições de alta temperatura e cisalhamento, além de acompanhar o desempenho de motores modernos em partidas a baixas temperaturas. A classificação SAE J300 continua sendo atualizada para atender às exigências de desempenho e normas complementares, como a MIL-PRF-2104G (A norma MIL-PRF-2104G é uma especificação militar dos Estados Unidos que define os requisitos de desempenho para óleos lubrificantes utilizados em motores a combustão interna, especialmente motores diesel e sistemas de transmissão em equipamentos militares. Ela estabelece parâmetros como viscosidade (incluindo HTHS e partida a frio via CCS), estabilidade térmica, resistência à oxidação, teor de cinzas, perdas por evaporação e proteção contra desgaste, garantindo desempenho confiável sob condições severas de operação. Essa padronização facilita a seleção e o fornecimento de lubrificantes compatíveis com as exigências operacionais das forças armadas).

De acordo com Carreteiro e Belmiro (2005), os óleos multiviscosos, também chamados de multigrado, são projetados para atender a mais de um grau de

viscosidade da classificação SAE, garantindo boa fluidez em baixas temperaturas e proteção adequada na temperatura de operação do motor. Ainda tendo em vista a análise dos autores, essa característica é obtida por meio de óleos com alto índice de viscosidade, que apresentam variações mínimas de viscosidade com mudanças de temperatura. Inicialmente considerados úteis apenas em regiões de clima frio, os óleos multiviscosos mostraram vantagens gerais, como a redução do desgaste das partes altas do motor, pois atingem essas regiões rapidamente durante a partida, evitando o contato prolongado metal-metal nos primeiros segundos de funcionamento. Um exemplo típico é o óleo 15W-40, que mantém fluidez a baixas temperaturas e apresenta viscosidade HTHS adequada a 150°C, desempenho que não seria alcançado por um óleo monograu. Já segundo Brunetti (2012), explica que a viscosidade de um óleo representa a força por unidade de área necessária para gerar um gradiente de velocidade entre camadas adjacentes do fluido, indicando, portanto, a maior ou menor facilidade com que o lubrificante escoar. Em um sistema composto por duas superfícies paralelas separadas por uma película de óleo, a força necessária para manter o movimento relativo é diretamente proporcional à velocidade e à área de contato, e inversamente proporcional à espessura da película lubrificante. O autor destaca ainda que a viscosidade dinâmica (ou absoluta) é uma propriedade intrínseca de cada lubrificante em determinada temperatura, aumentando à medida que a temperatura diminui e reduzindo-se quando está se eleva, influenciando de forma significativa o desempenho do sistema de lubrificação.

2.3 Tribologia: Conceitos fundamentais

A tribologia é definida como o estudo dos fenômenos relacionados ao atrito, desgaste e lubrificação entre superfícies em contato e em movimento relativo. Contudo, para compreender a real importância da tribologia, é essencial entender o que são, de fato, o atrito, o desgaste e a lubrificação. Segundo Carreteiro e Belmiro (2005), o atrito ocorre sempre que uma superfície se move em relação a outra, gerando uma força que se opõe a esse movimento — a chamada força de atrito.

Em determinadas aplicações, como nos sistemas de freios, o atrito é necessário e desejável, pois permite a frenagem e o controle do movimento. No entanto, na maioria dos sistemas mecânicos, o atrito é considerado um fenômeno indesejável, pois provoca a dissipação de energia sob forma de calor, reduz a eficiência do mecanismo e exige maior consumo de energia para vencer a resistência ao movimento.

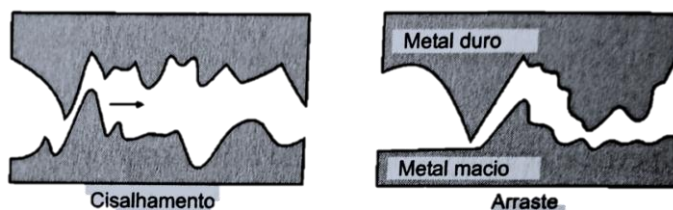
O atrito pode ser classificado em duas categorias principais: atrito sólido e atrito fluido. No caso do atrito sólido, há ainda duas subdivisões: o atrito de deslizamento, que ocorre quando uma superfície se desloca diretamente sobre outra em contato direto; e o atrito de rolamento, que acontece quando um corpo esférico ou cilíndrico rola entre duas superfícies. Nesta última situação, o atrito é consideravelmente menor, devido à menor área de contato entre os corpos e à substituição do deslizamento pelo rolamento.

Já no caso do atrito fluido, Carreteiro e Belmiro (2005) o descrevem como aquele que ocorre quando há uma camada fluida — seja gasosa ou líquida — separando as superfícies em movimento relativo. Essa camada interfacial é denominada lubrificante, e sua presença é fundamental para evitar o contato direto entre os corpos, reduzindo significativamente a resistência ao movimento e o desgaste.

Mas, afinal, o que causa o atrito? Mesmo superfícies aparentemente lisas, até as mais polidas, apresentam irregularidades microscópicas chamadas asperezas. De acordo com a obra *Lubrificantes e Lubrificação Industrial* (Carreteiro & Belmiro, 2005), existem duas causas principais para o atrito: cisalhamento e adesão.

O atrito por cisalhamento ocorre quando os picos das asperezas de duas superfícies entram em contato lateralmente, e a resistência ao movimento é determinada pela força necessária para romper essas microestruturas. Esse tipo de atrito pode se manifestar de duas formas conforme expresso na Figura 2: cisalhamento propriamente dito, quando as superfícies possuem durezas semelhantes, ou como arraste, quando uma das superfícies é significativamente mais dura do que a outra, funcionando como uma ferramenta de corte que desgasta ou deforma a superfície oposta.

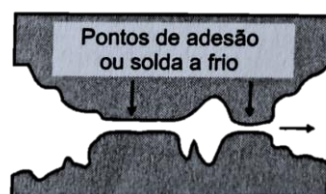
Figura 2 – Tipos de atrito por cisalhamento



Fonte: Carreteiro e Belmiro (2005)

Por outro lado, o atrito por adesão ocorre quando as superfícies em contato possuem áreas relativamente planas, ao invés de apenas picos. Nesses pontos de contato, pode haver a soldagem a frio entre as microáreas, formando ligações metálicas temporárias que oferecem resistência ao movimento. Esse mecanismo de atrito é, segundo os autores, o principal responsável pela resistência ao deslocamento em muitos sistemas tribológicos, sendo especialmente relevante em situações de contato metal-metal sem a presença de lubrificante adequado.

Figura 3 – Atrito por adesão



Fonte: Carreteiro e Belmiro (2005)

Um dos resultados do atrito é o desgaste, com isso podemos concluir que duas superfícies em movimento uma contra a outra sofrerão desgaste, o que se torna importante o conhecimento sobre os diversos tipos de desgaste e sua origem para que possam ser minimizados, onde compreender os diversos tipos de desgaste é essencial para identificar suas origens e adotar medidas eficazes de prevenção.

2.4 Importâncias da Tribologia em Sistemas Mecânicos

Ao projetar motores de combustão interna, é fundamental buscar a lubrificação mais eficaz possível para todos os componentes móveis, com o objetivo de minimizar o atrito e o desgaste, sem comprometer o meio ambiente. Essa tarefa, porém, é desafiadora, uma vez que os componentes do motor operam sob condições altamente variáveis de velocidade, carga e temperatura.

As perdas mecânicas por atrito têm impacto direto no desempenho e na eficiência do motor. Segundo Brunetti (2012), embora representem uma fração relativamente modesta da energia total liberada pela combustão, essas perdas consomem uma parcela significativa da potência útil disponível, especialmente em regimes de carga parcial, como os frequentemente encontrados em tráfego urbano. O autor estima que uma redução de 10% nas perdas por atrito pode levar a uma economia de até 3% no consumo de combustível, o que demonstra a importância de estratégias tribológicas eficientes no projeto de motores.

As maiores fontes de atrito dentro do motor estão concentradas no conjunto pistão–anéis–cilindro, nas bronzinas, nos eixos de válvulas, nos mancais e em componentes auxiliares como a bomba de óleo. Os mancais, em particular, são elementos essenciais no suporte rotativo de eixos e virabrequins, operando sob altas cargas e exigindo uma lubrificação adequada para evitar o contato metálico direto, que poderia acelerar o desgaste e comprometer a durabilidade do motor. Portanto, a seleção adequada de lubrificantes e o controle das condições operacionais são essenciais para reduzir as perdas por atrito e melhorar a eficiência energética do sistema.

2.5 Lubrificação dos motores

Brunetti (2012) destaca que o desempenho adequado de um sistema de lubrificação não depende apenas da presença do óleo em si, mas de um conjunto de fatores que atuam em equilíbrio. Entre eles estão a quantidade correta de lubrificante disponível no circuito, as propriedades físico-químicas do óleo como viscosidade, resistência à oxidação e capacidade de formar filme lubrificante, o acabamento das superfícies em contato, a escolha apropriada de materiais e suas respectivas durezas, além da definição precisa das folgas e da pressão específica de contato entre os componentes. Quando algum desses parâmetros não é respeitado, há maior probabilidade de falhas, como desgaste prematuro, aumento do atrito ou até mesmo a quebra de peças vitais.

Essa preocupação é reforçada pelo fato de que, nos motores modernos, predomina o sistema de lubrificação sob pressão, também conhecido como sistema de lubrificação forçada. Nesse modelo, uma bomba de deslocamento positivo garante a circulação do óleo sob pressão controlada, distribuindo-o de maneira eficiente para os principais pontos do motor. Entre os elementos beneficiados diretamente estão os mancais principais, as bielas, o topo dos pistões, o eixo comando de válvulas, os acessórios do motor e as engrenagens de sincronização.

Já as paredes dos cilindros, embora não recebam fluxo direto, são lubrificadas de forma indireta pelo óleo que escoava dos mancais principais. A adoção desse sistema justifica-se pela necessidade de assegurar que, mesmo em condições de altas rotações, elevadas cargas térmicas e pressões internas significativas, exista um filme lubrificante contínuo capaz de separar as superfícies metálicas em movimento relativo.

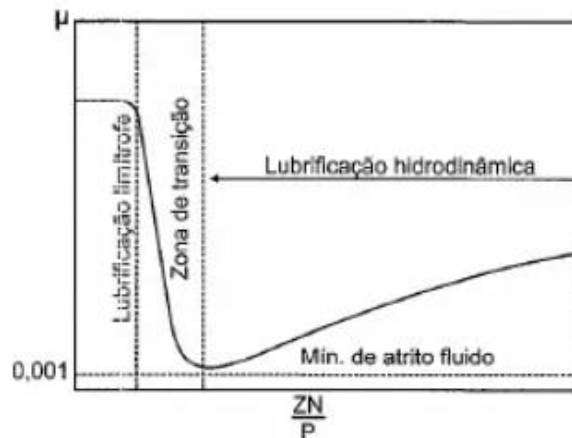
Dessa forma, o sistema de lubrificação sob pressão garante não apenas a redução do atrito e do desgaste, mas também auxilia na dissipação de calor, na limpeza de partículas e na proteção contra a corrosão. Portanto, a exigência de parâmetros rigorosos para o funcionamento adequado do sistema de lubrificação apontado por Brunetti (2012), encontra sua razão prática justamente no tipo de sistema amplamente utilizado nos motores atuais.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se em uma análise teórica dos fenômenos tribológicos presentes em motores de combustão interna do ciclo Otto, com ênfase no motor Volkswagen EA827 1.8. O foco principal foi o estudo dos mancais de apoio, considerados componentes críticos na redução de atrito e no suporte das cargas dinâmicas do virabrequim. Inicialmente, realizou-se uma revisão conceitual sobre tribologia, abordando os princípios de atrito, desgaste e lubrificação, bem como os regimes de lubrificação predominantes em mancais de deslizamento. Em seguida, aplicaram-se modelos matemáticos consagrados na literatura, como a

Equação de Petroff como demonstrado na Figura 4 e o Número de Sommerfeld, para estimar parâmetros como espessura do filme de óleo, coeficiente de atrito, torque resistivo e potência dissipada nos mancais.

Figura 4 – Representação gráfica da equação de Petroff



Fonte: Carreteiro e Belmiro (2005)

A Figura 4 expressa visualmente a equação de Petroff ao mostrar que o atrito hidrodinâmico cresce com o aumento do parâmetro, validando a dependência funcional prevista por essa equação clássica da tribologia. Já a Equação de Sommerfeld pode ser descrita por:

$$S = \left(\frac{r}{c}\right)^2 \cdot \frac{\mu \cdot N}{P}$$

onde r = raio do mancal, c = folga radial, μ = viscosidade dinâmica do óleo, N = velocidade de rotação e P = pressão média de carga.

Na primeira etapa do desenvolvimento deste trabalho, procedeu-se à definição dos principais parâmetros do sistema em estudo, com ênfase nas características geométricas dos mancais presentes no motor EA827 1.8. Foram considerados aspectos fundamentais como o diâmetro dos mancais, a folga radial entre o eixo e o mancal, bem como a largura dos componentes, parâmetros essenciais para a

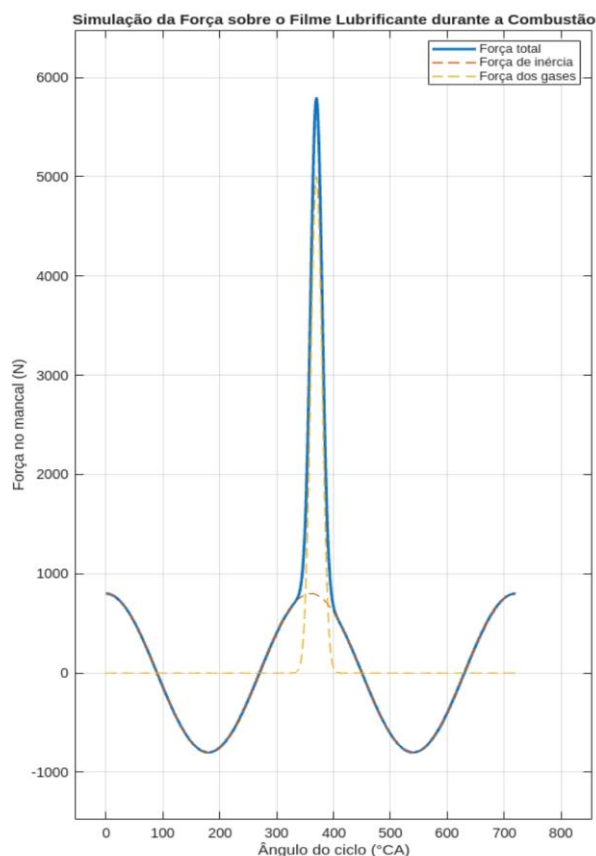
modelagem do regime de lubrificação hidrodinâmica e para a análise do desempenho tribológico do conjunto.

Além das dimensões geométricas, foram estabelecidas as condições operacionais típicas do motor, as quais incluem a rotação média de funcionamento, representando o regime mais frequente de operação, e a carga mecânica aplicada durante o funcionamento normal. Esses dados são cruciais para a avaliação da pressão de carga no mancal e para o dimensionamento do filme lubrificante, impactando diretamente na eficiência e na durabilidade do sistema.

Outro ponto de relevância nesta fase inicial foi a consideração das propriedades físico-químicas dos lubrificantes utilizados. Dentre essas propriedades, a viscosidade dinâmica foi tratada com destaque, uma vez que desempenha papel determinante na formação e manutenção do filme de óleo entre as superfícies em movimento relativo. A viscosidade foi analisada em diferentes temperaturas, considerando a variação térmica típica do funcionamento do motor, o que permite compreender o comportamento do lubrificante tanto em condições de partida a frio quanto em regime térmico estabilizado. Essa análise é fundamental para garantir que o lubrificante selecionado seja capaz de manter a integridade do filme lubrificante em diferentes cenários operacionais, evitando o contato metálico e minimizando o desgaste.

Durante o ciclo de funcionamento do motor, o conjunto pistão–biela–virabrequim está constantemente sujeito a variações de carga. Essas cargas se originam principalmente de dois fenômenos: a força de inércia gerada pela mudança de direção do pistão e a força provocada pela pressão dos gases no momento da combustão. Quando ocorre a queima da mistura, a pressão dentro da câmara aumenta de forma abrupta e intensa, transmitindo uma força significativa ao pistão, que por sua vez repassa essa carga ao mancal. Esse aumento repentino de força tende a comprimir o filme lubrificante, reduzindo momentaneamente sua espessura e exigindo maior capacidade de suporte hidrodinâmico. Portanto, compreender como essas cargas variam ao longo do ciclo é essencial para interpretar o comportamento do filme de óleo e identificar o ponto de maior sollicitação, que será evidenciado na Figura 5.

Figura 5 – Distribuição de força nos 720° do virabrequim



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O gráfico apresentado na Figura 5 mostra a força total aplicada ao filme lubrificante ao longo do ciclo de 720°, evidenciando como a carga no mancal varia conforme as fases do motor. Observa-se que as oscilações suaves são causadas pela força de inércia do pistão, enquanto um pico bastante elevado aparece próximo de 370° CA (CrankAngle ou ângulo do virabrequim), representando o momento da combustão, quando a pressão dos gases aumenta de forma abrupta e gera a maior força no mancal. Dessa forma, o gráfico permite visualizar claramente a combinação entre a carga dinâmica de inércia e o pico de força devido à combustão, destacando o ponto de maior exigência do filme lubrificante.

Na segunda etapa do estudo, procedeu-se à comparação entre dois lubrificantes multiviscosos com ampla aplicação em motores do ciclo Otto, com o objetivo de avaliar seus comportamentos em termos de desempenho tribológico e eficiência energética sob diferentes condições operacionais. Foram analisados os

óleos SAE 20W50 e SAE 5W30, cujas características reológicas apresentam diferenças significativas, especialmente em regimes de alta temperatura.

O óleo SAE 20W50, conforme a pode ser verificado na Figura 6 por apresentar maior viscosidade em temperaturas elevadas, é capaz de formar um filme lubrificante mais espesso entre as superfícies do mancal e do eixo. Essa espessura adicional do filme proporciona uma maior separação entre os elementos metálicos, favorecendo a proteção contra o desgaste e o funcionamento em regime puramente hidrodinâmico, mesmo sob cargas elevadas. No entanto, essa maior viscosidade também implica em um aumento das perdas por atrito hidrodinâmico, o que pode comprometer a eficiência mecânica do sistema, especialmente em regimes de rotação elevada ou durante partidas a frio, quando o óleo ainda não atingiu a temperatura ideal de operação.

Figura 6 – Especificações técnicas óleo 20W50

ENSAIOS	SAE	
	UNIDADES	20W-50
Densidade @ 20/4°C	g/cm ³	0,8790
Viscosidade Cinemática @ 40°C	cSt	155,8
Viscosidade Cinemática @ 100°C	cSt	19,25
Índice de Viscosidade	-	141
CCS @ -15°C	cP	5.000
Ponto de Fluidez	°C	-15
Ponto de Fulgor	°C	242
TBN	mg KOH/g	7,73

Fonte: Ipiranga (2018)

Por outro lado, o óleo SAE 5W30 apresenta menor viscosidade em regime de temperatura elevada, o que pode ser observado na Figura 7, favorecendo a redução do atrito interno do fluido e, conseqüentemente, das perdas por cisalhamento. Essa característica contribui para uma maior eficiência energética do motor, com menor consumo de combustível e melhor desempenho térmico. No entanto, a menor espessura do filme lubrificante torna este óleo mais suscetível ao contato limite entre as superfícies metálicas, especialmente em condições extremas de carga ou temperatura, exigindo maior rigor no controle das condições de operação e na integridade do sistema de lubrificação.

Figura 7 – Especificações técnicas óleo 5W30

ENSAIOS	SAE	5W30
	UNIDADES	
Densidade @ 20/4°C	g/cm ³	0,8520
Viscosidade Cinemática @ 100°C	cSt	9,76
Viscosidade Cinemática @ 40°C	cSt	57,14
Índice de Viscosidade	-	157
CCS @ -30°C	cP	5.414
Ponto de Fluidez	°C	-39
Ponto de Fulgor	°C	224
TBN	mg KOH/g	7,22

Fonte: Ipiranga (2018)

Essa comparação evidencia o clássico dilema entre proteção e eficiência, enquanto lubrificantes mais viscosos favorecem a durabilidade do sistema, os de menor viscosidade tendem a melhorar o desempenho energético. A escolha do lubrificante ideal, portanto, deve considerar o equilíbrio entre esses fatores, em função do perfil de uso do motor, das condições ambientais e dos requisitos de desempenho específicos do projeto.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para analisar o comportamento do filme lubrificante em mancais de motores sob diferentes condições de viscosidade, foi realizada uma investigação teórico-computacional utilizando dados representativos do mancal principal de um motor Volkswagen EA827 1.8. O objetivo principal da análise foi compreender como a variação do tipo de óleo, especificamente entre os lubrificantes SAE 5W-30 e SAE 20W-50, influencia parâmetros fundamentais da lubrificação hidrodinâmica, como a espessura mínima do filme de óleo (h_{min}), a excentricidade do eixo (e) e a estabilidade do regime de separação das superfícies metálicas.

Foram considerados valores típicos de operação para este motor, como raio do mancal de 53,958 mm, folga radial de 0,02 mm, rotações de 1200 rpm, 3000 rpm e 6000 rpm com pressão média de operação em torno de $1 \cdot 10^6$ Pa. A partir dessas

condições, foi possível realizar cálculos com base em quatro diferentes valores de viscosidade dinâmica (μ), representando diferentes estados térmicos e tipos de óleo: 0,00832 Pa·s (5W-30 a quente), 0,0169 Pa·s (20W-50 a quente), 0,0487 Pa·s e 0,1369 Pa·s (representando condições de óleo mais viscoso, como em partidas a frio). A análise foi conduzida por meio da aplicação da teoria da lubrificação hidrodinâmica, considerando o número de Sommerfeld como parâmetro de referência para avaliar o regime de operação e os efeitos da viscosidade sobre o filme lubrificante.

Os resultados obtidos evidenciaram uma clara correlação entre o aumento da viscosidade do óleo e o espessamento do filme de lubrificação. Para o óleo 5W-30, que apresenta a menor viscosidade entre os analisados ($\mu = 0,00832$ Pa·s), foi verificada uma espessura mínima de filme de 0,0092 mm. Já o óleo 20W-50, com viscosidade de 0,0169 Pa·s, gerou uma espessura de 0,0118 mm. À medida que a viscosidade aumentou, foram observados valores ainda maiores de h_{\min} , atingindo 0,0149 mm e 0,0169 mm para viscosidades de 0,0487 e 0,1369 Pa·s, respectivamente. Isso demonstra que óleos mais viscosos possuem maior capacidade de gerar pressão dentro da cunha lubrificante, proporcionando uma separação mais robusta entre as superfícies do mancal e do virabrequim.

Outro efeito observado foi a diminuição da excentricidade do eixo em função do aumento da viscosidade. Para o óleo menos viscoso, a excentricidade relativa calculada foi de 0,54, indicando que o eixo opera mais próximo da parede do mancal. Com o aumento da viscosidade, esse valor foi gradualmente reduzido, chegando a 0,16 no caso da maior viscosidade avaliada. Isso confirma que o fluido mais espesso proporciona maior força hidrodinâmica, o que contribui para centralizar o eixo dentro do mancal, reduzindo o risco de contato metal-metal e aumentando a estabilidade do sistema.

Em todas as situações analisadas, o número de Sommerfeld manteve-se dentro da faixa característica do regime de lubrificação hidrodinâmica plena, ou seja, não houve perda de contato fluido, mesmo com o uso do óleo de menor viscosidade. No entanto, a espessura reduzida do filme no caso do 5W-30 representa uma menor margem de segurança, principalmente diante de condições críticas, como elevação de temperatura, aumento de folgas devido ao desgaste ou elevação da carga

aplicada. Isso significa que, embora o óleo de menor viscosidade seja capaz de manter o regime hidrodinâmico sob condições normais, sua capacidade de resposta a variações extremas é mais limitada.

A comparação entre os óleos 5W-30 e 20W-50 evidencia um equilíbrio técnico entre eficiência e robustez. O óleo 5W-30, por apresentar menor viscosidade, oferece menor resistência ao escoamento interno, resultando em menores perdas por atrito e, conseqüentemente, em maior eficiência mecânica. Esse comportamento é vantajoso principalmente em motores modernos, projetados com folgas menores e sistemas de lubrificação otimizados, além de favorecer a rápida circulação do óleo logo após a partida do motor, especialmente em climas frios. Entretanto, essa menor viscosidade também implica uma menor espessura de filme lubrificante, o que pode ser problemático em motores com folgas elevadas ou sob condições de carga e temperatura severas.

Por outro lado, o óleo 20W-50, com viscosidade aproximadamente duas vezes maior na temperatura de operação, proporciona uma espessura de filme superior, garantindo maior capacidade de suporte de carga e melhor proteção contra desgaste. Isso o torna mais adequado para motores antigos, que já apresentam aumento natural das folgas devido ao uso prolongado, e para veículos que operam em condições mais severas, como altas temperaturas ou uso intenso. No entanto, esse tipo de óleo acarreta perdas por atrito maiores, maior dificuldade de circulação em temperaturas baixas e, por consequência, maior demanda energética para bombeamento e movimento interno, o que pode comprometer a eficiência do motor.

Um aspecto crítico observado na análise é a influência da temperatura na viscosidade do óleo. A viscosidade tende a diminuir com o aumento da temperatura, o que afeta diretamente a espessura do filme lubrificante. Assim, em condições térmicas elevadas, mesmo um óleo mais viscoso pode apresentar comportamento semelhante ao de um óleo mais fino, caso sua viscosidade caia excessivamente. Por isso, é imprescindível que a escolha do óleo leve em conta não apenas sua viscosidade nominal, mas também sua estabilidade térmica, capacidade de manter propriedades sob variações de temperatura e sua adequação ao estado e à aplicação do motor.

Dando continuidade à análise, foram considerados casos adicionais nos quais houve variação da rotação do eixo do virabrequim, mantendo-se combinações de viscosidade dinâmica e velocidade distintas. Os resultados extraídos foram dessa análise de variação de rotação e viscosidade podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Especificações Resultados extraídos após análise matemática

Temp.	Tipo de óleo	Raio M. (mm)	Viscosidade dinâmica	Pressão (Pa)	Folga R (mm)	RPM	Número de Sommerfeld	Razão de excentricidade	Espessura de óleo (h-min)
40°C	20W50	53,958	0,1369	1,00E+06	0,02	1200	19,9289	0,156	0,0168
100°C	20W50	53,958	0,0169	1,00E+06	0,02	1200	2,4601	0,411	0,0117
40°C	5W30	53,958	0,0487	1,00E+06	0,02	1200	7,0894	0,256	0,0148
100°C	5W30	53,958	0,00832	1,00E+06	0,02	1200	1,2111	0,5406	0,0091
40°C	20W50	53,958	0,1369	1,00E+06	0,02	3000	49,8224	0,0997	0,018
100°C	20W50	53,958	0,0169	1,00E+06	0,02	3000	6,1504	0,2742	0,01451
40°C	5W30	53,958	0,0487	1,00E+06	0,02	3000	17,7235	0,1656	0,01668
100°C	5W30	53,958	0,00832	1,00E+06	0,02	3000	3,0279	0,3765	0,01247
40°C	20W50	53,958	0,1369	1,00E+06	0,02	6000	99,6449	0,0707	0,0185
100°C	20W50	53,958	0,0169	1,00E+06	0,02	6000	12,3009	0,1976	0,016
40°C	5W30	53,958	0,0487	1,00E+06	0,02	6000	35,447	0,1179	0,0176
100°C	5W30	53,958	0,00832	1,00E+06	0,02	6000	6,0558	0,2762	0,0144

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

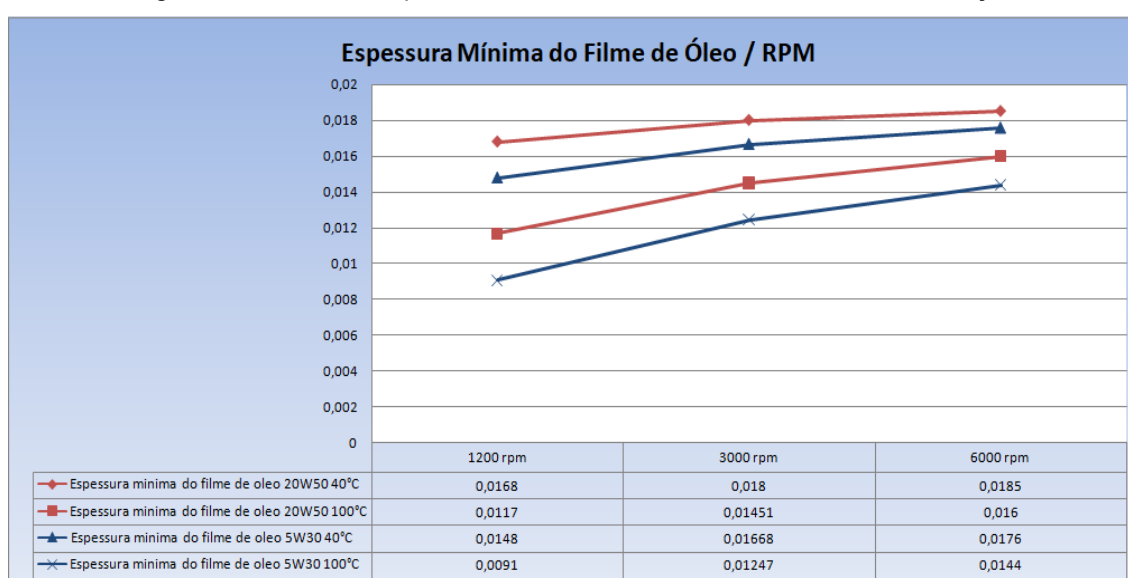
Esses novos dados, confirmam e ampliam as observações anteriores: tanto a viscosidade quanto a rotação afetam diretamente o número de Sommerfeld, que por sua vez regula a espessura do filme lubrificante e a posição do eixo no mancal.

Ao comparar dois casos com mesma rotação (6000 rpm) e diferentes viscosidades, percebe-se que o aumento de μ de 0,0169 para 0,0487 Pa·s elevou o h_{min} de 0,016047 mm para 0,017641 mm, reduzindo a excentricidade de 0,1976 para 0,1179. Isso demonstra que, mesmo em regimes de rotação elevados, a viscosidade continua a influenciar a espessura do filme, embora o ganho incremental tenda a diminuir – um efeito de saturação relativo. Portanto, em altas rotações, a velocidade já contribui significativamente para a formação do filme hidrodinâmico, permitindo que óleos menos viscosos ainda ofereçam proteção suficiente, desde que a folga e a rugosidade superficial estejam dentro de limites adequados.

Por outro lado, quando se observa a influência isolada da rotação, mantendo a viscosidade constante ($\mu \approx 0,00832$ Pa·s), nota-se que o aumento da velocidade de 1200 rpm (caso inicial) para 3000 rpm resultou em incremento significativo de h_{min}

— de aproximadamente 0,0092 mm para 0,012471 mm conforme pode ser verificado na Figura 9 — e uma diminuição da excentricidade. Isso evidencia que a rotação do motor tem papel fundamental na sustentação do filme de óleo. Motores que operam frequentemente em faixas de rotação mais elevadas tendem a manter filmes mais espessos e estáveis, com menor risco de transição para regimes de lubrificação mista, desde que as demais variáveis operacionais estejam controladas.

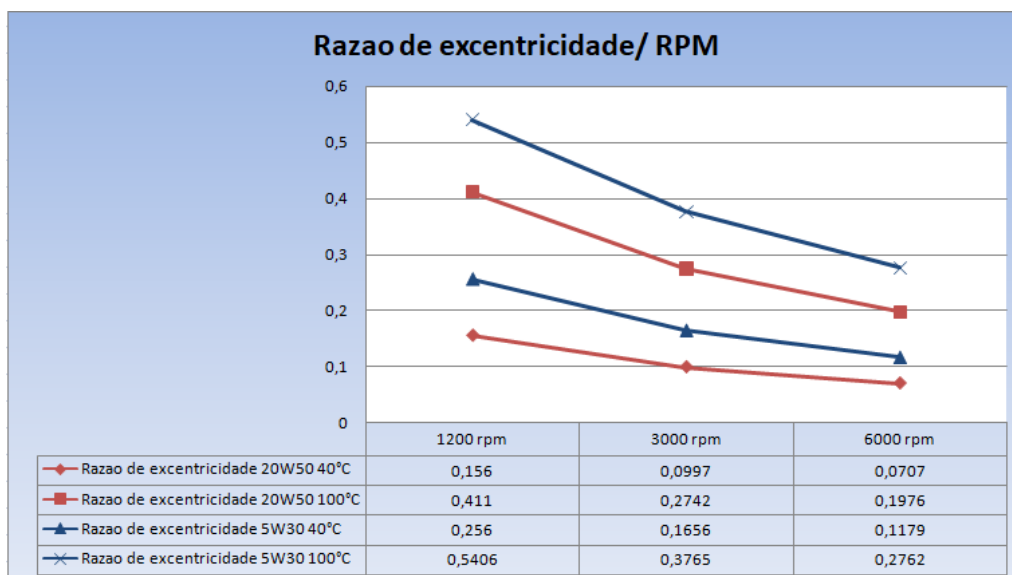
Figura 9 – Gráfico comparativo do filme de óleo com o aumento da rotação



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A excentricidade acompanha esse comportamento conforme podemos verificar na Figura 10, valores maiores, como 0,3765 para $S \approx 3$, indicam que o eixo se aproxima do mancal, reduzindo a folga efetiva e aumentando o risco de contato direto. Em contrapartida, excentricidades menores, como 0,1179 para $S \approx 35$, refletem um eixo mais centralizado e um regime de lubrificação mais seguro, com pressão hidrodinâmica mais distribuída e uniforme. Em termos práticos, isso significa menor probabilidade de desgaste localizado ou de falhas por atrito excessivo.

Figura 10 – Queda da excentricidade com o aumento do RPM



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Do ponto de vista de projeto e manutenção, as implicações são claras: em condições de uso com rotação moderada ou baixa, como marcha lenta ou condução urbana intensa, a utilização de um óleo com maior viscosidade operacional (como o 20W-50 em regime quente) amplia a espessura mínima do filme e aumenta a margem de segurança contra falhas por contato direto. Essa medida é especialmente relevante em motores mais desgastados, com folgas aumentadas. Por outro lado, em uso com rotação elevada, típico de condução em estrada ou condução esportiva, a própria rotação favorece a formação de um filme espesso, e, portanto, óleos com menor viscosidade como o 5W-30, podem garantir a separação adequada das superfícies, ao mesmo tempo em que reduzem perdas por atrito e melhoram a eficiência global do sistema.

Em situações de partida a frio, mesmo motores que operam com segurança em regime pleno podem apresentar h_{min} reduzido durante os primeiros momentos de funcionamento. Isso se deve à alta viscosidade inicial do óleo e à demora na sua distribuição completa. Nesse contexto, torna-se importante a escolha de um óleo com boa fluidez em baixas temperaturas (baixo índice “W”) e capacidade de rápida formação do filme protetor.

Por fim, embora todos os casos avaliados tenham permanecido dentro do regime de lubrificação hidrodinâmica plena, a margem de segurança representada por h_{min} — e pela razão $\lambda = h_{min}/\sigma$, onde σ é a rugosidade combinada — variou

significativamente entre os ensaios. Para aplicação prática, recomenda-se o cálculo dessa razão usando dados reais de rugosidade das superfícies envolvidas. Valores de λ superiores a 3–5 geralmente indicam separação segura com baixa chance de contato, a análise mostra que a variação de rotação altera de modo importante a espessura do filme, mas a viscosidade continua sendo uma variável-chave para definir a margem de proteção.

A escolha entre 5W-30 e 20W-50 deve, portanto, ser feita com base no estado do motor - folgas, no regime de operação predominante - baixa ou alta rotação, e nas exigências por eficiência versus robustez.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida neste estudo permitiu compreender de forma aprofundada a influência da viscosidade do óleo lubrificante sobre o comportamento tribológico dos mancais em motores de combustão interna do ciclo Otto. Através da comparação entre os lubrificantes SAE 5W-30 e SAE 20W-50 aplicados ao motor Volkswagen EA827 1.8, foi possível verificar que a viscosidade atua como um fator determinante na formação do filme de óleo e na estabilidade do regime de lubrificação hidrodinâmica.

Os resultados demonstraram que o óleo 20W-50, por possuir maior viscosidade, gera um filme lubrificante mais espesso e uma menor excentricidade do eixo, proporcionando melhor proteção contra desgaste e maior capacidade de suporte de carga. No entanto, esse comportamento vem acompanhado de aumento nas perdas por atrito e menor eficiência energética. Por outro lado, o óleo 5W-30, de menor viscosidade, apresentou espessura de filme reduzida, porém favoreceu a diminuição das perdas mecânicas, melhorando o rendimento global do sistema. Dessa forma, verifica-se que a escolha do lubrificante deve ser feita com base em um equilíbrio entre proteção e eficiência, levando em conta o estado de desgaste do motor e as condições de uso predominantes.

A variação da rotação também se mostrou um parâmetro relevante, uma vez que o aumento da velocidade de operação contribui para o espessamento do filme hidrodinâmico e a centralização do eixo, reduzindo o risco de contato entre superfícies. Em contrapartida, em regimes de baixa rotação ou durante partidas a frio, o controle da viscosidade e da fluidez do óleo é essencial para garantir a lubrificação adequada.

Conclui-se que a aplicação dos princípios da tribologia e da lubrificação hidrodinâmica é fundamental para o aprimoramento do desempenho e da durabilidade dos motores automotivos. O estudo reforça que o entendimento detalhado do tribossistema — composto por materiais, lubrificante, geometria e condições de operação — é indispensável para o desenvolvimento de motores mais eficientes e confiáveis. Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a realização de experimentos práticos e simulações térmicas dinâmicas para avaliar o comportamento real do filme de óleo sob variações transientes de carga e temperatura, ampliando a aplicabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 07 set 2025.

CARRETEIRO, Ronald P.; BELMIRO, Pedro Nelson A. **Lubrificantes e lubrificação industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), [2006].

CONAREM – **Conselho Nacional de Retíficas de Motores**. Catálogo técnico de medidas e especificações de motores nacionais: motor Volkswagen AP. São Paulo: CONAREM, [2025].

IPIRANGA F1 MASTER SINTÉTICO 5W30 SN (2018)

PIRANGA F1 MASTER PROTECTION 20W50 SL (2018)

RABELO, Laerte. **Motor Ciclo Otto: entenda o funcionamento**. 19 jun. 2020.