




MODELAGEM DE ATRITOS CAME-TUCHO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

 <https://doi.org/10.56238/levv16n48-051>

Data de submissão: 14/04/2025

Data de publicação: 14/05/2025

Leandro de Amorim Ratamero

Departamento de Engenharia Mecânica e Energia (DEMEC), Instituto Politécnico (IPRJ),
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
lratamero@iprj.uerj.br

Damiano da Silva Militão

Departamento de Engenharia Mecânica e Energia (DEMEC), Instituto Politécnico (IPRJ),
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
dmilitao@iprj.uerj.br

RESUMO

Os motores de combustão interna perdem significativa parcela de energia devido aos atritos no sistema came-tucho, impactando diretamente na eficiência energética e nas emissões de poluentes. Este artigo apresenta uma revisão sistemática dos modelos tribológicos aplicados a essa interface, destacando abordagens teóricas e computacionais para prever perdas por atrito. São analisados modelos elastohidrodinâmicos (EHL), efeitos dinâmicos multicorpos, influência de rugosidade superficial e aditivos lubrificantes (como ZDDP e MoDTC), além de condições termomecânicas críticas (*flash temperature*, *start-up*). Conclui-se que, embora os avanços recentes tenham aprimorado a compreensão do fenômeno, persiste a necessidade de um modelo unificado que integre parâmetros geométricos, tribológicos e térmicos. Tal ferramenta seria essencial para o desenvolvimento de motores energeticamente mais eficientes, alinhados às demandas globais de sustentabilidade.

Palavras-chave: Tribologia. Came-tucho. Motores de combustão interna. Modelagem EHL. Eficiência energética.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, empresas e governos vêm se esforçando para alcançar maior eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o consumo de combustível dos motores de combustão interna de automóveis continua sendo um importante tópico de estudo. A redução das perdas parasitárias de energia é uma contribuição valiosa para a melhoria geral da eficiência dos veículos. Um pequeno ganho no consumo de combustível, mesmo que seja de 1% em relação aos níveis atuais, é uma grande conquista [1].

Os diversos sistemas que compõem um motor de combustão interna possuem superfícies deslizantes lubrificadas em contato, a fonte de atrito interno. Cada par de superfícies móveis contribui para as perdas totais de energia do motor. Nestes motores, o sistema de pistões é a maior fonte de perdas por atrito, respondendo por cerca de 50% das perdas totais por atrito [2].

O sistema comando de válvulas é responsável por grande parte das perdas por atrito. Ele pode ser responsável por até 25% das perdas por atrito em um motor de combustão interna, em frequências de rotação do motor abaixo de 2.000 rpm [3].

Nesse contexto, é muito importante o comportamento tribológico do sistema came-tucho. Para minimizar o atrito e evitar problemas devido ao desgaste neste contato, é necessário o conhecimento sobre os fenômenos envolvidos e a sua modelagem. Para ajudar os pesquisadores a encontrarem referências sobre o tema, apresenta-se este trabalho de revisão.

2 METODOLOGIA

As interações tribológicas entre came e tucho, em motores de combustão interna, são essencialmente de natureza elasto-hidrodinâmica (EH), em especial nas interações nariz de came – tucho.

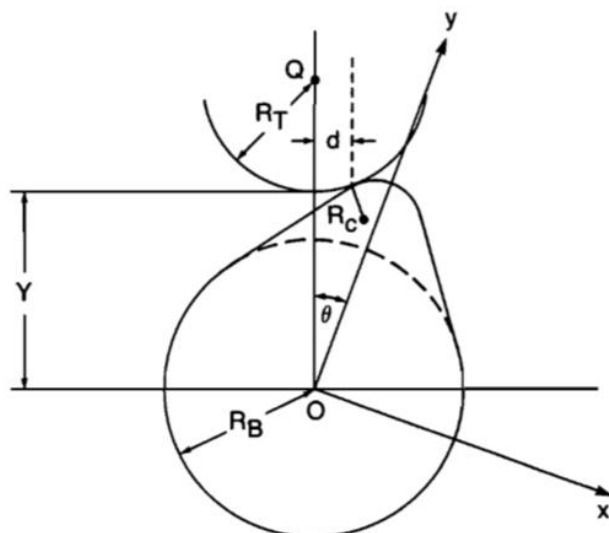
Os atritos entre came e tucho costumam ser os mais severos num motor de combustão interna.

Neste contexto, vários pesquisadores desenvolveram modelos no intuito de prever/descrever os atritos entre came e tucho. A sistemática dessa revisão foi conduzida com base em artigos publicados entre 1992 e 2018. Os critérios de inclusão priorizam estudos com modelagem matemática e computacional do contato camé-tucho, validação experimental e aplicação em motores reais.

2.1 UM MODELO MISTO EH COM CONSIDERAÇÃO DE SPIN DE TUCHO

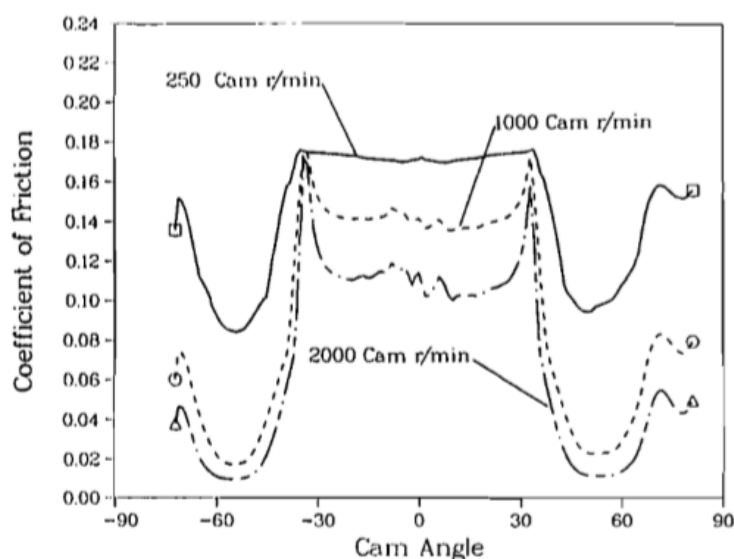
Gecin (1992) descreveu um modelo de contato elasto-hidrodinâmico elíptico, predizendo a espessura de filme de lubrificante, sob pressões Hertzianas, para os contatos came-tucho em vários ângulos de contato, conforme exhibe a Figura 1. Raios de coroa de tucho são considerados.

Figura 1 – Contatos Came-Tucho, Configuração Geométrica de Gecin. Extraído de [4].



A despeito do visível pequeno raio de coroa de tucho (R_T), na Figura 1, os raios de coroa de tucho, em geral, são muito grandes. No caso das simulações de Gecin, $R_T = 1,65\text{m}$. Para descrever as forças de atrito came-tucho, ele montou um modelo misto capaz de descrever as forças de atrito com a variação típica de carregamentos do sistema, que inclui efeitos de *squeeze* de filme (resolvendo uma equação de Reynolds unidimensional), *flash temperature* (por um fator de correção térmica), de *spin* de tucho (considerando atritos tucho-guia) e contatos de asperezas, por Greenwood and Tripp. A separação dos planos em contato é adotada como a espessura de filme lubrificante nominal [4]. Gecin obteve que os atritos de natureza hidrodinâmica são função da viscosidade do lubrificante e da temperatura do filme no contato, que por sua vez é dependente dos atritos totais e que é fracamente dependente das cargas aplicadas. Em termos de coeficientes de atrito, Gecin obteve os resultados exibidos na Figura 2.

Figura 2 – Contatos Came-Tucho, Configuração Geométrica de Gecin. Extraído de [4].

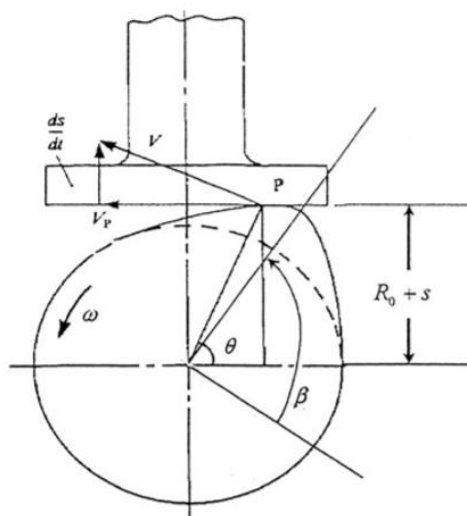


Observa-se uma redução dos coeficientes de atritos entre came e tucho, para grau zero de came, com o seu aumento da velocidade de rotação.

2.2 UMA SOLUÇÃO COMBINADA MULTI-CORPOS EH COM CONTATO EM LINHA LUBRIFICADO

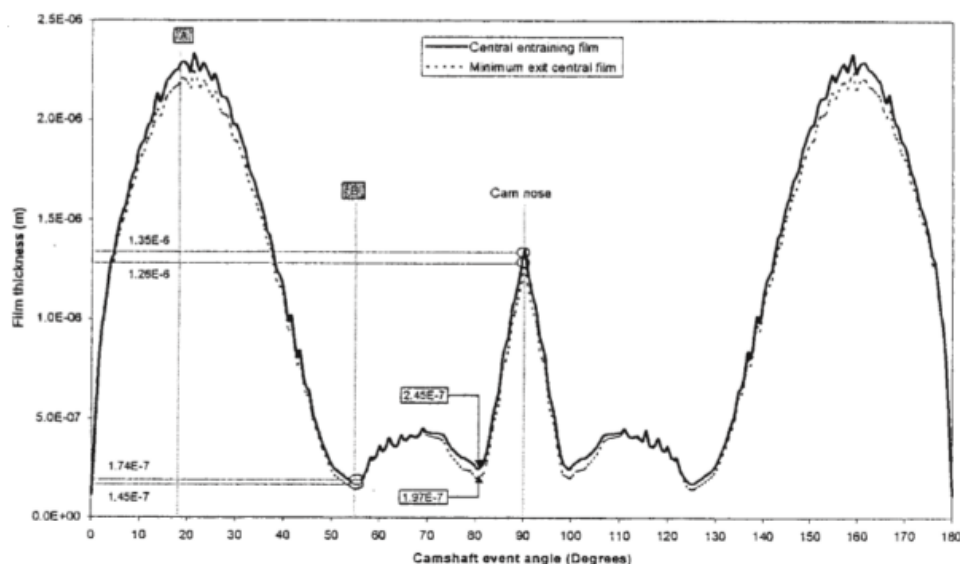
Kushwahu e Rahnejat (2002) apresentaram uma solução combinada de dinâmica multi-corpos de um sistema came-tucho, em condições lubrificadas, com contato em linha EH, um contato não conforme concentrado. O estudo é baseado em contato came – tucho *flat*, conforme exhibe a Figura 3.

Figura 3 – Contatos Came-Tucho *flat*, Configuração Geométrica de Kushwahu. Extraído de [5].



Um estudo cinemático/dinâmico é efetuado, no sentido de reconhecer as acelerações e as forças inerciais envolvidas nos movimentos de *lift* de tucho, por efeito do contato com o perfil de came. O came é adotado como rígido e é ignorado o *spin* de tucho. Kushwahu e Rahnejat afirmam: “*Na prática, o problema é muito mais complexo e muito complicado de ser formulado em termos matemáticos.*” Para as equações de movimento, do sistema trem de válvulas, utilizou-se uma abordagem multi-corpos, baseada na dinâmica Lagrangeana [5]. O contato came-tucho é tratado como uma junção de contato em linha, elastohidrodinâmica. Quando ocorre o levantamento do came, o contato com o tucho é submetido a um movimento combinado de *sliding* e compressão. A espessura do filme lubrificante, a distribuição gerada da pressão do lubrificante e a reação do lubrificante são descritas em cada etapa do tempo utilizando-se a equação de Reynolds na sua forma normalizada. São considerados efeitos reológicos da densidade do lubrificante (Dowson e Higginson) e alterações de viscosidades (por Roelands). As equações obtidas são resolvidas por métodos numéricos Newton-Raphson e simulações foram realizadas. O tempo total de computação foi de 600h, em uma máquina Pentium III, 850MHz, para um ciclo de came (0,02s, com came girando a 3000RPM). Para as espessuras de filme lubrificante, ao longo de vários ângulos de came, foram obtidos os resultados exibidos na Figura 4.

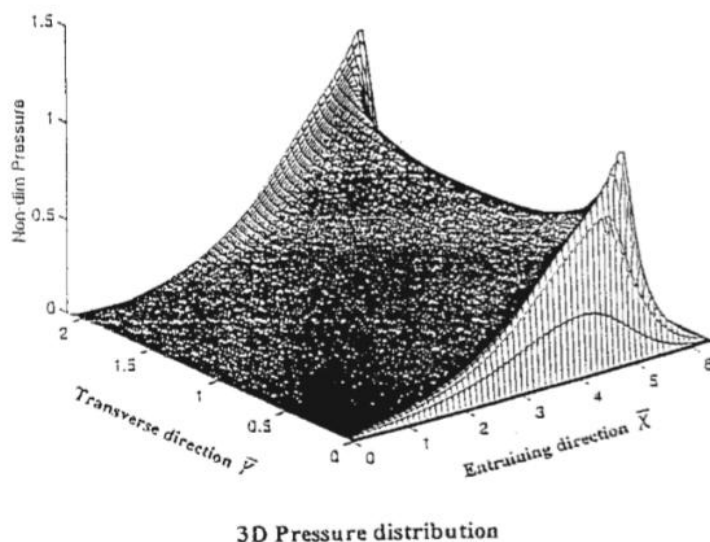
Figura 4 – Espessuras de Filme Lubrificante Obtidas pelas Simulações de Kushwahu. Extraído de [5].



Observa-se, para ângulo de came 90 graus, uma espessura de filme lubrificante de aproximadamente $1,3 \cdot 10^{-6} \text{m}$.

Um dos interessantes resultados obtidos neste trabalho consiste numa descrição de pressões de contato entre came e tucho, para ângulo de came 90 graus (Cam nose na Figura 4). Conforme exibe a Figura 5. O contato tem caráter elasto-hidrodinâmico, segundo o autor.

Figura 5 – Campo de Pressões no Contato a 90 graus de Came. Extraído de [5].



Nota-se um forte “efeito de borda”, indicando maior probabilidade de contatos limítrofes nestas regiões.

2.3 UMA SOLUÇÃO COMBINADA MULTI-CORPOS EH COM CONSIDERAÇÕES DE ATRITOS TUCHO *FLAT* – GUIA

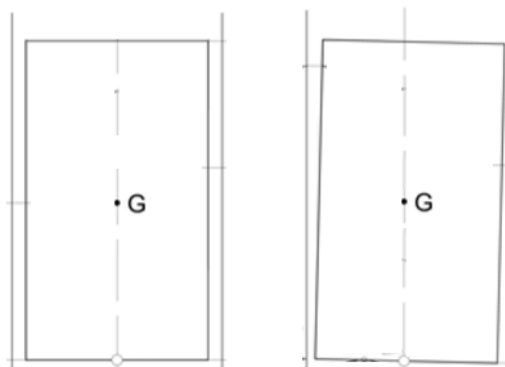
Teodorescu e Taraza (2004) investigaram as condições tribológicas entre came e tucho *flat*, levando em conta as características dinâmicas multicorpos, o comportamento elasto-hidrodinâmico do contato, e o *spin* de tucho, com modelagem tribológica dos atritos tucho-guia [6]. Eles apresentam um modelo simplificado de forças de atrito came-tucho e validam os seus resultados via medições em um motor mono-cilindro diesel. Teodorescu e Tanaza descrevem três modelos, que são incorporados a uma análise multi-corpos:

- Um modelo came-tucho de atritos;
- Um modelo tucho-guia de atritos;
- Um modelo de *spin* de tucho;

Estes modelos são acoplados.

O modelo tucho-guia de atritos compreende três regimes tribológicos, a saber, atritos hidrodinâmicos, atritos mistos e atritos limítrofes. Estes regimes surgem da consideração de *tilting* de tucho, conforme descrito na Figura 6, um diagrama de corpo livre do tucho.

Figura 6 – Diagrama de Corpo Livre de Tucho em Guia – *Tilting*. Extraído de [6].



Realizando considerações de equilíbrios de forças e momentos, Teodoreco e Taraza montaram um sistema de equações de equilíbrio que descrevem de forma acurada a dinâmica do tucho, com consideração de *tilting*. O modelo came-tucho de atrito, regido principalmente pelo *sliding* do nariz do came com o tucho (aproximadamente 60% da operação de válvulas), é descrito como a soma de uma força de atrito de origem piezo-viscosa e uma força de atrito de origem limítrofe. As forças de atrito limítrofes são descritas pelo clássico modelo de Greenwood e Tripp, e as forças piezo-viscosas são descritas pela relação descrita na Equação 1.

$$F_V = 0,99[\tau_0 A + \chi(P_a - p)]$$

Eq.1

onde

F_V é a força piezo-viscosa;

τ_0 é a tensão de Eyring;

A é a área de contato de Hertz;

X é a taxa de variação na tensão cisalhante com a pressão;

P_a é a força normal de contato came-tucho;

p é o carregamento de asperezas;

O modelo de spin de tucho é baseado em equilíbrio de torques atuantes no tucho e oferece respostas em velocidades angulares obtidas por integração numérica das acelerações angulares deste. Como resultado, Teodorescu e Taraza conseguiram descrever, de forma satisfatória, as velocidades de spin de tucho e as forças de atrito tucho-guia, para algumas velocidades rotacionais de came diferentes. Teodorescu e Taraza, neste trabalho, não apresentam resultados totais de atritos came-tucho. Eles afirmam que “*investigações adicionais devem ser realizadas para determinar a influência da rotação do came na força de atrito came-tucho, considerando um contato em linha bi-dimensional.*”

2.4 PREDIÇÃO DE ATRITOS CAME-TUCHO POR MODELO EH COM CONSIDERAÇÃO DE TEXTURAS DE SUPERFÍCIES

Zhou e Richadson (2002) desenvolveram um modelo EH para análises gerais de interações came-tucho [7]. O modelo prevê espessura de filme lubrificante, forças de atrito, perdas energéticas, e os efeitos das texturas de superfícies. Eles utilizaram uma equação de Reynolds unidimensional, modificada por Patir e Cheng, para contatos rugosos, obtendo espessuras de filme lubrificante e apresentaram uma equação de força total de atritos came-tucho, Equação 2.

$$F_R = \tau_0 A_C + \alpha_0 W_a + D_C \int (\tau_1 + \tau_2) dx \quad \text{Eq.2}$$

onde

F_r é a força de atrito total came-tucho;

τ_0 e α_0 são constantes;

A_C é dependente das espessuras de filmes lubrificantes e rugosidades;

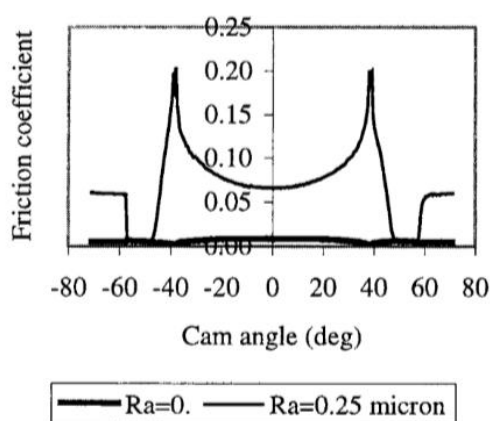
W_a é o carregamento de asperezas;

D_C é a largura do came;

τ_1 e τ_2 são equações diferenciais dependentes de vários parâmetros como: espessura de filme lubrificante, fatores de tensões cisalhantes, etc.

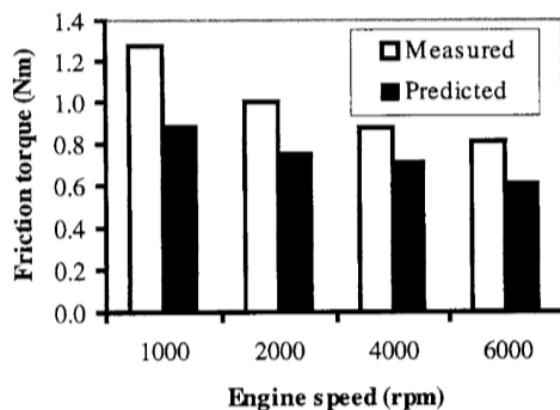
Zhou e Richardson desenvolveram um código (Multipol) para a determinação de parâmetros cinemáticos de came e de tucho, cujos *outputs* foram lidos por outro código, desenvolvido por Dowson e Toyoda (CTM99) na determinação iterativa de espessuras de filme lubrificante, forças de atrito, perdas energéticas. Eles realizaram um estudo de caso, com parâmetros similares aos encontrados no sistema came-tucho de um motor V8. O lubrificante de referência foi Texaco SN5W30. Obtiveram, dentre outros resultados, os seguintes coeficientes de atrito, para duas diferentes rugosidades. Figura 7.

Figura 7 – Coeficientes da Atrito Came-Tucho para duas Rugosidades. Extraído de [7].



Para perdas energéticas, Zhou e Richardson cruzaram informações a respeito de torque resistente de eixo de cames, para um motor V8, obtidos via modelo e obtidos via medição direta. Figura 8. Eles observaram que os valores preditos são sempre menores, e atribuíram a superioridade dos dados medidos às perdas hastes de válvula / guia e mancais de came, interações não previstas no modelo. Os comportamentos dinâmicos da válvula e da mola também podem contribuir para a diferença entre os valores medidos e previstos, uma vez que a energia potencial na mola, quando as válvulas estão totalmente abertas, não será totalmente recuperada quando as válvulas fecham.

Figura 8 – Torques Resistentes Modelo x Medidos. Extraído de [7].



2.5 MODELAGEM AVANÇADA DE SISTEMAS CAME-TUCHO

Nos últimos anos, alguns trabalhos foram publicados, no que se refere às forças de atrito came-tucho. Em geral, estes trabalhos baseiam-se nos modelos apresentados nos itens anteriores, com adições e/ou modificações que comportam outros fenômenos, até então não considerados.

Meng, Yuand e Xie (2018) investigaram o desempenho de lubrificação do contato came-tucho durante o *start-up* do motor. Eles estudaram os efeitos do isolamento térmico do revestimento no desempenho da lubrificação, os processos de partida, os processos de produção de carvão e o aquecimento. Um modelo numérico para a análise da lubrificação elasto-hidrodinâmica térmica de contato de came-tucho revestido é apresentado [8].

Paouris, Rahmani, Theodossiades, Rahnejat, Hunt e Barton (2016) apresentaram um modelo de atrito analítico, prevendo o coeficiente de atrito em contatos elastohidrodinâmicos. O efeito do aquecimento por *inlet shear heating* e *starvation* é considerado no modelo de atrito desenvolvido [9].

Roshan, Priest, Neville, Morina e Xia (2018) alertam que estudos recentes mostraram que os modelos existentes de fricção do trem de válvulas não são capazes de prever com segurança o atrito em condições de lubrificação limitrofe e mista e não são sensíveis à química do lubrificante. Uma técnica de regressão linear múltipla foi utilizada para obter um modelo de atrito na lubrificação de contorno a partir de dados de atrito retirados de testes de tribômetro. O modelo foi desenvolvido empiricamente em função da concentração de ZDDP, MoDTC, detergente e dispersante no óleo e na análise de velocidade de deslizamento. O modelo de atrito resultante é sensível à química do lubrificante na lubrificação nas interações limitrofes [10].

Umar, Mufti e Khurram (2018) descreveram o desenvolvimento de uma abordagem numérica baseada em análises de atrito lubrificado came-tucho, predizendo efeitos de *flash temperature* e seus efeitos [11].

3 CONCLUSÕES

Uma parte importante dos estudos e pesquisas na área de minimização de perdas energéticas nos motores de combustão interna é a modelagem das interações came-tucho, em especial com consideração de atritos entre o came e o tucho.

Nos sistemas came-tucho vários fatores, geométricos, dinâmicos, tribológicos, de materiais, etc, afetam os resultados obtidos por estes modelos, que consideram estes fatores parcialmente.

Interações elastohidrodinâmicas mistas entre came e tucho já foram modeladas levando-se em consideração: *spin* de tucho, abordagem multi-corpos com contato em linha lubrificado, texturas de superfícies em contato, isolamento térmico do revestimento no desempenho da lubrificação, processos de partida, processos de produção de carvão, características térmicas de contato, aquecimento por *inlet*

shear heating e *starvation* considerando-se concentração de ZDDP, MoDTC, detergente e dispersante no óleo e velocidade de deslizamento, assim como considerações de *flash temperature* e seus efeitos.

Entretanto, ainda hoje, carece-se de uma modelagem abrangente, completa e unificada, em termos de características e variáveis gerais dos contatos came-tucho, no intuito de descrever de forma analítica os atritos entre came e tucho, o que serviria de importante ferramenta de engenharia de motores de combustão interna energeticamente mais eficientes.

REFERÊNCIAS

- [1] WONG, V. W.; TUNG, S. C. Overview of automotive engine friction and reduction trends - Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. *Friction*, v. 4, n. 1, 2016. DOI: 10.1007/s40544-016-0107-9.
- [2] JOHANSSON, S. et al. Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact. *Wear*, v. 271, n. 5-6, p. 625-633, 2011. DOI: 10.1016/j.wear.2010.08.028.
- [3] SCHAMEL, A. R. et al. Amorphous carbon coatings for low friction and wear in bucket tappet valvetrains. *SAE Technical Paper*, n. 970004, 1997.
- [4] GECIM, B. A. Tribological study for a low-friction cam/tappet system including tappet spin. *Tribology Transactions*, v. 35, n. 2, p. 225-234, 1992. DOI: 10.1080/10402009208982112.
- [5] KUSHWAHU, M.; RAHNEJAT, H. Transient elastohydrodynamic lubrication of finite line conjunction of cam to follower concentrated contact. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 35, 2002.
- [6] TEODORESCU, M.; TARAHA, D.; HENEIN, N. A. Simplified elasto-hydrodynamic friction model of the cam-tappet contact. *SAE Technical Paper*, n. 2003-01-0985, 2003. ISSN 0148-7191.
- [7] ZHOU, Q.; RICHARDSON, S. H. Friction prediction of a cam-tappet interface using an EHL model with consideration of surface texture. In: DOWSON, D. et al. (Ed.). *Boundary and Mixed Lubrication: Science and Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2002. p. 345-356.
- [8] MENG, X. et al. Thermal insulation effect on EHL of coated cam/tappet contact during start up. *Industrial Lubrication and Tribology*, v. 70, n. 6, p. 917-926, 2018.
- [9] PAOURIS, L. et al. An analytical approach for prediction of elastohydrodynamic friction with inlet shear heating and starvation. *Tribology Letters*, v. 64, n. 10, 2016. DOI: 10.1007/s11249-016-0740-5.
- [10] ROSHAN, R. et al. A boundary lubrication friction model sensitive to detailed engine oil formulation in an automotive cam/follower interface. *Journal of Tribology*, v. 133, p. 042101-1, 2018.
- [11] UMAR, M. et al. Effect of flash temperature on engine valve train friction. *Tribology International*, 2018. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.09.030.