

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO REVESTIMENTO FeCrNiMo FABRICADO POR LASER METAL DEPOSITION SOB DESLIZAMENTO LUBRIFICADO COM ÓLEOS HIDRÁULICOS BIODEGRADÁVEIS

Éddie Magnus da Luz¹

Richard de Medeiros Castro²

Resumo: Para melhorar o desempenho e reduzir o consumo de energia em máquinas, a correta seleção de óleos lubrificantes e das superfícies de contato se faz necessária. Por essa razão, a engenharia de superfície vem propondo novas técnicas de deposição e revestimentos, aos quais seu comportamento tribológico ainda não são totalmente conhecidos, como é o caso da utilização de fluidos biodegradáveis em sistemas hidráulicos. Neste sentido, o presente trabalho analisa o comportamento do óleo mineral - HLP e dos óleos biodegradáveis - HEPR e HETG, submetidos a um deslizamento com pinos confeccionados em PTFE e Al₂O₃, contra um substrato plano revestido com FeCrNiMo pelo processo de Laser Metal Deposition. Este processo vem se revelando uma alternativa interessante na substituição do cromo duro que tem mostrado efeitos negativos a saúde humana. Para avaliar o desempenho desta combinação de lubrificantes biodegradáveis com superfícies de menor impacto ambiental, realizou-se ensaios de deslizamento em um tribômetro pino sobre o disco, modificando as cargas, com o intuito de avaliar os regimes de lubrificação e o desgaste. Os testes apresentaram que os valores médio dos coeficientes de atrito foram de $\mu_{\text{HETG}} = 0,072$, $\mu_{\text{HLP}} = 0,026$, $\mu_{\text{HEPR}} = 0,011$ com os regimes de lubrificação bem definidos. A espessura mínima de filme h_{min} foi 12 % e 55 % maior para os óleos HLP e HEPR em relação ao HETG, respectivamente. Na análise do desgaste, nota-se que as maiores concentrações de aditivos Zn e P, encontrados no HEPR, reduziram o dano na superfície. Os principais mecanismos de desgaste identificados na superfície da liga FeCrNiMo foram de riscamento, microtrinca, microsulco e destacamento. Também o maior volume removido do revestimento foi com o uso do óleo vegetal HETG, cerca de 41 % a mais do que o HEPR.

Palavras-chave: Consumo de energia. Laser Metal Deposition. FeCrNiMo. Óleo biodegradável. Desempenho Tribológico.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas hidráulicos ganharam uso em larga escala nos processos de fabricação industrial, sendo quase indispensáveis para o acionamento de máquinas e na fabricação de peças. A confiabilidade e durabilidade destes sistemas dependem, entre outros, do material de fabricação dos componentes e do fluido utilizado.

¹Graduando em Engenharia Mecânica. e-mail: eddiemagnusl@gmail.com

²Prof. Msc. Richard de Medeiros Castro. e-mail: richard.castro@satc.edu.br

Para melhorar as propriedades das superfícies de contato destes componentes, como a resistência contra o desgaste, a corrosão e a minimização do coeficiente de atrito, é necessário o uso de uma técnica de deposição com revestimento específico. A técnica adequada, bem como a seleção do revestimento proporcionam um acréscimo significativo na vida útil dos equipamentos e componentes industriais. A deposição feita por Laser Metal Deposition, utiliza uma fonte de energia - o próprio laser, junto ao material de adição - fio ou pó, para depositar uma camada fina de metal em um substrato a partir de condições de deposição bem definidas. A mesma tem sido explorada e utilizada na indústria como processo de substituição a outros métodos, que apresentam altas taxas de porosidades e problemas de ligação, como é o caso da eletrodeposição de cromo duro.

Simultaneamente a isto, mesmo dispondo de uma superfície com alto nível de resistência ao desgaste, a utilização de lubrificação se torna indispensável para manter uma vida útil mais prolongada dos componentes. Nos sistemas hidráulicos, o óleo mineral é consumido em larga escala na indústria devido a seu baixo custo. Entretanto, a utilização destes é extremamente prejudicial em caso de derramamento, tendo em vista que apenas um litro de óleo mineral demora mais de 250 anos para se degradar e causa danos praticamente irreversíveis a 1 milhão de litros de água (CONAMA, 2005). Neste âmbito, uma das soluções para modificar este quadro de degradação é a substituição dos óleos minerais por óleos biodegradáveis, seja tanto para lubrificação de sistemas quanto para transmissão de força.

Deste modo, será realizada uma pesquisa do comportamento tribológico de materiais utilizados na construção de componentes hidráulicos. Onde os ensaios se realizaram em um tribômetro do tipo pino sobre o disco, utilizando um óleo de base mineral (HLP) e outros dois biodegradáveis (HEPR e HETG). O disco foi fabricado em aço 1045, revestido com FeCrNiMo pelo processo de Laser Metal Deposition, enquanto a ponta esférica do pino, foi confeccionado em PTFE e em Al_2O_3 . Para a validação e compreensão dos aspectos tribológicos, ou seja, coeficiente de atrito (COF), desgaste, serão utilizados modelos matemáticos retirados da literatura e do ensaio ASTM G99 adaptado para condições lubrificadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRIBOLOGIA

A interação entre superfícies em movimento e seus assuntos relacionados é denominada Tribologia. Tendo como foco principal o atrito, desgaste e a lubrificação (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005 apud FARIAS, 2016). Holmberg et al. (2014) descreve que a implementação de soluções tribológicas existentes podem reduzir de 10 a 20 % a perda de eficiência em elementos, onde mais de 18 % de toda a energia produzida no mundo é usada para superar a degradação gerada pelo atrito.

O contato entre superfícies durante um movimento, produzem uma força contrária ao sentido dele, este fenômeno é conhecido como força de atrito, apresentando como principal característica a dissipação da energia cinética resultando na redução da vida útil da peça e na perda de eficiência da máquina (ALVES, 2018).

Salamanca (2018) traz que em bombas centrífugas submersas (BCS) para bombeamento de petróleo, a força de degradação por atrito é muito elevada, resultando não só em partes internas desgastadas, mas também a carcaça da bomba devido a qualidade de fluido bombeado. Buettner et al. (2019) descreve que por conta do atrito, é gerado atrasos no movimento do êmbolo dos atuadores resultando na perda de eficiência e na redução considerável na vida útil. Viersma (1980) apud Cesconeto (2018) enfatiza que a força de atrito, pode provocar em cilindros hidráulicos uma perda média da energia em mais de 13 %.

Para favorecer a diminuição do atrito, é crucial o uso de lubrificação que se entende por um processo/técnica, que tem por finalidade reduzir a pressão gerada entre as superfícies a partir da introdução de uma nova substância entre as mesmas, podendo ser líquida, gasosa ou até sólida (PANCHAL et al., 2017). Em vista disso, Stachowiak e Batchelor (2005) apud Castro et al. (2019) citam que para ser investigado os regimes de lubrificação é necessário determinar algumas variáveis. Uma delas, é a pressão média de contato entre disco e pino, descrita na Eq. 1:

$$P_{\text{media}} = \frac{F_n}{\pi \cdot a^2} \quad [N/m^2] \quad (1)$$

Fundamentado no conceito de pressão de Hertz o raio “ a ” é determinado a partir da Eq. 2:

$$a = \left(\frac{3 \cdot F_n \cdot R'}{E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [m] \quad (2)$$

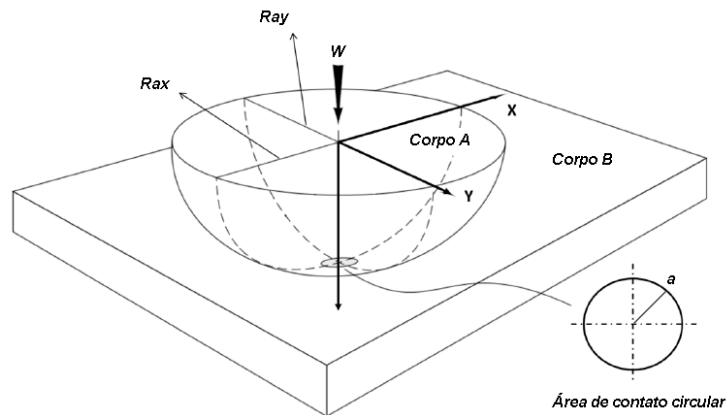
Onde E' e R' são o módulo de Young e o raio de curvatura, sendo definidas pelas Eq. 3 e Eq. 4, nesta ordem:

$$E' = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_2(1 - \nu_1^2) + E_1(1 - \nu_2^2)} \quad [N/m^2] \quad (3)$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad [m] \quad (4)$$

Se tratando de um sistema pino e disco, a Fig. 1 ilustra o raio de curvatura nas direções X e Y.

Figura 1: Raio de curvatura.



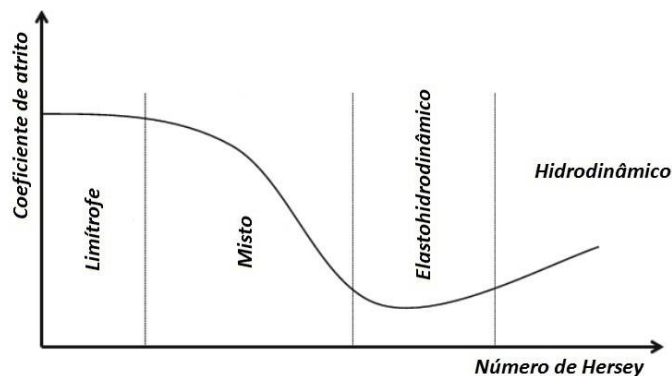
Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2001)

Sendo o raio da esfera atuante no tribômetro o valor de $R_x = R_y$. Com a finalidade de se estabelecer a espessura do filme lubrificante para regime EHD (elastohidrodinâmico) uma das expressões mais reconhecidas é a descrita da Eq. 5 para contatos circulares (HAMROCK et al., 2004).

$$\frac{H_{\min}}{R'} = 3,63 \cdot \left(\frac{U_e \cdot n_0}{E' \cdot R'} \right)^{0,68} \cdot (\alpha \cdot E')^{0,49} \cdot \left(\frac{F_n}{E' \cdot R'^2} \right)^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68k}) \quad [\mu m] \quad (5)$$

De acordo com Tsuha (2015) atribui-se o valor 1,0 ao parâmetro k para contatos pontuais/elípticos, tendo em vista que esta área de contato é muito pequena quando comparada à dimensão dos corpos. Em vista disso, é necessário investigar os regimes de lubrificação em relação ao atrito, e uma das ferramentas mais utilizadas é a Curva e Stribeck, ilustrada conforme a Fig. 2 (CREPALDI JUNIOR, 2017).

Figura 2: Curva de Stribeck.



Fonte: Adaptado de Chong e La Cruz (2014)

Estas curvas são encontradas em algumas configurações de eixos, uma delas é em seu eixo das ordenadas apresentar o coeficiente de atrito e no eixo das abscissas o número de Hersey. Número este, calculado com a Eq. 6 (SAGBAS, 2016).

$$H_s = \frac{n_0 \cdot U_e}{P_{\text{media}} \cdot \sigma_{\text{RMS}}} \quad [adm] \quad (6)$$

Tendo como base a curva de Stribeck, Fig. 2, é possível definir em qual regime de lubrificação o equipamento está inserido. A região intitulada EHD (elastohidrodinâmica) ocorre pela deformação elástica entre as superfícies em contato com a compreensão da geração de pressão que acontece no fluido, promovendo assim a separação das superfícies por um filme lubrificante mínimo (PABLO, 2019).

Tallian (1967) apud Grabarski (2019) menciona que baseado na teoria do regime elastohidrodinâmico, um parâmetro que leva em consideração esta variação de filme lubrificante em relação a rugosidade dos materiais em interação, é o parâmetro de filme. Podendo ser calculado através da Eq. 7.

$$\lambda = \frac{h_{\text{min}}}{\sigma_{\text{RMS}}} \quad [adm] \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

Desse modo, o parâmetro de filme (λ), interage com a curva de Stribeck e com os regimes de lubrificação. A Eq. 8, por sua vez, representa as rugosidades médias quadráticas entre o disco e a esfera. Szucs et al. (2015) ressalta que um parâmetro igualmente essencial para ser levado em consideração em relação ao lubrificante é a viscosidade cinemática, calculada a partir da Eq. 9.

$$\mu = \mu_0 e^{(\alpha \cdot p)} \quad [m^2/s] \quad (9)$$

Portanto, a viscosidade não é um valor fixo durante todo o sistema, ela é dependente da pressão de operação e do coeficiente de pressão-viscosidade (α). Dessa maneira, o uso de lubrificantes se torna essencial para evitar problemas como o desgaste (SILVA, 2018).

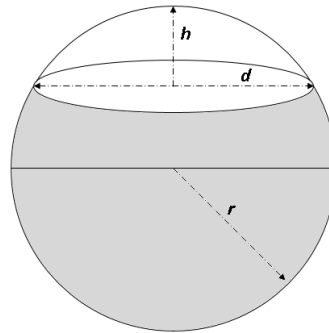
2.2 DESGASTE

O desgaste é a principal causa de perda de material em componentes industriais. Está associado ao atrito, desempenho mecânico, propriedades da superfície do material e as características do material abrasivo (UPADHYAY e KUMARASWAMIDHAS, 2014).

2.2.1 Desgaste no pino

Castro et al. (2019) explica que um dos métodos para se determinar o coeficiente de atrito indiretamente usando um tribômetro - pino no disco - é por meio da divisão da força de atrito pela força normal do pino, empregando as definições de Coulomb e Amontons. A Fig. 3 ilustra o diâmetro de desgaste (d) gerado em um pino/esfera. Suas dimensões, são determinadas a partir das medidas tomadas por meio de um microscópio ótico. Com isto, para se determinar o volume removido do pino/esfera é preciso, primeiramente, calcular a altura perdida da esfera (h) conforme Eq. 10 (NEUBER, 2017).

Figura 3: Semiesfera de desgaste.



Fonte: Adaptado de Castro et al. (2019)

$$h = r - \left(r^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad [m] \quad (10)$$

Segundo Zhang et al. (2019) o volume removido, Q , é então calculado de acordo com a Eq. 11.

$$Q = \pi \cdot h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \quad [m^3] \quad (11)$$

Diante disso, faz-se um somatório dos volumes removidos para a determinação do coeficiente de desgaste K , conforme o modelo de Archard. Exibido na Eq. 12 (CASTRO et al., 2019).

$$\sum_{i=1}^n Q_i = K \cdot \left(\sum_{i=1}^n F_{n_i} \cdot S_i \right) \quad [mm^3] \quad (12)$$

Sendo o somatório a variável dependente - volume removido - e a variável independente a multiplicação da força pela distância.

2.2.2 Desgaste no disco

Apontada pela norma, uma equação mais elaborada, que indica a perda de volume é apresentada na Eq. 13. É conveniente o uso da mesma, desde que o desgaste do disco seja excessivamente superior ao do pino (NEUBER, 2017).

$$V_{\text{disco}} = \frac{\pi \cdot R \cdot w_{\text{disco}}}{3 \cdot d} \quad [mm^3] \quad (13)$$

Se a largura da pista dividida pelo raio da esfera for menor que 0,30, então a Eq. 17 terá uma incerteza de 1 %. Caso esta razão for maior que 0,30 e menor que 0,80 a incerteza será de 5 % (ASTM G99, 2004).

2.3 ENGENHARIA DE SUPERFÍCIE

A ciência que estuda a modificação da microestrutura e/ou da composição de uma área com o intuito de torná-las mais homogêneas para atender a certas exigências, é denominada engenharia de superfície (GACHOT et al., 2017).

Aliado a isto, tem-se como principais técnicas de revestimento: a deposição química de vapor - CVD, deposição física de vapor - PVD, soldagem a arco, aspersão térmica - HVOF, eletrodeposição e o laser metal deposition - LMD (TORRES, 2015; CRUZ, 2018).

2.3.1 LMD - Laser Metal Deposition

Segundo Li et al. (2018) o LMD é uma técnica de recobrimento de superfície utilizada para depositar revestimentos através de um feixe de luz laser, normalmente, de alta potência. A forma de alimentação mais utilizada neste processo é por pó. Onde este mesmo pó é empurrado por meio de um gás, com auxílio de um cabeçote de geometria definida até a poça de fusão na superfície do substrato (AHMED et al., 2015). A Fig. 4 exibe uma aplicação desta técnica.

Figura 4: Aplicação de Laser Metal Deposition.



Fonte: Adaptado de Hornet (2018)

Conforme Pereira (2017), as características do pó depositado variam de acordo com a liga e o sistema de cabeçote utilizado. O autor explana também sobre o cuidado especial para com a morfologia e a granulometria do pó, que se não levado em consideração poderá acarretar problemas de entupimento nos canais de alimentação e no cabeçote. Atualmente, encontram-se alguns modelos comerciais de cabeçotes, um deles é o cabeçote coaxial contínuo.

Convergindo com feixe laser, o material de adição é depositado de forma coaxial, gerando um cone em relação a parte focal dele. Sua vantagem está em um cordão depositado de grande resolução e sua utilização podendo ser feita nas três dimensões (POPRAWA, 2011). A Tab. 1 exibe parâmetros comumente utilizados no processo LMD.

Tabela 1: Parâmetros laser.

Parâmetros	Valores	Unidade
Potência do laser	200 - 4000	W
Diâmetro do feixe	0,6 - 8	mm
Velocidade de avanço	200 - 2000	mm/min
Taxa de deposição do pó	0,5 - 30	g/min
Vazão do gás	2 - 15	L/min
Tipo de gás	He e Ar	-----

Fonte: Adaptado de Poprawe (2011)

Kaiming et al. (2016) afirma que um dos fatores que se deve levar em consideração na deposição a laser, é a taxa de diluição. Sendo calculada através da Eq. 14.

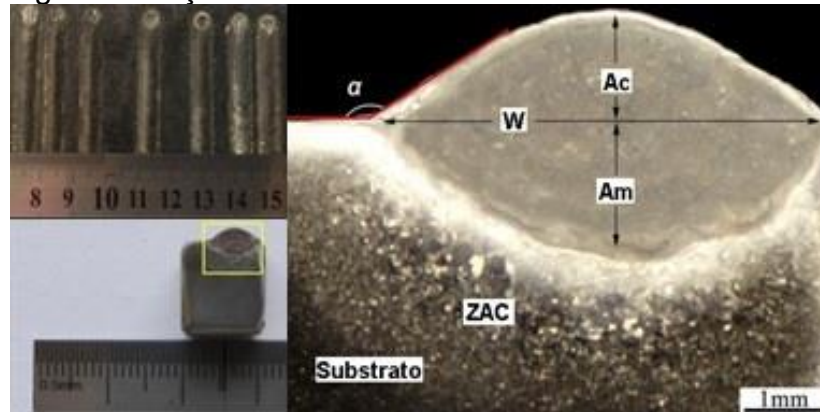
$$D_{\%} = \frac{A_m}{A_m + A_c} \cdot 100 \quad [\%] \quad (14)$$

Que se entende pela solvência do material de deposição - revestimento - no substrato. Segundo Liu, K. et al. (2015) os dados de entrada para o cálculo da diluição, são extraídos a partir de imagens da seção transversal apresentada na Fig. 5. É possível realizar o diagnóstico e comprovar uma boa qualidade de ligação metalúrgica (adesão metalúrgica) entre substrato e revestimento, e a não existência de rachaduras (trincas) e/ou vazios.

Dados do fabricante Höganäs (2018) trazem que com uma taxa de diluição em aproximadamente 5 % utilizando um substrato de aço, a liga base ferro - FeCrNiMo

- apresenta os seguintes valores de dureza em relação a temperatura. Os números são apresentados na Tab. 2.

Figura 5: Seção transversal.



Fonte: Adaptado de Liu, K. et al. (2015)

Tabela 2: Dureza da liga diluída em 5%.

Temperatura [°C]	Dureza [HV ₅]
Ambiente	620
200	520
300	500
400	490
500	480

Fonte: Adaptado de Höganäs (2018)

Estes dados concedem a liga as propriedades de alta resistência ao desgaste e uma boa resistência ao impacto. Para o teste de corrosão, o fabricante Höganäs (2018), simulou o teste considerando uma haste de cilindro hidráulico com diluição próxima de 9 % e uma espessura de revestimento em torno de 0,50 mm. O teste foi aplicado conforme a norma ISO 9227 NSS apresentando uma superfície brilhante e sem corrosão após 5000 horas de pulverização de sal.

Diante disso, além de garantir boas características de revestimento, a liga à base de ferro - FeCrNiMo - também possui propriedades ambientalmente eficientes se comparado ao cromo duro. Muito utilizado para revestir hastes de cilindros devido a seu baixo coeficiente de atrito, porém a sua utilização em altos níveis (Cr⁺⁶, hexavalente) apresenta tanto poder de contaminação ambiental quanto cancerígeno. Contudo, mesmo adotando um método com uma boa eficiência de deposição e um revestimento com baixo índice de degradação, ainda assim é essencial o uso de lubrificação.

2.4 LUBRIFICANTES E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Os lubrificantes são indispensáveis para a preservação de equipamentos, sendo de total importância no processo de manutenção industrial (ZANDEVALLI e THOMAZ, 2019). Mais de 80 % dos lubrificantes usados no mundo hoje, são a base de petróleo - HLP (SRIKANT e RAMANA, 2015). Entretanto, por conta de problemas ambientais envolvendo esse lubrificante a partir de recursos não renováveis, a procura pela utilização de óleos biodegradáveis tem aumentado (REEVES et al., 2015). Conforme Tab. 3 o fabricante de componentes hidráulicos Rexroth (2002) traz que os óleos biodegradáveis podem ser separados em quatro classes.

Tabela 3: Divisão dos biodegradáveis.

TIPO	BASE
HEES	Ésteres
HEPG	Poliglicóis (PAG)
HETG	Vegetal
HEPR	Polialfaolefina (PAO) ou Hidrocarbonetos Sintetizados (SHC)

Fonte: Adaptado de Rexroth (2002)

O entendimento de suas particularidades, vantagens e desvantagens é essencial para uma boa e correta aplicação. Algumas semelhanças como ótima estabilidade termoquímica e alta resistência a corrosão para materiais ferrosos e não ferrosos são identificadas nos óleos HETG e HEPR (ASAFF, 2013).

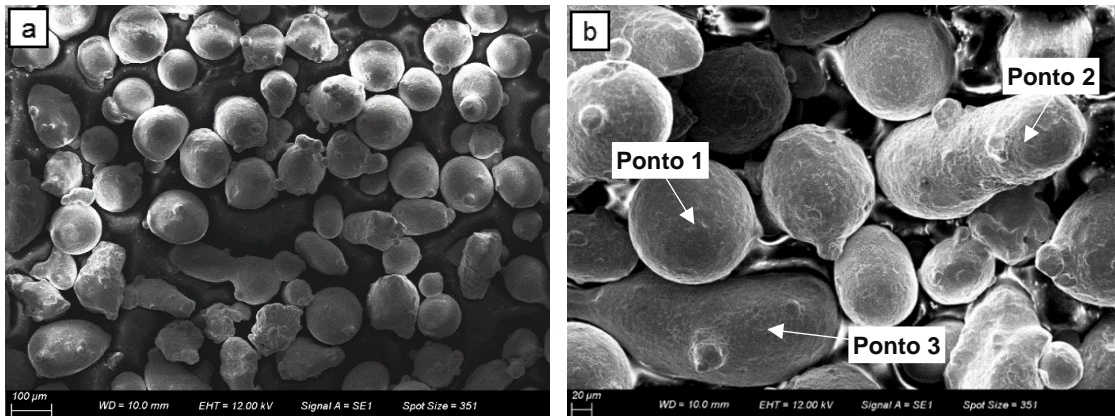
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO E REVESTIMENTO

Foram usados 6 corpos de prova usinados em formato cilíndrico com \varnothing 60 mm e $12 \pm 0,05$ mm de espessura após o processo de retificação. Todos foram fabricados em aço SAE 1045, material usado na fabricação de alguns componentes hidráulicos.

Segundo dados da Höganäs S.A. (2018), a liga FeCrNiMo é fabricada a partir do processo de atomização a água e possui dureza na faixa de 55 a 58 HRC. A Fig. 6 apresenta uma micrografia do pó obtida via microscopia eletrônica de varredura (MEV). Também nesse procedimento a composição química do pó foi identificada por espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

Figura 6: (a) MEV 200x, (b) MEV 500x com pontos do EDS.



Fonte: do Autor (2019)

Para validar a composição da liga, os resultados obtidos por microscopia eletrônica de varredura (MEV), juntamente com EDS, foram confrontados com os dados da literatura, conforme apresentados na Tab. 4.

Tabela 4: Comparativo da composição química da liga.

Composição química do pó Fe-CrNiMo (% peso)						
Comparativo	Fe	C	Cr	Mo	Ni	Outros
Höganäs	Balanço	0,15	18,00	0,50	2,50	< 3
× ₁₂₃	78,39	0,25	15,95	0,02	1,82	< 3

Fonte: do autor (2019) e Höganäs (2018)

Os números dispostos dos pontos 1, 2 e 3, identificados na Fig. 6b foram todos colocados em médias devido a quantidade de valores obtidos nesta análise.

3.2 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO POR LASER METAL DEPOSITION

3.2.1 Preparação do pó metálico

Tendo em vista que o pó metálico adquirido possuía uma granulometria entre 53 e 150 µm, existe a necessidade de diminuir esta faixa de tamanho de grão para obter uma maior uniformidade de deposição e que não acarrete problemas de entupimento do sistema de alimentação do laser. Desta forma, fez-se a seleção da peneira a ser utilizada com uma granulometria máxima de 106 µm.

3.2.2 Parametrização

A escolha dos valores para a deposição se dera em uma combinação entre a experiência de ensaios anteriormente executados no LMP-LASER e análise de parâmetros já fundamentados na literatura. A Tab. 5 expressa os valores aplicados em relação ao fluxo de gás.

Tabela 5: Dados do fluxo de gás.

Parâmetros	Valor	Unidade
Fluxo de alimentação de pó	10	g/min
Fluxo de gás de arraste	5	L/min
Fluxo de gás de proteção	10	L/min
Gás utilizado	Ar	-----

Fonte: do Autor (2019)

Em paralelo a isto, os principais parâmetros do processo a laser são apoiados em três variáveis: potência de saída, velocidade de avanço e a distância entre o foco de pó e o foco do laser. Baseado nas taxas descritas por Poprawe (2011) a Tab. 6 expressa os valores atribuídos ao laser.

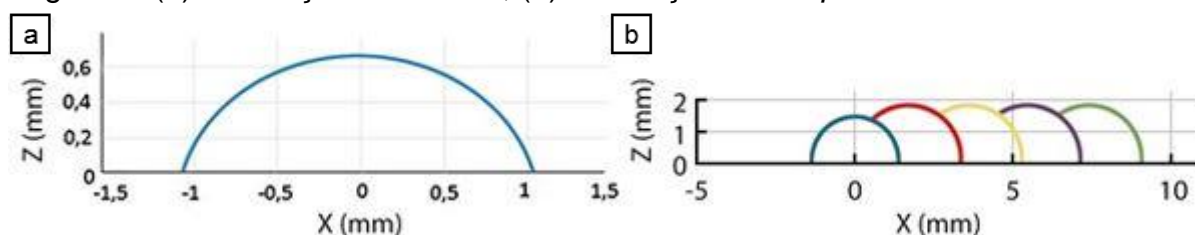
Tabela 6: Parâmetros do Laser.

Parâmetros	Valor	Unidade
Potência do laser	1,05	kW
Velocidade de avanço	13,33	mm/s
Altura entre foco feixe laser e a superfície da amostra	35,00	mm

Fonte: do Autor

Com isso, a parte final desta etapa consistiu na simulação do cordão e na determinação da porcentagem de sobreposição (OVERLAP). Esta previsão geométrica foi feita com o auxílio de um programa desenvolvido por Wolff (2017) no *software* MATLAB. Ilustrado conforme Fig. 7.

Figura 7: (a) Simulação do cordão, (b) Simulação *Overlap*.



Fonte: Baseado em imagem capturada do Matlab (2019)

A partir da simulação, foi gerado uma tabela com as propriedades do cordão, expressados na Tab. 7.

Tabela 7: Parâmetros usados para deposição do cordão.

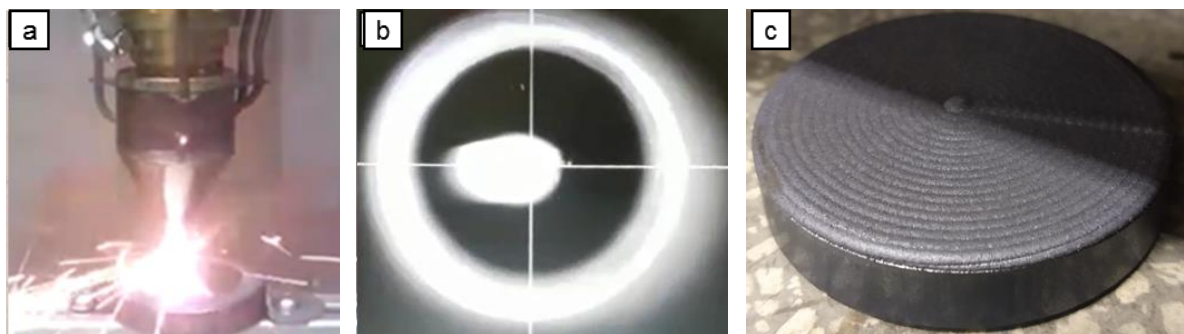
Parâmetros	Valor	Unidade
Largura do 1° cordão	2,06	mm
Altura do 1° cordão	0,63	mm
Profundidade do cordão	0,06	mm
Área do cordão	1,00	mm ²
OVERLAP - Sobreposição entre cordões	25	%
ZTA	1,17	mm ²
Área diluída	0,02	mm ²

Fonte: do Autor (2019)

3.2.3 Deposição do revestimento

Aplicando os valores mencionados nas Tab. 5 e 6, inicia-se as deposições com a fase de testes, onde foram aplicados cordões de 40 mm de comprimento tendo por finalidade analisar a qualidade do cordão depositado e verificar a possibilidade da existência de descontinuidades e ou defeitos no processo. Após esta fase, é dado início ao recobrimento nas amostras. A Fig. 8 mostra o processo de deposição do laser e a superfície do disco após o processo.

Figura 8: (a) Deposição laser, (b) Câmera interna laser, (c) Amostra pós-deposição.



Fonte: do Autor (2019)

O procedimento seguiu-se da seguinte forma: a deposição total foi feita num tempo de 149 segundos por peça, com um total de 19 voltas por ciclo e com o processo de deposição feito de fora para dentro. Posteriormente foi retificado a camada depositada das amostras para realizar o teste tribológico.

3.3 PROPRIEDADES DOS ÓLEOS HIDRÁULICOS

Atendendo as normas DIN 51524 (parte 2) como hidráulico e DIN 51517 (parte 1) como fluido lubrificante, o óleo HLP é reconhecido por proporcionar lubrificação adequada e, conseqüentemente, melhorar a resistência ao desgaste. Sendo recomendado pelo fabricante, ARCHEM, pois assegura uma vida útil longa de bombas e comandos hidráulicos a partir da redução do atrito entre as partes móveis.

O óleo HEPR de base mineral biodegradável incluso na norma ISO 15380 e o óleo HETG, ambos possuem grande capacidade de suportar cargas e boa proteção anticorrosiva frente a metais ferrosos e não ferrosos, segundo dados determinados pelo fabricante Rocol. Diante disto, a Tab. 8 expressa as propriedades dos óleos biodegradáveis e do óleo mineral.

Tanto o óleo mineral quanto os óleos biodegradáveis possuem em sua composição aditivos anti-desgastantes e de extrema pressão. Estes aditivos, são compósitos formulados em nanopartículas agregados ao filme lubrificante, havendo por finalidade reduzir os valores de atrito e degradação dos componentes.

Tabela 8: Propriedades físico-químicas dos lubrificantes.

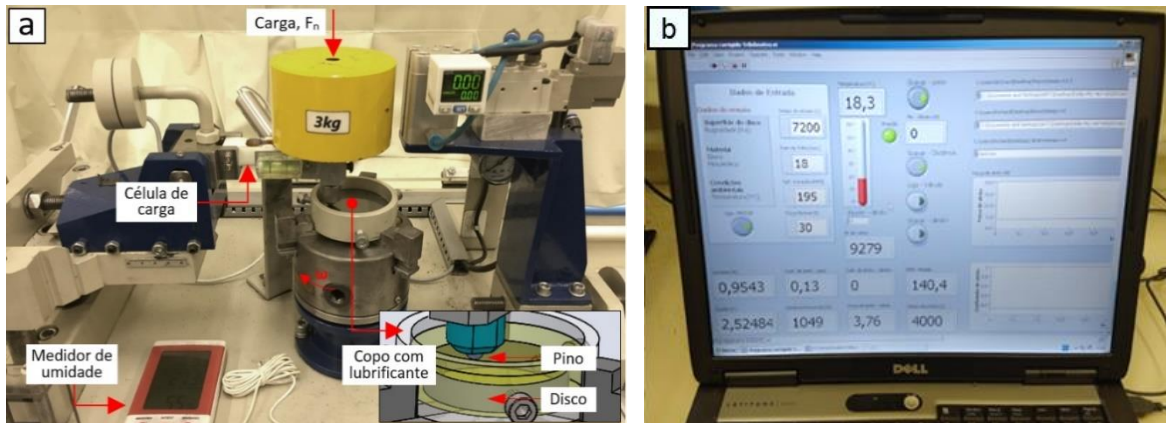
Parâmetros	HLP	HEPR	HETG	Unidade
Grau de viscosidade	68	68	68	mm ² /s
Índice de viscosidade	101	98	>200	-----
Ponto de fulgor	200	>150	>250	°C
Ponto de fluidez	-	-3	-	°C
Índice de neutralização	0,40	1,8	-	mgKOH/g
FZG - Estágio de desgaste	-	11	-	-----
Coeficiente de pressão - viscosidade	2,50E-08	3,12E-08	1,28E-08	m ² /N

Fonte: Adaptado de ARCHEM, 2010; ROCOL, 2009; ROCOL, 2004; TOTTEN, 2011 e HAMROCK et al., 2004

3.4 AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA

Para mensurar os valores de atrito e desgaste, foi utilizado um tribômetro de modelo TR-01 adaptado da norma ASTM G99-04 para condições lubrificadas. A Fig. 9 apresenta a estrutura de ensaio no tribômetro. Neste ensaio, um pino fixo de ponta esférica com um diâmetro de 6 mm é pressionado com uma carga controlada contra o disco rotativo.

Figura 9: (a) Tribômetro pino sobre o disco, (b) Interface do equipamento.



Fonte: Adaptada do Autor (2020)

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente entre 24 e 25 °C com uma umidade relativa do ar entre 50 e 80 %. A Tab. 9 expressa os valores para cada parâmetros utilizados nos ensaios. Nos ensaios de atrito foram utilizadas esferas (pino) de PTFE, simulando um sistema de vedação de um cilindro hidráulico e nos ensaios de desgaste esferas (pino) de Al_2O_3 , para que fosse analisada a perda de volume e a trilha gerada nos discos revestidos com a liga FeCrNiMo.

Tabela 9: Parâmetros fixados para os testes realizado no tribômetro.

Parâmetros	Ensaio de atrito	Ensaio de desgaste	Unidade
Velocidade linear	0,41	0,37	m/s
Raio da trilha	20	18	mm
Força	50, 30, 20, 10, 6, 1.8	30	N
Tempo de teste	3600	7200	s
Distância de deslizamento	945	1889	m

Fonte: do Autor (2020)

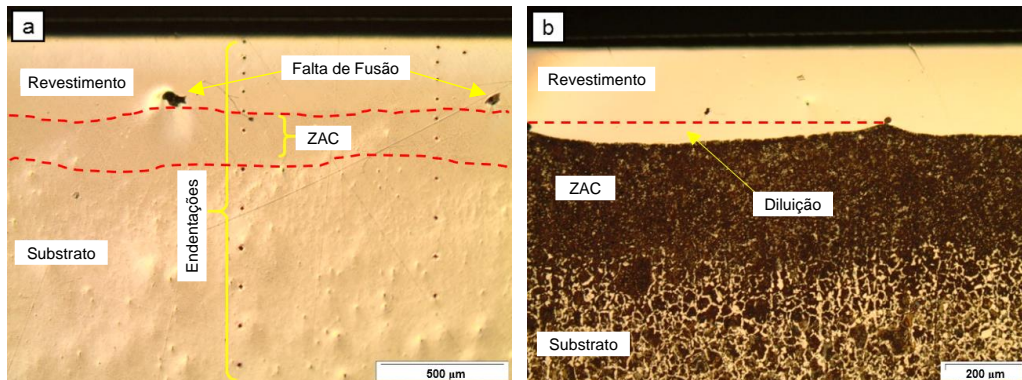
Antes dos testes, todos os corpos de prova foram limpos em banho ultrassônico. Duas seringas foram utilizadas para adicionar e retirar o lubrificante no copo usado como reservatório, conforme é apresentado na Fig. 9. A cada carga aplicada, o lubrificante usado era retirado e, em seguida, colocado outro novo, com um volume de 6 ml.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MICROESTRUTURA E DUREZA DOS REVESTIMENTOS

A metodologia empregada na seleção dos parâmetros de deposição - Tab. 5 e 6 - influenciaram diretamente nas características do revestimento final. A Fig. 10 apresenta imagens da seção transversal do corpo de prova.

Figura 10: (a) Micrografias das seções transversais do revestimento e substrato: endentações da microdureza, (b) Amostra atacada com nital 2 %.

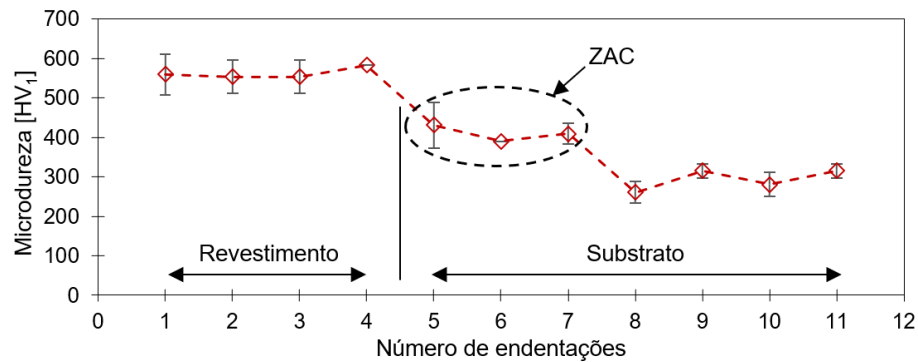


Fonte: do Autor (2020)

A Fig. 10a apresenta as endentações de microdureza, bem como revela um revestimento com baixa porosidade, uma boa união metalúrgica e alguns pontos de falta de diluição. Tian et al. (2020) cita que tais defeitos estão relacionados ao não equilíbrio da razão: potência do laser e velocidade de avanço do cabeçote, que consequentemente controlam a temperatura da poça de fusão. A Fig. 10b, identifica-se três regiões bem distintas, o revestimento, a ZAC e o substrato. Também se identificou que houve um bom procedimento de deposição, principalmente pela ausência de óxidos na interface da superfície do substrato. As características geométricas dos cordões individuais, junto a porcentagem de *overlap* utilizada, apresentaram redução proporcional ao incremento desta, assim como mostrou a previsão realizada nos resultados apresentados por Wolff (2017). Zhou et al. (2015) descreve que a alta densidade de potência no laser, obedecendo a relação largura/altura do revestimento e do superaquecimento da poça de fusão, é possível reduzir substancialmente a geração de poros, fator este que condiz com o resultado obtido das camadas.

A dureza também é um parâmetro importante para a análise do coeficiente de atrito e de desgaste dos revestimentos. Na Fig.11 apresenta o perfil de microdureza da seção transversal do corpo de prova. Uma carga de 9,8 N, com um tempo de endentação de 10 s foi usado.

Figura 11: Perfil médio de microdureza Vickers.



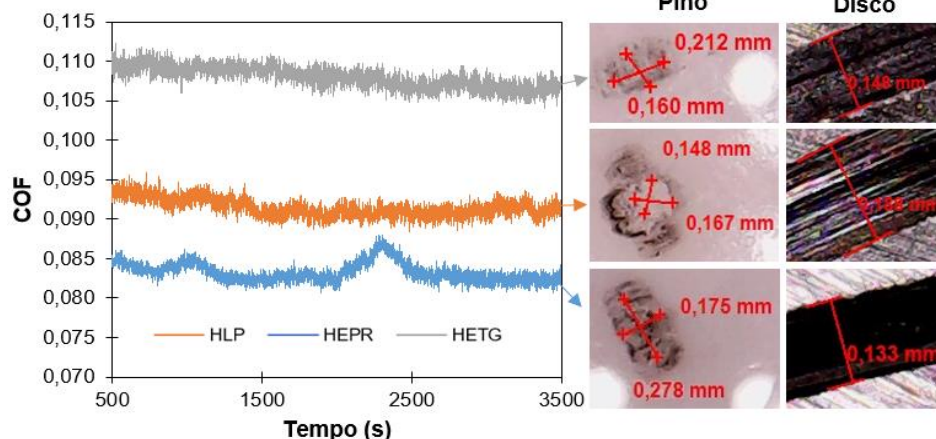
Fonte: do Autor (2020)

A dureza média obtida no revestimento foi superior a 560 HV, aprox. 2x maior que a média do substrato, que foi em torno de 293 HV, considerando fora da ZAC. Notou-se que nesta região as microdurezas foram superiores as medidas fora dessa zona, isso provavelmente devido ao refino de grãos, uma formação microestrutural do tipo martensítica no substrato e a influência da diluição química na dureza resultante observada na Fig. 11b. García et al. (2016), usando laser cladding, em um substrato de AISI 1045, observou aumento da dureza na ZAC, comparado ao substrato não afetado pelo calor.

4.2 ATRITO E DESGASTE

Para melhor avaliar o desgaste no deslizamento lubrificado foi gerado um gráfico do coeficiente de atrito. Em função do tempo e com o auxílio de um microscópio ótico, fez-se as devidas medições nas amostras ao final de cada teste (Fig. 12).

Figura 12: Desgaste do pino e do disco.



Fonte: Do Autor (2020)

Com as medidas dos respectivos raios das trilhas, sendo que o desgaste no disco fora excessivamente superior ao do pino, e não foi possível mensurar o volume removido da esfera, tendo em vista apenas um desgaste superficial na mesma, foi utilizado então a Eq. 13 descrita por Neuber (2017) para calcular a perda de volume no disco. A Tab. 12 apresenta os valores da perda volumétrica em comparação para cada tipo de lubrificante.

Tabela 12: Perda de volume para cada lubrificante.

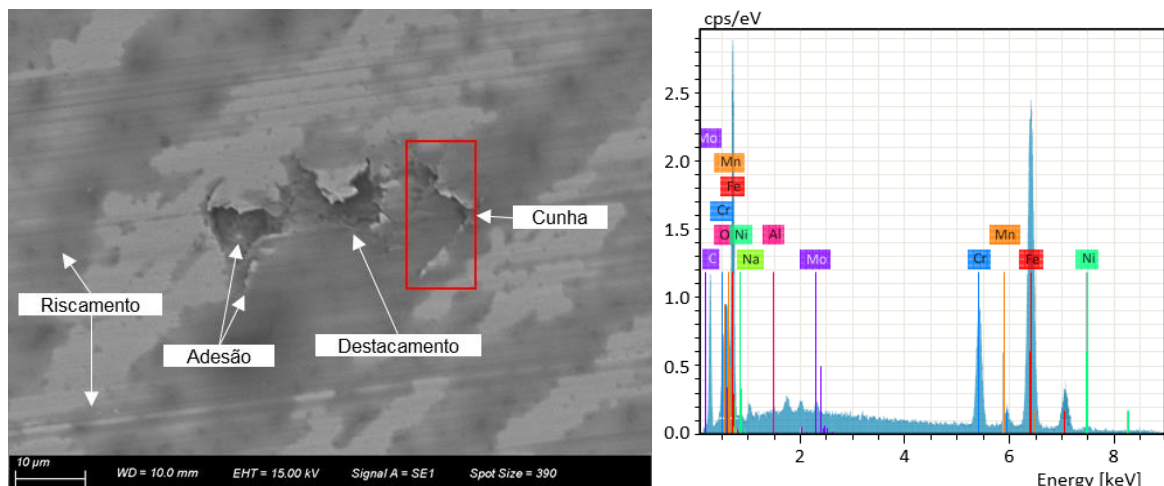
Lubrificante	Total Deslizado (m)	Perda de volume (m ³)
HEPR	1889	3,48E-10
HLP	1889	3,87E-10
HETG	1889	4,92E-10

Fonte: do Autor (2020)

De acordo com a Tab. 12, o ensaio utilizando o óleo HETG possui a menor perda de volume, cerca de 12 % e 41 % menor em relação aos lubrificantes HLP e HETG respectivamente, com uma incerteza em menos de 1% para todos os ensaios. Os resultados obtidos da perda de volume, quando corretamente feitos em laboratórios e sob as mesmas condições, devem exibir um coeficiente de variação entre as amostras, não mais do que 40 % (SCHIRMAN, 2004).

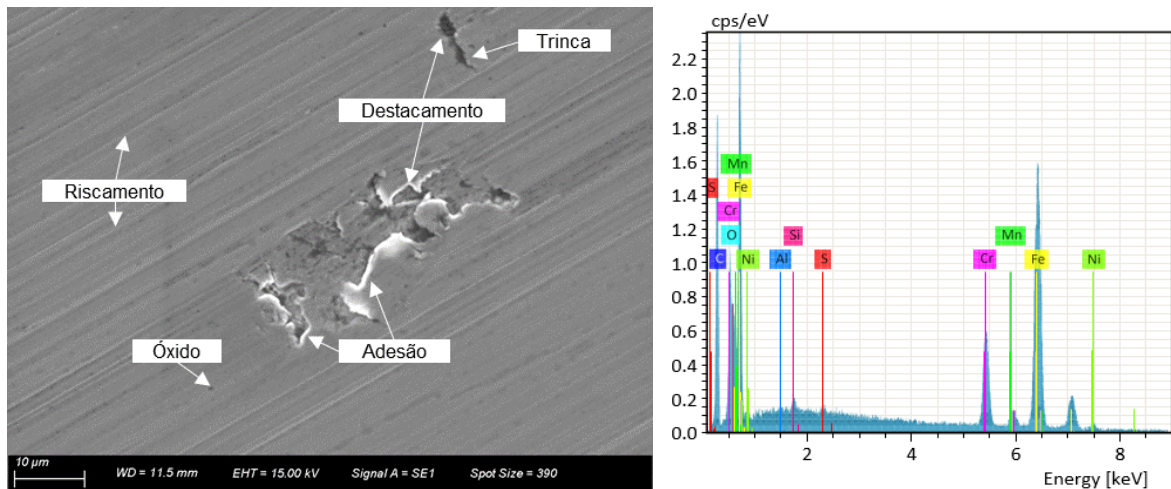
Para avaliação dos mecanismos de desgaste, realizou-se a análise de MEV/EDS, como mostra a Fig. 13, 14 e 15 nas dependências do LABSatc, identificando também os elementos presentes conforme EDX.

Figura 13: Mecanismos de desgaste para 3000x, com deslizamento do HEPR.



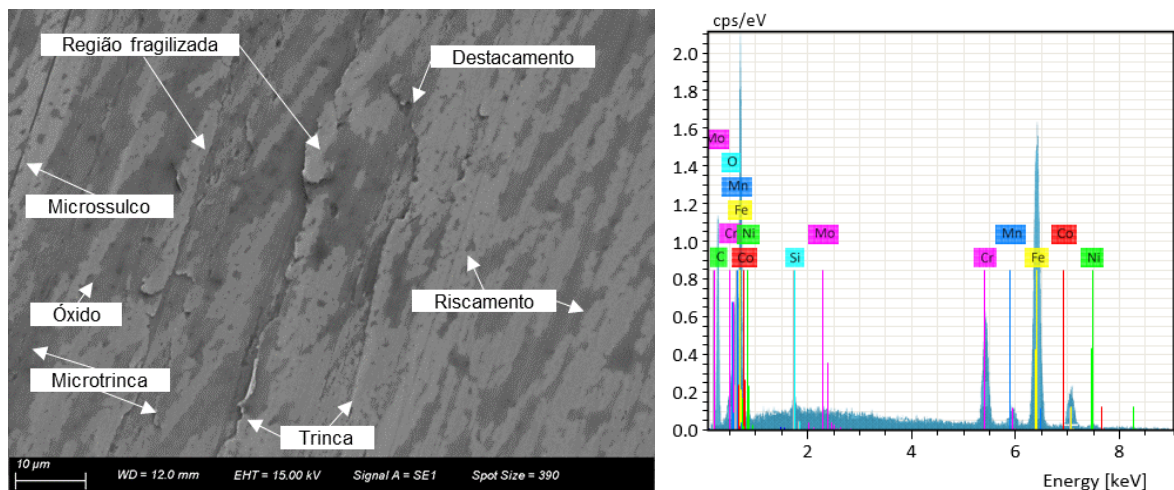
Fonte: do autor (2020)

Figura 14: Mecanismos de desgaste para 3000x, com deslizamento do HLP.



Fonte: do autor (2020)

Figura 15: Mecanismos de desgaste para 3000x, com deslizamento do HETG.



Fonte: do Autor (2020)

Analisando a Fig. 13 os mecanismos de desgaste identificados são constituídos por uma combinação de riscamento e destacamento de material. Ainda para a amostra do óleo HETG, identificou-se a formação de cunha e uma pequena iniciação de adesão. Já na Fig. 14 nota-se a presença de trincas, óxidos e destacamentos de material, com um maior processo de adesão e riscamento para amostra do óleo HLP se comparado ao HETG. A Fig. 15 identifica mecanismos de riscamento, destacamento de material, óxidos, microtrincas, microsulcos e trincas muito acentuadas que fragilizam as áreas periféricas da superfície. Nesta microestrutura (Fig. 15) é visto, claramente, a influência da baixa concentração dos aditivos Zn, usados contra desgaste, que contribuíram fortemente nos mecanismos

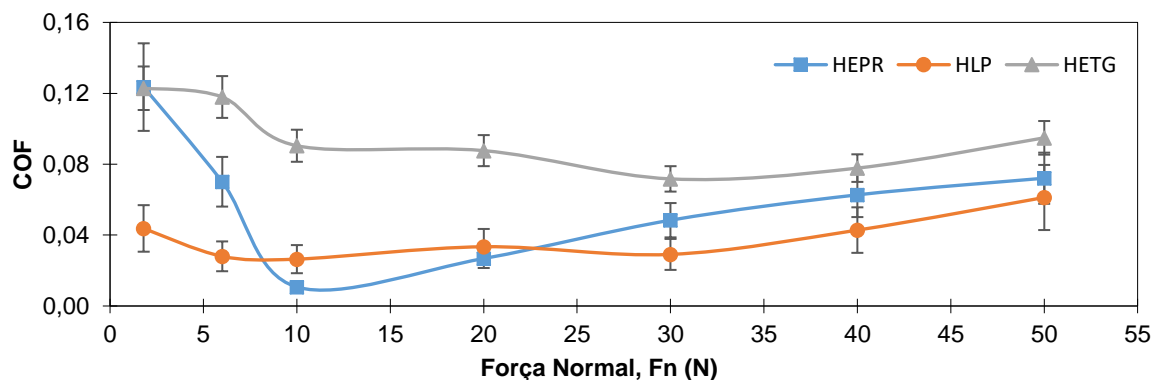
de falha da superfície com deslizamento do óleo HETG. Estudos realizados por Fernández et al., (2015), detectaram nas pistas desgastadas da liga base Fe-composição similar à do estudo, uma combinação também constituída por microsulcos profundos, deformação plástica e adesão, além da formação de efeitos de cunha em alguns pontos das pistas.

O desgaste abrasivo observado nas Fig. 13, 14 e 15, deve-se a presença de asperezas fixas a esfera e a pequenas partículas que acabam se soltando da mesma durante o ensaio e permanecendo no interior das pistas, sendo que a geometria côncava da pista dificulta a expulsão destas partículas. Com o decorrer do ensaio, a esfera tende a arrastar e/ou comprimir as mesmas ao longo da pista, resultando na remoção de material da superfície (WENG et al., 2016).

4.3 REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Para ser determinado o coeficiente de atrito, foi variado os pesos aplicados nos discos e fixado a velocidade de rotação e o tempo de ensaio para cada carga (Fig. 16).

Figura 16: Influência da carga no coeficiente de atrito para cada lubrificante.



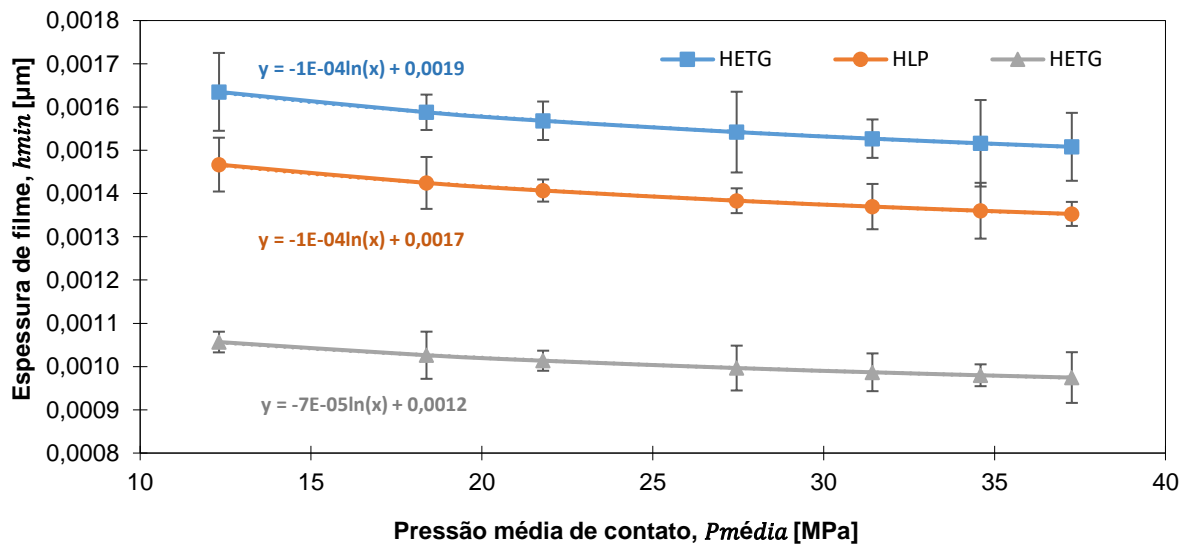
Fonte: do Autor (2020)

Analisando a Fig. 16, pode-se notar que os valores de coeficiente de atrito se encontram entre 0,0107 e 0,1457 nas cargas axiais de 1,8 N a 50 N. Os dados dos coeficientes de atrito de cada lubrificante possuem diferentes comportamentos conforme as cargas aumentam, chegando a valores de 0,072 (HEPR), 0,061 (HLP) e 0,095 (HETG) para a carga de 50 N. Vale ressaltar, que, mesmo possuindo um menor coeficiente de atrito, o óleo mineral HLP - é um valor desejável, tendo em vista que os

fluidos biodegradáveis possuem uma menor quantidade de aditivos e por consequência um coeficiente de atrito maior quando comparado a um óleo mineral (SRIKANT e RAMANA, 2015) - apresenta seus valores oscilando com os intervalos do óleo biodegradável HETG.

Conforme Hamrock et al. (2004), um parâmetro importante para se determinar é a espessura de filme lubrificante, calculado pela Eq. 5. Sendo os valores de viscosidade dinâmica (n_0) e coeficiente viscosidade-pressão (α) de 119,90 - $3,12 \times 10^{-8}$ para o óleo HEPR, 105,81 - $2,50 \times 10^{-8}$ para o óleo HLP e 102,96 - $1,28 \times 10^{-8}$ para o óleo HETG. A Fig. 17 mostra a comparação destas alturas de filme calculados para as diferentes pressões de contato. Já para se determinar as curvas de Stribeck, é necessário mensurar os valores das rugosidades médias quadráticas de cada amostra conforme a Eq. 8 e após isto, em conjunto dos valores de viscosidade e velocidade de rotação já definidos é estabelecido o número de Hersey de acordo com a Eq. 6. Assim a Fig. 18 exhibe os comportamentos dos três óleos de acordo com os parâmetros de filme (λ) calculado pela Eq. 7.

Figura 17: Espessura mínima do filme para cada lubrificante.



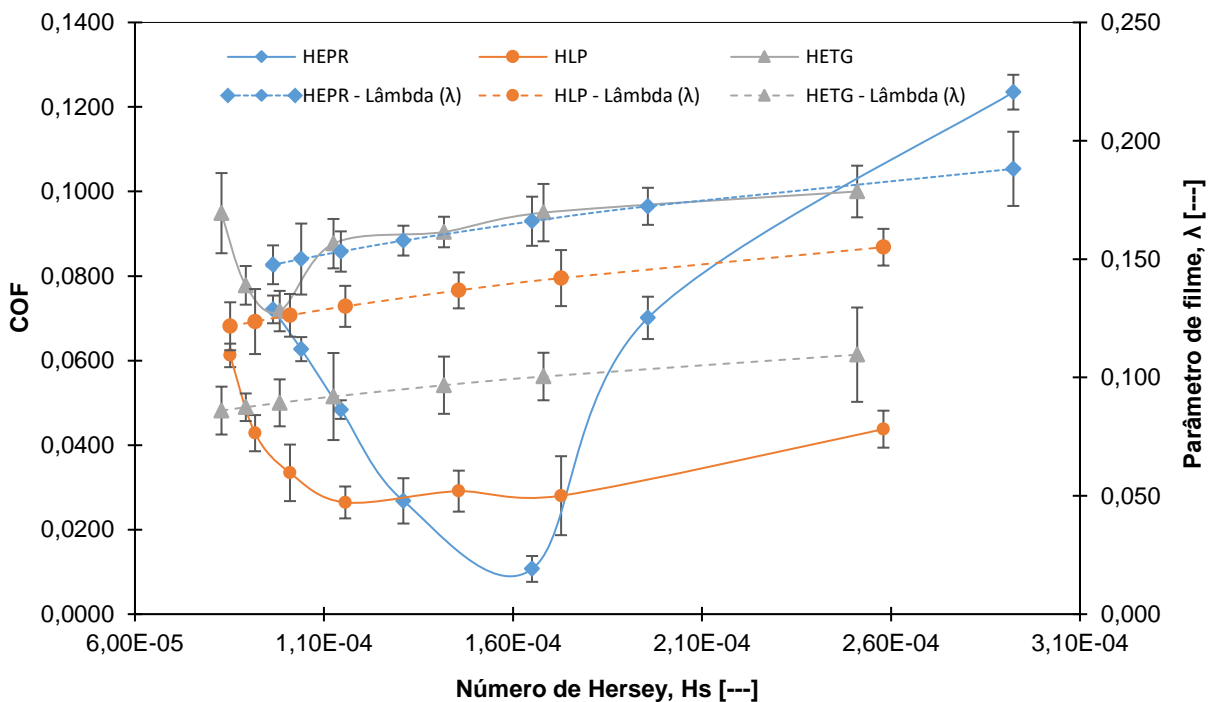
Fonte: do Autor (2020)

Analisando a Fig. 17 nota-se que as curvas apresentaram um comportamento logarítmico, sendo modeladas a partir da Eq. 5. Estes obtiveram uma estimativa de qualidade em mais de 99% com os valores variando entre 0,0174 e 0,0009. A equação e os resultados se mostram altamente dependentes do coeficiente

viscosidade-pressão (α). Este coeficiente refere-se à relação entre a carga colocada no filme de óleo (pressão) e a espessura de filme do óleo (viscosidade) quando todos os outros fatores são constantes (SZUCS et al., 2015).

Os valores utilizados para os óleos foram $3,12E-08$ para o HEPR, $2,50E-08$ para o HLP e $1,28E-08$ para o HETG (TOTTEN, 2011; HAMROCK et al., 2004). Onde para valores mais baixos significa que as propriedades de formação de filme de lubrificação são muito pobres, resultando em uma baixa espessura de filme. O uso destes valores se justifica tendo em vista a base de fabricação do óleo e o seu índice de viscosidade - Tab. 9 - onde para valores menores deste índice refletem aos lubrificantes valores mais altos de “ α ” (TOTTEN, 2011).

Figura 18: Análise dos regimes de lubrificação por meio da curva de Stribeck



Fonte: do Autor (2020)

Já a figura 18 mostra que o Número de Hersey variou entre $8,02E-05$ a $3,93E-04$. O menor coeficiente de atrito, próximo de 0,02 é observado para os óleos HLP e HEPR, porém para o lubrificante HETG este valor fica em torno de 0,07. Pontos estes que caracterizam a mudança do regime de lubrificação elastohidrodinâmico. Para valores superiores de coeficiente de atrito e baixo valor do número de Hersey, o regime é caracterizado como lubrificação mista e para valores altos do número de Hersey a tendência é modificar para o regime hidrodinâmico.

Ainda na Fig. 18 é mostrada a relação das curvas de Stribeck com o parâmetro de filme λ , cujas unidades estão representadas no eixo secundário do gráfico. Foi identificado uma diferença média de 21 % e 72 % do parâmetro de filme λ nos lubrificantes HLP e HEPR em comparação ao HETG respectivamente. O parâmetro de filme λ , a curva de Stribeck e espessura mínima h_{min} exibem os mesmos comportamentos característicos das curvas quando comparadas a estudos que contemplam estes tipos de ensaios (SAGBAS, 2016; TSUHA, 2015).

São apresentados na Tab. 10 os valores do parâmetro de filme λ e coeficiente de atrito, em relação ao número de Hersey, onde se verifica a relação do coeficiente de atrito com a mudança do regime de lubrificação e os valores do parâmetro de filme para os óleos biodegradáveis e mineral.

Tabela 10: Coeficiente de atrito e parâmetro de filme em função do número de Hersey.

HEPR							
Regime de Lubrificação	Misto				Concavidade	Elastohidrodinâmico	
Força (N)	50	40	30	20	10	6	1,8
Nº de Hersey	9,65E-05	1,04E-04	1,14E-04	1,31E-04	1,65E-04	1,96E-04	2,92E-04
COF - Atrito	0,072	0,063	0,048	0,027	0,011	0,070	0,124
Lambda, λ	0,148	0,150	0,153	0,158	0,166	0,172	0,188
HLP							
Regime de Lubrificação	Misto			Concavidade	Elastohidrodinâmico		
Força (N)	50	40	30	20	10	6	1,8
Nº de Hersey	8,52E-05	9,18E-05	1,01E-04	1,16E-04	1,46E-04	1,73E-04	2,58E-04
COF - Atrito	0,061	0,043	0,033	0,026	0,029	0,028	0,044
Lambda, λ	0,122	0,124	0,126	0,130	0,137	0,142	0,155
HETG							
Regime de Lubrificação	Misto		Concavidade	Elastohidrodinâmico			
Força (N)	50	40	30	20	10	6	1,8
Nº de Hersey	8,29E-05	8,93E-05	9,83E-05	1,13E-04	1,42E-04	1,68E-04	2,51E-04
COF - Atrito	0,095	0,078	0,072	0,088	0,090	0,095	0,110
Lambda, λ	0,086	0,087	0,089	0,092	0,097	0,100	0,110

Fonte: do Autor (2020)

Nos ensaios realizados, o menor coeficiente de atrito para o óleo biodegradável HEPR é no valor de $\mu_{min} = 0,011$ que corresponde ao parâmetro de filme $\lambda_{min} = 0,166$. Já para o óleo mineral HLP e para o óleo biodegradável HETG dão se os valores $\mu_{min} = 0,026$, $\lambda_{min} = 0,130$ e $\mu_{min} = 0,072$, $\lambda_{min} = 0,089$, respectivamente. Os regimes de lubrificação são identificados pelas mudanças dos valores do coeficiente de atrito e pelo ponto de concavidade da curva voltada para cima no gráfico (CREPALDI JUNIOR, 2017).

4.4 ANÁLISE DE ADITIVOS

A Tab. 11 apresenta as análises químicas feitas por espectrofotometria para os lubrificantes em estudo. Os resultados são em partes por milhão (ppm).

Tabela 11: Concentração de aditivos em ppm.

Lubrificantes	Zinco - Zn	Fósforo - P
HLP	473,50	356,90
HEPR	996,10	820,60
HETG	0,15	927,90

Fonte: Baseado em laudos da Laboroil (2019)

Observando os valores da Tab. 11 apresentados, o óleo HETG possui a menor concentração de zinco (Zn), cerca de 3156,6 vezes e 6640 vezes para os lubrificantes HLP e HEPR, nesta ordem. Já para o fósforo (P) o lubrificante HLP é o que possui a menor concentração, por volta de 2,3 vezes e 2,60 vezes para os óleos HEPR e HETG respectivamente. Estes elementos são aditivos tipicamente utilizados como anti-desgastantes e elevada pressão, onde os mesmos aderem na superfície das peças, mas sem afetar o contato entre as mesmas ocasionando a redução do atrito e por consequência a proteção contra o desgaste abrasivo e adesivo de alguns mecanismos (THAPLIYAL e THAKRE, 2017).

5. CONCLUSÃO

- O revestimento depositado pelo processo de Laser Metal Deposition possibilita alta adesão metalúrgica com o substrato e um baixo índice de porosidade e trincas.
- A dureza média do revestimento apresentou valor acima de 560 HV, diferente do substrato que exibiu um valor próximo de 293 HV, considerando suas medições feitas fora da ZAC.
- Nota-se a possibilidade da utilização da liga FeCrNiMo no recobrimento de componentes hidráulicos pelo processo de Laser Metal Deposition, tendo em vista seus baixos valores de desgaste para os três fluidos estudados.
- A partir dos resultados verifica-se que o óleo de base vegetal HETG possui o maior coeficiente de atrito decorrente da baixa concentração de aditivos, no que lhe confere uma altura mínima de filme (h_{min}) menor, resultando em uma maior perda de massa - maior desgaste - em relação aos lubrificantes HLP e HETG;

- Os óleos HLP e HEPR foram os lubrificantes a apresentar os maiores valores do coeficiente viscosidade-pressão (α) no que lhe conferiram os menores desgastes, sendo o de menor valor para o óleo HEPR;
- A curva de Stribeck permitiu avaliar o número de Hersey com o coeficiente de atrito, demonstrando uma leve diferença para os lubrificantes. Foi identificado o limite de lubrificação elastohidrodinâmico e misto para os óleos HEPR, HLP e HETG para as cargas 10 N, 20 N e 30 N respectivamente;
- Verificou-se que parâmetros como coeficiente de viscosidade e pressão, assim como a viscosidade dinâmica, influenciam fortemente na formação de filme e conseqüentemente no atrito e no desgaste das superfícies;
- A concentração dos aditivos Zn e P de cada lubrificante influenciaram fortemente nos resultados de atrito e nos mecanismos de desgaste. Valores menores de aditivos refletem em maiores valores de desgaste. Foi observado a deficiência para os óleos do tipo HLP e HETG;
- Os mecanismos de desgaste de riscamento, microtrinca, destacamento, cunha, trinca, adesão, óxido, microsulco e microtrinca foram identificados nas trilhas dos discos para todos os lubrificantes, estando mais evidente para o HETG;

Agradecimentos

Agradeço a minha família, amigos, a minha namorada, as empresas Smierveda, Höganäs, Só Esferas, Laboroil, Karel, ao grupo ITW, ao pessoal do LMP-UFSC, LASPHI, LACAMI e LABSATC. Agradeço também aos professores Richard de Medeiros Castro e Milton Pereira pela oportunidade, disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. United States: West Conshohocken, 2004. 6 p.

AHMED, Arslan et al. An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals. *Meccanica*, [s.l.], v. 51, n. 1, p.9-23, 21 abr. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11012-015-0180-6>.

ALVES, Monica Raquel. Identificação experimental do atrito em atuadores pneumáticos. **Bibliodigital**, 2018. Disponível em: <http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/5407?show=full>. Acesso em: 27/04/2019

ASAFF Mendoza, Y. E. (2013). Sistematização do projeto de circuitos hidráulicos para o emprego de fluidos biodegradáveis.

BUETTNER, Kevin E.; GUO, Yu; CURTIS, Jennifer S. Development of a collisional dissipation rate model for frictional cylinders. **Powder Technology**, [s.l.], p.1-13, Jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.068>.

CATÁLOGO ELETRÔNICO: Höganäs. Rockit® 401 - Sustainable solution to replace hard chrome plating: Edição 06/2018.

CATÁLOGO ELETRÔNICO: Hornet - Laser Cladding, 2018. Disponível em <<https://www.hornetlasercladding.com/>>. Acesso em: 10/07/2020.

CATÁLOGO ELETRÔNICO: Rexroth. Environmentally Acceptable Hydraulic Fluids: Edição 01/2002.

CATÁLOGO: Archem. Liquimatic - série HLP. ITW CHEMICAL PRODUCTS LTDA: Edição 03/2010.

CATÁLOGO: Rocol. BIOFLUID H. ITW CHEMICAL PRODUCTS LTDA: Edição 04/2009.

CATÁLOGO: Rocol. Série Rocol HO. ITW CHEMICAL PRODUCTS LTDA: Edição 02/2004.

CESCONETO, Emanuel Moutinho. Análise teórico experimental de prensa dobradeira hidráulica controlada por bomba-motor com velocidade variável. **Lume**, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/186157>. Acesso em: 30/03/2019.

CHONG, W. W. F.; LACRUZ, M. de. Elastoplastic contact of rough surfaces: a line contact model for boundary regime of lubrication. **Mechanics**, [s.l.], v. 49, n. 5, p.1177-1191, 8 jan. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11012-013-9861-1>.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 362/2005. Regulamentação da Coleta, Transporte, Armazenamento e Destinação Adequada dos óleos lubrificantes usados e contaminados, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res36205.xml>>. Acessado em 23/03/2019.

CREPALDI JUNIOR, Jesuel. Efeito da diluição de etanol em óleo lubrificante de baixa viscosidade no comportamento tribológico do contato anel do pistão/cilindro. 2017. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9604>. Acesso em: 18/04/2019

CRUZ, Daniel. Construção de Equipamento de Tratamento de Superfície a Plasma com Fonte DC Pulsada para Tratamento de Nitretação Iônica. **Repositório institucional UFSCar**, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9554>>. Acesso em: 30/04/2019.

CASTRO, R., Curi, E. I. M., Inácio, L. F. F., & da Silva Rocha, A. (2020). Analysis of the tribological performances of biodegradable hydraulic oils HEES and HEPR in the sliding of Cu-Zn/WC-CoCr alloys using the Stribeck curve. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(1), 2.

FARIAS, João Guilherme. Análise de desgaste de um pistão de bomba de injeção a diesel combinando ensaio experimental e simulação por elementos finitos. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2717>. Acesso em: 20/04/2019.

FERNÁNDEZ, M. et al. Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC. *Wear*, v. 324, p. 80-89, dec. 2015.

GACHOT, C. et al. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. **Wear**, [s.l.], v. 372-373, p.21-41, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.020>.

GARCÍA, A. et al. Study of the Sliding Wear and Friction Behavior of WC + NiCrBSi Laser Cladding Coatings as a Function of Actual Concentration of WC Reinforcement Particles in Ball-on-Disk Test. *Tribology Letters*, v. 63, n. 3, p. 41, aug.2016.

GRABARSKI, M. I. (2019). Efeito de tensões residuais compressivas na fadiga de contato por rolamento de um ferro fundido nodular com matriz de dureza elevada (Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

HAMROCK, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2004). **Fundamentals of fluid film lubrication**. CRC press.

HOLMBERG, Kenneth et al. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. **Tribology International**, [s.l.], v. 78, p.94-114, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2014.05.004>.

KAIMING, W.; YULONG, L.; HANGUANG, F.; YONGPING, L.; ZHENQING, S.; PENGFEI, M.. A study of laser cladding NiCrBSi/Mo composite coatings. **Surface Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 4, p. 267-275, 30 dez. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02670844.2016.1259096>.

LI, Chang et al. Numerical simulation and experimental study of cladding Fe60 on an ASTM 1045 substrate by laser cladding. **Surface and Coatings Technology**, [s.l.], v. 357, p.965-977, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.099>.

LIU, Kun et al. Effect of high dilution on the in situ synthesis of Ni-Zr/Zr-Si(B, C) reinforced composite coating on zirconium alloy substrate by laser cladding. **Materials**

& **Design**, [s.l.], v. 87, p.66-74, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.158>.

NEUBER, A. (2017). Calibração e aferição de reprodutibilidade do equipamento de ensaio de desgaste tipo pino sobre disco rotativo.

PABLO, J. P. (2019). Avaliação da resistência ao desgaste a seco e em meio salino de um revestimento de WC-12CO obtido por HVOF (Doctoral dissertation, Instituto Politécnico de Setúbal. Escola Superior de Tecnologia de Setúbal).

PANCHAL, Tirth M. et al. A methodological review on bio-lubricants from vegetable oil-based resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 70, p.65-70, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.105>.

PEREIRA, Adriano & Weingaertner, Walter & Pereira, Milton & Gutjahr, Jhonattan. 2017. Laser Cladding a Pó de AISI 316L em Substrato de SAE 1020 para Proteção de Maquinário à Corrosão. 10.26678/ABCM.COBEF2017.COF2017-0658.

POPRAWA, R. 2011, *Tailored Light 2*, edited by Poprawa, R., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2>.

REEVES, Carlton J. et al. The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. **Tribology International**, [s.l.], v. 90, p.123-134, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.021>.

SAGBAS, Binnur. Biotribology of Artificial Hip Joints. **Advances In Tribology**, [s.l.], p.112-141, 26 out. 2016. InTech. <http://dx.doi.org/10.5772/64488>.

SALAMANCA, Luis Felipe Barrera. Controle de bombas centrífugas submersas para operação no ponto de melhor eficiência, 2018. Recurso online (143 p.) Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/332032>. Acesso em: 30/03/2019

SCHIRMANN, G. (2016). Estudo de desgaste de ferro fundido nodular GGG 60, aço LNE 380 e aço LNE 250 através de ensaios de pino contra disco.

SILVA, Gustavo L.A. Tipos de aditivos utilizados em lubrificantes e suas funcionalidades na preservação de equipamentos mecânicos. **Repositório inst. Banco de produção acadêmica e intelectual**, 2018. Disponível em: <https://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/22701/1/GUSTAVO%20LUCIO%20ALMEIDA%20SILVA.pdf>. Acesso em: 28/04/2019

SRIKANT, R.r.; RAMANA, V.s.n.v.. Performance evaluation of vegetable emulsifier based green cutting fluid in turning of American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 steel – an initiative towards sustainable manufacturing. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 108, p.104-109, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.031>.

SZUCS, M.; KRALLICS, G.; LENARD, J. G.. The stribeck curve in cold flat rolling. **International Journal Of Material Forming**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.99-107, 30 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-015-1263-6>.

THAPLIYAL, P., & THAKRE, G. D. (2017). Correlation study of physicochemical, rheological, and tribological parameters of engine oils. *Advances in Tribology*, 2017.

TIAN, Q., Guo, S., & Guo, Y. (2020). A physics-driven deep learning model for process-porosity causal relationship and porosity prediction with interpretability in laser metal deposition. *CIRP Annals*.

TORRES, Jorge Miguel Sá Pinto. Melhoramento e Automatização de um Sistema de Revestimento com Laser. **Repositório Universidade Nova**, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10362/16200>>. Acesso em: 19/04/2019.

TOTTEN, G. E. (2011). Handbook of hydraulic fluid technology. CRC press.

TSUHA, Natália Akemi Hoshikawa. Análise do mecanismo camo-seguidor de translação sob lubrificação elastohidrodinâmica. 2015. 144 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265836>>. Acesso em: 08/04/2019

UPADHYAY, R. K., & KUMARASWAMIDHAS, L. A. (2014). Surface modification by multilayered W/W2N coating. *Surface engineering*, 30(7), 475-482.

WENG, Z. et al. Wear resistance of diode laser-clad Ni/WC composite coatings at different temperatures. *Surface and Coatings Technology*, v. 304, p. 283-292, jul.2016.

WOLFF, T. Young-Laplace fitting for laser clad geometry modelling. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina: 9 p. 2017.

ZANDAVALLI, Andrei Gustavo; THOMAZ, Maria Regina. Proposta de redução de custos com óleo lubrificante na manutenção preventiva de bombas de vácuo de uma agroindústria. **Anais da Engenharia Mecânica / ISSN 2594-4649**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 167 - 185, apr. 2019. ISSN 2594-4649. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/241>>. Acesso em: 02/05/2019.

ZHANG, Wei et al. Effect of nanorelief structure formed in situ on tribological properties of ceramics in dry sliding. **Ceramics International**, [s.l.], v. 45, n. 11, p.13818-13824, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.078>.

ZHOU, C. et al. Mitigation of pores generation at overlapping zone during laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 216, p. 369-374, 2015.

LISTA DE SÍMBOLOS

$P_{média}$	[N/m ²]	Pressão média entre pino e disco
F_n	[N]	Carga normal
a	[m]	Raio da área de contato
R'	[m]	Raio de curvatura equivalente
E'	[N/m ²]	Módulo de Young equivalente
E_1	[GPa]	Módulo de Young do disco
E_2	[GPa]	Módulo de Young da esfera
ν_1	[---]	Coefficiente de Poisson do disco
ν_2	[---]	Coefficiente de Poisson da esfera
$R_x = R_y$	[m]	Raio de curvatura
h_{min}	[μm]	Espessura de filme mínimo
U_e	[RPM]	Velocidade de rotação
n_0	[Pa. s]	Viscosidade dinâmica do lubrificante
α	[m ² /N]	Coefficiente de viscosidade-pressão
k	[---]	Parâmetro para contatos pontuais/elípticos
H_s	[---]	Número de Hersey
σ_{rms}	[μm]	Amplitude de rugosidade equivalente
Rq_1	[μm]	Rugosidade do disco
Rq_2	[μm]	Rugosidade esfera
μ	[m ² /s]	Viscosidade Cinemática
μ_0	[m ² /s]	Viscosidade Inicial
p	[N/m ²]	Pressão de operação
h	[m]	Altura perdida da esfera
r	[m]	Raio da esfera
d	[m]	Diâmetro de desgaste
Q	[m ³]	Volume removido da esfera
Q_i	[mm ³]	Somatório de volumes removidos
K	[mm ³ /N. m]	Coefficiente de desgaste
Fn_i	[N]	Carga normal
S_i	[m]	Distância de deslizamento