

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS)
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS
(PPGE3M)

**INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE DESLIZE NA
PERFORMANCE DE COMPONENTES DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA**

Paula Rodrigues Caumo
Engenheira Metalúrgica

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre – RS
2023

PAULA RODRIGUES CAUMO

**INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE DESLIZE NA
PERFORMANCE DE COMPONENTES DE MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA**

Dissertação submetida ao Programa Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica

Orientador: Prof. Dr. Antonio S. Takimi

Porto Alegre

2023

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciências e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio S. Takimi

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
REITOR: CARLOS ANDRÉ BULHÕES MENDES
VICE-REITOR: PATRICIA PRANKE

ESCOLA DE ENGENHARIA
DIRETORA: CARLA SCHWENGBER TEN CATEN
VICE-DIRETOR: AFONSO REGULY

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M
COORDENADOR: PROF. DR. RODRIGO DE LEMOS PERONI
VICE-COORDENADOR: PROFA. DRA. ANNE LISE KOPP ALVES

Rodrigues Caumo, Paula
INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE DESLIZE
NA PERFORMANCE DE COMPONENTES DE MOTORES À COMBUSTÃO
INTERNA / Paula Rodrigues Caumo. -- 2023.
75 f.
Orientador: Prof. Dr. Antonio S. Takimi.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.

1. Topografia . 2. Tribologia. 3. Lubrificação. 4.
Camada de cromo. I. S. Takimi, Prof. Dr. Antonio,
orient. II. Título.

Dedico este trabalho, a todos que participaram desta jornada, pela motivação, incentivo e apoio durante o período do mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof Antonio Takimi, por sua orientação, disposição e confiança em mim depositada para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Prof Ney por todo conhecimento em tribologia compartilhado. Agradeço ao Prof Patrick e Jean pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho. Obrigada por toda ajuda, paciência, dedicação, disponibilidade e ensinamentos durante esse período.

Ao Guilherme Sieben, pois sua participação e motivação foram fundamentais para a realização deste trabalho, assim como as contribuições técnicas para realização deste trabalho.

Ao Leonardo Batista, pois seus ensinamentos, ideias e oportunidades para o desenvolvimento deste trabalho foi fundamental.

A toda a minha família: Mãe, Pai, Bruna, Pedro, Andrey e Eduardo obrigada por sempre me incentivar na busca por conhecimento e por meu futuro profissional. Obrigada pelos bons momentos de convivência e por tanto me apoiar nesta importante etapa.

Ao colega de trabalho Alexandre Biondo, pelo excelente trabalho na execução dos testes e compartilhamento dos conhecimentos técnicos.

A minha grande amiga Natali Harumi, por todo auxílio durante esses anos, seus conselhos sempre me motivaram a seguir em frente.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e ao PPGE3M, por toda estrutura e apoio durante a realização do mestrado.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A perda de energia e desgaste devido ao movimento relativo entre superfícies em contato em um sistema tribológico de cilindro/pistão é um problema persistente desde a criação do primeiro motor a combustão interna em 1854. Durante o funcionamento do motor, existem regiões onde a pressão estabelecida por uma fina película de lubrificante não é suficiente para manter as superfícies relativamente separadas durante o movimento, levando as superfícies a entrarem em contato uma com a outra. Além de lubrificantes e de revestimentos protetores, a texturização da superfície do cilindro pode auxiliar na redução de atrito e desgaste dos motores de combustão interna. A topografia da superfície apresenta grande influência na performance de motores a combustão interna, onde a texturização com microcavidades afeta a distribuição e retenção de óleo na superfície, o que pode propiciar uma melhor lubrificação do sistema tribológico e reduzindo o desgaste. Assim, este trabalho avalia o papel da topografia de superfície na retenção e distribuição de óleo de componentes de motores de combustão, analisando a diferença de desgaste devido à possível diferença na capacidade de retenção e distribuição de óleo entre os grupos X e Y estudados, o qual apresentam diferentes topografias e características de microcavidades. As amostras foram avaliadas por microscopia ótica, medidor de rugosidade 2D e interferometria óptica tridimensional, além de testes funcionais de rodagem. Os corpos de prova do grupo X apresentaram superfícies caracterizadas por microcavidades mais rasas, bem como em maior número, quando comparado às superfícies do grupo Y. Essas características levaram a um melhor desempenho do motor nos testes de desgaste, atribuído à melhor retenção e distribuição do lubrificante entre os anéis do pistão e a camisa do cilindro. Os parâmetros topográficos relacionados aos vales (diâmetro e profundidade) e também ao número de cavidades na superfície foram os parâmetros que mais influenciaram na distribuição e retenção do lubrificante, permitindo uma maior força hidrodinâmica de sustentação entre as superfícies móveis (anel de pistão / cilindro). Isso reduziu a força de atrito e melhorou a vida útil do cilindro.

Palavras-chave - Topografia; tribologia; lubrificação; camada de cromo; motor à combustão.

ABSTRACT

Energy loss and wear due to relative movement between contacting surfaces in a cylinder/piston tribological system has been a persistent problem since the creation of the first internal combustion engine in 1854. During engine operation, there are regions where the pressure established by a thin film of lubricant is not sufficient to keep the surfaces relatively separated during movement, causing the surfaces to come into contact with each other. In addition to lubricants and protective coatings, texturing the cylinder surface can help reduce friction and wear in internal combustion engines. Surface topography has a major influence on the performance of internal combustion engines, where texturing with microcavities affects the distribution and retention of oil on the surface, which can lead to better lubrication of the tribological system and reduce wear. Therefore, this work evaluates the role of surface topography on the retention and distribution of oil in combustion engine components, analyzing the difference in wear due to the possible difference in oil retention and distribution capacity between the X and Y groups studied. The samples were evaluated using optical microscopy, 2D roughness and three-dimensional optical interferometry, as well as functional running-in tests. The specimens from group X had surfaces characterized by a greater number of shallower microcavities. These characteristics led to better engine performance during wear tests, attributed to better retention and distribution of the lubricant between the piston rings and the cylinder liner. The topographical parameters related to the valleys (diameter and depth) and also the number of cavities on the surface were the parameters that had the greatest influence on the distribution and retention of the lubricant, allowing for a greater hydrodynamic support force between the moving surfaces (piston ring / cylinder). This reduced the friction force and improved the service life of the cylinder.

Key words: Topography; tribology; lubrication; chromium layer; combustion engine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração do ciclo de um motor 2 tempos (à esquerda) e um motor 4 tempos (à direita). Adaptado de [14].	19
Figura 2: Representação do conjunto: Pistão, anéis do pistão e biela. Adaptado pelo autor [14].	20
Figura 3: Cilindro de um motor à combustão interna de ciclo de operação 2 tempos. Camisa do cilindro apresentado à direita com o cilindro em corte. Fonte: Autor.	21
Figura 4: Ilustração de uma célula de eletrodeposição. O elemento cobre (Cu), é depósito sobre um metal (Me). Adaptado de [53].	22
Figura 5: Representação dos mecanismos de desgaste. Fonte: [71].	29
Figura 6: Representação esquemática da curva de Stribeck [13]. A curva de Stribeck plota o coeficiente de atrito (ou forças) para um tribossistema como uma função das propriedades do lubrificante: viscosidade x velocidade de deslizamento / carga.	31
Figura 7: Texturas fabricadas por uma combinação de ambas as técnicas. Superfícies fabricadas com acabamento de texturização apresentam menores coeficientes de atrito. Fonte: Lubricants, Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives.	33
Figura 8: Representação esquemática de superfície em 2D e parâmetros de rugosidade apresentados na curva Abbott. Fonte: Adaptado pelo autor: DIN EN ISO 13565 (1998).	34
Figura 9: Faixas ideais de parâmetros de texturização em diferentes faixas de velocidades. Adaptado de [49].	37
Figura 10: Diferentes padrões de textura de superfície na camisa do cilindro com parâmetros variáveis conforme os diferentes intervalos de velocidade. Adaptado de [49].	38
Figura 11: Relação entre a densidade de área S_p , razão profundidade/diâmetro das microcavidades e a pressão do filme P_a sob as velocidades de (a) 1m/s, (b) 5m/s e (c) 8m/s. Adaptado de: [49].	39
Figura 12: Gráfico da influência da profundidade de microcavidades no coeficiente de atrito em diferentes velocidades com diâmetro constante. Adaptado de [72].	40
Figura 13: Ilustração de diferentes geometrias de texturas de superfície [74].	41
Figura 14: Exemplo da distribuição de pressão sobre um deslizador paralelo totalmente texturizado com cavidade na forma de tampas esféricas como previsto pela	

equação de Reynolds e um tratamento de conservação de massa de cavitação Adaptado de [52].	42
Figura 15: Distribuição de pressão em uma textura única com cavitação. Adaptado de [52].	43
Figura 16: Distribuição de pressão em uma microcavidade ao longo da direção de fluxo. Adaptado de [73].	44
Figura 17: Esquema do método de análise utilizado no presente trabalho.	45
Figura 18 - Esquema do método de análise utilizado no presente trabalho.	46
Figura 19: Fixação com cilindros montados no dispositivo para ser submerso no banho de cromo.	47
Figura 20: Dispositivo submerso no banho de cromo com o polo positivo e negativo para o fechamento do circuito do processo de eletrodeposição.	48
Figura 21: Máquina de polimento eletrolítico utilizada para revelação das trincas da camada de cromo da superfície de deslize de amostras de cilindros. Fonte: Fabricante Struers Ensuring Certainty.	50
Figura 22: Camada de cromo da superfície de deslize de amostras de cilindros com preparação de polimento e ataque eletrolítico para revelação das trincas.	51
Figura 23: Região do ponto morto superior analisada para as medições de topografia 3D.	52
Figura 24: Regiões do ponto morto superior analisada para as medições de topografia 3D. Três regiões analisadas, r1 (acima do ponto morto superior, região sem desgaste), r2 (região do ponto morto superior, região de maior desgaste), r3 (região abaixo do ponto morto superior, com desgaste moderado).	53
Figura 25: Imagem bidimensional obtida a partir de um microscópio digital (à esquerda) e imagem com aplicação de um threshold para quantificação de vales na superfície da camada de cromo brunida.	54
Figura 26: Esquema da bancada de teste, com seus respectivos equipamentos. Fonte: BIONDO (2019).	55
Figura 27: Esquema de medição de desgaste das amostras de cilindros testadas.	58
Figura 28: Posições angulares medidos em torno da circunferência do cilindro para avaliação de desgaste.	58
Figura 29: Superfície cromada após polimento eletroquímico para avaliação das trincas, à direita grupo Y e à esquerda grupo X. Mesma magnificação para a comparação de densidade de trincas.	59

Figura 30: Densidade de trincas individuais de cada amostra do grupo X (azul) e do grupo Y (vermelho).....	60
Figura 31: Média e desvio padrão dos valores de densidade de trincas de cada amostra do grupo X (azul) e do grupo Y (vermelho).	60
Figura 32: Curva Abbott-Firestone do grupo X (em azul) e do grupo Y(em laranja).	61
Figura 33: Parâmetro de rugosidade S_k da curva Abbott-Firestone.....	62
Figura 34: Parâmetro de rugosidade S_{pk} referente a picos da superfície a partir da curva Abbott-Firestone.	62
Figura 35: Parâmetro de rugosidade S_{vk} referente a vales da superfície a partir da curva Abbott-Firestone.	63
Figura 36: Parâmetro de retenção de óleo disponível na superfície calculado a partir dos parâmetros da curva Abbott-Firestone.	64
Figura 37: Média do perfil de profundidade do grupo X e Y.	65
Figura 38: Perfil de profundidade do grupo X apresentando profundidade moderada.	65
Figura 39: Perfil de profundidade do grupo Y apresentando grande variação da profundidade das microcavidades.....	65
Figura 40: Resultados da quantidade de microcavidades (vales) das amostras analisadas do grupo X e Y.	66
Figura 41: Morfologia da superfície 2D das amostras de cilindros do grupo X (à esquerda) e do grupo Y (à direita).....	67
Figura 42: Área média das microcavidades do grupo X e Y.	68
Figura 43: Diâmetro médio das microcavidades do grupo X e Y.....	68
Figura 44: Razão entre a profundidade e diâmetro das microcavidades do grupo X e Y.....	69
Figura 45: Resultados de desgaste obtidos nos testes de bancada: à esquerda resultados individuais de desgaste para cada amostra de cilindro e à direita resultado médio do desgaste.	70
Figura 46: Superfície da camada do grupo Y (à esquerda) e grupo X (à direita) exemplificando o efeito das microcavidades da superfície de cromo na lubrificação da superfície e pressão hidrodinâmica. Fonte: Próprio autor.	71
Figura 47: Avaliação do desgaste a partir da topografia da superfície após teste de durabilidade da variante X.....	72

Figura 48: Avaliação do desgaste a partir da topografia da superfície após teste de durabilidade da variante Y.....	72
Figura 49: Rotações dos motores obtidas antes do seu emperramento forçado para o grupo X (azul) e o grupo Y (vermelho).	74
Figura 50: Média das rotações dos motores obtidas antes do seu emperramento forçado para o grupo X (azul) e o grupo Y (vermelho).	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.1.1 Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA	18
3.1.1 Motor à combustão interna do ciclo de dois e quatro tempos	18
3.1.2 Cilindro e o Conjunto Pistão	19
3.2 PROCESSOS ELETROQUÍMICOS	21
3.2.1 Cromo duro	22
3.2.2 Influência dos parâmetros de cromagem na camada	24
3.2.3 Formação de microtrincas	24
3.3 PROCESSO DE BRUNIMENTO.....	25
3.3.1 Brunimento Plateau (Platô)	26
3.4 TRIBOLOGIA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	27
3.4.1 Desgaste	28
3.4.2 Lubrificação	29
3.5 INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE NA LUBRIFICAÇÃO	31
3.5.1 Parâmetros de rugosidade	33
3.5.2 Efeitos da texturização de superfícies na lubrificação.....	35
4. METODOLOGIA	45
4.1 PRODUÇÃO DE AMOSTRAS.....	46
4.1.1 Cromagem dos cilindros	47
4.1.2 Brunimento dos cilindros	48
4.1.3 Medição dimensional das amostras	49
4.2 ANÁLISE TOPOGRÁFICA E MORFOLÓGICA DA SUPERFÍCIE	49
4.2.1 Análise de densidade de trincas	50
4.2.2 Análise topográfica da superfície	51
4.2.2.1 Análise topográfica da superfície de cilindros não testados	51
4.2.2.2 Análise topográfica da superfície de cilindros testados em bancada	53
4.2.3 Análise morfológica da superfície	53
4.3 TESTES DINÂMICOS EM BANCADA.....	54
4.3.1 Testes funcionais em bancada	55

4.3.2	Teste de durabilidade em bancada	56
4.4	MEDIÇÃO E ANÁLISE DE DESGASTE	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE TRINCAS	59
5.2	ANÁLISE DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE APÓS O BRUNIMENTO	61
5.2.2	Caracterização das microcavidades	66
5.3	MEDIÇÃO DE DESGASTE APÓS TESTE DE DURABILIDADE	69
5.4	TESTES FUNCIONAIS.....	73
6	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

A perda de energia por atrito devido ao movimento relativo entre superfícies em contato em um sistema tribológico de cilindro/pistão é um problema presente o qual existe desde a criação do primeiro motor a combustão interna em 1854 [13] e que deve ser minimizado. A tribologia do conjunto do pistão, o qual é formado pelo cilindro, pistão e anel do pistão, é um assunto complexo, pois inclui os regimes de lubrificação hidrodinâmica, microelastohidrodinâmica, mista e de limite, além das condições severas de temperatura e pressão presentes durante o uso. A literatura [1-7] sugere que lubrificantes, revestimentos e textura superficial são os principais campos de pesquisa relacionados à redução de atrito e desgaste no conjunto de pistão. Estudos mostram que os componentes deste sistema tribológico são responsáveis pelo maior fator de perdas por atrito do motor, devido ao contato de trabalho [13]. E uma forma de aumentar a durabilidade e reduzir esse atrito é criar um filme de espessura de óleo lubrificante para separar essas superfícies móveis.

Objetivando aprimorar as propriedades superficiais e melhorar o desempenho em serviço, os tratamentos de superfície se destacam em diversos setores do mercado, como automobilístico, doméstico e industrial. O atrito e o desgaste presentes em motores à combustão interna impactam diretamente no consumo de combustível e, conseqüentemente, no nível de emissões do motor. O desgaste quando acontece em níveis excessivos pode causar folgas e vibrações inaceitáveis na performance do motor [32]. Durante o funcionamento do motor existem regiões onde a pressão estabelecida dentro da fina película de lubrificante não é suficiente para manter as superfícies relativamente separadas durante o movimento, levando as superfícies a entrarem em contato uma com a outra. As regiões mais afetadas onde a película de lubrificante é mínima, é quando a velocidade do pistão é zero, pois neste caso, conforme a curva de Stribeck, a pressão de contato entre o sistema tribológico é máxima [8].

Além da lubrificação e do uso de revestimentos, a texturização da superfície do cilindro através da criação de microcavidades [10] pode auxiliar na redução de atrito e desgaste dos motores de combustão interna, cuja performance foi demonstrada experimentalmente por meio de testes de desgaste [10,11]. Além disso, as microcavidades afetam a distribuição e retenção de óleo na superfície, o que propicia

uma melhor lubrificação do sistema tribológico, reduzindo o desgaste [12]. Desta forma, a motivação para realização do presente estudo é caracterizar e avaliar a influência das microcavidades obtidas através do brunimento de camisas de cilindro revestidas com cromo duro na redução de desgaste quando aplicados em condições de uso similares aos encontrados nos produtos comerciais em que são utilizados.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o de caracterizar e avaliar a influência de microcavidades superficiais, obtidas através do brunimento de camisas de cilindro revestidos com cromo duro, na sua capacidade de redução do desgaste, quando aplicados em condições de uso similares aos encontrados nos produtos comerciais em que são utilizados.

2.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Produção de cilindros com diferentes parâmetros de cromagem a fim de se obter diferentes morfologias e topografias da superfície de deslize;
- ii. Avaliação da morfologia e topografia da superfície de deslize;
- iii. Realizar testes em bancada de durabilidade e funcionais, visando comparar o desempenho de ambas morfologias obtidas;
- iv. Caracterizar as superfícies obtidas, comparar e relacionar com os resultados encontrados em testes de bancada e funcionais;
- v. Encontrar parâmetros que definam a otimização da topografia da superfície de deslize.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas capazes de transformar a energia química contida nos combustíveis em trabalho mecânico, através do movimento recíproco (sobe e desce) do pistão dentro do cilindro. A fase de produção de potência do ciclo de operação de um motor tem começo dentro do cilindro com o processo de compressão da mistura ar-combustível. Após a compressão inicia-se a queima desta mistura, com a consequente liberação da energia química contida no combustível e a geração de produtos de combustão à elevada temperatura, o que aumenta a pressão dentro do cilindro. Os gases queimados se expandem dentro do cilindro, realizando trabalho sobre o êmbolo. Desta forma, como o motor é operado continuamente, potência mecânica é produzida [13].

3.1.1 Motor à combustão interna do ciclo de dois e quatro tempos

Grande parte dos motores à combustão interna transformam o movimento alternativo do êmbolo em movimento rotacional na árvore de manivelas. Existem dois ciclos de operação que são comumente utilizados: o de dois-tempos e o de quatro-tempos. Ambos os ciclos se baseiam no princípio de funcionamento descrito anteriormente, porém se diferenciam no processo de troca gasosa. Em um motor do ciclo de dois-tempos, tanto os processos de admissão da mistura ar-combustível fresca no cárter e de compressão, quanto os processos de lavagem e escape ocorrem simultaneamente. Já para motores do ciclo de quatro-tempos cada um destes processos ocorre em um momento distinto dentro do ciclo. Sendo assim, enquanto um motor do ciclo de dois-tempos tem seu ciclo completo com uma revolução da árvore de manivelas (360°), o motor do ciclo de quatro-tempos tem o seu ciclo completo com duas revoluções da árvore de manivelas (720°), na Figura 1 é apresentado o ciclo de um motor 2 tempos e um motor 4 tempos. Motores de 2 tempos são encontrados em equipamentos mais leves, são usados onde baixo custo, praticidade e peso leve são importantes. Devido à leveza e simplicidade e à ausência do mecanismo de atuação da válvula, o custo inicial do motor de dois tempos é menor.

Já os motores chamados 4 tempos estão presentes em equipamentos mais pesados, como carros e caminhões. Eles podem ser movidos a gasolina e diesel e são classificados como motores de combustão interna. Devido ao peso comparativamente maior e ao mecanismo de válvula complicado, o custo inicial do motor de quatro tempos é maior. Via de regra, os maiores (~30.000 MW) e menores (~15 W) motores a êmbolo no mundo usam o ciclo de dois-tempos [31].

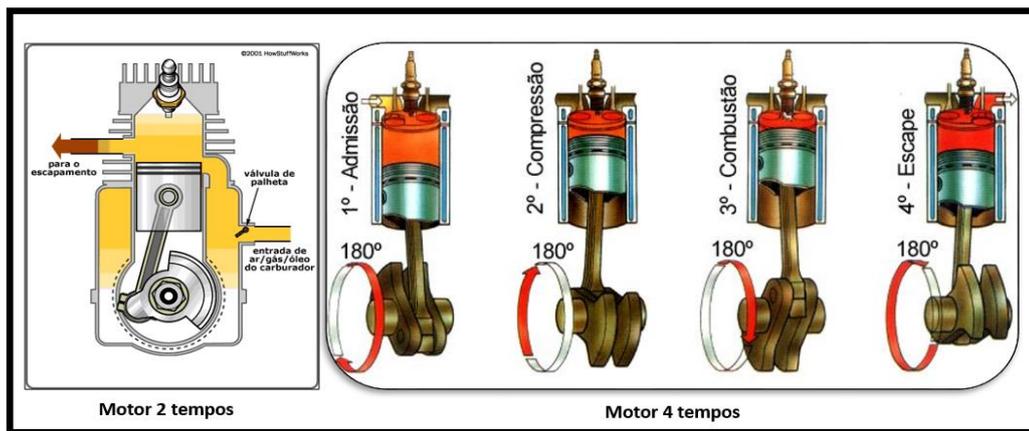


Figura 1: Ilustração do ciclo de um motor 2 tempos (à esquerda) e um motor 4 tempos (à direita). Adaptado de [14].

3.1.2 Cilindro e o Conjunto Pistão

O conjunto do pistão é composto por um pistão, seus anéis, pino e biela [14], conforme está ilustrado na Figura 2. O componente responsável por transmitir a energia resultante da expansão dos gases, após a combustão para a biela é o pistão, o qual é geralmente fundido em liga de Al-Si (alumínio - silício) por ser uma liga que apresenta menor densidade em comparação aos aços e por apresentar boa condutividade térmica. O conjunto de anéis é acomodado na parte superior do pistão, onde a principal função desse grupo de anéis é garantir a vedação correta dos gases entre o cilindro e o cárter do motor [14].

Existem dois anéis de compressão no ciclo de um motor à combustão interna de dois tempos. O primeiro, também conhecido como anel superior, é mecanicamente mais estressado durante os ciclos do motor por estar mais próximo da câmara de combustão, a Figura 2 ilustra a posição dos anéis de compressão. Os anéis do

conjunto pistão normalmente são de ferro fundido cinzento devido à alta resistência ao desgaste, mas a resistência deve ser proporcional às tensões termomecânicas. São projetados para um diâmetro maior que o cilindro e, quando comprimidos e montados, se encaixam nas paredes de contato da camisa do cilindro [13,14].

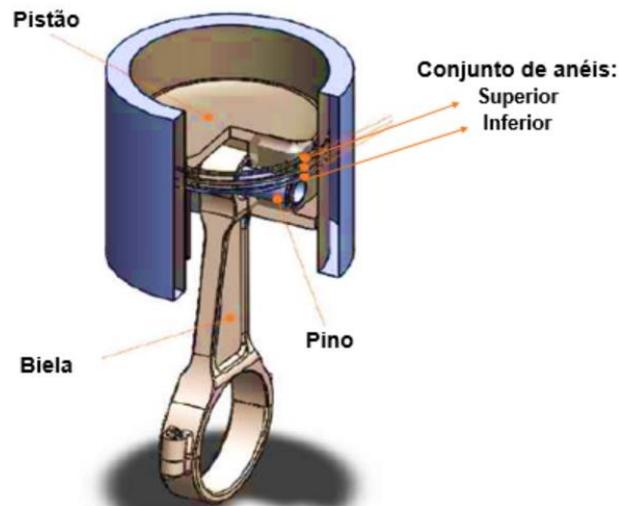


Figura 2: Representação do conjunto: Pistão, anéis do pistão e biela. Adaptado pelo autor [14].

O cilindro, o qual é composto por: conjunto cabeçote, camisa do cilindro e câmara de combustão, (Figura 3) é um importante componente para o conjunto câmara de combustão. O cilindro fornece um espaço fechado onde ocorre a combustão do combustível. A mistura de ar e combustível é introduzida no cilindro por meio de uma válvula de admissão. Em seguida, a vela de ignição provoca a ignição da mistura, gerando uma reação de combustão. Este componente é projetado e desenvolvido para suportar altas temperaturas e pressões, desta maneira é importante salientar que camisas de cilindro de ligas Al-Si (para ligas hipoeutéticas e eutéticas) precisam de revestimentos na superfície da camisa para suportar as altas temperaturas e pressões durante a combustão, além de possuir propriedades mecânicas capazes de resistir aos ciclos do motor e resistência ao desgaste suficiente em sua superfície para suportar o movimento recíproco (sobe e desce) do pistão.



Figura 3: Cilindro de um motor à combustão interna de ciclo de operação 2 tempos. Camisa do cilindro apresentado à direita com o cilindro em corte. Fonte: Autor.

3.2 PROCESSOS ELETROQUÍMICOS

Os processos de eletrodeposição são aqueles que permitem a formação de depósitos sólidos sobre superfícies condutoras [15]. Segundo a literatura [16], para as reações químicas acontecerem e para que seja possível ocorrer a eletrodeposição, são necessários estímulos elétricos, os quais devem possuir dois polos divergentes para que o circuito elétrico esteja completo, promovendo dois efeitos distintos. Em um polo, ocorre a deposição de material, e no outro polo, sua retirada. Para fazer isso, a corrente, deve ser capaz de fluir de um polo para o outro através de um eletrólito com propriedades condutoras. Na Figura 4 é apresentado uma célula de eletrodeposição. A partir da diferença da carga elétrica nos polos, ocorrem dois processos competitivos, um de redução e outro de oxidação, denominando este de processo redox. No eletrodo negativo, denominado anodo, os ânions são direcionados, possibilitando a oxidação do material e sua perda de massa, com a consequente perda de elétrons e aumento da oxidação. O outro polo (competidor) é o cátodo, ou seja, o eletrodo positivo, onde ocorre a direção do cátion, promovendo a redução e aumento de massa do material, com aumento de elétrons e diminuição do seu nox [17].

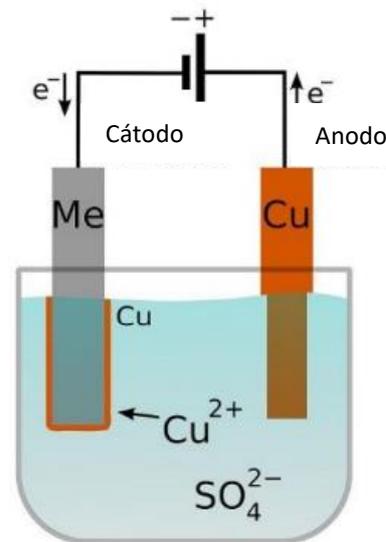
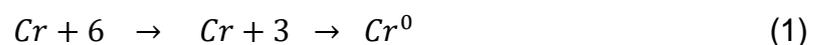


Figura 4: Ilustração de uma célula de eletrodeposição. O elemento cobre (Cu), é depósito sobre um metal (Me). Adaptado de [53].

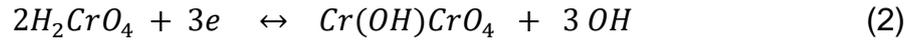
3.2.1 Cromo duro

Revestir a superfície de deslizamento de cilindros Al-Si é de extrema importância para melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas dos cilindros. Parte do comportamento tribológico do material é determinado por sua estrutura e propriedades, como atrito e resistência de contato, que podem ser modificadas e otimizadas por meio de revestimentos de superfície para reduzir o desgaste. Os revestimentos de cromo duro apresentam sua aplicação onde são exigidos altos níveis de dureza, resistência à corrosão e baixo coeficiente de atrito [18]. O revestimento de cromo duro pode, além de elevar a dureza de superfície auxiliar nas propriedades tribológicas da superfície [19].

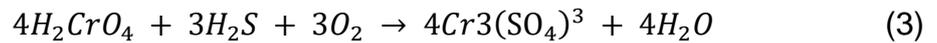
O revestimento de cromo duro é produzido por eletrodeposição a partir de uma solução contendo ácido crômico (H_2CrO_3) e um ânion catalítico na proporção adequada [20]. Liebreich sugere que a deposição de cromo é realizada em vários estágios, através das seguintes ocorrências:



Segundo Geuther [21] em suas experiências, foi possível depositar um filme marrom claro no cátodo. A deposição do filme estava ligada à equação [21]:



A reação global de deposição do cromo a partir do ácido crômico pode ser representada pela seguinte equação química [21]:

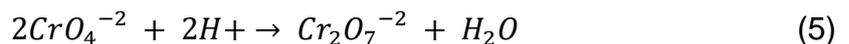


Nessa equação, o ácido crômico (H_2CrO_4) é reduzido a cromo trivalente (Cr^{3+}) pelo sulfeto de hidrogênio (H_2S) e oxigênio (O_2), resultando na deposição de cromo na forma de sulfato de cromo ($Cr(SO_4)_3$) e água (H_2O) [21].

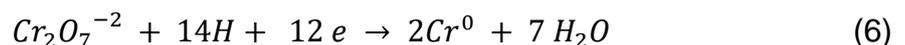
O trióxido de cromo é o composto mais utilizado comercialmente para o processo de cromagem. Apresenta a característica de reagir com a água, formando assim um composto final de ácido dicrômico, além de ácido monocrômico como estágio intermediário [20]:



Com os banhos de cromo em solução aquosa e com o equilíbrio é estabelecido acontece a seguinte equação:



Como a concentração de cromato nos banhos é alta, esse equilíbrio é fortemente deslocado para a direita, ou seja, o dicromato é o componente com maior concentração [20]:



O material eletrodepositado, cromo duro, é extremamente duro e resistente à corrosão, assim como excelente resistência ao desgaste. O cromo duro pode ser aplicado em componentes como: anéis de pistão, amortecedores, amortecedores, pistões de freio e camisas de cilindro [22]. Os principais fatores de seleção para a

decisão em usar o cromo duro devem levar em consideração as seguintes características [22,23]:

- A dureza inerente e a resistência ao desgaste do cromo eletrodepositado
- A espessura do cromo necessária
- A forma, tamanho e construção da peça a ser banhada
- O tipo de metal do qual a peça é feita
- Requisitos de mascaramento (para peças que devem ser cromadas seletivamente)
- Requisitos dimensionais (ou seja, se o acabamento mecânico é necessário ou não e pode ser realizado de acordo com as tolerâncias desejadas).

3.2.2 Influência dos parâmetros de cromagem na camada

Os principais fatores que influenciam na eletrodeposição de cromo são: concentração do ácido crômico; proporção entre ácido crômico e catalisador; temperatura; catalisador utilizado; densidade de corrente; tempo de deposição e difusão de hidrogênio [24, 25]. A temperatura dos banhos de cromo pode afetar a dureza do revestimento final, com diferentes propriedades e características da camada, assim como a densidade de corrente, difusão de hidrogênio e o tempo influenciam diretamente na deposição do metal [21,25].

3.2.3 Formação de microtrincas

No momento da deposição da camada de cromo há a modificação do retículo cristalino, o qual possui estrutura inicial hexagonal de face centrada no seu estado hexavalente e, após se transformar em metal, apresenta sua estrutura para cúbico de corpo centrado [21]. A formação das microtrincas são benéficas para o alívio das tensões geradas no processo de eletrodeposição e a sua formação está relacionada com a formação de tensões residuais presentes na camada depositada [23]. As tensões residuais são um fenômeno natural que ocorre durante a eletrodeposição de metais. No processo de eletrodeposição acontece uma reorganização dos átomos de cromo depositados, resultando em tensões internas na camada. No caso específico

da camada de cromo, essas tensões podem ser significativas e influenciar a qualidade e a aderência do revestimento [66].

A condição química do banho influencia a quantidade de microtrincas, por exemplo: cromo convencional, cromo com catalizador fluoretado, cromo com banho de alta eficiência [21]. As microtrincas influenciam diretamente a resistência mecânica da camada de cromo, quanto maior a complexidade dessa rede de fissuras, a partir de condições de maiores taxas de deposição, há o aumento da quantidade de microtrincas. A adição de sulfato ao banho de cromo aumenta a complexidade da rede de trincas e, portanto, a densidade. Para alguns banhos, mudanças na temperatura e na concentração do catalisador também podem ser eficazes no aumento da rede de microtrincas [22].

As microtrincas diminuem a tensão no depósito à medida que a espessura do depósito aumenta. A tensão é inversamente proporcional ao número de microtrincas [65]. As camadas eletrodepositadas sem microtrincas são altamente tensionadas e apresentam menor dureza comparadas às camadas de cromo com microtrincas [67]. As microtrincas não são espaços vazios, mas áreas com estrutura e composição diferentes das da massa, mais óxido de cromo, o que aumenta a microdureza do depósito [66].

3.3 PROCESSO DE BRUNIMENTO

O processo de brunimento é uma etapa de acabamento, o qual possibilita um acabamento da superfície com texturas específicas, além de melhorar as características da superfície da região acabada. Com o objetivo de melhorar a exatidão dimensional, pode ser considerada um processo de usinagem de precisão. Auxilia no controle de parâmetros de topografia e rugosidade das superfícies. Usualmente é a última operação de acabamento de superfícies cilíndricas, pois propicia uma boa capacidade de retenção de lubrificantes [26]. O processo de brunimento pode gerar importantes características para a superfície acabada, como [26]: geração de superfícies circunferenciais e de corte retilíneo, corrigindo desvios geométricos de processos anteriores; obtenção de acabamentos com texturas de superfícies desejadas, com boa qualidade dimensional; remoção rápida e econômica

de partículas com distorções e aquecimentos mínimos. A norma DIN 8589 explica que o processo de brunimento compõe parte dos processos de fabricação por abrasão que possuem ferramentas com arestas de corte geometricamente indeterminadas, multicortantes que se mantêm em incessante contato com a superfície da peça. O abrasivo deve ser a parte a ser desgastada, pois é responsável pela remoção de material nas peças usinadas, ou seja, o grande número de grãos abrasivos com arestas cortantes, cujas características diferem-se entre eles e são de difícil determinação, penetram na superfície da peça, resultando em inúmeros cavacos [28]. Os grãos abrasivos devem ser compostos de grãos cristalinos e duros, afim de possuir uma dureza maior que a do material a ser acabado, mas deve ser de natureza frágil, de modo que, se partem em pequenas partículas, formando novos grãos e gerando novas arestas pontiagudas [28], para que assim o cavaco da remoção de material seja formado. As novas arestas pontiagudas formadas (partes mais salientes dos grãos) devem penetrar na superfície da peça durante a usinagem, desgastando-os até arestas planas que se renovam durante o processo de brunimento [27].

Dependendo da aplicação, pode-se utilizar o brunimento de desbaste, acabamento ou combinado (desbaste e acabamento) [68]. No desbaste, o material é removido com a utilização de pedras abrasivas com grãos grosseiros afim de obter curtos tempos de operação. No processo de acabamento são removidos valores mínimos de material e sobretudo com a redução da rugosidade da superfície por meio da utilização de pedras abrasivas de grãos finos [68]. Em situações de elevadas exigências de um produto, recomenda-se a utilização de um brunimento combinado.

3.3.1 Brunimento Plateau (Platô)

O brunimento de platô é um processo especial que despertou interesse nos mercados de fabricação e retificação de motores de combustão interna. O método "plateau" é utilizado para polir as buchas dos pistões de motores de alta potência, principalmente motores diesel [27]. Além do desbaste normal, o processo é dividido em duas operações para obter uma boa superfície lisa e espelhada que retém o óleo: pré-acabamento e acabamento final. Na primeira operação (pré-polimento), utiliza-se abrasivos com uma granulometria mais grossa para retirar até 0,06mm de excesso de material, enquanto na etapa de acabamento, usa-se abrasivos de menor

granulometria para polir a peça e retira-se 0,005 a 0,01mm, sendo que esta etapa dificilmente altera a dimensão da peça. Em vista disso, os erros de forma devem ser corrigidos durante as operações de desbaste. O brunimento platô tem a finalidade de remover os picos residuais da rugosidade produzidos por operações anteriores em poucos segundos, mantendo os vales intactos para reter o lubrificante. Desta maneira, aumenta-se a área de contato lubrificado e propicia uma maior resistência ao desgaste na parede do cilindro com os anéis do pistão [27].

3.4 TRIBOLOGIA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

A tribologia é o estudo do atrito, lubrificação e desgaste, o qual pode ser utilizado para minimizar perdas e garantir a eficiência e durabilidade do motor, que é uma necessidade crescente na indústria [33]. O campo da tribologia envolve tribossistemas, os quais há três tipos no conjunto pistão: o deslizamento da saia do pistão sobre o cilindro; o deslizamento da superfície do pistão com o movimento de rotação da biela e, finalmente, a superfície do anel em contato com a pista deslizante do cilindro, durante o movimento alternativo (reciprocante), que é o foco deste trabalho [33].

Em um motor à combustão interna, quando em funcionamento, grande parte da energia transformada é dissipada, a partir de perdas por calor e fricção, reduzindo desta forma as eficiências térmicas e mecânicas dos motores devido ao deslizamento do conjunto pistão na superfície do cilindro [13]. As perdas mecânicas por atrito, impactam diretamente no consumo de combustível e, conseqüentemente, no nível de emissões do motor. Além disso, o desgaste quando acontece em níveis excessivos, pode causar folgas e vibrações inaceitáveis na performance do motor [32].

Para entender os conceitos da tribologia, como atrito e desgaste do sistema é necessário analisar o tribossistema, que é formado por: anel de compressão do pistão; pista de deslize do cilindro; lubrificante; temperatura, gases e pressões. O estudo da tribologia de sistema pode trazer benefícios ao motor, como: aumento da potência do motor; redução no consumo de combustível e do óleo lubrificante; redução no nível de emissões de gases poluentes e o aumento da durabilidade, confiabilidade e vida útil do motor.

3.4.1 Desgaste

O desgaste pode ser considerado conforme a norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é; o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso [69].

Os contatos tribológicos de superfície são observados em muitos componentes críticos de desempenho, como pistões, cilindros, anéis e rolamentos axiais. No setor automotivo o desgaste pode chegar em até um terço de todo o consumo de combustível para superar o atrito nos componentes do motor [36].

Os mecanismos de desgaste podem ser classificados em mecânicos, químicos e térmicos. Essa é uma classificação macroscópica e abrangente na qual a maioria dos modelos de desgaste está incluída [70]. No desgaste mecânico, ocorrem a deformação e a fratura, que são processos importantes em materiais dúcteis e frágeis, respectivamente. O desgaste químico caracteriza-se pela formação de um filme de reação química, esse desgaste químico é causado por reações triboquímicas, ou seja, quando reações de corrosão são potencializadas pela liberação de energia resultante do movimento relativo (reagem com o meio ambiente) [34]. O desgaste térmico é caracterizado não apenas pela fusão local do material devido ao aquecimento causado pelo atrito, mas também por fraturas em materiais frágeis após choques térmicos. O desgaste depende do sistema tribológico e pode ser causado por uma combinação de mecanismos de desgaste [71], conforme a Figura 5.

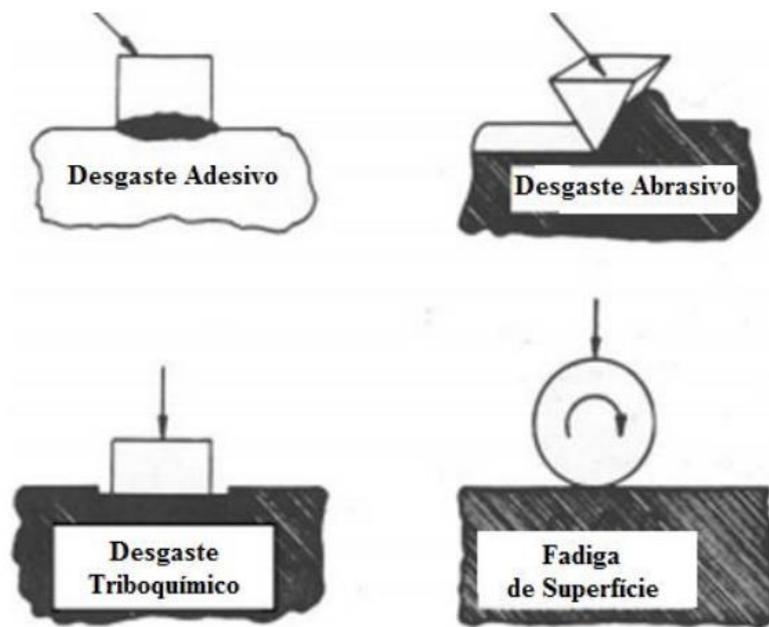


Figura 5: Representação dos mecanismos de desgaste. Fonte: [71].

Os mecanismos de desgaste verificados em anéis de pistões são classificados em: adesivo, durante o amaciamento do motor, seguido de abrasivo e corrosivo durante o uso [29]. Desgaste por abrasivo é o principal mecanismo de desgaste do sistema tribológico cilindro e anéis do pistão. Ocorre quando há partículas duras pressionadas entre o deslizamento das superfícies. Essas podem ser resultado de resíduos sólidos da combustão, partículas metálicas da superfície desgastada ou resultantes do processo de fabricação das superfícies e poeira/sujeira que passaram pelo sistema de filtragem do ar.

Durante o funcionamento do motor existem regiões, onde a pressão estabelecida dentro da fina película de lubrificante não é suficiente para manter as superfícies relativamente separadas durante o movimento, levando as superfícies a entrarem em contato uma com a outra [29].

As perdas devido ao desgaste podem ser reduzidas por otimização, além de um design apropriado, produção, montagem, acessórios e microestrutura do componente correta para a aplicação [69].

3.4.2 Lubrificação

A definição de lubrificação pode ser considerada como: "substâncias que tendem a reduzir o atrito entre superfícies de atrito ou de rolamento" [37]. A separação da superfície é a função mais importante dos lubrificantes. Minimizar o efeito do atrito entre duas superfícies é de suma importância nos sistemas mecânicos, pois forma um filme/película (líquido, sólido, gasoso) que separa as superfícies que estão se movimentando, reduzindo assim o contato direto de componentes, melhorando a dissipação do calor devido ao movimento e diminuindo o desgaste exercido [37].

O mecanismo de lubrificação dos motores 2 tempos e 4 tempos são totalmente diferentes, o qual a lubrificação do motor 2 tempos acontece pelo próprio combustível, o qual deve receber óleo no abastecimento, pois os motores 2 tempos não possuem sistema de lubrificação por bomba de óleo. Por ter funcionamento mais intenso que os motores de quatro tempos e não possuir sistema de lubrificação e refrigeração, costumam se desgastar com mais facilidade e sua durabilidade se mostra bastante inferior quando comparados aos motores 4 tempos [31]. Nos motores de quatro tempos o óleo lubrificante é armazenado no cárter e o fluxo de óleo é feito sob pressão através de galerias existentes no motor, ou seja, os motores 4 tempos possuem um sistema de lubrificação independente do tanque de combustível, apresentando maior eficiência na lubrificação do motor quando comparamos com o sistema de lubrificação de um motor de ciclo 2 tempos.

Richard Stribeck, investigou o atrito em mancais de rolamento como funções de carga e velocidade. Sua caracterização do atrito trouxe a conhecida curva de Stribeck, o qual é extremamente importante [38]. Com lubrificantes afetando fortemente as propriedades tribológicas de materiais em contato, a curva de Stribeck ajuda a mapear o coeficiente de atrito entre duas superfícies de contato separadas por um fluido filme em função do número de Hersey ($\eta \cdot N/P$), onde η é a viscosidade do fluido, N é a velocidade relativa entre o contato superfícies e P é a pressão normal aplicada. A Figura 6 é uma curva de Stribeck típica, mostrando a presença de diferentes regimes de lubrificação, incluindo lubrificação de limite, lubrificação mista e lubrificação hidrodinâmica. O regime de lubrificação limite, que ocorre em baixa velocidade e/ou alta carga, tem contato superfície-superfície apreciável, resultando em um alto atrito. No regime de lubrificação mista, que ocorre em velocidade e carga médias, uma fina película de fluido aparece entre as superfícies; como resultado, a

carga normal é compartilhada tanto pelo filme fluido quanto pelo contato superfície-superfície, reduzindo o atrito.

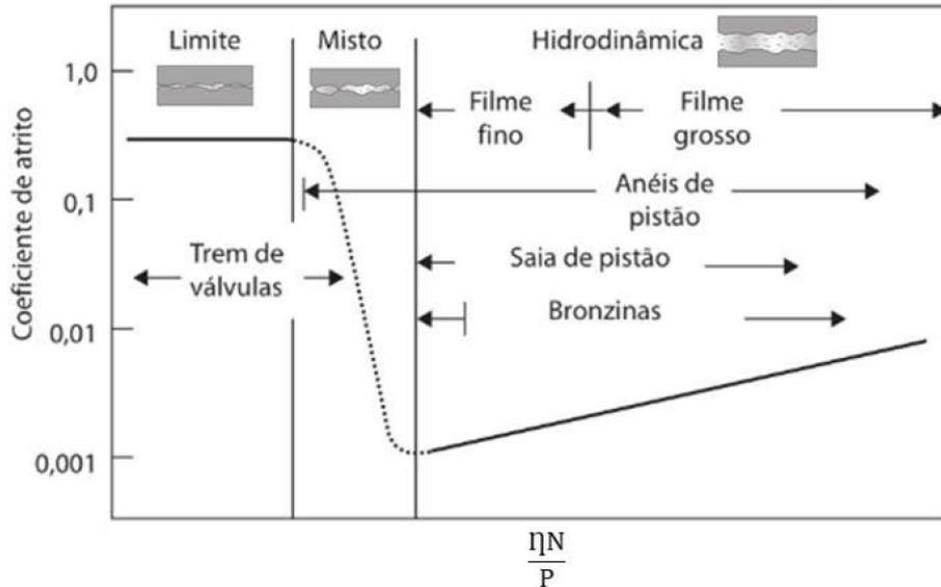


Figura 6: Representação esquemática da curva de Stribeck [13]. A curva de Stribeck plota o coeficiente de atrito (ou forças) para um tribossistema como uma função das propriedades do lubrificante: viscosidade x velocidade de deslizamento / carga.

No regime de lubrificação hidrodinâmica, ocorrendo em alta velocidade e/ou baixa carga, a pressão hidrodinâmica é suportada por um filme de fluido completamente formado que separa a superfície de contato [39]. Como resultado, este regime tem a menor atrito inicial devido à lubrificação elasto-hidrodinâmica. No entanto, à medida que o filme de fluido aumenta, resulta em atrito viscoso, o que novamente aumenta o atrito, como visto no último estágio do regime de lubrificação hidrodinâmica [39]. De particular interesse a este respeito são desenhos de textura de superfície que podem afetar esse comportamento para otimizar o consumo de energia [40]. Estudos recentes mostraram que as microtexturas criadas artificialmente reduzem significativamente atrito e desgaste de superfícies lubrificadas [41]. Especificamente, superfícies microtexturizadas podem modificar esses regimes, de modo a melhorar as propriedades de atrito e desgaste de componentes [42].

3.5 INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE NA LUBRIFICAÇÃO

A topografia da superfície tem um papel importante na lubrificação de sistemas mecânicos e tribológicos. A consideração da topografia da superfície é fundamental no projeto e operação de sistemas tribológicos para garantir uma lubrificação eficiente, reduzir o desgaste e prolongar a vida útil dos componentes mecânicos [76]. Técnicas de acabamento de superfície, como polimento ou revestimentos, podem ser empregadas para otimizar a lubrificação em diferentes aplicações. A topografia da superfície refere-se às características físicas e geométricas da superfície, incluindo rugosidade, textura, morfologia e perfil de aspereza. Essas características da superfície podem influenciar a eficácia da lubrificação de várias maneiras, como por exemplo na formação do filme lubrificante e na capacidade de retenção de lubrificante [76].

A avaliação da topografia de superfícies auxilia a prever o desempenho do componente. Por exemplo, uma superfície de rolamento requer um nível de textura de superfície que permita que o lubrificante seja retido em pequenas bolsas e, ao mesmo tempo, permita que o rolamento role com um mínimo de atrito. Se a superfície for muito áspera, o desgaste pode se desenvolver rapidamente; no entanto, se a superfície for muito lisa, pode ocorrer lubrificação inadequada e emperramento. A outra razão principal para medir uma superfície é controlar o processo de fabricação. Ao medir a topografia da superfície durante o processamento, um operador pode detectar alterações no acabamento da superfície e ajustar o processo de fabricação para garantir que o processo permaneça no limite.

A correta texturização para uma devida aplicação pode auxiliar na redução de desgaste [30] na superfície e também reduzir consumo de lubrificação do sistema e é resultado do processo de brunimento. Para melhorar ainda mais as propriedades tribológicas das superfícies lubrificadas, existem tecnologias como a *Laser Structuring*, que alteram a textura da superfície polida de forma a criar cavidades nos cilindros do motor que podem armazenar lubrificante.

Estudos mostram que a mudança na superfície de deslize a partir da texturização pode apresentar efeitos positivos na redução do desgaste, auxiliando na correta lubrificação, principalmente em regiões mais solicitadas, como o ponto morto superior [30]. A Figura 7 apresenta resultados para o coeficiente de atrito para diferentes superfícies, a superfície lisa, sem presença de texturas apresenta maior

coeficiente de atrito, enquanto superfícies com *dimples* da texturização apresentam menores coeficientes de atrito, para as mesmas condições de carga e lubrificação aplicados.

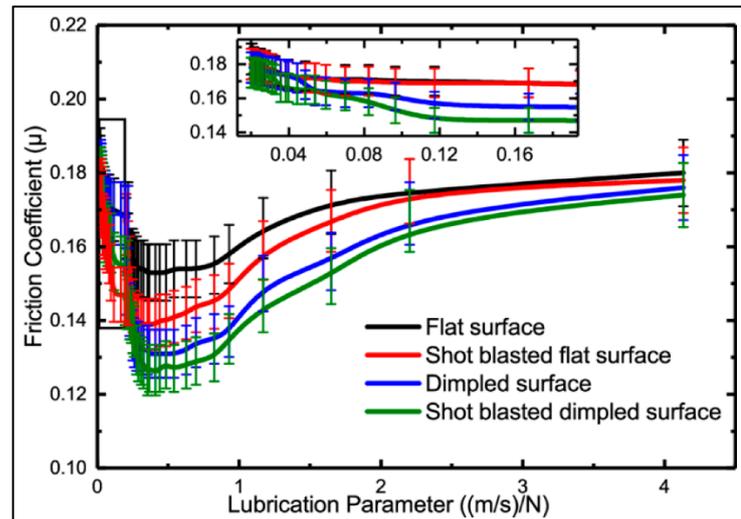


Figura 7:

Figura 7: Texturas fabricadas por uma combinação de ambas as técnicas.

Superfícies fabricadas com acabamento de texturização apresentam menores coeficientes de atrito. Fonte: Lubricants, Multi-Scale Surface Texturing in Tribology—Current Knowledge and Future Perspectives.

3.5.1 Parâmetros de rugosidade

A qualidade da superfície gerada no processo de fabricação pode influenciar na lubrificação e na performance dos componentes que estão diretamente em contato. Essas superfícies podem ser representadas em duas dimensões (2D) e em três dimensões (3D). Uma grande vantagem é a sua precisa descrição para aplicação industrial, além de melhorar a visualização da superfície, aumentar a estabilidade estatística, melhorar detecção e análise, sendo possível representar os dados por muitos métodos. Na Figura 8 está exemplificado uma superfície em 2D, com picos e vales, ao lado da superfície é apresentado a curva Abbott, com os parâmetros: Spk , Sk , Svk , $SMr1$ e $SMr2$ [44].

A curva Abbott também é comumente conhecida como curva Areal Material Ratio. Os

parâmetros são extraídos com base no padrão ISO 13565-2: 1996. Os parâmetros Spk, Sk, Svk, SMr1 e SMr2 são todos derivados da curva Areal Material Ratio com base no padrão ISO 13565-2: 1996. A altura do pico reduzida, Spk, é uma medida da altura do pico acima da rugosidade do núcleo. A profundidade de rugosidade do núcleo, Sk, é uma medida da rugosidade do “núcleo” (pico a vale) da superfície com os picos e vales predominantes removidos. A profundidade do vale reduzida, Svk, é uma medida da profundidade do vale abaixo da rugosidade do núcleo. SMr1, a Porção de Material do Pico, indica a porcentagem de material que compreende as estruturas de pico associadas ao Spk. A porção de material do vale, SMr2, se refere à porcentagem (ou seja, 100% -SMr2) da área de medição que compreende as estruturas de vale mais profundas associadas a Svk [44].

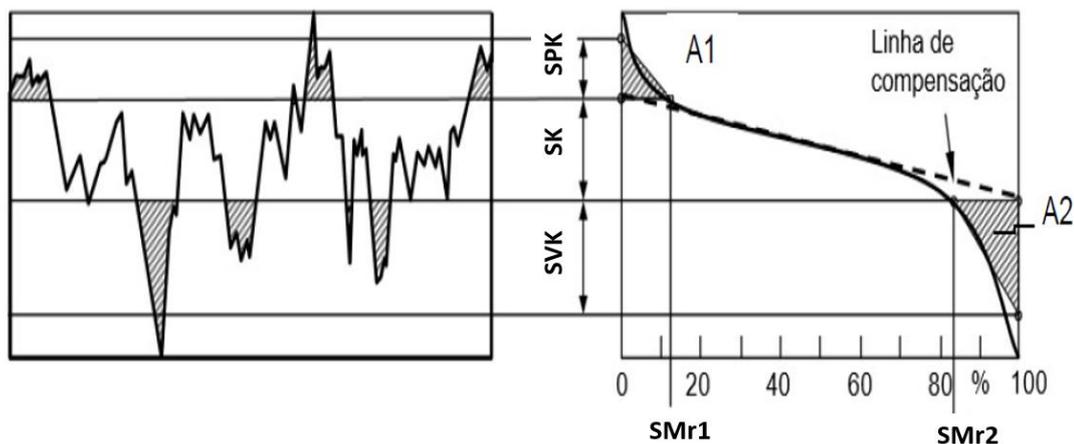


Figura 8: Representação esquemática de superfície em 2D e parâmetros de rugosidade apresentados na curva Abbott. Fonte: Adaptado pelo autor: DIN EN ISO 13565 (1998).

O parâmetro Spk é aplicado na verificação do amaciamento de motores a combustão interna. O Svk é muito empregado em motores que precisam de pontos específicos de lubrificação, pois está relacionado com a capacidade de a superfície reter algum tipo de fluido. Já o parâmetro Sk influencia no desempenho de algumas superfícies, pois quantifica a taxa de desgaste das superfícies em contato [45]. Além dos parâmetros acima mencionados também foi estudado o parâmetro de volume de retenção de óleo (V_o), calculado pela equação 1:

$$V_o = (Svk(100 - Smr2)/200)$$

Este estudo se limitará na definição dos parâmetros de rugosidade 3D capazes de caracterizar as superfícies de cilindros quanto às propriedades de desgaste e retenção de óleo (Sk, Svk, Spk, Smr1, Smr2 e Vo).

3.5.2 Efeitos da texturização de superfícies na lubrificação

A utilização de texturas em uma superfície de deslize, quando utilizada adequadamente, pode alterar positivamente o desempenho tribológico de componentes mecânicos [49]. O reconhecimento de que o perfil da superfície desempenha um papel importante na criação da pressão hidrodinâmica levou os pesquisadores a buscar ativamente técnicas para modificar a topografia das superfícies de contato para facilitar e otimizar a geração da pressão hidrodinâmica.

Segundo Gropper e Wang [52], os mecanismos que estão envolvidos com a mudança de comportamento tribológico de superfícies texturizadas são:

- As texturas de superfície podem atuar como reservatórios de lubrificante, fornecendo lubrificante em casos que a lubrificação é limítrofe;
- Podem auxiliar em reter detritos oriundos do desgaste, minimizando a abrasão do terceiro corpo;
- A texturização de superfície pode reduzir o desgaste e atrito, através do aumento na capacidade de carga a partir da sustentação hidrodinâmica, em casos em que a lubrificação é mista e hidrodinâmica;

Ma CB [50] utilizou um método numérico baseado na equação de Reynolds para estudar as propriedades de lubrificação hidrodinâmica de superfícies texturizadas. Conforme Zhou e colaboradores [49] foram escolhidos estudar os valores ótimos para o efeito hidrodinâmico máximo sob as condições específicas de operação. A distribuição da pressão hidrodinâmica sobre um único microporo, com formato cilíndrico com diâmetro e profundidade, para o líquido Newtoniano é obtida a partir da equação de Reynolds:

$$\frac{\partial}{\partial x} * \left(\frac{h^3 \partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} * \left(\frac{h^3 \partial p}{\partial y} \right) = 6\mu\eta \frac{\partial h}{\partial x} \quad (6)$$

onde x e y são as coordenadas cartesianas, P é a pressão hidrodinâmica, h é a espessura do filme, η é a viscosidade dinâmica, e μ é a velocidade deslizante.

Os resultados mostraram que existe a possibilidade de obter a máxima capacidade de carregamento e um mínimo coeficiente de atrito através da otimização dos parâmetros de texturização, para diferentes texturizações de superfície. Conforme Zhou [49] e colaboradores, a otimização da superfície a partir da criação de microcavidades com uma relação diâmetro e profundidade da cavidade adequada aumenta a capacidade de carga sob alta velocidade. Neste mesmo estudo é apresentado uma relação ideal entre a densidade superficial das microcavidades e razão entre profundidade/diâmetro das mesmas, em função da velocidade de deslizamento, como pode ser vista na Figura 9, onde estão apresentadas as faixas ideais de valores.

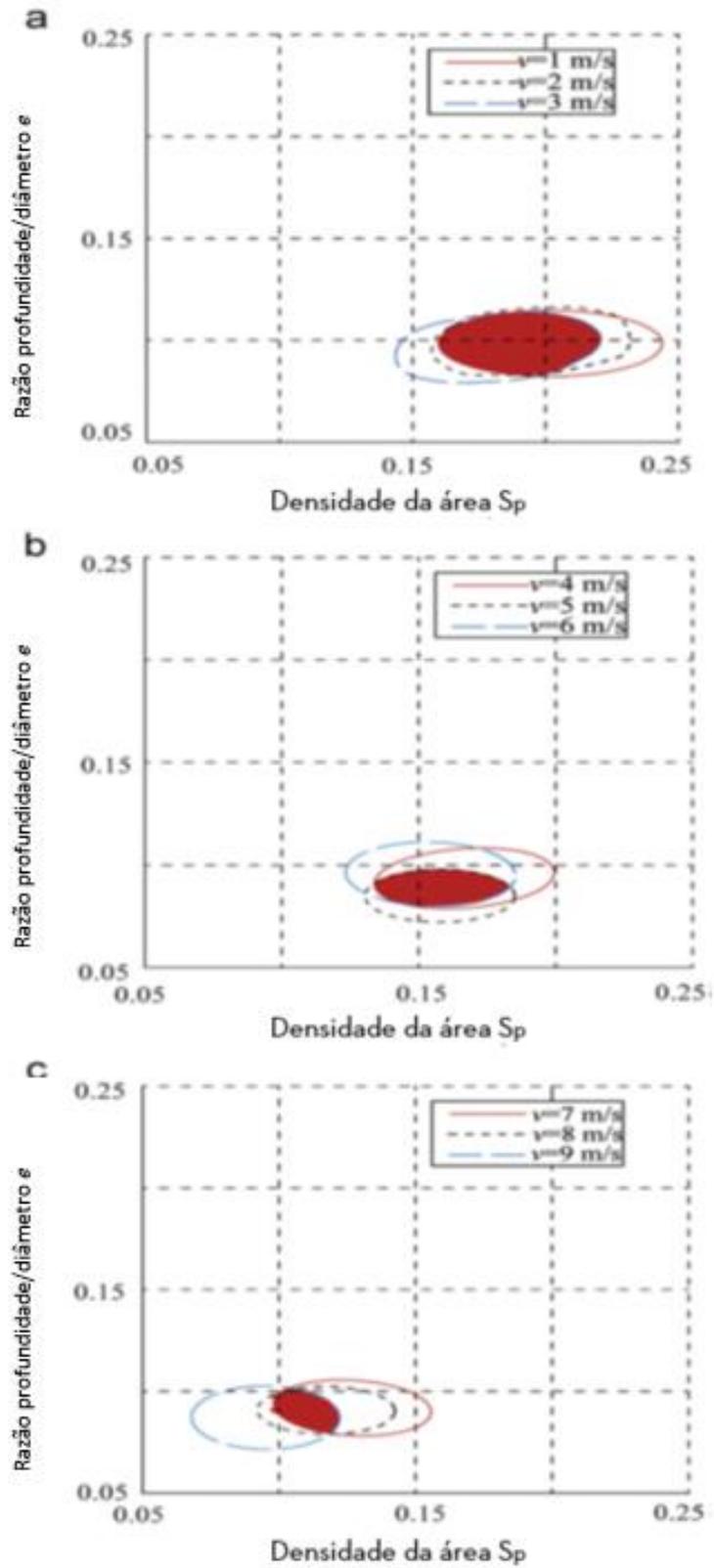


Figura 9: Faixas ideais de parâmetros de texturização em diferentes faixas de velocidades. Adaptado de [49].

Em faixas de velocidade baixa, média e alta, as faixas de densidades de área ideais são 16–22%, 14–18% e 10–12%, respectivamente. Para a razão profundidade/diâmetro, as faixas ideais são 0,08-0,11, 0,07-0,09 e 0,08–0,10, para as faixas de velocidade baixa, média e alta, respectivamente. Com o aumento da velocidade a relação ideal de profundidade sobre diâmetro se mantém próximo de 0,10, desta forma, segundo Gropper e Wang [52] sugere-se que o valor de 0,10 pode ser escolhido como a relação ideal entre profundidade e diâmetro em qualquer condição de operação.

Na Figura 10 é possível visualizar uma representação dos diferentes padrões de textura de superfície na camisa do cilindro conforme os diferentes intervalos de velocidade na pista de deslize. De acordo com Zhou [49] e colaboradores, a introdução de microcavidades com diferentes densidades superficiais e razão profundidade/diâmetro de acordo as diferentes faixas de velocidade de deslizamento podem produzir um filme lubrificante mais espesso do que a texturização com um único tipo de microcavidade pois de acordo com os autores existe uma relação ideal entre densidade de área e razão profundidade/diâmetro para cada faixa de velocidades de deslizamento.

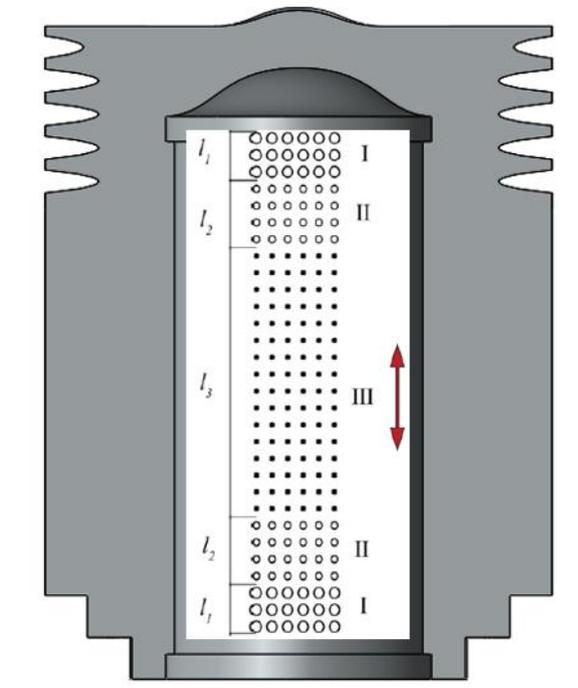


Figura 10: Diferentes padrões de textura de superfície na camisa do cilindro com parâmetros variáveis conforme os diferentes intervalos de velocidade. Adaptado de [49].

Na Figura 11 é possível observar que a pressão do filme adimensional do lubrificante (utilizada para avaliar a capacidade de carga do filme) aumenta de 0,48 para 4,63 quando a velocidade aumenta de 1 m/s para 8 m/s, indicando um expressivo aumento da capacidade de sustentação de carga em alta velocidade. Além da velocidade, a pressão de sustentação dos filmes lubrificantes também varia com a densidade superficial de microcavidades e a razão profundidade/diâmetro das mesmas, onde fica clara a existência de uma estreita janela de valores que otimiza a lubrificação.

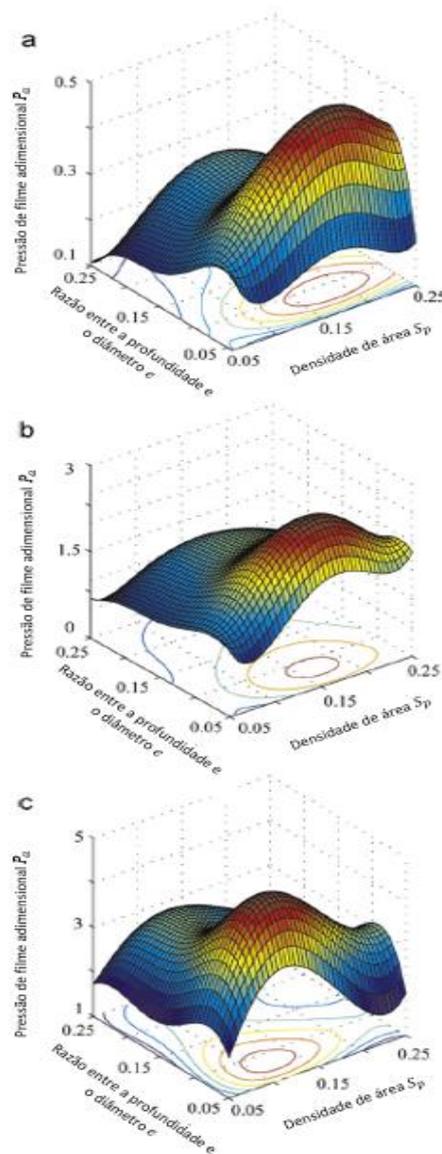


Figura 11: Relação entre a densidade de área S_p , razão profundidade/diâmetro das microcavidades e a pressão do filme P_a sob as velocidades de (a) 1m/s, (b) 5m/s e (c) 8m/s. Adaptado de: [49].

Superfícies com microcavidades menores e mais rasas, segundo Shubrajit [72], são capazes de reduzir o atrito devido à sustentação hidrodinâmica, neste mesmo estudo, microcavidades com diâmetro de 1,5mm e profundidade de 0,6mm apresentaram menores coeficientes (redução de 54,5%) de atrito para velocidades mais altas em torno de 11,57m/s e uma carga de 100N. A redução do atrito também depende do número de microcavidades, o qual é responsável pelo fluxo de lubrificante sobre a superfície. Na Figura 12 é possível verificar a influência da profundidade das microcavidades no coeficiente de atrito, o qual o aumento da profundidade da microcavidade também provoca um aumento no coeficiente de atrito, considerando o diâmetro constante. Para controlar o atrito de forma eficaz, deve-se existir um equilíbrio entre as características das microcavidades, como citado anteriormente por outros autores [49,52].

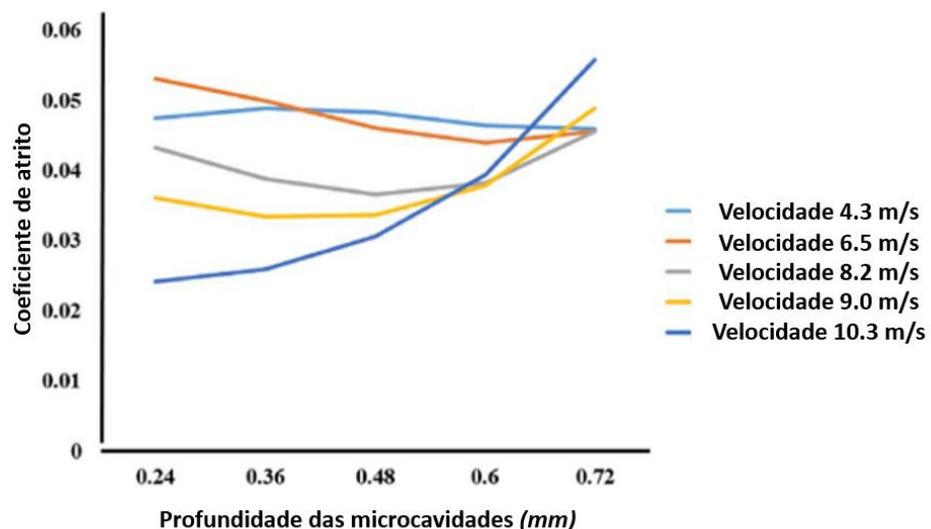


Figura 12: Gráfico da influência da profundidade de microcavidades no coeficiente de atrito em diferentes velocidades com diâmetro constante. Adaptado de [72].

Além destas características citadas anteriormente, a forma das microcavidades também deve ser considerada. Diferentes perfis de fundo e formas são apresentados na Figura 13. Segundo Gropper e Wang [74] as diferentes formas de textura e estruturas internas podem influenciar na sustentação hidrodinâmica e na capacidade de carga, de acordo com Yu, Wang e Zhou [75] é possível simular células de textura única aplicando a equação de Reynolds com um tratamento não conservador de massa de cavitação e condições de contorno periódicas.

Em termos de orientação da microcavidade, verificou-se que os *chevrons* com geometria apontando ao longo da direção de deslizamento foram consideradas mais eficazes. De acordo Yu et al. [75] isso foi explicado pela restrição e pela direção do fluxo dentro da microcavidade em direção ao lado de alta pressão, já que os chevrons têm um formato em forma de V ou de seta, com uma direção predominante, essa direção orientada ajuda a direcionar o fluxo de fluido, como ar ou líquido, ao longo da superfície, reduzindo a resistência ao fluxo e melhorar a eficiência do deslizamento. As elipses, também parecem ser uma opção preferível em termos de aumento da capacidade de carga e redução do atrito, pois distribuem a carga de forma mais uniforme em comparação com as microcavidades circulares. Isso é importante para evitar o acúmulo de estresse em pontos específicos da superfície, reduzindo o desgaste e aumentando a durabilidade da superfície de deslize [74].

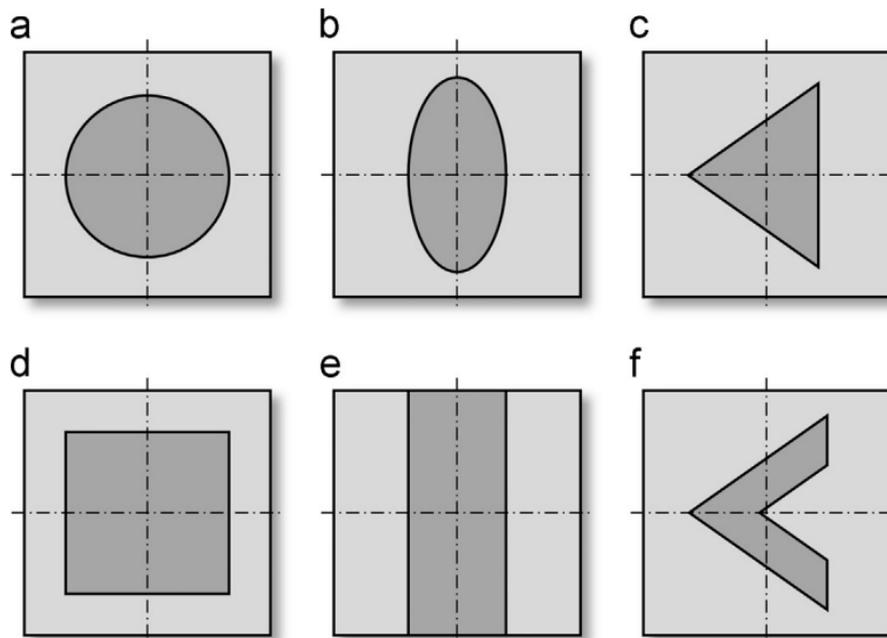


Figura 13: Ilustração de diferentes geometrias de texturas de superfície [74].

Além do estudo da sustentação hidrodinâmica, estudos envolvendo cavitação na superfície deslizante foram realizados [52]. A cavitação pode ocorrer além de globalmente em áreas de contato divergentes, mas também localmente dentro das cavidades ou entre as asperezas (microcavitação) (Figura 14). A cavitação local pode

levar a uma distribuição de pressão assimétrica em uma única textura, já que as pressões negativas causadas pela parte divergente de uma textura são limitadas pela pressão de cavitação do lubrificante [52].

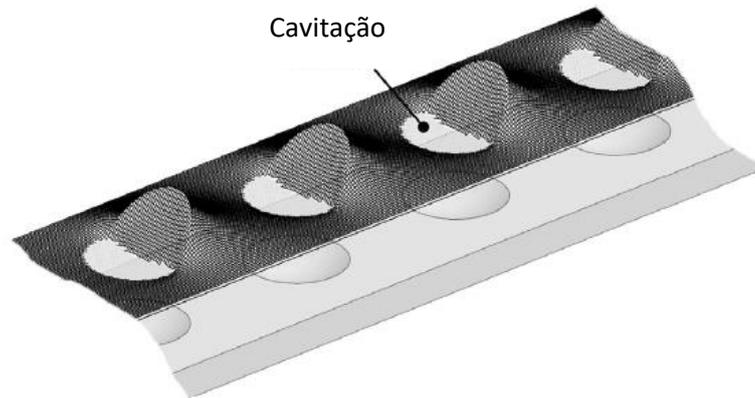


Figura 14: Exemplo da distribuição de pressão sobre um deslizador paralelo totalmente texturizado com cavidade na forma de tampas esféricas como previsto pela equação de Reynolds e um tratamento de conservação de massa de cavitação

Adaptado de [52].

Em alguns casos, o suporte de carga pode até se tornar negativo, dependendo da forma da distribuição de pressão assimétrica. A elevação hidrodinâmica só pode ser gerada quando a pressão de cavitação for inferior à pressão de suprimento (Figura 15), pois isso fornecerá o gradiente de pressão necessário para garantir um suprimento de lubrificante suficiente [52]. Se a cavitação e a pressão de suprimento forem iguais, esse gradiente de pressão não ocorre, pois, nenhuma pressão poderá se acumular. Se a pressão de suprimento for muito maior do que a pressão de cavitação, a cavitação também não irá ocorrer, pois nesse caso, a distribuição de pressão em uma única textura é assimétrica e nenhuma elevação pode ser gerada.

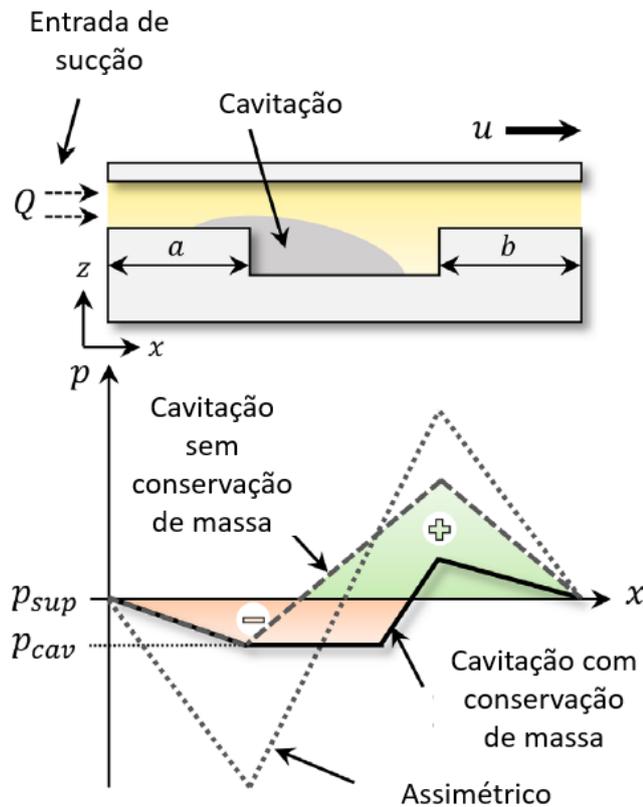


Figura 15: Distribuição de pressão em uma textura única com cavitação. Adaptado de [52].

Uma distribuição de pressão geralmente aceita em cada área das microcavidades é ilustrada na Figura 16. Ela tem uma pressão negativa (pressão ambiente como referência) dentro da região divergente e uma pressão positiva na região convergente. Sem cavitação, a pressão negativa e a pressão positiva se anularão. Entretanto, devido à liberação do gás contido no óleo, a pressão negativa não pode ser menor do que a pressão de vapor ou a pressão de saturação. Na maioria dos casos, a pressão de saturação é quase ambiente devido ao longo tempo de exposição ao ar. Segundo os autores Xiaobin e Khonsari [73] essa distribuição de pressão assimétrica de pressão resulta em uma capacidade adicional de capacidade de carga adicional. No regime de lubrificação hidrodinâmica, uma pressão hidrodinâmica maior cria uma espessura do filme, resultando, portanto, em uma menor tensão de cisalhamento e um coeficiente de atrito menor.

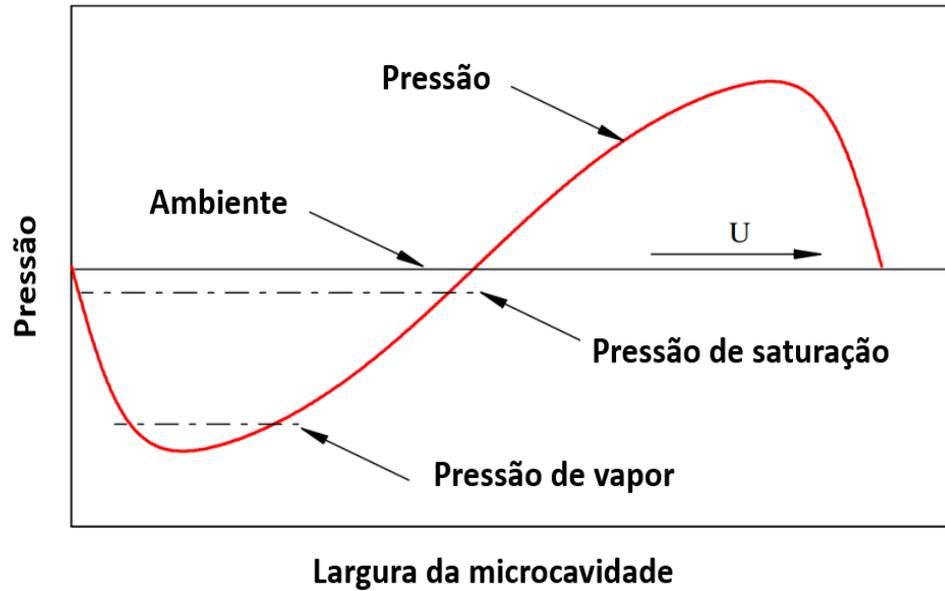


Figura 16: Distribuição de pressão em uma microcavidade ao longo da direção de fluxo. Adaptado de [73].

Como a ruptura e o retorno da película lubrificante podem ocorrer várias vezes, o tratamento da massa da cavitação tem se mostrado crucial para previsões precisas de desempenho [52]. Estudos com de diferentes variantes de cavitação de massa tem sido proposta [52], os quais os algoritmos desenvolvidos são geralmente baseados nas condições de limite de cavitação.

Assim, muitas pesquisas têm sido feitas com o objetivo de encontrar parâmetros ideais de texturas para melhorar o desempenho. Embora existam algumas diretrizes gerais, tornou-se claro que na maioria dos casos as texturas precisam ser projetadas para uma aplicação específica e dadas condições de operação. A texturização da superfície continua sendo um método viável para melhorar o desempenho do contato em termos de capacidade de carga, espessura mínima do filme, fricção e desgaste [52].

4. METODOLOGIA

Foram utilizados cilindros de alumínio normais de produção como corpos de prova prontos para os processos de cromagem na superfície de deslize e acabamento via brunimento. Na Figura 17 está exemplificado as etapas realizadas para obtenção das amostras. Foram disponibilizados 14 cilindros para cada variante, totalizando 28 (vinte e oito) cilindros para o estudo. Após o processo de cromagem foi realizado o processo de acabamento da pista via brunimento.

Após a produção das amostras, três amostras de cada variante foram enviadas para avaliação topográfica e morfológicas das superfícies cromadas para obtenção das superfícies 3D (Interferometria), feitos no laboratório de Tribologia – LATRIB da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Além da avaliação da superfície, foi realizado avaliação da camada de cromo por meio da quantificação da quantidade de trincas. A caracterização das superfícies cromadas e brunidas é fundamental para correlacionar com os ensaios funcionais dos motores. Foram realizados os ensaios funcionais dos motores para avaliação de performances para cada variante cromada e após os testes foi realizado medição de desgaste da camada de cromo e análise da superfície.

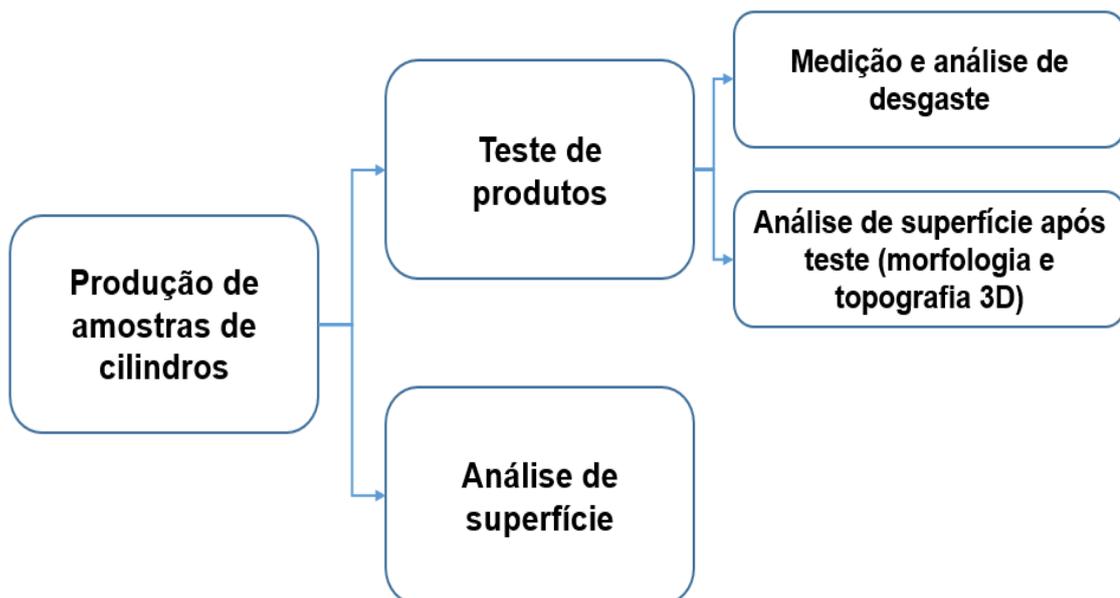


Figura 17: Esquema do método de análise utilizado no presente trabalho.

4.1 PRODUÇÃO DE AMOSTRAS

Para o desenvolvimento do trabalho o par tribológico utilizado avaliado consiste em anéis de pistão e cilindro de um motor dois tempos utilizado em aplicações de elevada exigência. Anéis de pistão do mesmo lote de fabricação e com as mesmas especificações foram utilizados em todos os testes. Os anéis de pistão foram feitos de aço fundido com acabamento de superfície de fosfatização, com dureza e rugosidade médias (S_a), 390 HV10 e $1,50\mu\text{m}$, respectivamente.

Os cilindros foram cromados com diferentes parâmetros de processo para obter diferentes configurações de topografia e morfologia da camada de cromo a fim de se obter dois grupos de corpos de provas de cilindros de motor a combustão (X e Y), totalizando 28 corpos de prova, (14 amostras por grupo). Destes quatorze, 8 corpos de prova foram designados para os testes de desgaste, 3 para testes funcionais de produto e 3 corpos de prova para análise de superfície. A Figura 18 apresenta o esquema do método de análise utilizado. Como processo de acabamento superficial, após o processo de cromagem, a superfície dos cilindros foi brunida. Porém todos os cilindros avaliados de cada grupo foram produzidos no mesmo lote, para garantir a mesma configuração da superfície dos cilindros que foram testados.

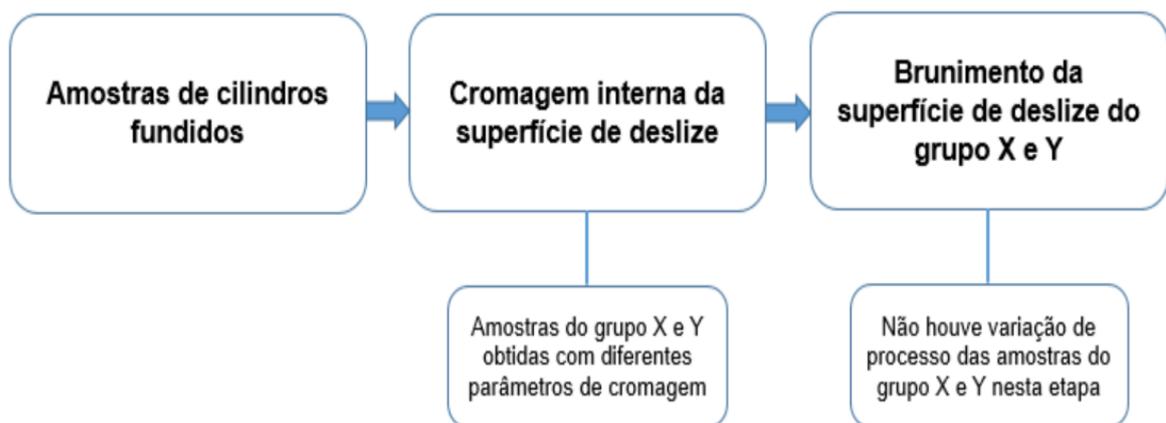


Figura 18 - Esquema do método de análise utilizado no presente trabalho.

4.1.1 Cromagem dos cilindros

Os cilindros fundidos e usinados foram disponibilizados para o processo de cromagem, o qual, as amostras foram submetidas a preparação superficial prévia, que antecede o processo de cromagem, composto por desengraxe, banho alcalino, lavagens, banho ácido, lavagens, zincagem e lavagens. Para a execução destas etapas, os cilindros foram aplicados (mergulhados) no efluente em questão. A preparação dos corpos de prova foi realizada na linha de produção, o qual os tanques possuíam sistema de exaustão, agitação para controle de parâmetros de processo e homogeneidade dos banhos.

Para o processo de eletrodeposição ocorrer foi utilizado um dispositivo (Figura 19). Na base do dispositivo, quanto no ânodo, houve a presença de um contato elétrico que é acoplado ao barramento de cobre, ligado ao retificador. Desta forma há circulação de corrente elétrica entre os polos positivo e negativo do circuito estabelecido. O retificador foi ligado previamente para atingir a temperatura desejada, após as peças serem processadas no pré tratamento. Os parâmetros de cromagem foram definidos para o grupo X e Y (tempo, densidade de corrente e temperatura) com a finalidade de se obter diferentes densidades de trincas na camada de cromo entre os grupos X e Y. A densidade de trincas oriundas do processo de cromagem está relacionada com a quantidade de microcavidades que surgirão após o processo de brunimento.



Figura 19: Fixação com cilindros montados no dispositivo para ser submerso no banho de cromo.

O dispositivo foi submerso no banho de cromo (Figura 20) e os contatos elétricos foram acoplados ao barramento principal, este conectado ao retificador, dando início a cromagem da peça.



Figura 20: Dispositivo submerso no banho de cromo com o polo positivo e negativo para o fechamento do circuito do processo de eletrodeposição.

4.1.2 Brunimento dos cilindros

O processo de brunimento é, também, dividido em etapas, sendo a primeira um desbaste da camada de cromo e a segunda o acabamento da superfície da camisa. Foram brunidas, pelo método plateau, na linha de brunimento de cilindros seriados. Para o desbaste foi utilizado uma brunidora vertical (etapa 1) e para o acabamento, uma horizontal (etapa 2). A etapa de desbaste é realizada com abrasivos diamantados e é responsável por eliminar as irregularidades da camada cromada, levando-a praticamente para o diâmetro final especificado para o produto. É no desbaste que serão gerados os pick-outs (microcavidades na superfície causados por remoção de material) na camada cromada, que servirão como microreservatórios de lubrificantes e para o armazenamento de partículas de desgaste. A posterior etapa de acabamento realiza o ajuste do diâmetro final da camisa conforme especificação,

reduz a rugosidade de picos e confere a topografia final da superfície de deslize do cilindro, nesta etapa o abrasivo utilizado é de óxido de alumínio.

4.1.3 Medição dimensional das amostras

Foi realizado medição dos erros de forma e diâmetro dos cilindros após os processos de cromagem e brunimento para garantir o diâmetro e circularidade da pista de deslize conforme a especificação.

As medições dos erros de forma foram feitas no equipamento universal de medição de forma da marca Mahr, modelo MarForm MMQ 400-2. Este modelo possui uma estação totalmente automatizada com mesa motorizada de centragem e nivelamento e um apalpador motorizado T7W com um eixo rotacional acionado por um motor. O curso de medição é $Z=900$ mm e $X=280$ mm, o equipamento suporta até 400 Newton e seu erro dimensional é de 0,005 mm de circularidade. O método de medição da circularidade foi o dos mínimos quadrados (LSC – Least Squares Circles). Os diâmetros foram medidos na tridimensional linear DuraMax, marca Zeiss, automatizada com faixa de medição por contato de 500 x 500 x 500 milímetros (X, Y, Z). Sua faixa de repetibilidade é 1,7 micrometro e seu tempo de medição é de 55 segundos.

4.2 ANÁLISE TOPOGRÁFICA E MORFOLÓGICA DA SUPERFÍCIE

A superfície cromada e brunida dos cilindros foi analisada de modo a avaliar a influência dos processos de cromagem na topografia da superfície. Análises de topografia e morfologia foram realizadas para caracterizar com detalhes as superfícies obtidas dos grupos produzidos X e Y. As análises foram realizadas no ponto morto superior (PMS), pois essa é a região em que a velocidade de deslizamento entre o cilindro e o anel é próxima de zero, levando ao regime de lubrificação limítrofe. É sabido da literatura que no regime de lubrificação limítrofe o desgaste é maior [6]. O maior desgaste ocorre devido a não possibilidade de manter uma película lubrificante contínua de espessura adequada entre as superfícies. Além

disso, no PMS tem-se alta pressão e temperatura devido à sua proximidade da zona de ignição [6].

4.2.1 Análise de densidade de trincas

As trincas contabilizadas são as microtrincas, sendo que essas são classificadas mediante a sua dimensão: profundidade de até 4 μm e comprimento máximo de 6 μm . Para a revelação das trincas é necessário o ataque químico da amostra mediante a Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) a uma temperatura de 80 °C por 15 segundos, com posterior lavagem em água e álcool. Para esse pré tratamento, foi aplicado corrente elétrica (densidade de corrente entre 20-30 A/dm^2), possibilitando o ataque eletroquímico da superfície. Para revelação da rede de trincas, um banho à base de NaOH com concentração de 100 g/L foi montado, permanecendo numa faixa de temperatura entre 20 °C e 25 °C, e a amostra foi polarizada por 120 segundos. A figura 21 apresenta o equipamento utilizado com o contato elétrico e amostra durante este processo para a revelação das trincas.



Figura 21: Máquina de polimento eletrolítico utilizada para revelação das trincas da camada de cromo da superfície de deslize de amostras de cilindros. Fonte: Fabricante Struers Ensuring Certainty.

Após finalizada o polimento eletrolítico da superfície, as amostras foram visualizadas e imagens foram registradas no microscópio óptico da marca Leica, modelo DM 4000. Foram analisadas 3 amostras de cada grupo (X e Y) e de cada amostra foi contabilizado 3 imagens para contabilização das trincas. O software para captura das imagens e posterior contabilização das trincas é o *Leica Application Suite* (LAS). A Figura 22 apresenta o aspecto visual da densidade de trincas para uma amostra submetida a este método de preparação de polimento e ataque eletrolítico.

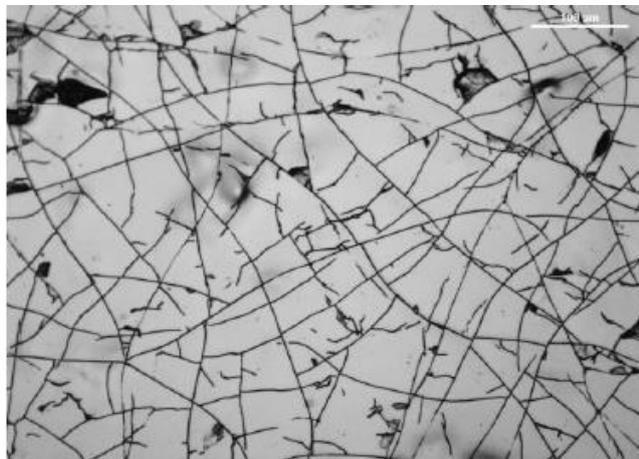


Figura 22: Camada de cromo da superfície de deslizamento de amostras de cilindros com preparação de polimento e ataque eletrolítico para revelação das trincas.

4.2.2 Análise topográfica da superfície

As medições da superfície dos corpos de prova dos cilindros foram conduzidas com um interferômetro Bruker Contour GTK na região superior das amostras. Foram analisadas 3 amostras por grupo, nos quais foi realizado 3 medições por amostra, definidas com área de medição de 1 mm².

4.2.2.1 Análise topográfica da superfície de cilindros não testados

Na Figura 23 é apresentado o esquema de medição de topografia e região que foi realizado em cada amostra. Aos dados brutos obtidos na interferometria foi aplicado um filtro de polinômio de segunda ordem para a remoção de formas. Devido à presença de alguns vales profundos na superfície do cilindro, filtros gaussianos

foram aplicados sobre os dados brutos. Comprimentos de onda de $\lambda_s = 2,5\mu\text{m}$ e $\lambda_c = 250\mu\text{m}$ foram aplicados. Para a captação de dados e visualização do perfil tridimensional, o aparelho é conectado ao software MATLAB.

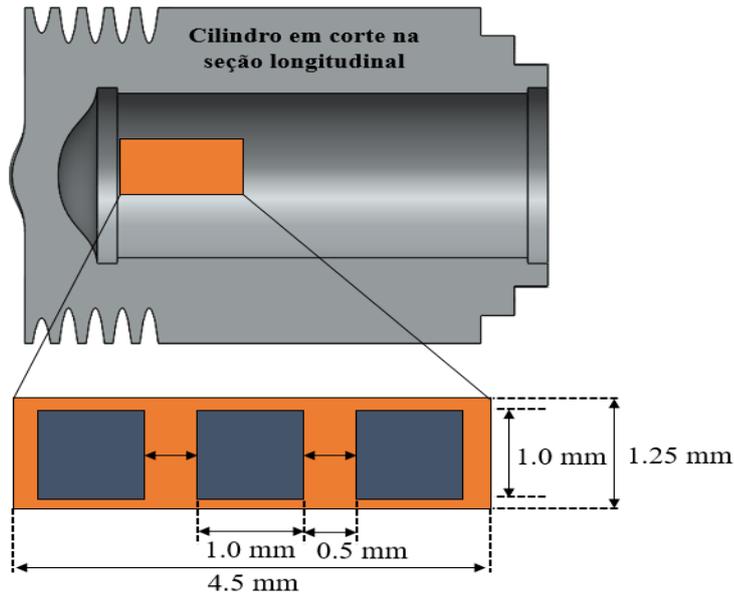


Figura 23:

Figura 23: Região do ponto morto superior analisada para as medições de topografia 3D.

A análise topográfica teve como objetivo apresentar o comportamento das asperezas dos dois grupos estudados, X e Y. A principal razão para medir a superfície é tentar prever e entender o desempenho do componente, assim como controlar o processo de fabricação. Os parâmetros topográficos estudados nas amostras analisadas foram os parâmetros da curva Abbott-Firestone [12]: Spk, Sk, Svk, SMr1 e SMr2. A curva Abbott também é comumente conhecida como curva Areal Material Ratio. Os parâmetros são extraídos com base no padrão ISO 13565-2: 1996. A Altura do pico Reduzida, Spk, é uma medida da altura do pico acima da rugosidade do núcleo. Já o parâmetro Sk, é uma medida da rugosidade do núcleo. O parâmetro Svk, que tem relação com a profundidade dos vales, parâmetro de grande importância para o tipo de superfície estudada, é uma medida da profundidade do vale abaixo da rugosidade do núcleo. O parâmetro SMr1 indica a porção de material de pico, enquanto o parâmetro Smr2 refere-se à área de medição que compreende as

estruturas de vale mais profundas associadas a Svk [11]. Além dos parâmetros acima mencionados também foi estudado o parâmetro de volume de retenção de óleo (V0).

4.2.2.2 Análise topográfica da superfície de cilindros testados em bancada

Para analisar as superfícies dos cilindros após passarem pelo teste em bancada, foram mantidos os mesmos parâmetros de medição, porém as regiões analisadas foram diferentes. A Figura 24 apresenta as regiões analisadas: a região (r1) onde não há contato com o anel do pistão (região de referência de superfície inicial), região do ponto morto superior, o qual apresenta maior desgaste (r2) e a região onde o desgaste não é um problema (r3). Para comparar a topografia e morfologia com o desgaste da superfície, foi realizado uma linha longa de medição, utilizando um interferômetro Bruker Contour GTK, analisando uma área de $0,2 \times 10 \text{ mm}^2$, com resolução espacial de $0,5 \mu\text{m}$, aplicando-se filtro apenas remoção de inclinação.

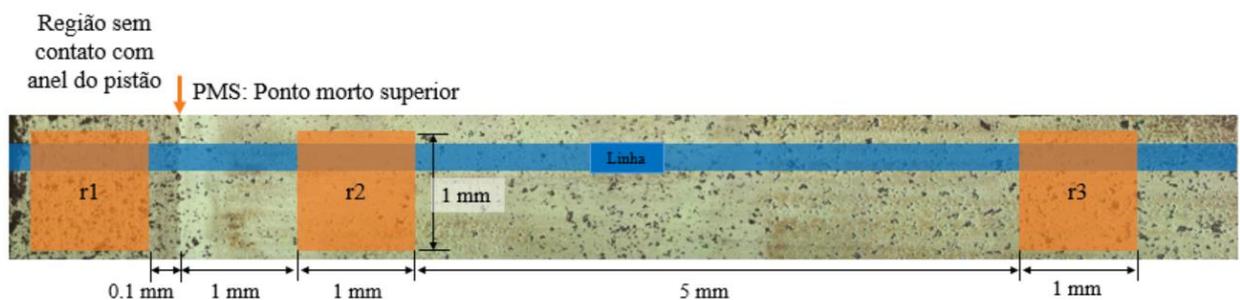


Figura 24: Regiões do ponto morto superior analisada para as medições de topografia 3D. Três regiões analisadas, r1 (acima do ponto morto superior, região sem desgaste), r2 (região do ponto morto superior, região de maior desgaste), r3 (região abaixo do ponto morto superior, com desgaste moderado).

4.2.3 Análise morfológica da superfície

Assim como os parâmetros topográficos em 3D apresentados anteriormente, as características morfológicas da superfície em 2D, como quantidade de vales e área média dos mesmos, são parâmetros que também apresentam

influência no desempenho do motor. As análises morfológicas da superfície foram realizadas a partir de imagens adquiridas em um Microscópio Digital VHX-970F – Keyence.

Após a obtenção das imagens bidimensionais foi utilizado o software Fiji-ImageJ para a quantificação de vales. A partir da aplicação do *threshold*, a imagem é binarizada para transformá-la em uma imagem branca e preta, no qual o *software* faz a contagem dos pixels brancos e pretos. Um exemplo do processo de binarização é mostrado na Figura 25 (cor preta: vales). Para as análises da morfologia no referido *software* foi utilizado o filtro Gaussian Blur para suavizar riscos na superfície oriundos do processo de brunimento. Também foi aplicado um filtro de medição para considerar apenas vales com área acima de $2 \mu\text{m}^2$.

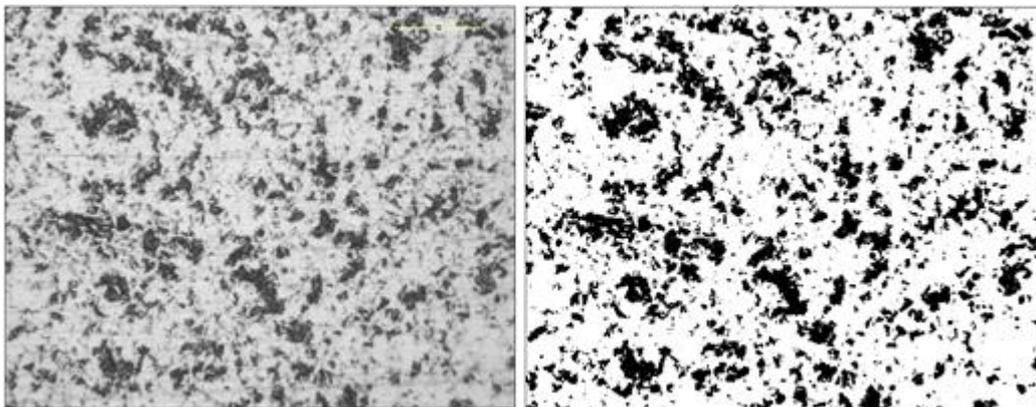


Figura 25: Imagem bidimensional obtida a partir de um microscópio digital (à esquerda) e imagem com aplicação de um *threshold* para quantificação de vales na superfície da camada de cromo brunida.

4.3 TESTES DINÂMICOS EM BANCADA

Para a avaliar as diferentes topografias produzidas, foram realizados testes funcionais de produto, o qual tem o objetivo de estudar o comportamento das máquinas, níveis de emissões e níveis de robustez da máquina. Testes de durabilidade de produto também foram realizados, o qual o objetivo foi avaliar o

desgaste da topografia superfície de deslize da camada cromada nas variantes produzidas.

4.3.1 Testes funcionais em bancada

Os testes são realizados em marcha lenta, nas condições de potência máxima e condições normais de operação. Em uma bancada de teste, com seus respectivos equipamentos, foram realizados os testes funcionais (Figura 26). Para cada variante obtida com uma topografia diferente da superfície de deslizamento, a operação de montagem do motor foi o mesmo.

O teste funcional do motor realizado foi o engripamento, o qual é um método destrutivo do motor que consiste na diminuição (empobrecimento) da quantidade de combustível na mistura de combustível, ocasionando o derretimento do material do pistão na área de deslize do cilindro devido ao superaquecimento, resultando no travamento do motor. A avaliação realizada é até o máximo de rotações por minuto até o motor engripar com a situação mais reduzida do combustível no sistema (máquina empobrecida).

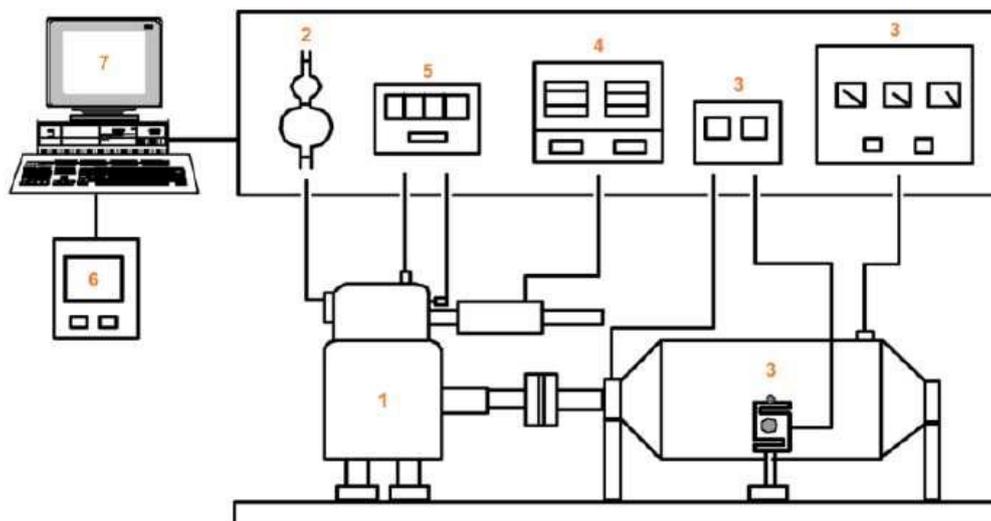


Figura 26: Esquema da bancada de teste, com seus respectivos equipamentos.

Fonte: BIONDO (2019).

4.3.2 Teste de durabilidade em bancada

Os testes de durabilidade simulam de forma acelerada o ciclo de vida do motor. O teste de durabilidade consiste em um ciclo fechado, onde o motor é forçado a funcionar com carga por um tempo determinado, alternando as velocidades (lenta, máxima e de trabalho) do movimento do pistão contra a parede do cilindro, simulando o cenário real de funcionamento de um motor a combustão interna. Para a realização do teste, foi utilizado um motor completo, no qual o componente cilindro foi trocado pelos cilindros produzidos neste trabalho, para avaliar a diferença de resultados do grupo X e Y. O restante do sistema tribológico (anel, pistão óleo lubrificante+combustível) foram mantidos os mesmos. O teste de durabilidade em bancada consiste no funcionamento do motor por 200h. Após o término do teste é realizado o desmonte do motor para a medição do desgaste da camada de cromo.

Os registros dos resultados são feitos por um sistema de aquisição de dados, o qual é acoplado a um computador, sendo possível monitorar as condições de trabalho (limite de rotação, limite de temperatura) durante o período de teste. Os parâmetros monitorados para execução dos testes são apresentadas na tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros monitorados para execução dos testes de durabilidade em bancada:

Parâmetros	Condições de teste
Fixação do motor	Fixação nos cabos
Regulagem do carburador	Conforme especificação
Ciclo de amaciamento do motor	
Combustível	
Óleo lubrificante	Óleo para motores 2 tempos
Relação de mistura	01:50
Grandezas de medição	Rotação n [1/min]
	Tempo de funcionamento t [h]
	Temperatura T_k [°C]
	Consumo B [l/h]
Temperatura de teste	25 °C +/- °C

4.4 MEDIÇÃO E ANÁLISE DE DESGASTE

O desgaste dos cilindros foi avaliado após o teste de bancada, na região do ponto morto superior, onde o componente sofre maior desgaste. As medições do perfil bidimensional foram realizadas com um perfilômetro MAHR MMQ 400-2. Os perfis foram avaliados na mesma direção de deslizamento do movimento dos anéis de pistão. Na Figura 27 é apresentado o sentido de medição do desgaste dos cilindros testados.

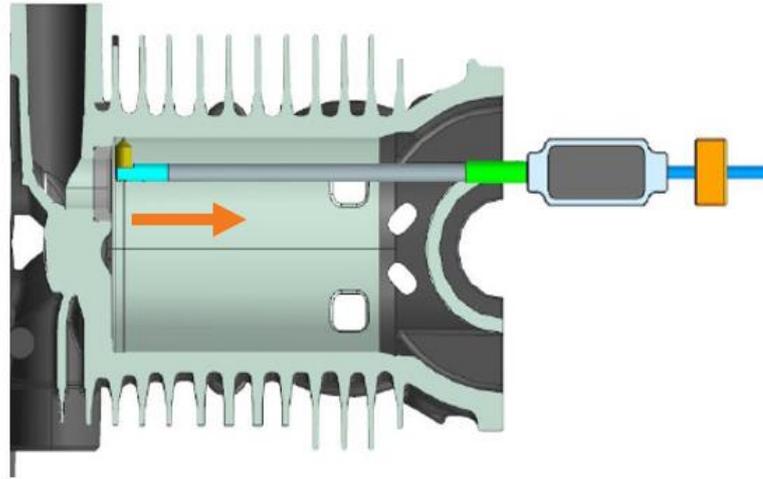


Figura 27: Esquema de medição de desgaste das amostras de cilindros testadas.

As medições foram realizadas em diferentes posições angulares (Figura 28). A altura do degrau, diferença entre a região de referência e a superfície desgastada, foi considerada como o resultado de desgaste para cada perfil. O valor de desgaste considerado foi o desgaste máximo dentre todas as posições angulares medidas e avaliadas.

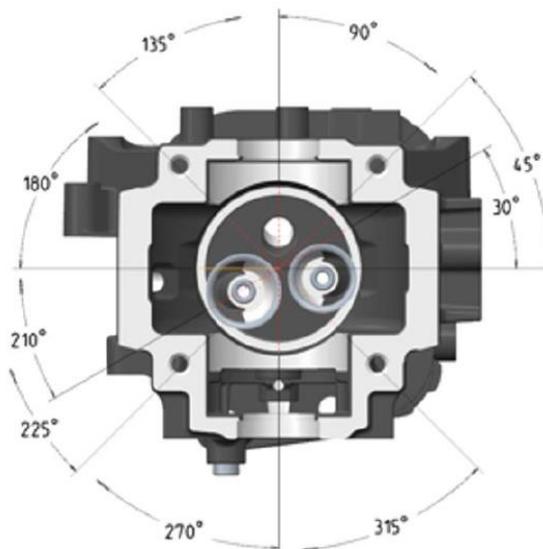


Figura 28: Posições angulares medidas em torno da circunferência do cilindro para avaliação de desgaste.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A camada de cromo para ambos grupos apresentou valores de microdureza entre 800 e 1200 HV_{0,1} e a camada na seção transversal apresenta uma espessura cerca de 60µm após o brunimento.

5.1 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE TRINCAS

A partir dos parâmetros do processo de cromagem avaliados foi possível obter camadas de cromo duro com densidade de trincas distintas. Foi realizada uma avaliação qualitativa com a mesma magnificação para ambos grupos, a diferença da quantidade de trincas é facilmente visível (Figura 29).

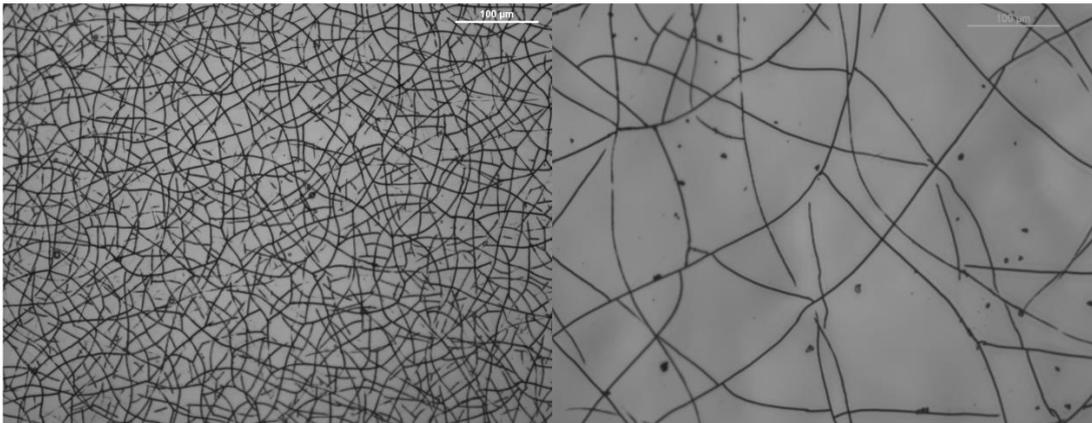


Figura 29: Superfície cromada após polimento eletroquímico para avaliação das trincas, à direita grupo Y e à esquerda grupo X. Mesma magnificação para a comparação de densidade de trincas.

O grupo X apresentou em sua superfície cerca de 200% a mais de densidade de trincas (trincas/cm) que o grupo Y (Figura 30). Na figura 21 temos os valores individuais de cada amostra analisada e a figura 31 é apresentado a média da densidade de trincas para o grupo X e Y.

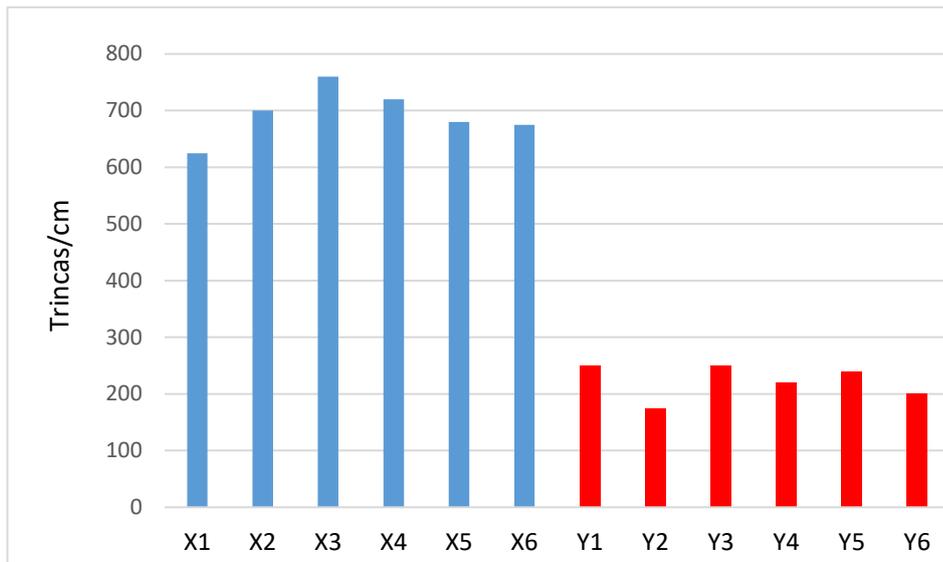


Figura 30: Densidade de trincas individuais de cada amostra do grupo X (azul) e do grupo Y (vermelho).

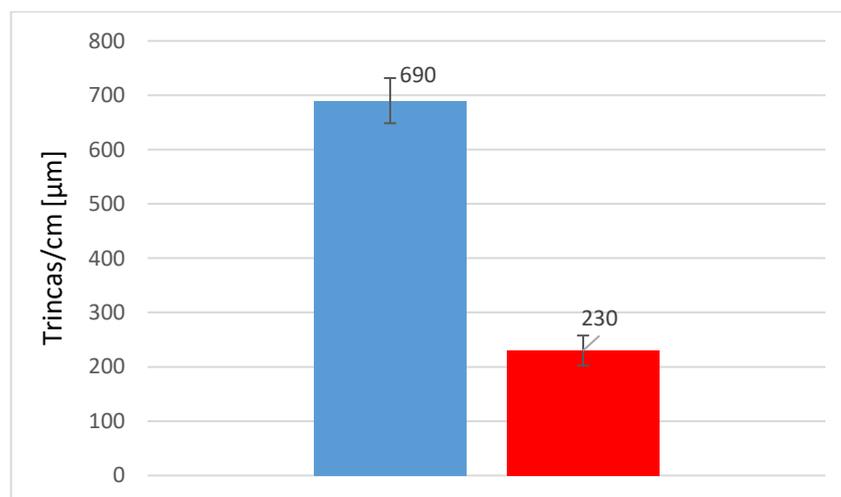


Figura 31: Média e desvio padrão dos valores de densidade de trincas de cada amostra do grupo X (azul) e do grupo Y (vermelho).

A densidade de trincas é em parte responsável pela superfície final após o processo de brunimento, pois conforme a quantidade de trincas presentes a quantidade de microcavidades na superfície será proporcional. Os parâmetros de cromagem influenciam diretamente na quantidade de trincas, pois eles têm um papel fundamental na estrutura da camada cromada devido aos processos e condições específicas envolvidas na aplicação do revestimento, os parâmetros que mais

influenciam as características da camada são: composição química, temperatura do banho, tempo e densidade de corrente [66]. As características obtidas na camada cromada possuem um papel muito importante no conjunto tribológico, pois a trincas têm a capacidade de influenciar no desempenho tribológico da superfície de deslizamento [66].

5.2 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DA SUPERFÍCIE APÓS O BRUNIMENTO

5.2.1 Topografia de superfície

Os parâmetros da função (S_{pk} , S_k e S_{vk}) estão profundamente relacionados à curva de Abbott-Firestone (Figura 32). Os parâmetros da curva Abbott-Firestone são utilizados para avaliar a capacidade de um lubrificante de formar uma película protetora entre duas superfícies em contato [54]. Na Figura 32 é apresentado a média das curvas Abbott, um total de 9 medições por grupo.

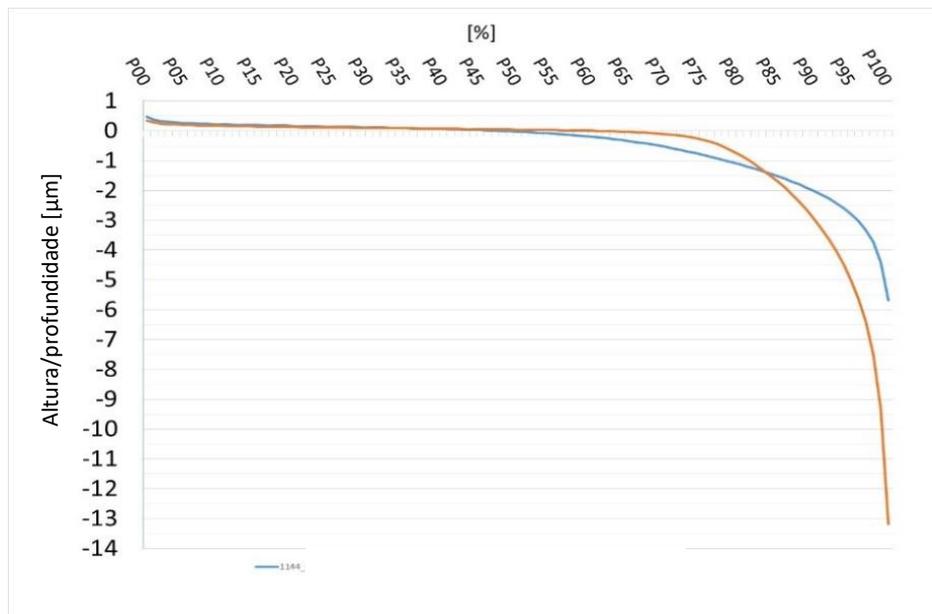


Figura 32: Curva Abbott-Firestone do grupo X (em azul) e do grupo Y (em laranja).

A partir da curva Abbott é possível observar a diferença de comportamento entre o

grupo X e Y, onde o grupo Y apresenta uma razão altura/profundidade a 100% de material cerca de 2x maior que o grupo X. Os parâmetros de rugosidade funcionais são extraídos da curva Abbott, o qual a profundidade máxima a 100% de material influencia diretamente o parâmetro Svk, e ambos têm relação com a profundidade de vales ou microcavidades. As Figuras 33 e 34 apresentam os resultados das médias do valor Sk e Spk.

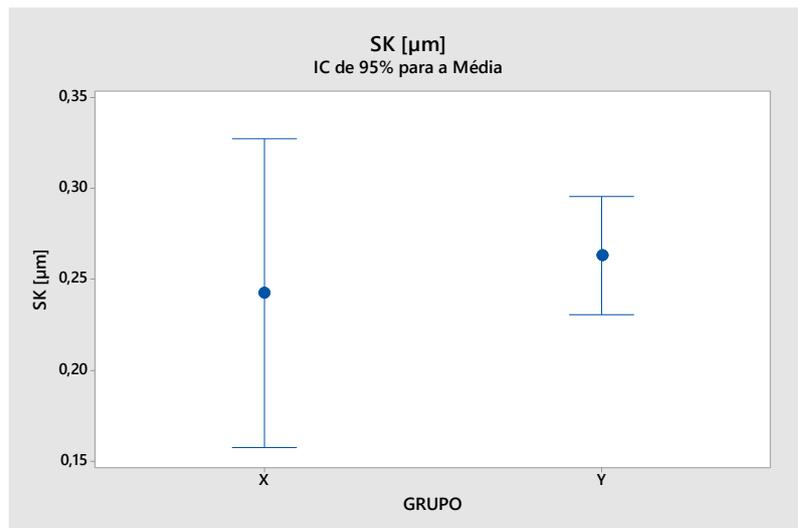


Figura 33: Parâmetro de rugosidade Sk da curva Abbott-Firestone.

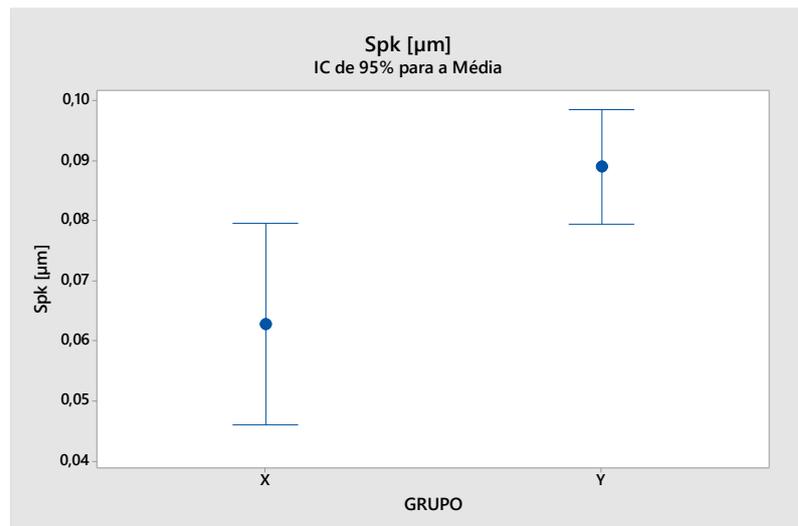


Figura 34: Parâmetro de rugosidade Spk referente a picos da superfície a partir da curva Abbott-Firestone.

As grandezas Spk e Sk estão diretamente relacionados com a rugosidade da superfície [57]. Os parâmetros da curva Abbott-Firestone Sk e Spk não apresentaram diferenças significativas entre as variantes avaliadas neste trabalho. Ambas variantes foram brunidas com parâmetros não variáveis, isso explica por que os resultados de Spk e Sk são similares, já que o brunimento do platô pode influenciar tanto o Spk quanto o Sk devido à remoção de material e ao acabamento da superfície durante o processo [58], com a finalidade de obter uma superfície mais lisa e com menor rugosidade [59].

O parâmetro Svk, que tem relação com a profundidade das microcavidades e o V0 que se refere ao parâmetro de retenção de óleo são apresentados na Figura 35 e 36.

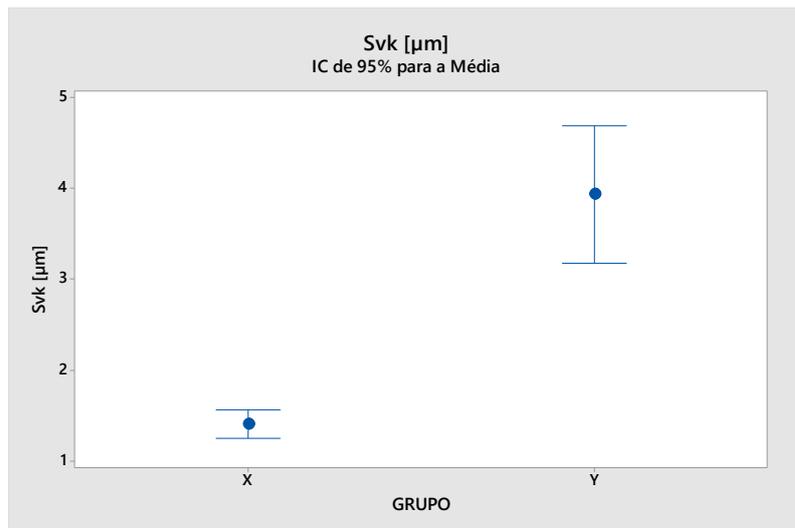


Figura 35: Parâmetro de rugosidade Svk referente a vales da superfície a partir da curva Abbott-Firestone.

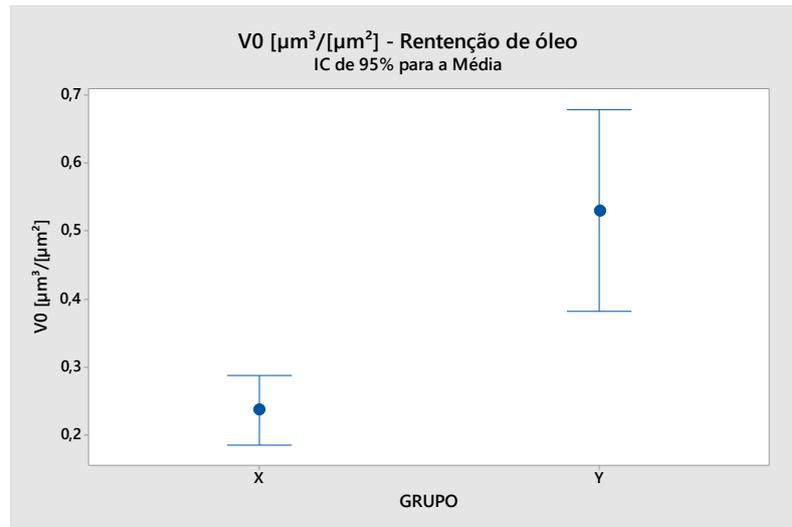


Figura 36: Parâmetro de retenção de óleo disponível na superfície calculado a partir dos parâmetros da curva Abbott-Firestone.

O grupo Y apresentou um aumento de quase 3x no parâmetro Svk em comparação ao grupo X, apresentando uma significativa diferença entre as variantes do estudo, o Svk está relacionado com a capacidade de a superfície reter algum tipo de fluido [45], e tem relação direta com a profundidade das microcavidades da superfície de deslize. O desvio padrão para o grupo Y também foi maior, com maior variação na superfície quando comparado com a variação do grupo X.

O parâmetro de volume de retenção de óleo ($V0$), para o grupo Y apresentou cerca de 2x maior que o grupo X. Este parâmetro é importante para garantir uma lubrificação adequada entre as superfícies em contato, pois o óleo funciona como um filme que separa as superfícies e reduz o atrito e o desgaste [57]. Relações considerando o parâmetro Svk da curva Abbott também foram encontrados nos estudos de Grabon e Pawlus, 2014.

Outros importantes parâmetros a serem analisados são os perfis de profundidade (Figuras 37, 38 e 39), os quais também estão relacionados com a disponibilidade de óleo na superfície, assim como os parâmetros mencionados anteriormente (Svk e parâmetro de retenção de óleo $V0$).

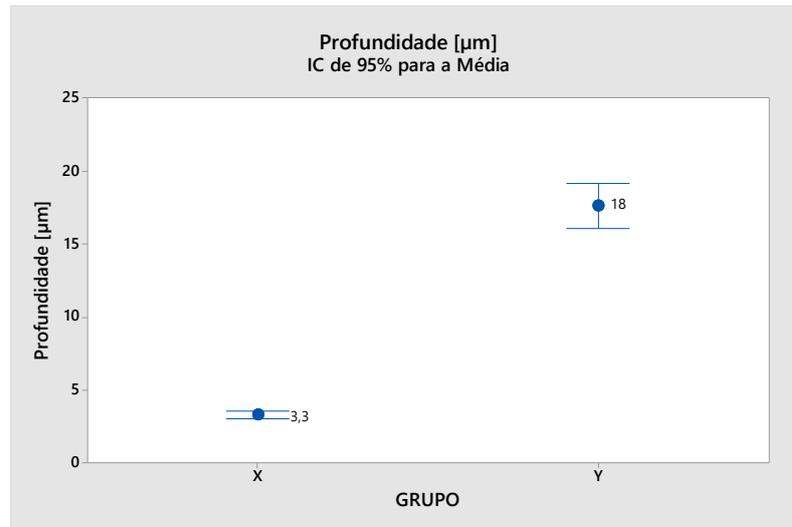


Figura 37: Média do perfil de profundidade do grupo X e Y.

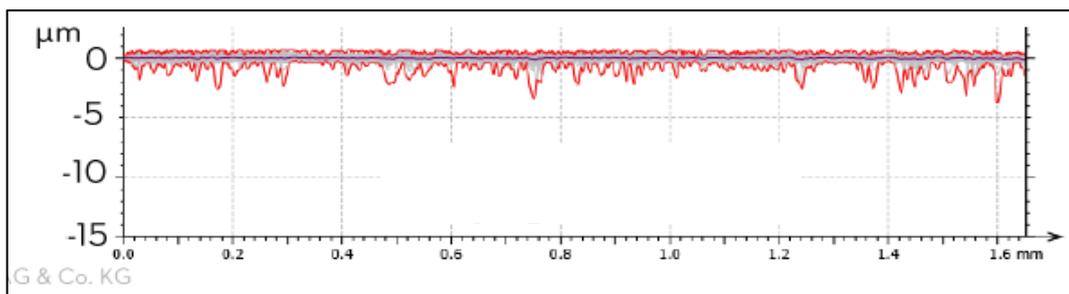


Figura 38: Perfil de profundidade do grupo X apresentando profundidade moderada.

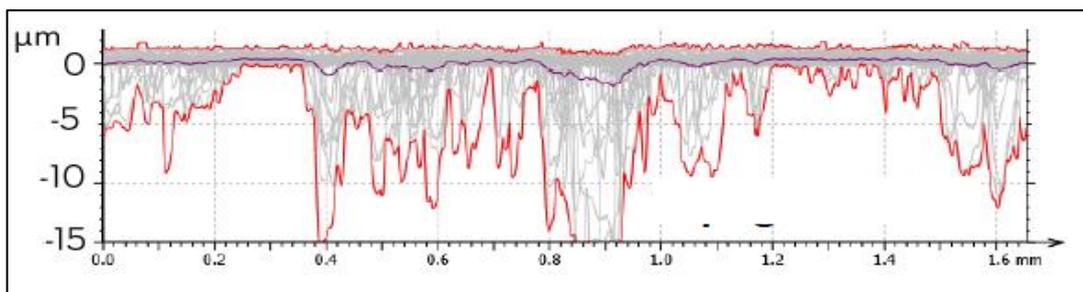


Figura 39: Perfil de profundidade do grupo Y apresentando grande variação da profundidade das microcavidades.

A profundidade média das microcavidades, obtidos a partir da análise do perfil de profundidade, apresentou valores cerca de 5,5x maior para o grupo Y do que em relação ao grupo X. Estes parâmetros influenciam significativamente a retenção de

lubrificante nas microcavidades podem apresentar influências significativas no desempenho tribológico conforme [52], já que microcavidades profundas podem armazenar uma quantidade significativa de lubrificante, reduzindo a disponibilidade do fluido lubrificante para outras partes da superfície de contato. Além disso, segundo Zhou [49], existe uma relação entre densidade superficial das microcavidades e razão entre profundidade/diâmetro das microcavidades, o qual conforme a velocidade de deslizamento existe uma relação ideal para ser aplicado na superfície de deslize.

5.2.2 Caracterização das microcavidades

A Figura 40 apresenta a quantidade de microcavidades contabilizados em uma imagem de 1mm², para o grupo X e Y:

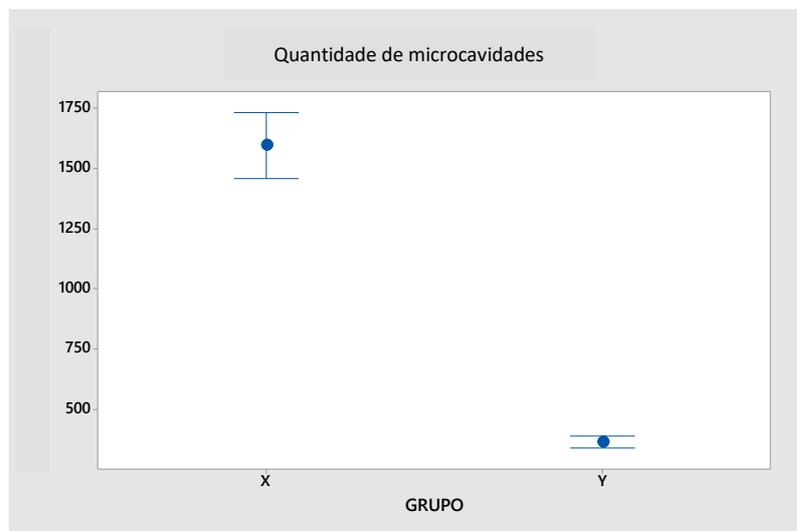


Figura 40: Resultados da quantidade de microcavidades (vales) das amostras analisadas do grupo X e Y.

O grupo X apresentou maior quantidade de vales que o grupo Y, cerca de 4x mais. Nas superfícies avaliadas, esta grande diferença no número de microcavidades significa uma maior distribuição destas estruturas sobre a superfície do cilindro. Foi relatado [62,63,64] que o perfil da distribuição da pressão sobre uma única microcavidade promove uma pressão hidrodinâmica adicional para o lubrificante. Este efeito hidrodinâmico aumenta a capacidade de suporte de carga da superfície do

cilindro, ajudando a suportar a carga dos anéis do pistão. Portanto, uma maior quantidade de microcavidades proporciona melhor distribuição do efeito de pressão hidrodinâmica acima mencionado por toda a superfície, ajudando a reduzir a força de atrito e, conseqüentemente, melhorando o desempenho do motor em termos de desgaste. A Figura 41 apresenta a morfologia das microcavidades obtidas em cada grupo:

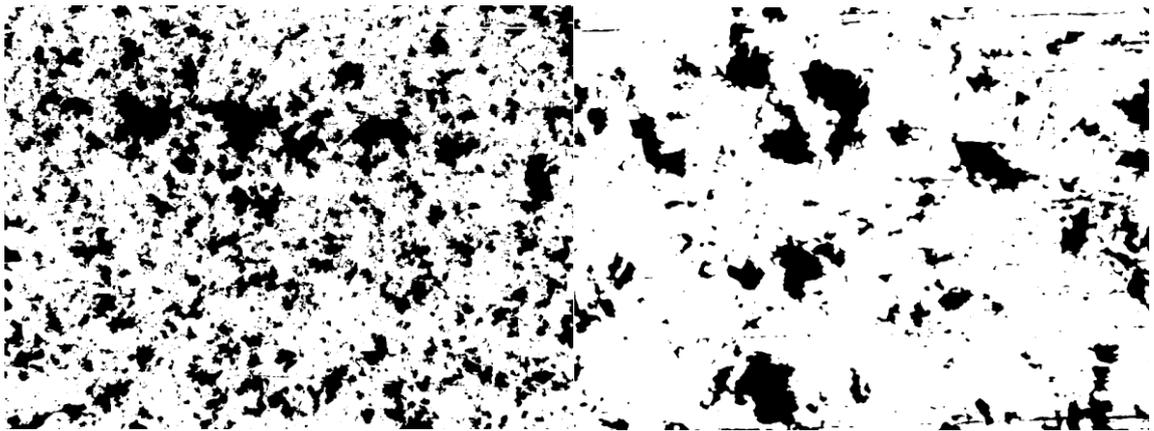


Figura 41: Morfologia da superfície 2D das amostras de cilindros do grupo X (à esquerda) e do grupo Y (à direita).

O grupo X apresenta as microcavidades distribuídos em toda a superfície, diferente do que acontece no grupo Y, onde as cavidades estão em menor quantidade e em algumas situações juntos, havendo regiões em que não há a presença de microcavidades. As Figuras 42 e 43 apresentam a área média e diâmetro médio das microcavidades das variantes do grupo X e Y.

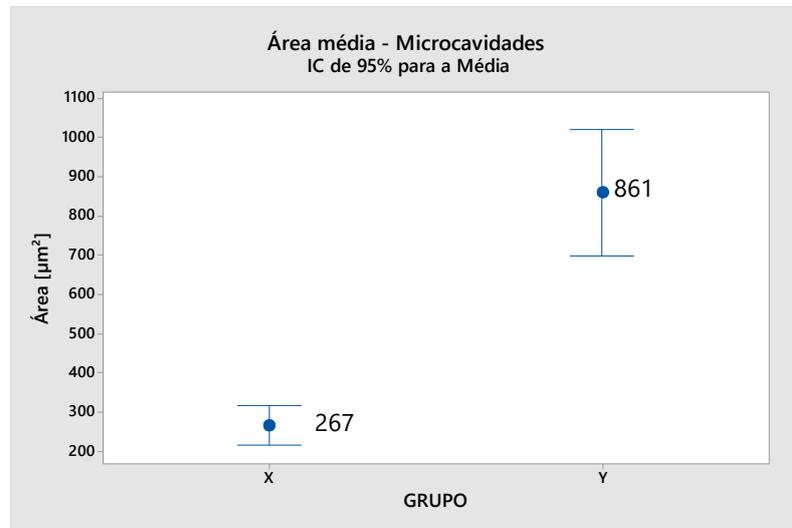


Figura 42: Área média das microcavidades do grupo X e Y.

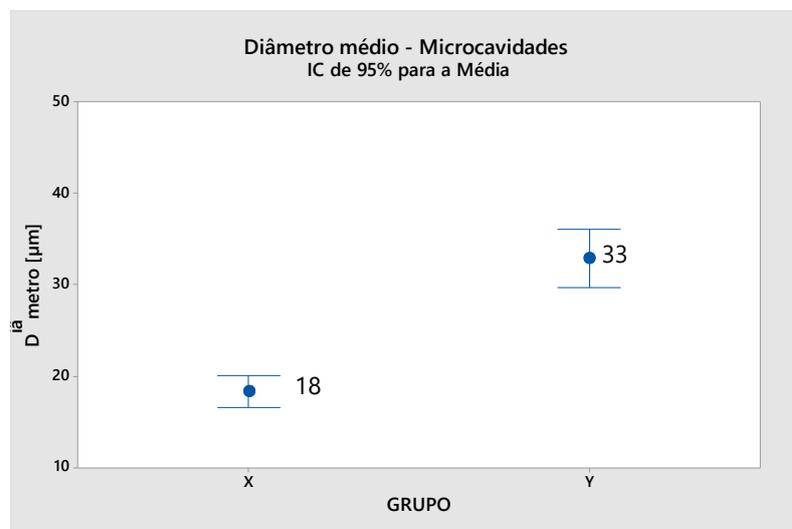


Figura 43: Diâmetro médio das microcavidades do grupo X e Y.

O grupo Y apresenta área média e diâmetro médio significativamente maiores do que o grupo X, cerca de 69% e 46%, respectivamente.

A Figura 44 apresenta a razão entre a profundidade e o diâmetro das microcavidades para os dois grupos estudados.

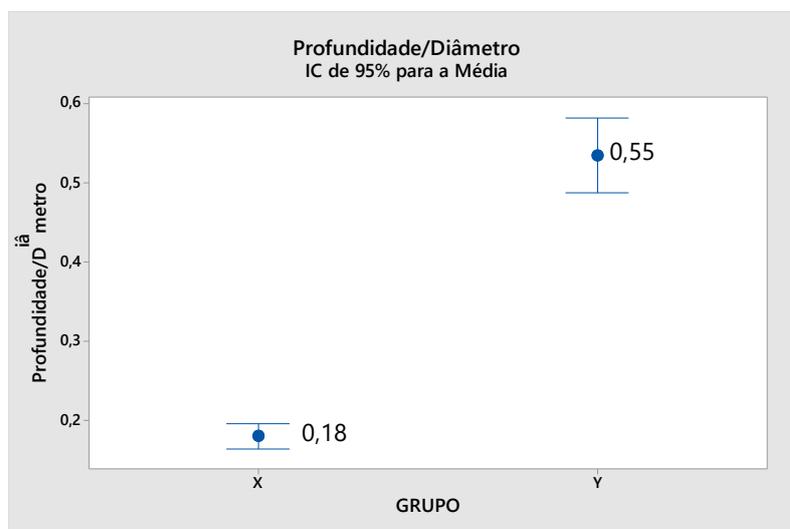


Figura 44: Razão entre a profundidade e diâmetro das microcavidades do grupo X e Y.

Segundo [49,52,72] existe uma relação ideal entre quantidade, diâmetro e profundidade das microcavidades para que elas possam atuar como reservatórios de lubrificante, retenção de detritos de desgaste e aumento na capacidade de carga através da sustentação hidrodinâmica. Segundo Gropper e Wang [52], sugere-se que o valor de 0,10 pode ser escolhido como a relação ideal entre profundidade e diâmetro em qualquer condição de operação. O grupo X apresentou uma média de 0,18, valor próximo ao de referência de acordo com Gropper e Wang [52] entre a razão profundidade/diâmetro das microcavidades. Ao contrário, o grupo Y apresentou uma média de 0,55, uma relação de profundidade e diâmetro distante da considerada ideal para qualquer condição de operação de deslizamento entre os anéis do pistão e a camisa do cilindro. O valor próximo do grupo X com a literatura está atrelado a profundidade rasa das microcavidades e do diâmetro/área das microcavidades, que apresentam valores menores, cerca de 2x e 3x, respectivamente, em relação ao grupo Y.

5.3 MEDIÇÃO DE DESGASTE APÓS TESTE DE DURABILIDADE

Na Figura 45 são exibidos os resultados de desgaste obtidos experimentalmente:

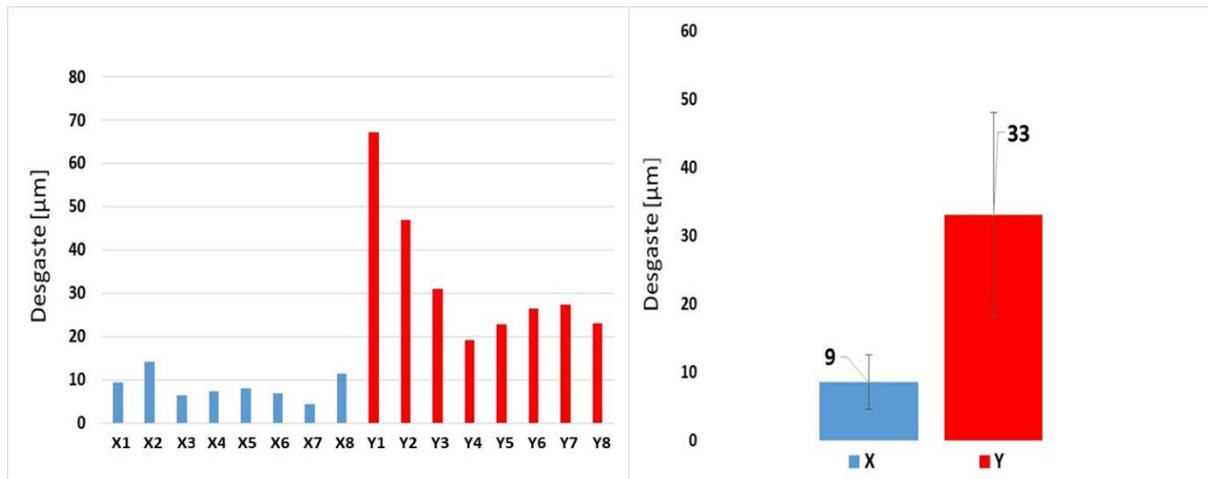


Figura 45: Resultados de desgaste obtidos nos testes de bancada: à esquerda resultados individuais de desgaste para cada amostra de cilindro e à direita resultado médio do desgaste.

É possível observar o melhor desempenho em relação às amostras do grupo X, com uma redução de 73% de desgaste em comparação às amostras do grupo Y. Os cilindros do grupo X apresentaram melhor performance em relação a desgaste, assim como um menor desvio dos resultados (barra de erros).

Os parâmetros de topografia avaliados anteriormente relacionado a vales, como: S_{vk} , V_0 e profundidade das microcavidades apresentaram valores consideravelmente mais altos para o grupo Y, indicando que o volume de retenção de óleo deve ser o suficiente para armazenar quantidade de lubrificante adequada, mas também rasos o suficiente para permitir que o lubrificante armazenado contribua positivamente para o contato tribológico em alguns casos, as microcavidades podem reter excesso de lubrificante, o que pode levar a uma lubrificação inadequada e ao aumento da fricção e do desgaste da superfície do cilindro [60].

Os resultados de desgaste também vão ao encontro da relação ideal entre a razão da profundidade/diâmetro das microcavidades, o qual segundo a literatura [49,52,72] existe uma faixa ótima de valores e essa faixa é limitada. O grupo X apresentou esta relação próxima da literatura [52], devido a profundidade rasa das microcavidades e ao menor diâmetro/área das microcavidades.

A maior quantidade de microcavidades do grupo X pode ter auxiliado na redução do atrito e desgaste, pois segundo J. Cheong et. Al [47] tem-se que o perfil

da distribuição de pressão ao longo de uma única microcavidade promove pressão hidrodinâmica adicional para o lubrificante. Este efeito de suporte hidrodinâmico aumenta a capacidade de suporte de carga da superfície do cilindro, ajudando a suportar a carga dos anéis de pistão (Figura 46). Portanto, um maior número de microcavidades fornece melhor distribuição do efeito da pressão hidrodinâmica acima mencionado sobre toda a superfície, ajudando a reduzir a força de atrito e, conseqüentemente, melhorando o desempenho de desgaste do motor.

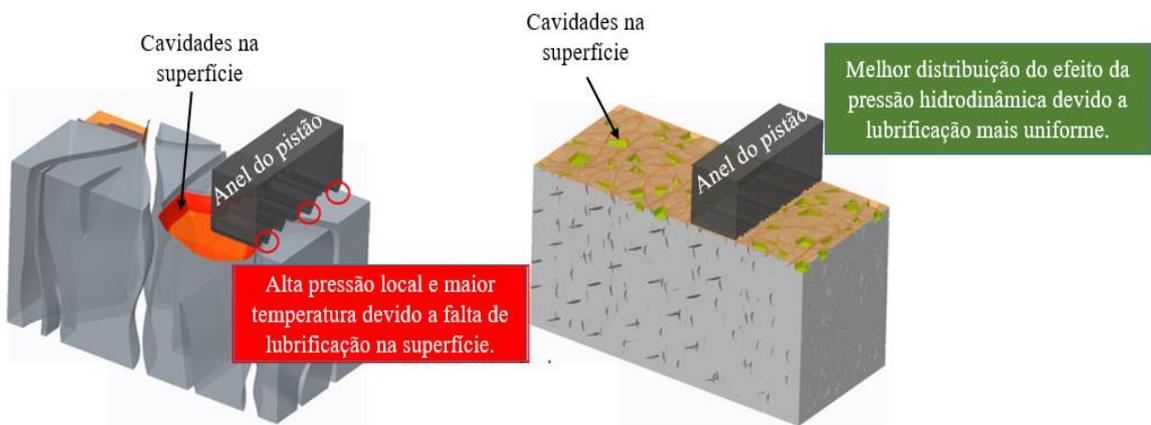


Figura 46: Representação esquemática das superfícies das camadas dos grupos Y (à esquerda) e X (à direita), exemplificando o efeito das microcavidades na lubrificação da superfície e pressão hidrodinâmica. Fonte: Próprio autor.

A partir das avaliações de topografia após o teste de durabilidade, é possível verificar a diferença na região do ponto morto superior entre os dois grupos (Figura 47 e 48).

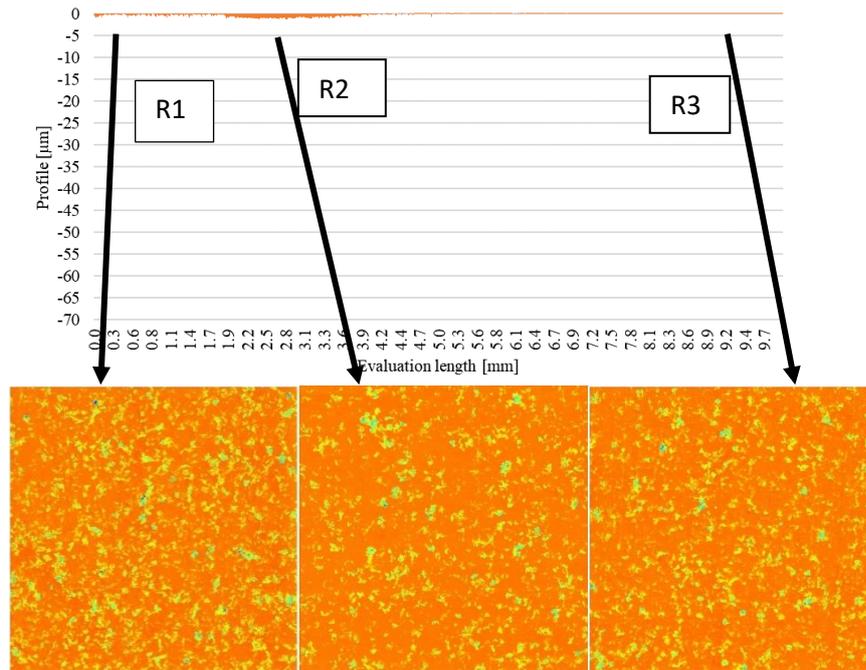


Figura 47: Avaliação do desgaste a partir da topografia da superfície após teste de durabilidade da variante X.

O grupo X, no ponto de maior solicitação (região R2) apresenta em sua superfície a presença de microcavidades, que auxiliam na lubrificação da superfície e permanecem mesmo após todo o teste.

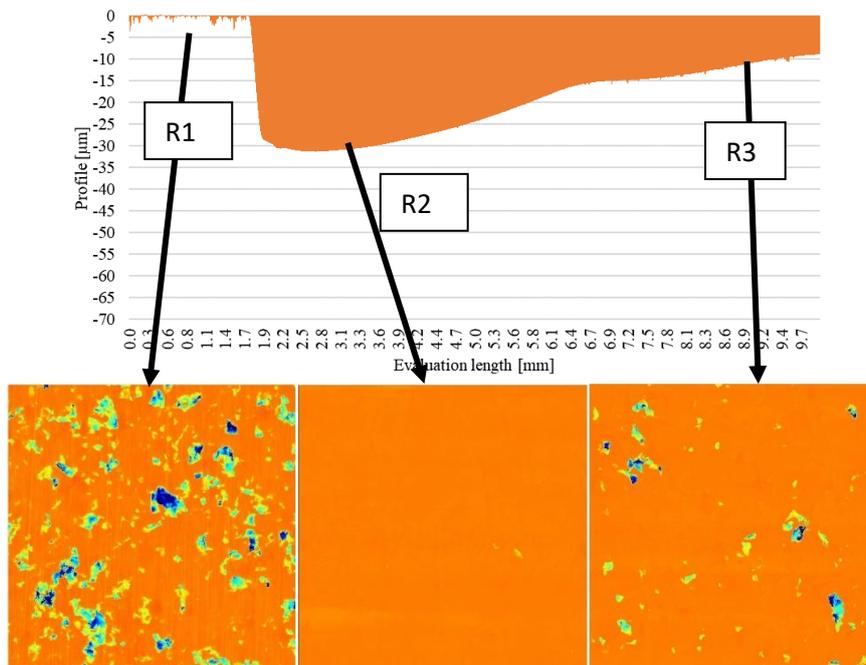


Figura 48: Avaliação do desgaste a partir da topografia da superfície após teste de durabilidade da variante Y.

As superfícies das amostras do grupo Y na região R2 (PMS) e R3 apresentaram desgaste mais elevado do que as amostras do grupo X nas respectivas regiões. Destaca-se a ausência de microcavidades, que foram removidas pelo desgaste excessivo, indicando a baixa eficiência das microcavidades características destas amostras. A região R1 não apresenta desgaste, pois é uma região onde não há contato do anel com a superfície do cilindro. A região R3 apresentou desgaste, mas inferior ao da região R2, pois se localiza em uma região onde há lubrificação hidrodinâmica [39].

5.4 TESTES FUNCIONAIS

As Figuras 49 e 50 apresentam os valores das rotações até o emperramento dos motores as amostras do grupo X e Y. Para a construção dos gráficos dos resultados dos testes funcionais, os resultados apresentados tiveram seus valores normalizados, através da equação 7 abaixo.

$$Gn = \left(\frac{G}{G_{max}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Nesta equação Gn representa o resultado normalizado, G a grandeza em questão e G_{máx} o valor obtido experimentalmente desta grandeza, dentro das especificações estipuladas pelo fabricante. Os resultados estão normalizados em relação ao valor nominal de aprovação adotado para este teste.

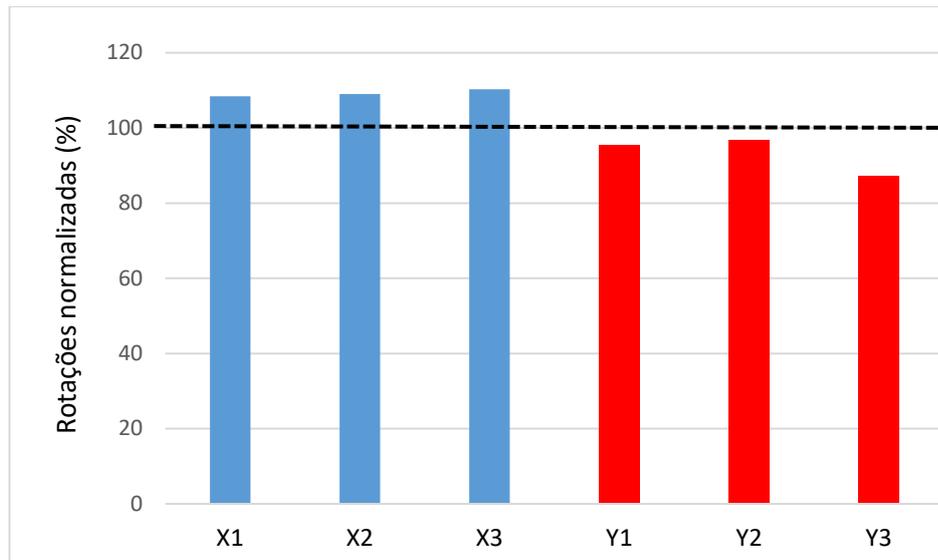


Figura 49: Rotações dos motores obtidas antes do seu emperramento forçado para o grupo X (azul) e o grupo Y (vermelho).

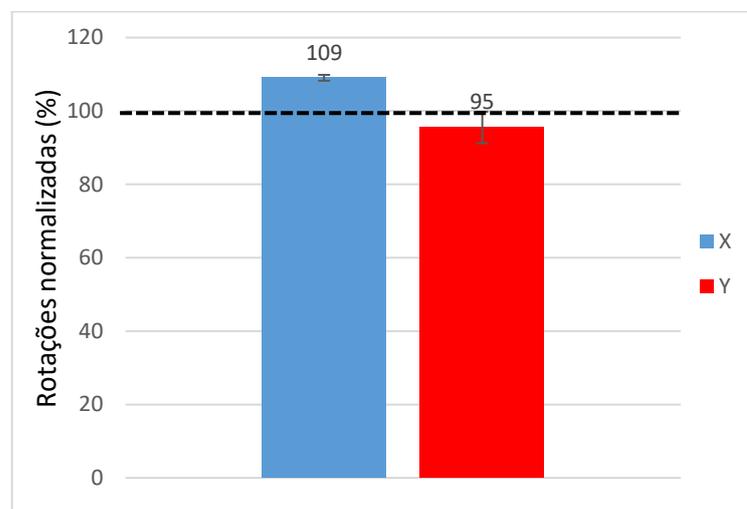


Figura 50: Média das rotações dos motores obtidas antes do seu emperramento forçado para o grupo X (azul) e o grupo Y (vermelho).

Observa-se que todos os motores testados com o cilindro do grupo X superaram a rotação nominal do cilindro de série (linha tracejada), ou seja, suportaram misturas mais pobres (ou seja, com menos lubrificante) antes do emperramento do

motor. O grupo X também atingiu, em comparação ao grupo Y, rotações 15% superiores até o emperramento do motor.

Uma maior quantidade de cavidades na superfície com profundidade e diâmetros próximos do valor considerado ótimo pode ter favorecido o deslocamento de lubrificante para a superfície [74], auxiliando na formação do filme lubrificante que separa o contato entre o anel do pistão e o cilindro [55].

Possivelmente, conforme se reduz a quantidade de combustível (e conseqüentemente de lubrificante) da mistura ar/combustível, as microcavidades presentes no grupo X atuam como reservatórios de lubrificante, retenção de detritos de desgaste e aumento na capacidade de carga através da sustentação hidrodinâmica [52]. Entretanto, chega um momento em que o volume de óleo retido na superfície é tão pequeno que não consegue evitar o contato entre as asperezas do conjunto cilindro pistão, resultando na elevação de temperatura nesta região e, em condições extremas, no emperramento do motor [48]. O grupo Y apresentou parada do motor por engripamento abaixo dos valores especificados para os motores de produção, possivelmente devida à sua capacidade limitada de reter lubrificante devido aos profundos e poucos vales, potencializados quando há o empobrecimento da mistura ar/combustível no motor.

Os resultados dos testes funcionais, assim como os resultados de desgaste, também vão ao encontro da relação ideal entre a razão da profundidade/diâmetro da microcavidade [49,52,72]. O grupo X apresentou esta relação próxima da considerada ideal pela literatura [52], devido a profundidade rasa das microcavidades e ao menor diâmetro/área das microcavidades, diferente do grupo Y que apresentou em sua morfologia da superfície com maior profundidade e diâmetro das microcavidades, cerca de 82% e 46%, respectivamente, maiores que o grupo X.

O grupo X além de apresentar resultados acima da especificação, também apresenta menor desvio padrão, fator muito importante para as exigências do motor. O grupo Y apresenta a média abaixo do especificado, o que remete a não aprovação do motor com para esta variante testada. O desvio padrão para o grupo Y foi maior que o grupo X, e como citado anteriormente, a estabilidade de resultados é um requisito muito importante para motores.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, verificou-se experimentalmente, a partir de testes de durabilidade e funcionais, que as amostras de cilindros do grupo X apresentaram melhor performance em relação às do grupo Y. Os resultados de desgaste mostraram uma redução de 73% para o grupo X em relação ao grupo Y. Nos testes funcionais do motor o grupo X possibilitou, em comparação ao grupo Y, atingir valores de rotações até 15% superiores. O grupo X apresentou uma menor razão entre a profundidade/diâmetro das microcavidades, tendo valores próximos daqueles sugeridos pela literatura como valores ótimos, devido a profundidade rasa das microcavidades e ao menor diâmetro/área das microcavidades, diferentemente do grupo Y, o qual apresentou microcavidades com maior profundidade e diâmetro, cerca de 82% e 46%, respectivamente, em relação ao grupo X. Outra importante característica que diferencia o grupo X do Y foi a quantidade de microcavidades, o qual o grupo X apresentou cerca de 4x mais do que o grupo Y, com uma distribuição mais uniforme na superfície.

Os parâmetros da curva Abbott-Firestone S_k e S_{pk} não apresentaram relação com o desempenho das amostras testadas. Já os parâmetros com relação a profundidade de vales, S_{vk} , V_0 (retenção de óleo) e perfil de profundidade foram os parâmetros que mais influenciaram no desempenho do motor ao desgaste.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que o método proposto para criar as microcavidades é adequado para a aplicação, possibilitando a redução no desgaste do motor.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Holmberg, P. Andersson, N.O. Nylund, K. Mäkelä, A. Erdemir, **Global energy consumption due to friction in trucks 30 and buses**, Tribol. Int. 78 (2014) 94–114. doi:10.1016/j.triboint.2014.05.004. 31
- [2] K. Holmberg, P. Andersson, A. Erdemir, **Global energy consumption due to friction in passenger cars**, Tribol. Int. 47 32 (2012) 221–234. doi:10.1016/j.triboint.2011.11.022. 33
- [3] R.R. Fessler, G.R. Fenske, **Reducing Friction and Wear in Heavy Vehicles**, Argonne - US, 1999. 34
- [4] G. Ryk, I. Etsion, **Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction**, Wear. 261 (2006) 792–35 796. doi:10.1016/j.wear.2006.01.031. 36
- [5] G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion, **Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive 37 components**, Tribol. Trans. 45 (2002) 444–449. doi:10.1080/10402000208982572. 38
- [6] N. Biboulet, H. Bouassida, J. Cavoret, A. Lubrecht, **Determination of fundamental parameters for the cross-hatched 39 cylinder liner micro-geometry**, Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol. 231 (2017) 293–301. 40 doi:10.1177/1350650114548202. 41
- [7] M. Nakada, **Trends in engine technology and tribology**, Tribol. Int. 27 (1994) 3–8. doi:10.1016/0301-679X(94)90056-42 6.
- [8] Akbarzadeh S, Khonsari MM (2010), **Effect of surface pattern on Stribeck curve**. Tribol Lett 37:477–486.
- [9] M. Paarth, L. Ryan, B. James, **Effect of textured surfaces created by modulation-assisted machining on the Stribeck curve and wear properties of steel-aluminum contact**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018).

- [10] W. Koszela, P. Pawlus, R. Reizer, T. Liskiewicz, **The combined effect of surface texturing and DLC coating on the functional properties of internal combustion engines.** Tribol. Int. 127 (2018)470–477.51 doi:10.1016/j.triboint.2018.06.034.
- [11]J. Michalski, P. Woś, **The effect of cylinder liner surface topography on abrasive wear of piston-cylinder assembly in combustion engine.** Wear. 271 (2011) 582–589. doi:10.1016/j.wear.2010.05.006.
- [12]H. Rahnejat, S. Balakrishnan, P.D. King, S. Howell-Smith, **In-cylinder friction reduction using a surface finish optimization technique,** Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 220 (2006) 1309–1318. 11 doi:10.1243/09544070JAUTO282.
- [13]Brunetti, F. (2012). **Motores a Combustão Interna (Vol. 2).** São Paulo: Edgard Bluncher.
- [14]Junior, J. C. (2017). **Efeito da Diluição de Etanol em Óleo Lubrificante de Baixa Viscosidade no comportamento Tribológico do Contato Anel do Pistão/Cilindro.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Londrina.
- [15]Hamilton, W. C. **Neutron diffraction investigation of the 119 K transition in magnetite.** Phys. Rev. G, 1958.
- [16]Munford, M. L. **Eletrodeposição de nanoestruturas metálicas em silício monocristalino.** Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- [17]Peruzzo, Francisco Miragaia & CANTO, Eduardo Leite. **Química na abordagem do cotidiano.** São Paulo, 2003.
- [18]Souza, R. & NASCIMENTO, M, Voordwald, H., Pigatin, W.; **Carbeto de Tungstênio- Uma alternativa ao Cromo Duro Eletrodepositado.** Jornadas SAM 2000. Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, 2000.
- [19]Oliveira, A. F. (2019). **Avaliação Crítica do Revestimento de Cromo Duro em Cilindros de Laminação a Frio.** São Paulo: Tese. (Doutorado em Ciências) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Escola Politécnica da Unisversidade de São Paulo.

- [20] Luckmann, Airton. **Cromaço** Técnica e Decorativa De Alumínio. EBRATS. São Paulo, 2003.
- [21] Lausmann, Gunther. **Safe deposition of Chromium based on Hexavalent Solutions. EUROMAT**. Alemanha, 2007.
- [22] JP. Branciaroli. **Control of Chromium Plating Baths, Product Finishing**, Vol 25, Dec 1960, p 50-56.
- [23] Dubpernee L, George. **The Development of Chromium Plating, Plating**, Vol 47, Jan 1960, p 35-53.
- [24] Bertorelli, Eugenio. **Trattato de galvanostegia**. Itália, 1960.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRATAMENTOS DE SUPERFÍCIE (ABTS). **Tratamento de superfície**. São Paulo, Maio de 2017.
- [26] Klocke, F. (1997). **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. (A.Kuchle, Trad.) Alemanha: Springer-Verlag.
- [27] Visque, E. J. (1998). **Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Brunimento**. Campinas: Dissertação. (Especialização em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- [28] Klocke, F. (1997). **Manufacturing Processes 3: Grinding, Honing, Lapping**. (A.Kuchle, Trad.) Alemanha: Springer-Verlag.
- [29] Tomanik, E. (2000). **Modelamento do Desgaste por Deslizamento em Anéis de Pistão de Motores de combustão Interna**. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [30] Vladescu, S.-C. C. (2017). **Looking Into a Laser Textured Piston Ring-Liner Contact**. Tribology International, 115, pp. 140-153.
- [31] Heywood, J.B.; **“Internal Combustion Engines Fundamentals”**. McGraw-Hill, 1st edition, 1988.
- [32] Mehta, P. **Effect of textured surfaces created by modulation-assisted machining on the Stribeck curve and wear properties of steel-aluminum contact**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018) 99:399–409.

- [33] Jost, P. Lubrication (Tribology) Education and Research: **A Report on the Present Position and Industry's Needs**," Jost Report, HMSO, Department of Education and Science, U. K., 1966.
- [34] Akchurin, A. **"Car 2020" and Tribology Research**. TriboNet about Tribology. Acesso em 13 de fevereiro de 2022.
- [35] P.J. Blau, **Friction Science and Technology**, Marcel Dekker, New York, 1995.
- [36] Holmberg K, ANDERSSON P, Erdemir A (2012) Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol Int* 47:221–234.
- [37] S.C. Lim. "Lubrication (Tribology) Education and Research: **A Report on the Present Position and Industry's Needs**," *Jost Report*, HMSO, Department of Education and Science, U. K., 1966.
- [38] Akbarzadeh S, Khonsari MM (2010). **Effect of surface pattern on Stribeck curve**. *Tribol Lett* 37:477–486.
- [39] Galda L, Pawlus P, Sep J (2009) **Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve**. *Tribol Int* 42:1505–1512.
- [40] Podgornik B, Sedlacek M (2012). **Performance, characterization and design of textured surfaces**. *J Tribol* 134:041701.
- [41] Tang W, ZHOU Y (2013). **The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact**.
- [42] Wos S, KOSZELA W, (2014). **Tribological behaviours of textured surfaces under conformal and non-conformal starved lubricated contact conditions**. *Proc InstMech Eng J J Eng Tribol* 229: 398–409.
- [43] R.K. Morton. **Topography of Surfaces** (1994). ASM HANDBOOKS ONLINE, volume 5, Surface Engineering.
- [44] Michigan Metrology, LLC (2014). **Surface Texture Parameters Glossary**. Pag. 88-100.
- [45] Silva, D. A. (2019). **Estudo dos Parâmetros de Superfície e da Tensão residual no aço ABNT 4340 Endurecido Após Retificação Utilizando Diferentes Fluidos de Corte**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Acesso em 14 de março de 2022, disponível em

http://www.posmat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/120/2018/04/Vers%C3%A3o-Final_Davi-Alves.pdf.

- [46] Andreatta, B. H. (2017). **Análise de um Pré-Tratamento de Dados Baseado em Valores Limiares de Amplitude na Textura de Superfícies Brunidas**. Curitiba: Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acesso em 6 de outubro de 2019, disponível em http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9367/1/CT_DAMEC_2017_1s_40.pdf.
- [47] J. Cheong, S. Wigger, H.J. Füller, S.A. Kaiser, **High-resolution LIF-Imaging of the oil film thickness in the piston-ring/ cylinder-liner contact in an optical tribometer**, Tribol. Int. 147 (2020). doi:10.1016/j.triboint.2020.106230.
- [48] Heywood, J., & SHER, E. (1999). **The Two-Stroke Cycle Engine: Its Development, Operation and Design (1 ed.)**. SAE International.
- [49] Zhou, Y., **Development of the theoretical model for the optimal design of surface texturing on cylinder liner**. Tribology International 52 (2012) 1–6.
- [50] Ma CB, **Study on the lubrication computational model and antifriction performance of textured surfaces**. Dissertação de doutorado, China University of Mining and Technology; 2010.p. 128–9.
- [51] Wakuda M., **Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact**. Wear 2003;254:356–63.
- [52] Gropper, D., WANG, L., **Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling technique and key findings**. Tribology International 94(2016)509–529.
- [53] Josefin Sjöberg. **Validation and development of an electroplating process to deposit a black chromium coating from a trivalent chromium electrolyte**. MSc programmer Engineering Physics with Materials Science Uppsala University, September 2016.
- [54] Dowson, D. and Higginson, G.R., **Elastohydrodynamic Lubrication**. Pergamon Press, 1977.

- [55] Zang, X., Yao, Y., Wang, J., & Wang, H. (2017). **Effect of lubricant film thickness on preventing scuffing failure in an internal combustion engine.** Tribology Transactions, 60(6), 1076-1083.
- [56] Zhang, N., Zengli, W., et. Al. **Investigation on Tribological Performance of Lubricating Film with Chevron Texture.** Published: 7 December 2022 by Informa UK Limited in Tribology Transactions.
- [57] Wang, Q. J., & Zhu, D. (2004). **An experimental study of the effect of surface texturing on the friction and wear of a point contact.** Journal of tribology, 126(4), 632-637.
- [58] Park, S., Kim, D., & Jang, J. (2015). **Effect of surface roughness on the wear behavior of polymeric materials.** Polymer Testing, 44, 195-201.
- [59] Shahidi, R., Nouri, A., & Azadi, M. (2012). **An investigation into the effects of honing parameters on surface roughness and form accuracy.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(1-4), 163-173.
- [60] Tzeng S., Saibel E. **On the effects of surface roughness in the hydrodynamic lubrication theory of a short journal bearing.** Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York (U.S.A.)
- [61] W. Grabon, P. Pawlus, **Description of two-process surface topography,** Surf. Topogr. Metrol. Prop. 2 (2014). doi:10.1088/2051-672X/2/2/025007.
- [62] G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion, **Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components,** Tribol. Trans. 45 (2002) 444–449. doi:10.1080/10402000208982572.
- [63] J. Cheong, S. Wigger, H.J. Füller, S.A. Kaiser, **High-resolution LIF-Imaging of the oil film thickness in the piston-ring/ cylinder-liner contact in an optical tribometer,** Tribol. Int. 147 (2020). doi:10.1016/j.triboint.2020.106230.
- [64] C. Shen, M.M. Khonsari, **Effect of dimple's internal structure on hydrodynamic lubrication,** Tribol. Lett. 52 (2013) 415– 57 430. doi:10.1007/s11249-013-0225-8.
- [65] Allen R. Jones. **Corrosion of Electroplated Hard Chromium.** ASM Handbook Corrosion Materials. Vol. 13 (2005).

- [66] Kenneth R. Newby. **Corrosion of Electroplated Hard Chromium**. ASM Industrial (Hard) Chromium Plating. Vol 5 (1994).
- [67] Jones, Allen R. **Microribbons in Hard Chromium Electrodeposits**. Atotech WW R&D. Rock Hill, USA (2005).
- [68] Machado, Guilherme A. **Brunimento a platô aplicado a cilindros de motores: avaliação da evolução da topografia da superfície após ciclos de funcionamento em bancos de provas**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia universidade católica de minas gerais; 2008.p.151-47.
- [69] Suski, Cássio Aurélio. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina; 2004.p.100-4.
- [70] Dallmann, Jeferson, **Projeto, Construção e Validação de um Abrasômetro Roda de Borracha**. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais, UDESC, 2012. p. 78.
- [71] Silva, Álisson R. Stochero. **Developing a rubber wheel abrasometer**. Artigo para Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, 1-4.
- [72] Shubrajit Bhaumik Dr., PhD. Et.al **Analysing the frictional properties of micro dimpled surface created by milling machine under lubricated condition**. Tribology International, volume 146, June 2020, 106260.
- [73] Xiaobin Lu & M. M. Khonsari. **An Experimental Investigation of Dimple Effect on the Stribeck Curve of Journal Bearings**. Tribol Lett (2007) 27:169–176 DOI 10.1007/s11249-007-9217-x.
- [74] Daniel Gropper, Ling Wang, Terry J. Harvey. **Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings**. Tribology International. Volume 94, February 2016, Pages 509-529. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.009>.

- [75] Yu H, Wang X, Zhou F. **Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces.** TribolLett2010; 37:123–30.
- [76] Krupka I, Hartl M, Svoboda P, **Effects of surface topography on lubrication film formation within elastohydrodynamic and mixed lubricated non-conformal contacts.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. Volume 224, Issue 8. <https://doi.org/10.1243/13506501JET657>.