

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS DE
CILINDROS DE MOTORES DE DOIS TEMPOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ELTON YVENS GODOY DE OLIVEIRA

RIO GRANDE

2023

ELTON YVENS GODOY DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO
TRIBOLÓGICO DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS DE
CILINDROS DE MOTORES DE DOIS TEMPOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Mecânica.

Orientadora: Prof.^a Ph.D. Henara Lillian Costa Murray
Coorientador: Prof. Dr. Francisco José Profito

RIO GRANDE

2023

Ficha Catalográfica

O48s Oliveira, Elton Yvens Godoy de.
 Simulação numérica do comportamento tribológico de superfícies
 texturizadas de cilindros de motores de dois tempos / Elton Yvens
 Godoy de Oliveira. – 2023.
 60 f.

 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
 FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio
 Grande/RS, 2023.
 Orientadora: Dra. Henara Lillian Costa Murray.
 Coorientador: Dr. Francisco José Profito.

 1. Texturização superficial 2. Lubrificação 3. Motor de dois tempos
 4. *Plateau honing* 5. Simulação numérica 6. Sistema pistão/cilindro
 7. Tribologia I. Murray, Henara Lillian Costa II. Profito, Francisco José
 III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº **9/2023** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos doze dias do mês de julho de dois mil e vinte e três, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às treze horas e trinta minutos, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **Elton Yvens Godoy de Oliveira**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Simulação e controle de processos de fabricação, com o seguinte título: **Simulação Numérica do Comportamento Tribológico de Superfícies Texturizadas de Cilindros de Motores de Dois Tempos**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Henara Lillian Murray Costa, Francisco José Profito, Gustavo Platt e o convidado Washington Martins da Silva Jr. sob a presidência da Professora Henara Lillian Murray Costa. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Henara Lillian Murray Costa: Aprovado
2. Francisco José Profito: Aprovado
3. Gustavo Platt: Aprovado
4. Washington Martins da Silva Jr.: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____	 Documento assinado digitalmente HENARA LILLIAN COSTA MURRAY Data: 15/08/2023 17:24:07-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
CPF: 847.359.106-20	 Documento assinado digitalmente FRANCISCO JOSE PROFITO Data: 23/08/2023 18:51:37-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
2. _____		
CPF: 321.596.308-61	 Documento assinado digitalmente GUSTAVO MENDES PLATT Data: 22/08/2023 17:02:49-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
3. _____		
CPF: 044.087.637-05		



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



4.

CPF: 595.123.771-87



Documento assinado digitalmente

WASHINGTON MARTINS DA SILVA JUNIOR

Data: 15/08/2023 18:03:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Elton Yvens Godoy de Oliveira:



Documento assinado digitalmente

ELTON YVENS GODOY DE OLIVEIRA

Data: 15/08/2023 17:13:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Joisse e Elton, e ao meu irmão Ian, pelo suporte, incentivo e amor, quando
mais precisei.*

*E à minha querida avó Silvia, que foi inspiração e grande incentivadora dos meus
estudos. Dedico este trabalho a ti, com saudade e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, antes de tudo, à minha orientadora, Prof.^a Ph.D. Henara Lillian Costa Murray, pela confiança, pelo apoio, pela paciência e pela dedicação que ofereceu ao longo destes anos de trabalho. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

Também gostaria de agradecer ao meu coorientador, Prof. Dr. Francisco José Profito, do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP), pelo auxílio, pela disponibilidade, pelas sugestões e pelos ensinamentos que me proporcionou durante este processo. Sua coorientação foi muito valiosa para a existência deste trabalho.

Aos colegas Felipe Kevin Luz (FURG) e Samuel Anísio Nunes Silva (UFU), pelo auxílio e pela disponibilidade concedidos no decorrer deste trabalho. A ajuda de vocês foi de imensa importância e não será esquecida.

Devo agradecimento também ao engenheiro Guilherme Pizzato Sieben e à Stihl, parceiros do projeto, pela oportunidade, colaboração, acesso aos dados e pelos recursos que viabilizaram a realização desta pesquisa. Esta parceria foi essencial para a execução deste trabalho.

Agradeço ao Programa Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação (MAI-DAI) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento, reconhecimento, acompanhamento e, principalmente, pela valorização da pesquisa científica no Brasil.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande (PPMec-FURG), pela infraestrutura de seus laboratórios, pelo corpo docente, corpo técnico e pelo ambiente acadêmico que me proporcionou uma formação de qualidade e uma experiência enriquecedora.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS DE CILINDROS DE MOTORES DE DOIS TEMPOS

RESUMO

Atualmente o desenvolvimento de motores de combustão interna mais eficientes tem por foco a redução do atrito entre as interfaces móveis do motor, principalmente no contato entre as superfícies dos anéis do pistão e do cilindro. Dentre os vários meios existentes para diminuir o atrito deste tribossistema, há a inserção de texturas de sulcos de brunimento em uma ou ambas as superfícies. Algumas técnicas lançam mão da criação de modelos numéricos de superfícies brunidas para simular o comportamento em regime de lubrificação mista de superfícies texturizadas em sistemas pistão/cilindro. Este trabalho busca a otimização de padrões de brunimento para a superfície do cilindro de motores de dois tempos. Ainda pouco explorado, o estudo do brunimento possui poucas referências sobre a simulação numérica de seu comportamento nestes tipos de motores, principalmente sobre a combinação de uma textura estocástica com sulcos de brunimento, formando uma textura híbrida. Estes cilindros possuem uma textura estocástica prévia resultante de um revestimento de cromo duro aplicado industrialmente, seguido de polimento. Com o auxílio de ferramentas computacionais para inserção de sulcos de brunimento, foram realizadas simulações numéricas para avaliar os efeitos do ângulo de cruzamento (α), profundidade (d_p), largura (w) e densidade (d_e) destes sulcos na lubrificação e atrito do tribossistema pistão/cilindro. Através destes métodos, chegou-se aos valores de $\alpha = 40^\circ$, $d_e = 0.15$, $w = 15 \mu\text{m}$ e $d_p = 1.5 \mu\text{m}$, os quais apresentaram melhor comportamento entre as superfícies numericamente modificadas. Os resultados sugerem que, neste caso, os sulcos não resultariam em redução de atrito. Isso provavelmente ocorre porque, para os casos estudados, já havia uma textura estocástica resultante da deposição anterior de cromo duro, a qual possuía dimensões mais significativas que os sulcos de brunimento digitalmente introduzidos.

Palavras-chave: Texturização superficial; Lubrificação; Motor de dois tempos; *Plateau honing*; Simulação numérica; Sistema pistão/cilindro; Tribologia.

NUMERICAL SIMULATION OF THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF TEXTURED CYLINDER LINERS OF TWO-STROKE ENGINES

ABSTRACT

Currently, the development of more efficient internal combustion engines focuses on reducing friction between the engine's moving interfaces, especially in the contact between the piston ring and cylinder liner surfaces. Among the various means to reduce friction in this tribosystem, there is the insertion of honing groove textures on one or both surfaces. Some techniques make use of the creation of numerical models of honed surfaces used to simulate the behavior of textured surfaces in mixed lubrication regimes in piston/cylinder systems. This work seeks to optimize honing patterns for the cylinder surface of two-stroke engines. Still little explored, the study of honing has few references on the numerical simulation of its behavior in these types of engines, mainly on the combination of a stochastic texture with honing grooves, forming a hybrid texture. These cylinders have a previous stochastic texture resulting from an industrially applied hard chromium coating, followed by polishing. With the aid of computational tools for inserting honing grooves, numerical simulations were carried out to evaluate the effects of crossing angle (α), depth (d_p), width (w), and density (d_e) of these grooves on lubrication and friction in the piston/cylinder tribosystem. Through these methods, values of $\alpha = 40^\circ$, $d_e = 0.15$, $w = 15 \mu\text{m}$ and $d_p = 1.5 \mu\text{m}$ were reached, which showed better behavior among the numerically modified surfaces. The results suggest that, in this case, the grooves would not improve tribology. This probably occurs because, in this case, there was already a stochastic texture resulting from a previous hard chrome deposition.

Keywords: Surface texturing; Lubrication; Two-stroke engine; Plateau honing; Numerical simulation; Piston/cylinder system; Tribology;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica de um volume de controle do MVFbE. Fonte: Adaptada de Profíto, Giacomini, Zachariadis e Dini (2015).	23
Figura 2 - Representação detalhada do contato de cada aspereza. Fonte: Adaptada de Profíto, Tomanik e Zachariadis (2016).	25
Figura 3 - Média da espessura mínima de filme lubrificante pelo ângulo de cruzamento dos sulcos de brunimento. Fonte: Adaptada de Spencer, Almqvist e Larsson (2011).	27
Figura 4 - Topografia superficial 3D por interferometria ótica da amostra P3. Fonte: Autor.	28
Figura 5 - Resultados de campo para mesmo segmento a uma razão $\lambda = 1,25$ de uma superfície de camisa de cilindro de motor a combustão interna apresentando (a) topografia de superfície, (b) pressão hidrodinâmica, (c) fração de filme hidrodinâmico e (d) pressão de contato das asperidades. Fonte: Adaptada de Profíto (2015).	31
Figura 6 - Fluxo metodológico das simulações para (a) a superfície estocástica original, para (b) as superfícies brunidas digitalmente com segmentos de 200 μm para (c) as superfícies brunidas digitalmente com segmentos de 1200 μm . Fonte: Autor.	32
Figura 7 - Sequência de resultados da extratificação da superfície da contato da interface anel/camisa para amostra P3 (a), apresentando processos de (b) remoção de protuberâncias, (c) remoção da forma, (d) correções de pnm e distorções e (e) separação das asperezas das ondulações superficiais. Fonte: Autor.	34
Figura 8 - Segmentos produzidos a partir superfície de rugosidade da amostra P3. Fonte: Autor.	35
Figura 9 - Deslocamento da linha de referência do plano médio da amostra P3. Fonte: Autor.	37
Figura 10 - Curvas de Abbott-Firestone para amostras P3 com sulcos de $\alpha = 30^\circ$ para w $= 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e d_e igual a (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.	38
Figura 11 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 30° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.	39

Figura 12 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 40° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.....	40
Figura 13 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 50° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.....	41
Figura 14 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 60° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.....	42
Figura 15 - Pressão hidrodinâmica média da amostra P3 para diferentes densidades de sulcos para os ângulos de: (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°. Fonte: Autor.	44
Figura 16 - Tensão de cisalhamento hidrodinâmica média da amostra P3 para diferentes densidades de sulcos para os ângulos de: (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°. Fonte: Autor.....	45
Figura 17 - Perfis de rugosidade da superfície P3 digitalmente texturizada para profundidades de sulco com (a) $d_p = 0,75 \mu\text{m}$, (b) $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ e (c) $d_p = 3 \mu\text{m}$, além da (d) superfície resultante da amostra pós-tratamento. Fonte: Autor.....	47
Figura 18 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 com sulco com ângulo de cruzamento $\alpha = 40^\circ$ e profundidades de sulcos d_e de 0,75 μm , 1,5 μm e 3 μm . Fonte: Autor.	48
Figura 19 - Segmentos da amostra P3 com sulcos com espessura de 1200 μm . Fonte: Autor.....	50
Figura 20 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 com sulcos inseridos digitalmente com segmentos de espessura de 200 μm e 1200 μm . Fonte: Autor.	51
Figura 21 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 original com segmentos de espessura de 200 μm e 1200 μm . Fonte: Autor.	51
Figura 22 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica, (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica e (c) coeficiente de atrito da amostra P3 com sulcos de brunimento para velocidades de 3 m/s, 11,71 m/s e 16,66 m/s. Fonte: Autor.....	53

Figura 23 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica, (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica e (c) coeficiente de atrito da amostra P3 original para velocidades de 3 m/s, 11,71 m/s e 16,66 m/s. Fonte: Autor..... 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 tratada no MountainsMap®	34
Tabela 2 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 30° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.	39
Tabela 3 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 40° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.	40
Tabela 4 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 50° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.	41
Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 60° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.	42
Tabela 6 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 digitalmente texturizada para profundidades de sulco d_p com 0,75 μm , 1,5 μm e 3 μm	48
Tabela 7 - Volumes de vazios das amostras P3 sem sulcos e P3 com sulcos de dimensões: $\alpha = 40^\circ$; $d_e = 0,15$; $w = 15 \mu\text{m}$ e; $d_p = 1,5 \mu\text{m}$	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
JFO	Jakobsson-Floberg-Olsson
LFS	Laboratório de Fenômenos de Superfície
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
MVFbE	Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos
P3	Amostra da superfície polida da camisa de cilindro do motor dois tempos
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PNM	Pontos Não-Mensurados
SURFAT	<i>Surface Analysis Toolbar</i>
SurfLUB	<i>Surface Lubrication</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s	Área de contato real
d_e	Densidade de sulcos de brunimento
d_p	Profundidade do sulco
E	Elementos
E_S^*	Módulo elástico combinado da asperidade
F	Face de integração
H	Dureza do material mais macio
h_{lim}	Distância de separação entre a superfície rugosa e a superfície rígida plana
h_m	Espessura mínima de lubrificante
$\vec{n}$	Vetor normal
P	Nó
Pa	Pascal
p_{asp_s}	Pressão de contato no pico da aspereza
p_{asp}	Pressão de contato das asperidades
P_{asp}	Pressão de contato das asperidades média
p_{hydro}	Pressão hidrodinâmica
P_{hydro}	Pressão hidrodinâmica média
pI	Ponto de integração
rpm	Revoluções por minuto
S	Segundos
SCV	Subdivisões do volume de controle
Sku	Curtose da curva de distribuição das alturas
Spq	Rugosidade média quadrática dos picos da região do platô
Sq	Rugosidade média quadrática da superfície
Ssk	Assimetria da curva de distribuição das alturas
VC	Volume de controle
V_v	Volume de vazio
V_{vc}	Volume de vazio no núcleo
V_{vv}	Volume de vazio nos vales
W	Largura do sulco
w_s	Interferência do contato
α	Ângulo de cruzamento entre os sulcos de brunimento

β_s	Raio de curvatura do topo da aspereza local
ε	Razão entre profundidade e largura de sulco
λ	Espessura de filme lubrificante adimensional em função do S_q
Λ	Espessura de filme lubrificante adimensional em função do S_{pq}
μ	Coeficiente de atrito
τ_{asp}	Tensão de cisalhamento das asperidades
T_{asp}	Tensão de cisalhamento das asperidades média
τ_{hydro}	Tensão de cisalhamento hidrodinâmica
T_{hydro}	Tensão de cisalhamento hidrodinâmica média

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS GERAIS	21
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	PRINCÍPIOS DO ALGORITMO DE CONSERVAÇÃO DE MASSA PARA SIMULAÇÃO DA LUBRIFICAÇÃO MISTA.....	22
2.2	MODELOS DE LUBRIFICAÇÃO MISTA	23
2.2.1	Definição de Lubrificação Mista	24
2.2.2	Contato entre superfícies rugosas	24
2.3	SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS	25
2.4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE SUPERFÍCIES BRUNIDAS	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAIS	28
3.1.1	Amostra	28
3.1.2	Programas utilizados.....	29
3.2	METODOLOGIA	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	ETAPA DE PROCESSAMENTO DA SUPERFÍCIE ORIGINAL.....	33
4.2	ETAPA DE CRIAÇÃO DOS SULCOS DE BRUNIMENTO	37
4.2.1	Superfícies com diferentes ângulos e densidades de sulcos	37
4.2.1.1	Obtenção digital dos sulcos de brunimento.....	37
4.2.1.2	Resultados das simulações do SurfLUB para diferentes ângulos entre sulcos e densidades de sulcos	42
4.2.2	Superfícies com ângulo, densidade e largura de sulcos de brunimento definidos e com diferentes profundidades.....	46
4.2.2.1	Obtenção das novas profundidades de sulcos	46
4.2.2.2	Resultados das simulações do SurfLUB para diferentes profundidades de sulcos de brunimento.....	48

4.3	SIMULAÇÕES COM ESPESSURA MAIOR DOS SEGMENTOS E VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE SIMULAÇÃO	49
4.3.1	Simulações para segmentos com 1200 µm de espessura a 3 m/s de velocidade	49
4.3.2	Simulações para elevadas velocidades de trabalho	52
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58
	REFERÊNCIAS NOMINAIS	58
	REFERÊNCIAS POR ESTRATO	60
	REFERÊNCIAS POR QUALIS	61
	REFERÊNCIAS POR DATA	61

1 INTRODUÇÃO

Motores de combustão interna são amplamente utilizados no mundo, seja na indústria, em meios de transporte ou também em atividades domésticas. Devido a esta diversidade de aplicações e grande importância global, este sistema possui diversos estudos focados no desenvolvimento de motores mais eficientes, com baixa emissão de gases nocivos ao meio ambiente e menor consumo de combustível. Atualmente, as eficiências termomecânicas de motores de combustão interna ainda são muito baixas, visto que de toda capacidade energética fornecida pelo combustível, apenas uma pequena porcentagem é aproveitada na forma de energia mecânica. Parte significativa da energia mecânica gerada pela combustão é perdida através do atrito existente entre as várias interfaces móveis do motor, sendo a interface anel do pistão/camisa do cilindro, considerada a maior dissipadora dessa energia dentre todos componentes do equipamento (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012).

Por conta desta característica, diferentes tecnologias têm sido exploradas com a finalidade de diminuir os efeitos do atrito nesta interface. Dentre elas estão o tratamento térmico e revestimento da superfície do anel do pistão, a adição de diversos aditivos e nanopartículas em lubrificantes, a modificação da rugosidade e perfilamento das superfícies em contato etc. Uma das formas de diminuição de perdas por atrito é a aplicação de texturas em uma ou ambas as superfícies em contato, com formas geométricas e distribuição espacial que favoreçam as condições de lubrificação das interfaces.

Pesquisas indicam que alguns formatos de texturas feitas em camisas de cilindros podem provocar um efeito de cavitação do lubrificante em seu interior durante a passagem da interface do anel do pistão, apresentando melhores resultados quanto à espessura do filme de lubrificante e diminuição do atrito em alguns casos, além de servirem como um depósito de debris de desgaste (VLĂDESCU; MEDINA; OLVER; PEGG *et al.*, 2016). Estes efeitos levam à diminuição das perdas por atrito e do desgaste severo das superfícies de contato, podendo assim contribuir para a diminuição de consumo de combustível.

Parte deste efeito ocorre devido à influência provocada pela textura superficial na espessura de filme lubrificante no contato, pois em casos específicos de regime de lubrificação, como mista ou limítrofe, ela causa aumento da espessura do filme, reduzindo o contato entre asperidades e com isso, também o atrito (VLĂDESCU; MEDINA; OLVER; PEGG *et al.*, 2016). Esta mudança se deve ao fato de os bolsos na superfície funcionarem como espécies de micro mancais hidrodinâmicos, de modo a deslocar a curva de Stribeck para a esquerda,

melhorando assim o desempenho do tribossistema nos regimes misto e limítrofe de lubrificação (ROSENKRANZ; GRÜTZMACHER; GACHOT; COSTA, 2019).

Com o avanço da computação e a sofisticação de programas de análise numérica, tornou-se possível a criação de modelos que recriassem as características geométricas e condições de operação semelhantes às que ocorrem em sistemas pistão/cilindro. RONEN; ETSION e KLIGERMAN (2001) desenvolveram um modelo analítico para a simulação do comportamento de uma superfície texturizada para um sistema anel de pistão/cilindro simplificado, através da solução da equação de Reynolds e da equação do movimento. Estudos como este foram muito importantes para o setor automotivo, visto que ajudaram a elucidar o quão pertinentes são as superfícies texturizadas para a redução de perdas por atrito em componentes automotivos alternativos.

Entretanto, constatou-se posteriormente que tal modelagem não leva em consideração um aspecto fundamental da lubrificação entre superfícies texturizadas: o aspecto transiente da cavitação no interior dos bolsos. AUSAS; JAI e BUSCAGLIA (2009), como forma de solucionar esse tipo de adversidade, propuseram um algoritmo para a solução de problemas transientes de lubrificação em que a cavitação foi modelada com base na formulação de Elrod-Adams para a equação de Reynolds, que considera condições de contorno que garantem a conservação de massa do escoamento do lubrificante.

Quando se analisam modelos numéricos do sistema pistão/cilindro, é necessário levar em conta a geometria do contato entre o anel do pistão e a camisa do cilindro, a variação de velocidade do movimento relativo entre as superfícies de contato e, por consequência, a variação da espessura do filme de lubrificante na interface, além das mudanças de regime de lubrificação. LIU; LI e TIAN (2017) desenvolveram um modelo baseado no método dos elementos finitos, em que simularam o transporte de óleo através da interface entre o anel do pistão/camisa do cilindro a fim de obter-se a espessura do filme lubrificante para um motor de combustão interna de um veículo de passeio. Além das variáveis já citadas, são analisadas também as forças presentes no contato, as pressões hidrodinâmicas geradas pelo deslizamento do anel sobre a superfície da camisa, assim como as distorções geométricas causadas pela variação da temperatura de operação do sistema.

A análise do comportamento da lubrificação e desgaste de superfícies mecanicamente texturizadas é explorada há muitos anos. Durante o período pós segunda guerra mundial, já haviam alguns estudos aplicados à avaliação do desgaste em contatos lubrificados de superfícies brunidas, concluindo que os padrões de sulcos, características deste tipo de operação, geravam um comportamento desejável para alguns regimes de lubrificação, como captura de debris de

desgaste, diminuição do atrito e do desgaste (MARTZ, 1949). Isso deu origem a um processo de acabamento comumente utilizado em camisas de pistão conhecido como brunimento.

Atualmente, os estudos deste tipo de superfície baseiam-se na otimização da geometria destes sulcos para o melhor comportamento tribológico. LI; LU; MA; XU *et al.* (2019) realizaram uma análise numérica e experimental utilizando um modelo de lubrificação para o tribossistema anel de pistão/cilindro com diferentes padrões de brunimento, avaliando os impactos causados por estas superfícies na lubrificação. Com base em análises numéricas de variáveis como coeficiente de atrito instantâneo, espessura mínima de filme e capacidade de sustentação de carga do filme, foi possível chegar a valores de ângulo de cruzamento, profundidade e densidade de sulcos em que a força de atrito alcançou um valor mínimo, otimizando as perdas por atrito em função desses parâmetros do brunimento.

O presente trabalho visou realizar a simulação numérica variando diferentes parâmetros geométricos de superfícies brunidas, em parceria com a empresa Stihl, com a finalidade de se obter a otimização do brunimento visando a diminuição das perdas por atrito do sistema anel do pistão/camisa do cilindro. A superfície que serviu como base para texturização trata-se de uma amostra digitalizada de uma camisa de cilindro de um motor à combustão interna de dois tempos, que durante sua fabricação recebe um revestimento de cromo duro, seguido de um processo de acabamento superficial de brunimento. O brunimento é feito em duas etapas, onde primeiro faz-se um acabamento tipo *mirror-like polishing*, seguido de uma segunda etapa para a produção dos sulcos de brunimento. Desta forma, portanto, trata-se da simulação de uma superfície texturizada híbrida, que combina uma textura estocástica composta pelos bolsos resultantes do revestimento de cromo com sulcos de brunimento. Estes sulcos de brunimento oriundos do processo de acabamento não têm geometria pré-definida e possuem profundidades reduzidas comparadas aos dos sulcos virtuais presentes neste trabalho, tendo apenas o propósito de produzir uma superfície espelhada pelo seu polimento, além de reter uma parcela de fluidos lubrificantes, diferentemente dos sulcos os quais este trabalho se propõe a realizar. Como ferramenta de simulação e análise de dados, foram utilizados os programas SURFAT (utilizado para a preparação das superfícies digitalizadas) e SurfLUB (utilizado para a simulação da lubrificação do tribossistema anel/camisa). Estes algoritmos foram desenvolvidos pelo Prof. Francisco José Profito, do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Universidade de São Paulo (USP), que é coorientador deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho possui como objetivo geral propor, por meio de simulação numérica, padrões de brunimento para texturização de superfícies de camisa de cilindro de motores de dois tempos que venham a ser sobrepostos a textura aleatória resultante de processo de recobrimento por cromo duro usado nestas camisas de pistão.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as geometrias mais vantajosas para texturização por brunimento em estudos já existentes;
- Propor variáveis de brunimento, baseados nestes estudos, para superfície de contato da camisa do cilindro pré-estabelecida;
- Simular o comportamento da lubrificação de camisas de cilindro com texturas aleatórias sem e com sobreposição de um padrão de brunimento;
- Simular numericamente as interações do contato anel do pistão/camisa do cilindro;
- Identificar as pressões de contato.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico são apresentados os fundamentos teóricos, os quais embasam o desenvolvimento deste trabalho. Primeiro são apresentados os princípios os quais permitem o funcionamento do algoritmo para a solução da equação de Reynolds com modelo de cavitação com conservação de massa, seguido do modelo de lubrificação mista e do modelo de contato empregados nesta análise. Posteriormente, são elencados alguns avanços na texturização de superfícies em testes realizados em laboratório e, em seguida, também são pontuadas algumas possibilidades que surgiram com o desenvolvimento do emprego da computação para auxiliar na simulação de superfícies brunidas.

2.1 PRINCÍPIOS DO ALGORITMO DE CONSERVAÇÃO DE MASSA PARA SIMULAÇÃO DA LUBRIFICAÇÃO MISTA

O software utilizado para as simulações numéricas conduzidas no presente trabalho, baseia-se na solução geral da equação de Reynolds com modelo de cavitação p- θ de Elrod-Adams, que garante a conservação de massa do escoamento do lubrificante de acordo com as condições de contorno estabelecidas por Jakobsson-Floberg-Olsson (JFO). O esquema de discretização utilizado para a solução da equação de Reynolds foi o Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos MVFbE (PROFITO; GIACOPINI; ZACHARIADIS; DINI, 2015).

O modelo de cavitação p- θ de Elrod-Adams destaca-se por adicionar o campo escalar θ (função de saturação) como forma de garantir a conservação de massa do escoamento do lubrificante independente das condições de contato, o que não ocorre com o modelo de cavitação de Swift-Steiber (ou Reynolds) (ELROD; ADAMS, 1974). AUSAS; RAGOT; LEIVA; JAI *et al.* (2007), por meio de comparações entre os resultados para ambos os modelos de cavitação aplicados à superfície de mancais microtexturizados, mostraram que com o modelo de Reynolds ocorre uma falsa redução da área cavitada devido à determinação incorreta das regiões de reformação do filme lubrificante nos sulcos. Como as regiões cavitadas não são preenchidas completamente por lubrificante, o modelo de cavitação de Reynolds tende a superestimar os efeitos benéficos da texturização.

A discretização das equações de Reynolds pelo MVFbE tem sido empregada em diversos estudos recentes (ARDAH; PROFITO; DINI, 2023; KURDI; ALHAZMI; ALHAZMI; TABBAKH, 2020; ROSENKRANZ; COSTA; PROFITO; GACHOT *et al.*, 2019).

Basicamente, esse método de discretização combina a flexibilidade do Método dos Elementos Finitos (MEF) em lidar com malhas não-estruturadas, com a natureza conservativa, tanto local quanto global, dos fluxos através do domínio discretizado garantida pelo Método dos Volumes Finitos (MVF). O MVFbE utiliza os elementos da malha como auxiliares na construção dos volumes de controle para integrar as equações de transporte, constituindo uma malha computacional diferente da malha geométrica. Como mostrado na Figura 1, o volume de controle (CV) associado ao nó (P) é composto por várias subdivisões (SCV), obtidas por meio de uma divisão baricêntrica da malha geométrica, onde a partir do ponto médio (pI) de cada linha divisória (f) são efetivamente calculados os escoamentos de fluido. Desta forma, cada volume de controle associado a P pode ser considerado como a soma dos SCV 's dos elementos vizinhos ligados a este nó, e portanto, o escoamento em um pI específico pode ser calculado usando dados do elemento em que esteja localizado (PROFITO; GIACOPINI; ZACHARIADIS; DINI, 2015).

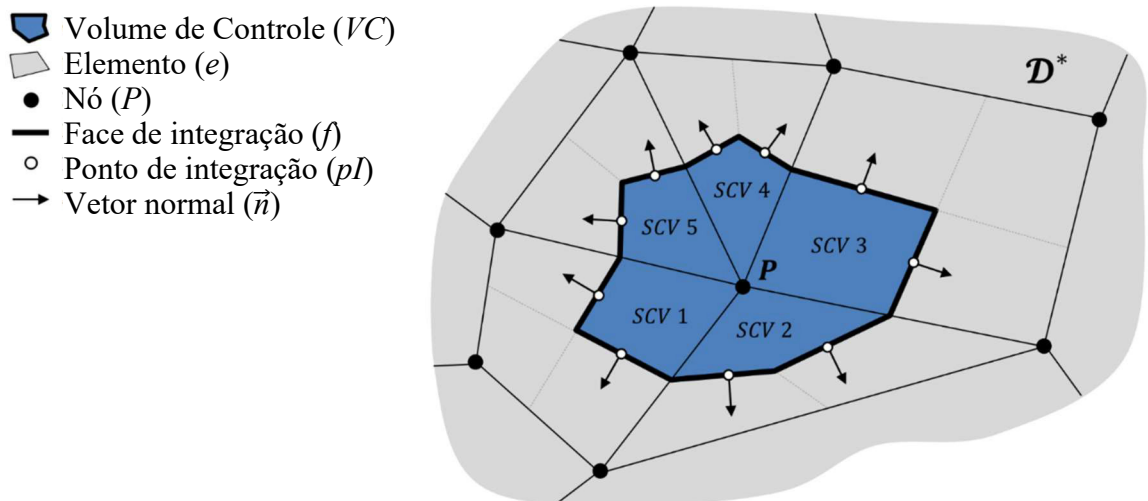


Figura 1 - Representação gráfica de um volume de controle do MVFbE. Fonte: Adaptada de Profito, Giacopini, Zachariadis e Dini (2015).

2.2 MODELOS DE LUBRIFICAÇÃO MISTA

Neste presente estudo, as análises consistem em simulações para contatos lubrificados entre as superfícies de anel do pistão e camisa do cilindro. Neste tipo de interação estão envolvidas várias características intrínsecas ao tribossistema, como por exemplo, o regime de lubrificação e o modelo de contato das asperidades.

2.2.1 Definição de Lubrificação Mista

A interface anel do pistão/camisa do cilindro para motores de combustão interna opera sob regime de lubrificação mista. ZHANG (2014) define a lubrificação mista como a ação simultânea de dois ou mais mecanismos de lubrificação, que pode possuir majoritariamente contato entre as asperezas, porém algumas porções destas permanecem separadas por um filme hidrodinâmico parcial.

O que determina quando o filme lubrificante começa a sofrer deterioração entre as interfaces do contato é a razão λ , a qual considera a razão entre a espessura mínima de lubrificante h_m e o desvio padrão das alturas de rugosidade Sq de ambas as superfícies de contato, que para a lubrificação mista encontra-se entre $1 < \lambda < 3$ (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). No caso deste trabalho, a superfície de referência para o cálculo destes parâmetros foi definida com relação à rugosidade do platô, por se tratar de uma superfície não-gaussiana, com sulcos e poros profundos. Por conta destas características, empregou-se a espessura de filme lubrificante adimensional ($\lambda = h_m / Sq$), sendo Sq o desvio padrão das alturas de rugosidade das regiões de platô (PROFITO; TOMANIK; ZACHARIADIS, 2016).

2.2.2 Contato entre superfícies rugosas

Na modelagem do contato determinístico entre asperidades deste estudo foi empregado um modelo elástico perfeitamente plástico simplificado, cujo comportamento no regime elástico é baseado nas equações de Hertz. A área de contato real (A_s) e a pressão de contato para cada aspereza (p_{asp}), apresentadas nas eq. (1a) e eq. (2a), respectivamente, são expressas como (PROFITO; TOMANIK; ZACHARIADIS, 2016):

$$A_s = \pi \beta_s w_s \quad (1a)$$

$$p_{asp} = \begin{cases} \frac{4E_s^*}{3\pi} \left(\frac{w_s}{\beta_s} \right)^{1/2}, & p_{asp_s} \leq H \\ H, & p_{asp_s} > H \end{cases} \quad (1b)$$

onde β_s é o raio de curvatura da aspereza, w_s a interferência do contato, E_s^* o módulo elástico combinado da aspereza e H é a dureza do material mais mole. A Figura 2 representa a interação de uma aspereza em contato.

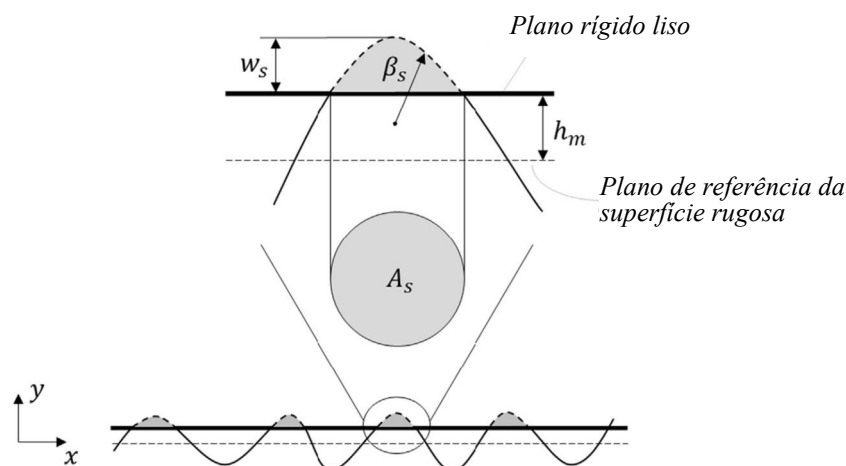


Figura 2 - Representação detalhada do contato de cada aspereza. Fonte: Adaptada de Profito, Tomanik e Zachariadis (2016).

2.3 SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS

A texturização de superfícies é uma técnica empregada para geração de uma topografia de superfície controlada. Essa nova superfície gerada pela texturização pode afetar diversas características funcionais, como o atrito e o desgaste em contatos deslizantes. No caso da presença de lubrificantes, como ocorre em superfícies texturizadas do contato entre as interfaces anel do pistão/camisa do cilindro de motores a combustão, a texturização pode afetar os mecanismos de lubrificação. Elas podem ser produzidas de diversas formas e com diferentes geometrias, as quais possam contribuir para as propriedades antidesgaste e antiatrito (ATULKAR; PANDEY; SUBBARAO, 2021).

VLĂDESCU; OLVER; PEGG e REDDYHOFF (2016) realizaram um estudo sobre o comportamento de atrito e desgaste para superfície texturizada a laser com pequenos sulcos retangulares (*pockets*) da interface pistão/camisa. Neste teste chegaram a valores de até 70% de redução do atrito para estas superfícies, se comparadas às que não haviam passado por texturização, além de reduzir o desgaste em até 69%. Porém neste mesmo estudo, chegaram à conclusão de que quando a largura do sulco é maior que a do contato, ocorre o aumento do atrito devido ao colapso do filme lubrificante. Esta análise corrobora a teoria de que, além de aumentar a espessura do filme hidrodinâmico, os sulcos agem como reservatórios, os quais fornecem suprimento adicional de lubrificante ao contato, devido à cavitação em seu interior.

Em relação às superfícies brunidas de camisas de cilindro, o ângulo entre os sulcos também influencia nestas propriedades. Em alguns testes de laboratório foi possível notar que os coeficientes de atrito para ângulos de cruzamento menores que 55° foram menores do que em comparação com ângulos maiores (GRABON; PAWLUS; WOS; KOSZELA *et al.*, 2016).

Recentemente, uma pesquisa realizada por BABY e RAJENDRAKUMAR (2022), investigaram o ângulo de brunimento ideal a fim de otimizar o comportamento tribológico da interface anel/camisa para um sistema automotivo em regime limítrofe de lubrificação. Os testes foram conduzidos em um tribômetro linear recíproco para amostra com ângulos de cruzamento de 20° à 100° em velocidades de 0,2 m/s e 0,3 m/s, realizados duas vezes cada amostra, resultando em um total de 28 experimentos. Durante os testes constataram que os menores valores de coeficiente de atrito foram obtidos para ângulo de cruzamento de sulcos de 40° e também a menor proporção de desgaste para ambas velocidades. Os autores concluíram que tal comportamento se deve ao fato de que ângulos intermediários possuem maior retenção de lubrificante e debris de desgaste em seus vales. Além disso, também causa o aumento da espessura do filme lubrificante, devido ao efeito de compressão na região do pms.

2.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE SUPERFÍCIES BRUNIDAS

A modelagem de superfícies de camisas de cilindro brunidas, para simulações numéricas do comportamento em trabalho de sua interação com o anel do pistão em contatos lubrificados de motores à combustão, surgiu como meio de minimizar custos e tempo de experimentos em relação aos testes realizados em laboratório com amostras submetidas a demorados ciclos de testes em tribômetros (PAWLUS; REIZER; WIECZOROWSKI, 2021).

SPENCER; ALMQVIST e LARSSON (2011) realizaram simulações para superfícies texturizadas artificiais de camisa de cilindro, baseadas em superfícies reais mensuradas por interferometria de luz branca. Os ângulos de cruzamento entre os sulcos de brunimento em análise variavam entre 25° e 75°. Neste estudo concluíram que quanto menor é o ângulo de cruzamento, maior é a espessura do filme lubrificante, não apresentando mudanças tribológicas significativas para a região da região central do percurso do pistão (*mid-stroke*), onde ocorre o regime de lubrificação hidrodinâmica. A Figura 3 apresenta o gráfico da média da espessura mínima de filme lubrificante calculada para cada um dos ângulos de cruzamento entre sulcos de brunimento, considerando somente pontos em que o estado da espessura de filme fosse estável. Observando o gráfico, é possível notar que a curva ajustada para valores médios da espessura mínima de filme aumenta de valor conforme o ângulo diminui, atingindo seu máximo para ângulos próximos de 35°. Também vale ressaltar que os pontos referentes aos ângulos de 45° e 50° estão significativamente fora desta média.

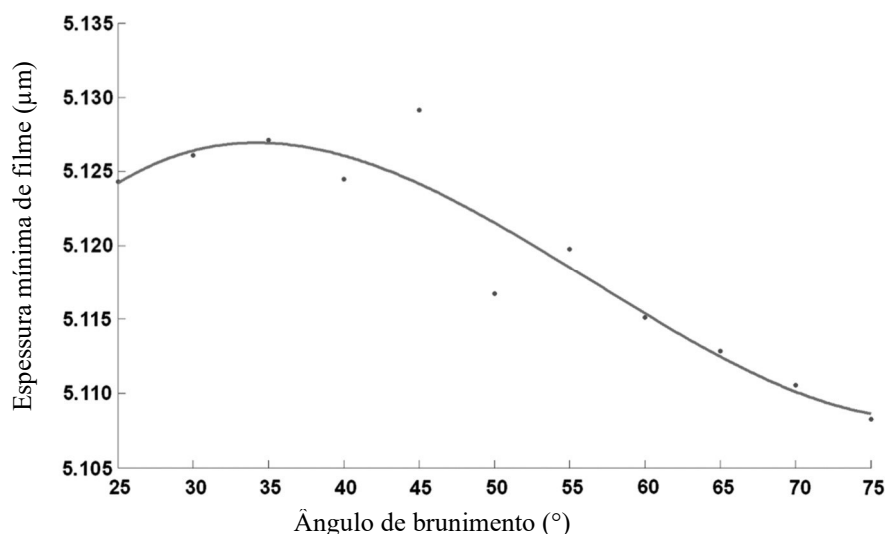


Figura 3 - Média da espessura mínima de filme lubrificante pelo ângulo de cruzamento dos sulcos de brunimento. Fonte: Adaptada de Spencer, Almqvist e Larsson (2011).

Posteriormente, MEZGHANI; DEMIRCI; ZAHOUANI e EL MANSORI (2012) realizaram simulações numéricas a fim de investigar qual a influência da textura em superfícies de camisas de cilindro para diversos ângulos de brunimento, mirando a redução do atrito e do consumo de óleo. Para estes objetivos propostos, os ângulos de melhores desempenhos estão entre 40° e 55°, para uma distribuição simétrica de sulcos contínuos (quando comparados com sulcos descontínuos), além de largura de sulco maior que 20 μm.

Um estudo mais recente, onde almejou-se parâmetros geométricos dos sulcos de brunimento cujo desempenho da interface tribológica anel/camisa fosse melhorado, concluiu que as forças de atrito no pms/pmi tiveram valores menores para valores de ângulo de cruzamento de 40°, profundidade de sulco de 3 μm, e densidade de sulcos de 1,5 mm⁻¹. Também afirmou que a densidade de sulcos possui maior significância no desempenho da lubrificação do tribossistema e a profundidade dos sulcos (d_p), o menor efeito (LI; LU; MA; XU *et al.*, 2019).

Como base nos dados apresentados pelas bibliografias discutidas neste capítulo, foi possível a elaboração de práticas metodológicas que ajudassem a alcançar os objetivos que este trabalho propõe. Dentre os dados abordados, os principais foram os que relacionavam o ângulo de cruzamento dos sulcos com o menor coeficiente de atrito e desgaste, o qual foi corroborado em diversos testes realizados pelos estudos e principalmente por simulações numéricas, principal ferramenta de análise utilizada neste trabalho, chegando a valores que variam de 40° à 55°.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente tópico apresenta a variedade de materiais empregados neste trabalho, como amostra e softwares, assim como detalha a metodologia utilizada para realização das simulações.

3.1 MATERIAIS

A seguir, estão presentes os materiais empregados na realização dos testes propostos nos objetivos deste trabalho.

3.1.1 Amostra

A amostra consiste de uma superfície da camisa de cilindro de motor dois tempos, neste trabalho denominada de superfície P3, fornecida pela empresa Stihl. Esta camisa de cilindro é de aço com revestimento interno de cromo duro com posterior processo de lapidação. A topografia da superfície foi medida por interferometria óptica pela empresa Stihl e o arquivo digital contendo as medições foi fornecido pra análise. O revestimento duro seguido de lapidação confere à superfície um padrão de textura caracterizado por planaltos ásperos e vales profundos. A amostra analisada está representada na Figura 4.

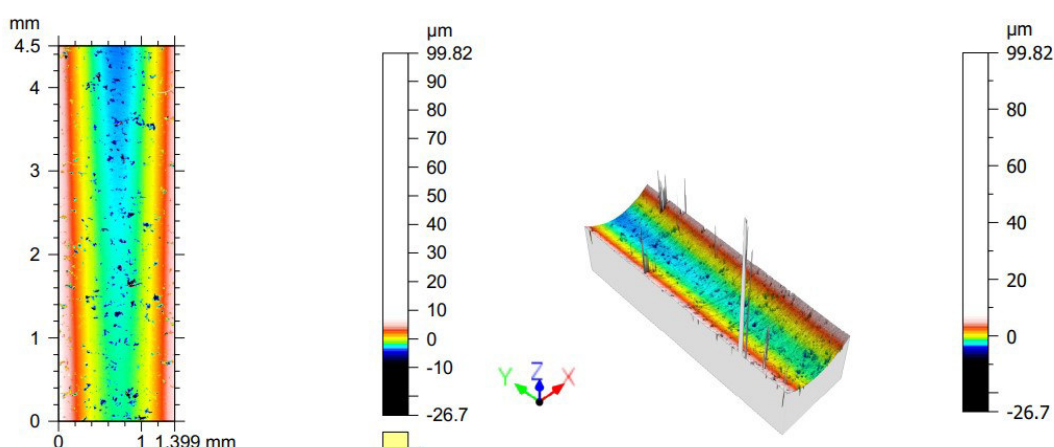


Figura 4 - Topografia superficial 3D por interferometria ótica da amostra P3. Fonte: Autor.

3.1.2 Programas utilizados

Para tratamento da superfície da amostra obtida, foi utilizado o programa MountainsMap[®] 8, da Digital Surf. O mesmo foi utilizado para pré-processamento das amostras e obtenção da superfície de rugosidade para posterior teste.

Um programa já citado anteriormente é o SURFAT, produzido pelo Prof. Francisco José Profito, cujo papel neste estudo foi produzir segmentos (*slices*) das superfícies em análise, para assim serem inseridas no SurfLUB. Este último programa, também desenvolvido pelo mesmo, é responsável por realizar as simulações e produzir dados referentes às pressões hidrodinâmicas do filme de lubrificante presente no tribossistema e sua espessura, assim como as pressões de contato entre as asperidades das superfícies.

3.2 METODOLOGIA

Inicialmente, a superfície interna da camisa do cilindro foi medida por interferometria óptica, obtendo-se a digitalização destas características em formato ASCII, processo realizado nas instalações da empresa Stihl. Esta amostra foi recebida e tratada no programa MountainsMap[®], para em seguida, ser inserida em um fluxo de trabalho que consiste em tratar a superfície para que se possa ser estudada somente suas características superficiais que irão influenciar no contato com o anel do pistão, eliminando qualquer distorção decorrente de formato da superfície, inclinação, ondulação e pontos não-mensurados. Para remoção de forma aplicou-se um filtro polinomial de grau 2, indicado para superfícies cilíndricas (PODULKA; DOBRZAŃSKI; PAWLUS; LENART, 2014). Quanto à filtragem da ondulação, aplicou-se um *cut-off* de 800 μm , por não afetar características relacionadas aos poros presentes na superfície da amostra (PAWLUS; REIZER; WIECZOROWSKI, 2021). Deste processo, resulta uma superfície plana, com padrão de asperidades e textura próximos ao da superfície real, possibilitando a análise do contato anel do pistão/camisa do cilindro.

Em seguida, esta superfície resultante recebeu um último tratamento, no programa SURFAT. Nesta etapa, a amostra é subdividida em diversas fatias no sentido perpendicular ao percurso do deslizamento do contato com o anel do pistão, possuindo cada uma delas, a espessura de 200 μm . Este processo também envolve a realocação da referência de altura dos picos de rugosidade, visto que por tratar-se de uma superfície de asperezas com alturas menores comparadas com a profundidade dos poros, este aspecto acaba por baixar esta linha referencial,

havendo distorções de alguns parâmetros importantes para a etapa subsequente. A técnica de realocação da linha de referência utilizada neste trabalho foi desenvolvida por SILVA (2022).

Após gerar os segmentos, eles foram alimentados no programa SurfLUB, onde também foram inseridos dados relacionados ao formato da superfície do anel do pistão, carga distribuída no contato e propriedades reológicas do óleo lubrificante. Primeiramente, a velocidade selecionada para as simulações foi de 3 m/s, de modo a emular os efeitos tribológicos mais críticos que ocorrem nas zonas de ponto morto superior/ponto morto inferior (pms/pmi). Este programa realiza a simulação da lubrificação do tribossistema anel do pistão/camisa do cilindro através de um modelo determinístico baseado na solução das equações de Reynolds para o contato deslizante entre estas duas superfícies (LIU; LI; TIAN, 2017).

De modo geral, o programa SurfLUB, para cada um dos segmentos, realiza a solução numérica do modelo de Elrod-Adams para cada ponto P da malha envolto pelo volume de controle definido pelo MVFbE, encontrando valores para pressão hidrodinâmica (p_{hydro}) e tensão de cisalhamento hidrodinâmico (τ_{hydro}). Para esses mesmos pontos da malha primária, também soluciona o modelo de contato de Hertz para encontrar valores de pressão das asperidades (p_{asp}) e tensão de cisalhamento das asperidades (τ_{asp}). Posteriormente, realiza-se a média das pressões de todos os pontos para cada segmento produzindo assumindo-se um valor de separação A entre as superfícies. Este procedimento é realizado para valores assumidos de A entre 0,05 e 5, de forma a varrer-se todos os regimes de lubrificação entre o limítrofe e o hidrodinâmico. Plota-se então um gráfico da pressão média em função da espessura de filme adimensional (A). Estes dados são agrupados e analisados com auxílio da ferramenta Correlation Factors Analysis (Scalar Results), que faz parte do SurfLUB, servindo justamente para pós-processamento dos resultados. Esta ferramenta seleciona os resultados das pressões referentes a cada segmento e reagrupa-os, gerando uma média global para o sistema. Esse procedimento é exemplificado na Figura 5, onde, para um mesmo segmento e razão A , são apresentados resultados de campo obtidas pela solução das equações de Reynolds e de Hertz para cada ponto da malha, como a pressão hidrodinâmica e pressão de contato, além da fração de filme hidrodinâmico e da topografia da superfície da amostra (PROFITO, 2015).

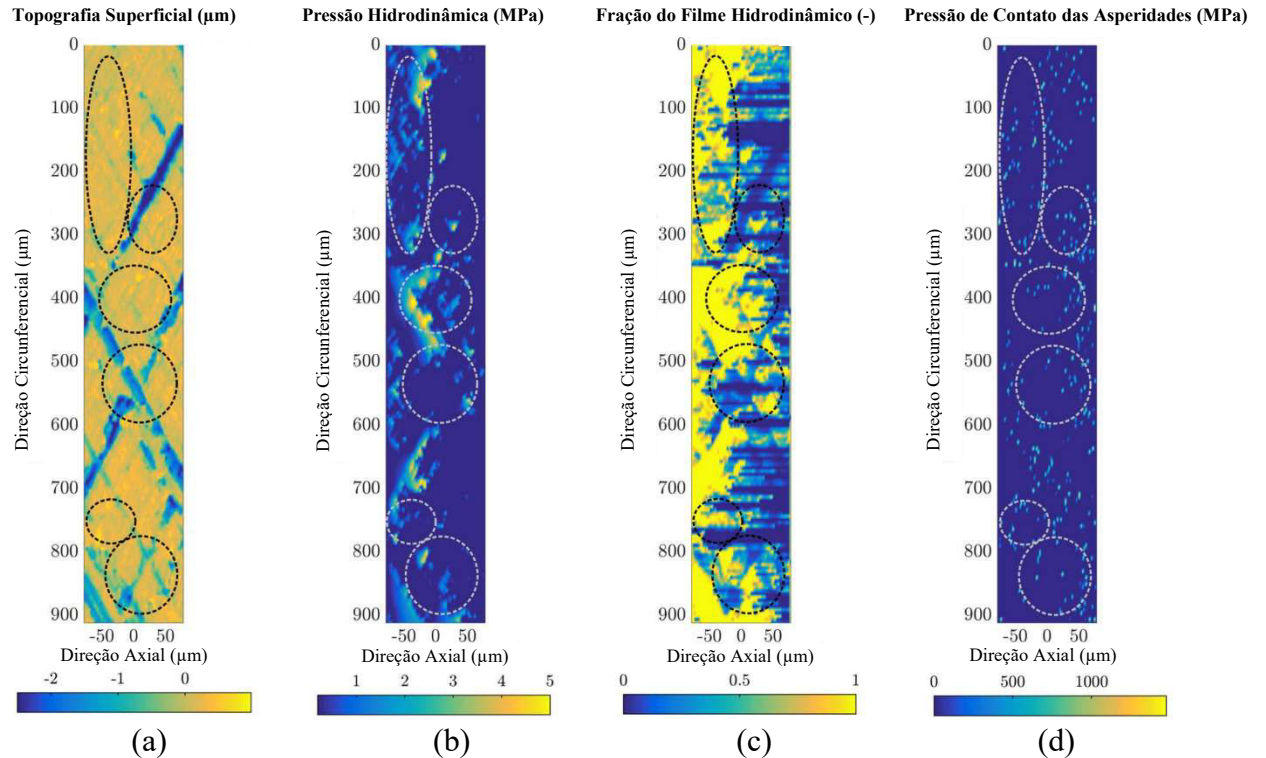


Figura 5 - Resultados de campo para mesmo segmento a uma razão $\lambda = 1,25$ de uma superfície de camisa de cilindro de motor a combustão interna apresentando (a) topografia de superfície, (b) pressão hidrodinâmica, (c) fração de filme hidrodinâmico e (d) pressão de contato das asperidades. Fonte: Adaptada de Profito (2015).

Para a seguinte etapa, foram avaliados parâmetros de brunimento, tais como ângulo de cruzamento α , profundidade do sulco d_p e densidade de sulcos d_e . Tais parâmetros foram escolhidos com base em recentes estudos sobre os efeitos deste tipo de processo de acabamento no tribossistema anel/camisa, tanto de testes laboratoriais (GRABON; PAWLUS; WOS; KOSZELA *et al.*, 2016) quanto de modelos numéricos que buscam a otimização deste tipo de processo (LI; LU; MA; XU *et al.*, 2019). Após a seleção destes parâmetros, estes foram sobrepostos nas superfícies das amostras através de um método de imposição de superfícies, gerando uma amostra do tipo *plateau honed* (REIZER; PAWLUS, 2012). Após a execução deste processo, as superfícies texturizadas artificialmente pelos sulcos de brunimento sobrepostos passaram pelas mesmas etapas descritas anteriormente para a superfície P3. A Figura 6a ilustra o fluxo metodológico utilizado para as simulações da superfície original e a Figura 6b ilustra a metodologia para simulação das superfícies brunidas digitalmente.

Posteriormente, em seguimento à seleção dos padrões geométricos dos sulcos da superfície numericamente brunida, houve simulações com segmentos de espessura de 1200 μm (a mesma da face do anel de compressão do pistão) com os mesmos padrões de brunimento resultantes de testes com 200 μm , de modo a comparar o efeito da espessura do anel nas simulações. Nestes casos, como forma de simular as condições do movimento do contato pistão/cilindro, foram adotados testes de baixa velocidade (3 m/s), e de altas velocidades, com

16,66 m/s (13500 rpm) e 11,71 m/s (9500 rpm), para pms/pmi e o centro do cilindro, respectivamente. A Figura 6c apresenta o procedimento metodológico utilizado nesta etapa do estudo

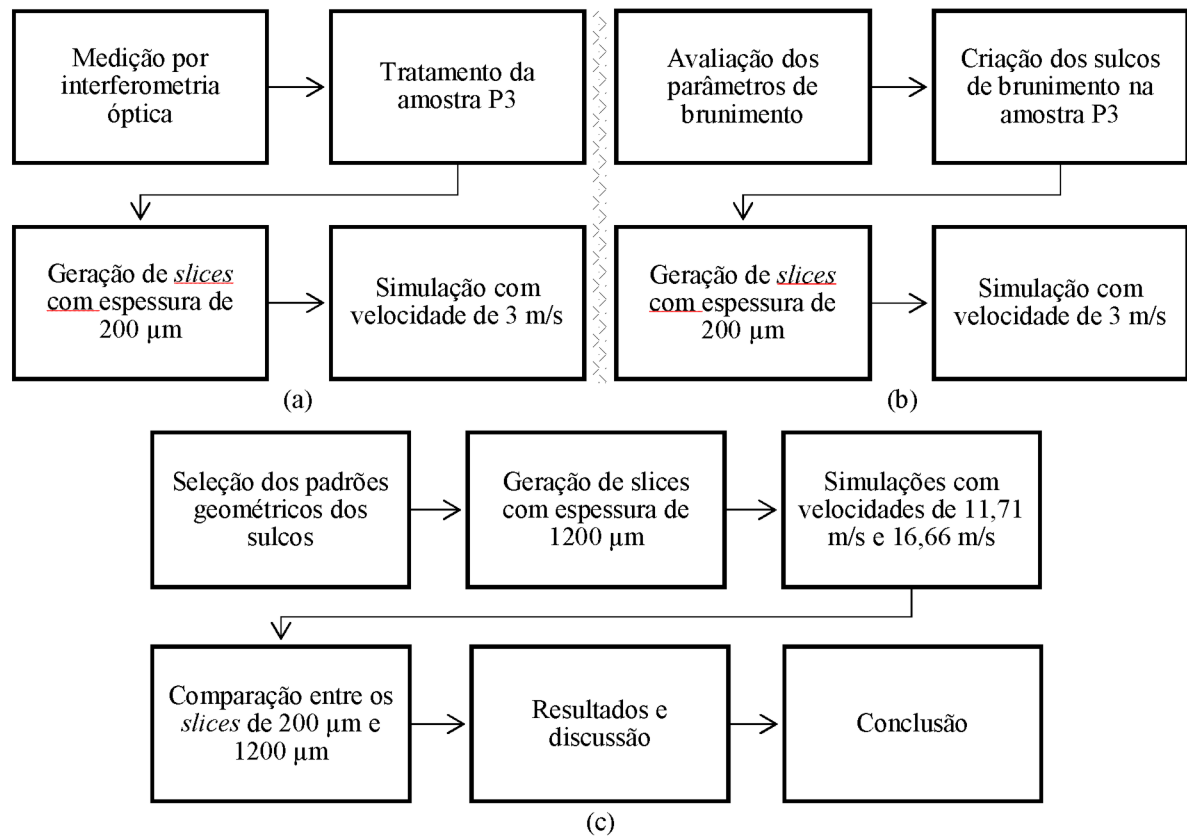


Figura 6 - Fluxo metodológico das simulações para (a) a superfície estocástica original, para (b) as superfícies brunidas digitalmente com segmentos de 200 µm para (c) as superfícies brunidas digitalmente com segmentos de 1200 µm. Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os seguintes subtópicos consistem na discussão dos resultados obtidos das diversas simulações numéricas desempenhadas com auxílio dos programas MountainsMap[®], SURFAT e SurfLUB, baseados no fluxo metodológico apresentado. Os resultados destas simulações visam auxiliar na adequação dos padrões para sulcos de brunimento de modo a satisfazer o comportamento em regime de lubrificação mista esperado para o tribossistema anel do pistão/camisa do cilindro.

4.1 ETAPA DE PROCESSAMENTO DA SUPERFÍCIE ORIGINAL

Na etapa de pré-processamento das superfícies medidas por interferometria ótica, foram removidas distorções, forma, ondulações, estratificando somente a superfície plana texturizada, na qual o contato ocorre, de fato com o auxílio do programa MountainsMap[®]. A Figura 7 ilustra a sequência de aplicações envolvidas no processo de estratificação da superfície de contato. Começando pela superfície P3 original (Figura 7a), a qual recebeu um filtro limiar para remoção de protuberâncias provavelmente provenientes da formação de óxidos pela exposição da amostra ao ar (Figura 7b). Em seguida, foi removida sua forma por um filtro de polinômio de grau 2 (PODULKA; DOBRZAŃSKI; PAWLUS; LENART, 2014), passando por um nivelamento superficial (Figura 7c). Seguiu-se pelo preenchimento de pontos não-mensurados (pnm) e novamente pelo filtro limiar, a fim de eliminar distorções de menores grandezas (Figura 7d). Por último, a amostra recebeu um filtro gaussiano robusto com *cut-off* de 800 μm para remoção de ondulações da superfície (PAWLUS; REIZER; WIECZOROWSKI, 2021) para, enfim, resultar em apenas nas asperezas que realizam o contato da interface anel/camisa (Figura 7e). Na Tabela 1 constam alguns parâmetros de rugosidade da superfície calculados após este fluxo de trabalho, como a aspereza média quadrática do platô (Spq), a assimetria (Ssk), a curtose (Sku) da curva de distribuição das alturas, e o volume de vazio no núcleo (V_{vc}) e nos vales (V_{vv}).

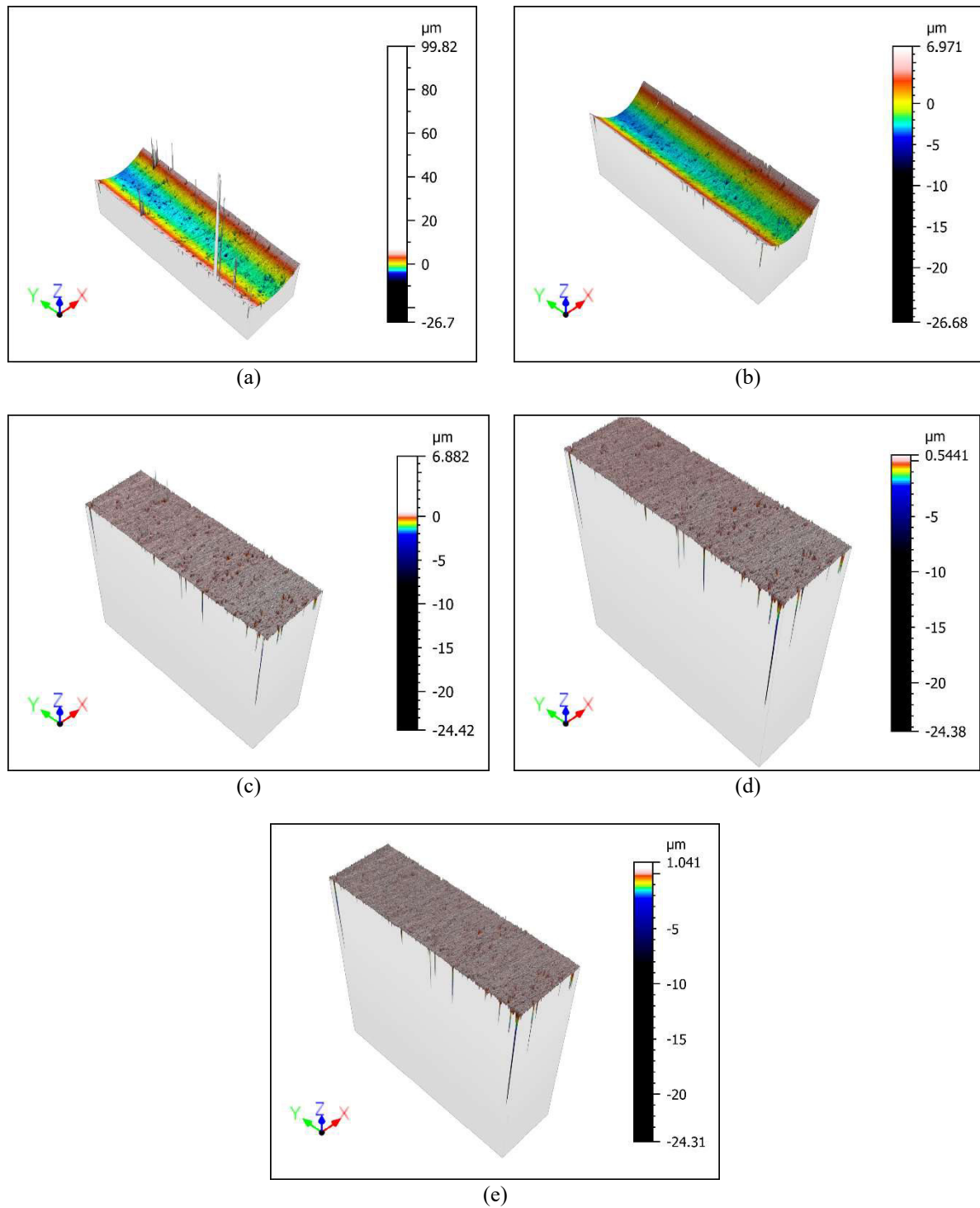


Figura 7 - Sequência de resultados da extratificação da superfície da contato da interface anel/camisã para amostra P3 (a), apresentando processos de (b) remoção de protuberâncias, (c) remoção da forma, (d) correções de pnm e distorções e (e) separação das asperezas das ondulações superficiais. Fonte: Autor.

Tabela 1 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 tratada no MountainsMap®.

Spq	Ssk	Sku	Vvc	Vvv
(μm)	(-)	(-)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)
0,08514	-6,624	60,34	0,0842	0,2510

Fonte: Autor.

Posteriormente, no programa SURFAT, esta superfície rugosa extraída da amostra bruta foi processada de forma a ser dividida em diversos segmentos (*slices*), cada um com espessura de 200 μm e malha de 376 x 251 nós fixados, totalizando 23 segmentos (Figura 8). Esta espessura foi selecionada como maneira de estabelecer segmentos com malha conforme e que gerassem valores com menores distorções e de maior confiabilidade, visto que estas dimensões de malha estão pré-estabelecidas para simulação no programa SurfLUB. Além do mais, nesta sequência de trabalho foi efetuado o deslocamento do plano de referência (*shift*) conforme proposto por (SILVA, 2022). A Figura 9a apresenta um perfil de rugosidade da superfície da amostra P3, onde a linha em azul indica o plano médio original acima do ponto e a linha em vermelho, o plano médio após receber o tratamento de *shift*. Este método baseia-se no modelo de mistura gaussiana, em que as asperezas da superfície são separadas em conjuntos de gaussianas (Figura 9b), identificando as asperezas de regiões do platô, vales e poros mais profundos, e através de distribuições estatísticas da mistura gaussiana (Figura 9c), efetua o deslocamento do plano de referência. Este processo auxilia na acurácia dos valores dos resultados obtidos nas simulações de lubrificação do programa SurfLUB.

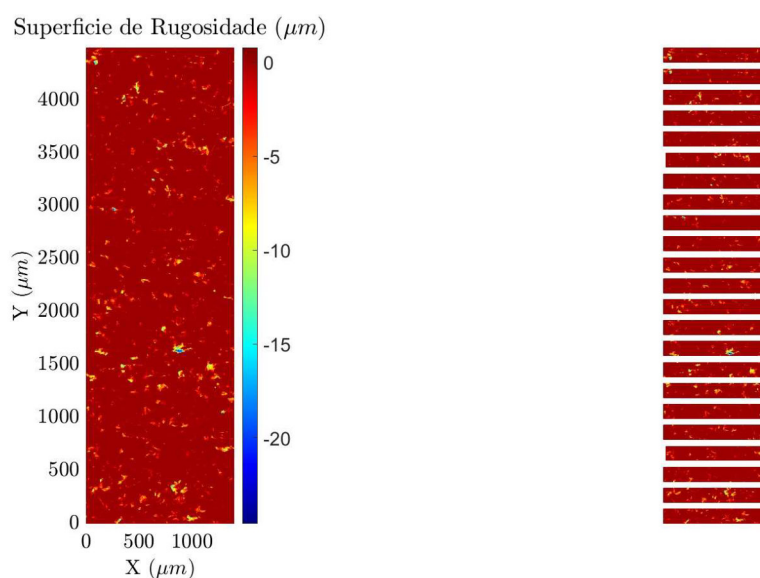
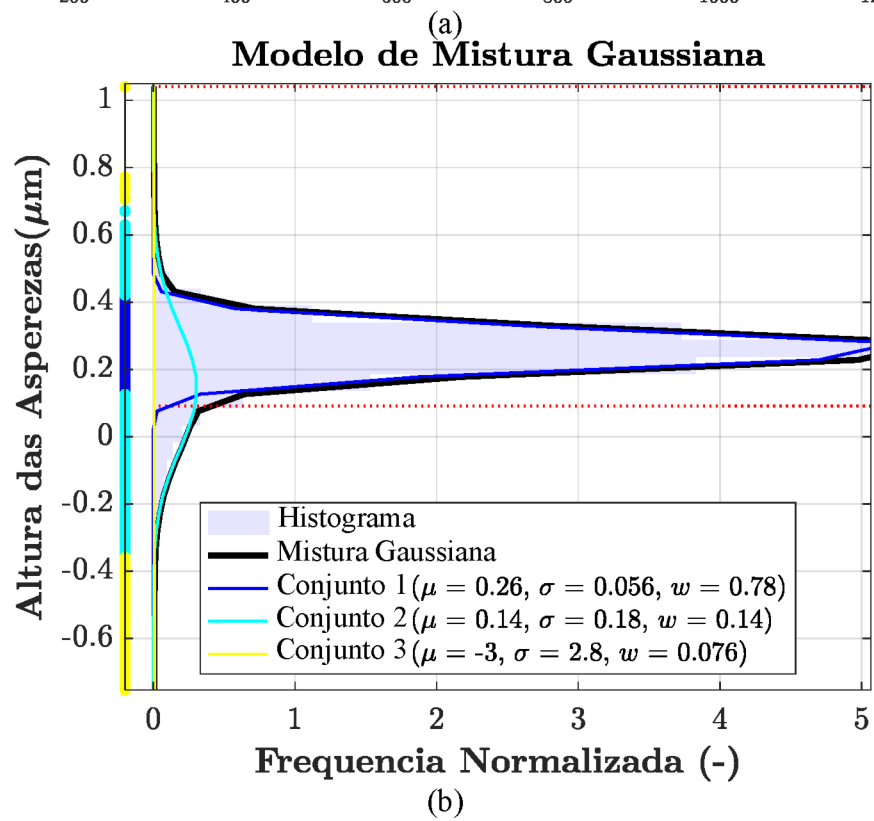
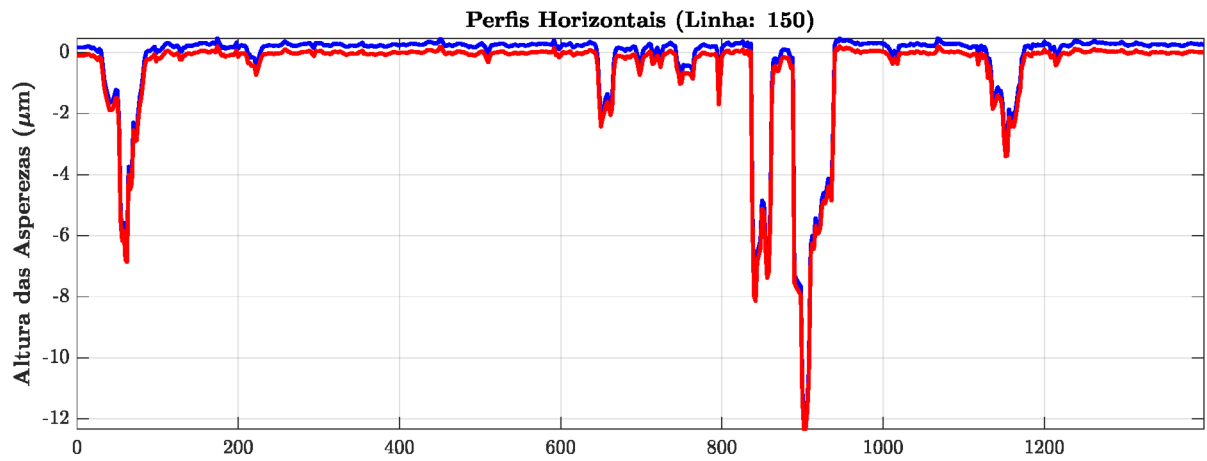


Figura 8 - Segmentos produzidos a partir superfície de rugosidade da amostra P3. Fonte: Autor.



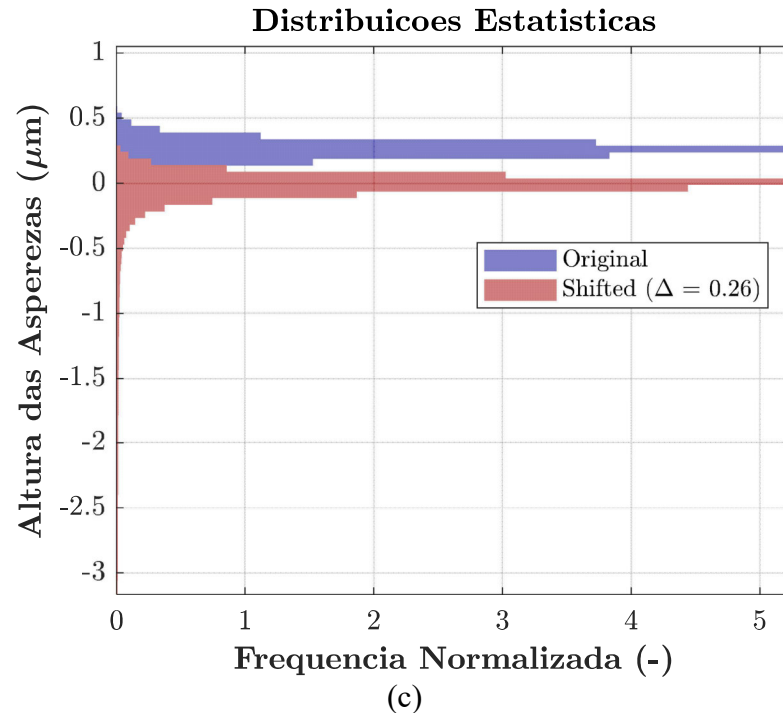


Figura 9 - Deslocamento da linha de referência do plano médio da amostra P3. Fonte: Autor.

4.2 ETAPA DE CRIAÇÃO DOS SULCOS DE BRUNIMENTO

Nesta etapa ocorre o processo de criação dos sulcos de brunimento e a comparação dos seus resultados de simulações para contato lubrificado. Portanto, estabelecendo uma geometria de sulco propícia para a formação de um filme de lubrificante mais espesso com auxílio da cavitação de lubrificante no interior destes sulcos para, assim, haver a diminuição do atrito.

4.2.1 Superfícies com diferentes ângulos e densidades de sulcos

Os primeiros testes realizados para a superfície P3 foram para diferentes ângulos entre os sulcos, assim como para diferentes densidades destes. Foram selecionados ângulos de 30°, 40°, 50° e 60°, para as densidades de sulcos de 0,1, 0,3 e 0,6.

4.2.1.1 Obtenção digital dos sulcos de brunimento

Para obtenção dos sulcos de brunimento foram fixados os valores de largura w e profundidade d_p dos sulcos, obedecendo uma razão ($\varepsilon = d_p / w$) de aproximadamente 0,07, uma vez que trabalhos da literatura mostram atrito mínimo para texturas com valores próximos dessa razão em contatos lubrificados (RONEN; ETSION; KLIGERMAN, 2001). Considerando esta razão, chegou-se aos valores de $w = 32 \mu\text{m}$ e $d_p = 2,24 \mu\text{m}$.

As presentes figuras Figura 11 a Figura 14 apresentam a mudança do aspecto superficial causado pelos sulcos de brunimento inseridos digitalmente para os ângulos de 30° , 40° , 50° e 60° , respectivamente, para as densidades de 0,1, 0,3 e 0,6. É notável nestas imagens a diferença brusca existente na quantidade de sulcos de brunimento para as densidades selecionadas, mesmo para diferentes ângulos. A grosso modo, pode-se julgar que para superfícies com densidade de sulcos maiores do que as apresentadas forneceria pouquíssima capacidade de apoio à face do anel, assim como não contribuiriam para a sustentação do filme de lubrificante. Em caso contrário, densidades menores não alterariam significativamente as propriedades da superfície P3 original de modo a melhorar a lubrificação do par anel/camisa. Em seguida, na Figura 10 são apresentadas as curvas de Abbott-Firestone para a amostra de $\alpha = 30^\circ$ e d_e igual a 0,1 (Figura 10a), 0,3 (Figura 10b) e 0,6 (Figura 10c), que mostram o efeito de diminuição de área de apoio na região do platô causado pelo aumento no número de sulcos inseridos na superfície, padrão este que repete para os outros ângulos gerados. Também são apresentadas nas tabelas Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 alguns parâmetros de rugosidade para as amostras digitalmente modificadas, como Spq , Ssk , Sku , Vvc e Vvv .

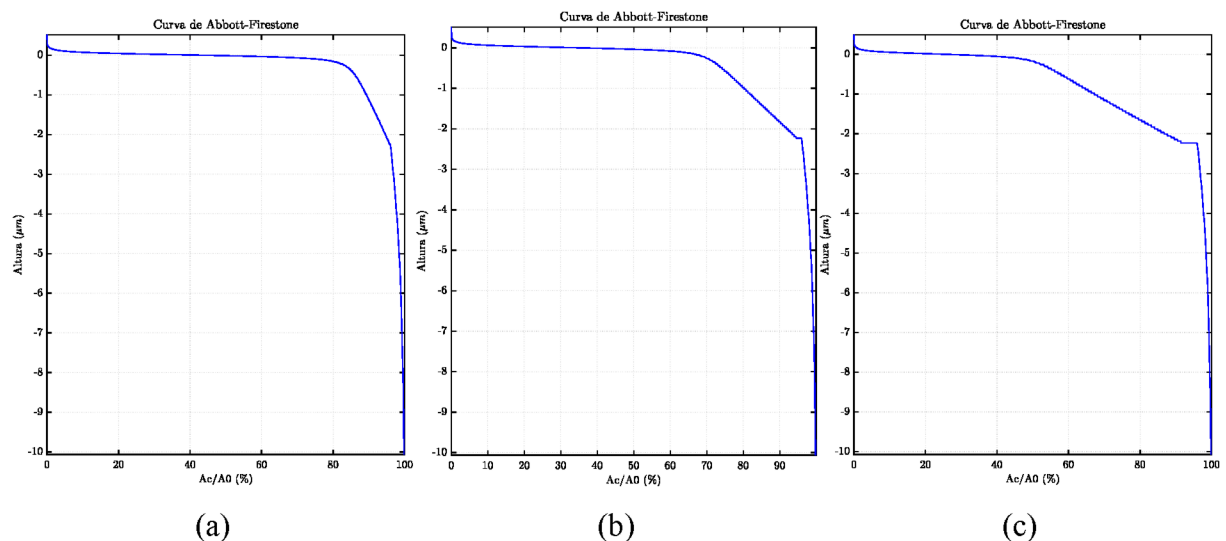


Figura 10 - Curvas de Abbott-Firestone para amostras P3 com sulcos de $\alpha = 30^\circ$ para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e d_e igual a (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.

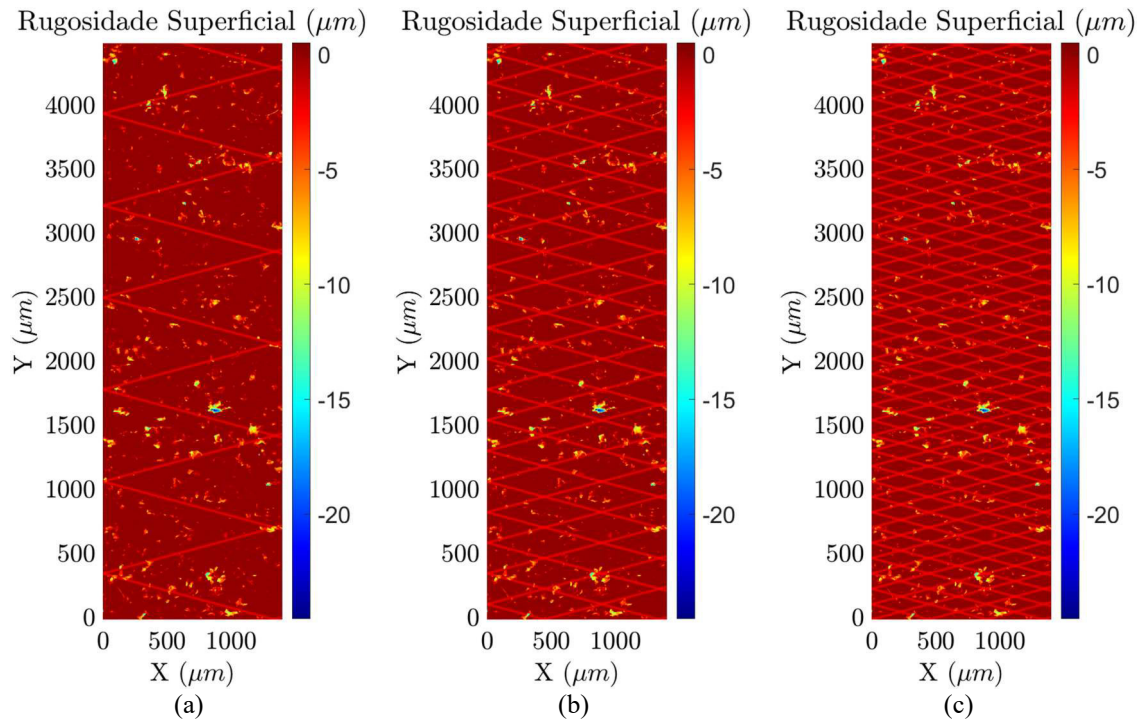


Figura 11 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 30° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.

Tabela 2 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 30° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.

d_e	Spq	Ssk	Sku	Vvc	Vvv
(-)	(μm)	(-)	(-)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)
0,1	0,0972	-5,873	51,30	0,1041	0,3204
0,3	0,1161	-4,831	39,99	0,3262	0,2721
0,6	0,1381	-3,931	31,87	0,6502	0,1959

Fonte: Autor.

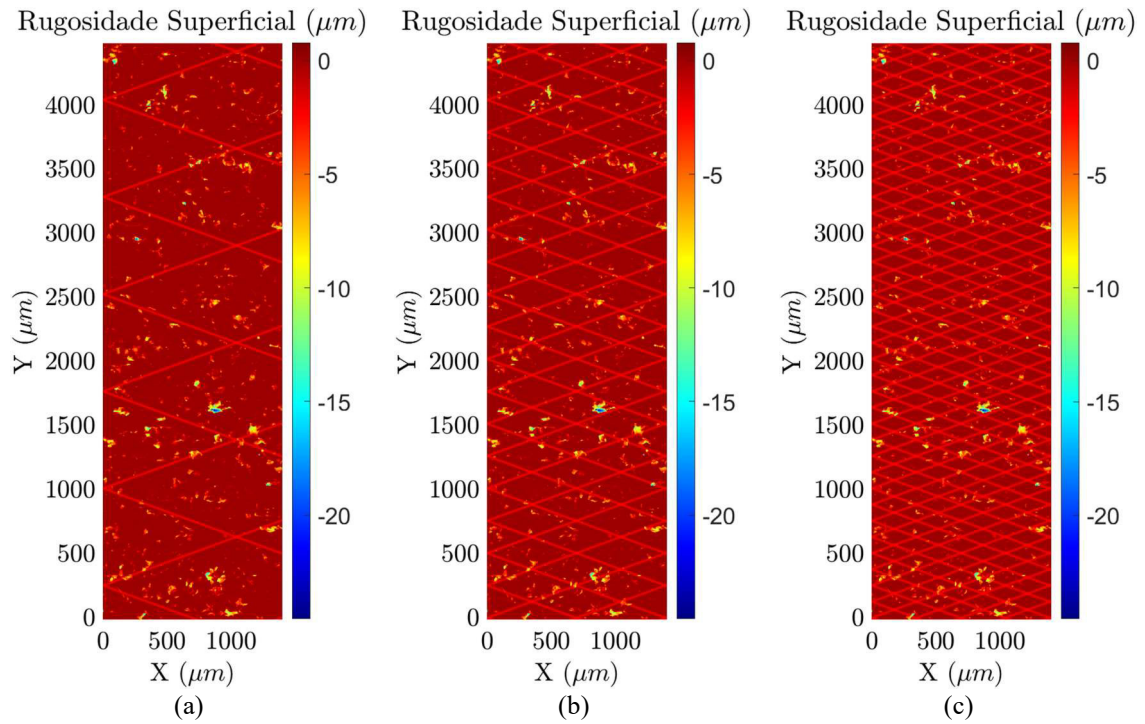


Figura 12 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 40° para $w = 32 \mu m$, $d_p = 2,24 \mu m$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.

Tabela 3 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 40° para $w = 32 \mu m$, $d_p = 2,24 \mu m$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.

d_e	Spq	Ssk	Sku	Vvc	Vvv
(-)	(μm)	(-)	(-)	($\mu m^3/\mu m^2$)	($\mu m^3/\mu m^2$)
0,1	0,09658	-5,909	51,72	0,1023	0,3175
0,3	0,1141	-4,903	40,74	0,3094	0,2755
0,6	0,1363	-4,011	32,53	0,6203	0,2000

Fonte: Autor.

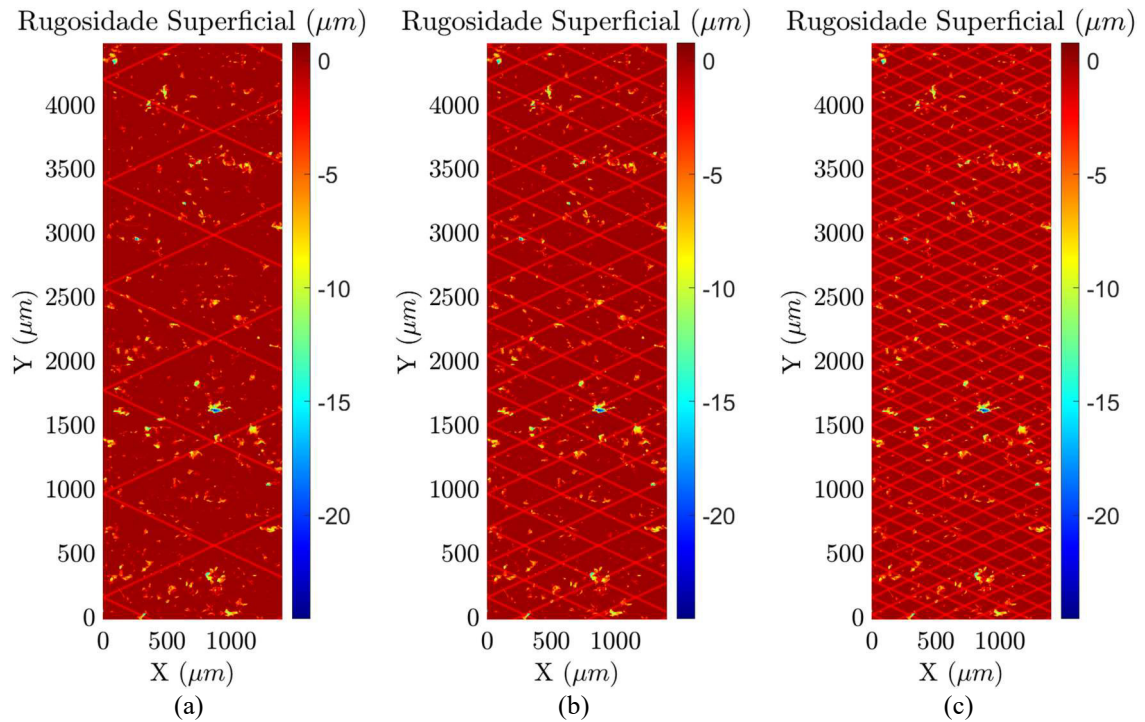


Figura 13 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 50° para $w = 32 \mu m$, $d_p = 2,24 \mu m$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.

Tabela 4 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 50° para $w = 32 \mu m$, $d_p = 2,24 \mu m$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.

d_e	Spq	Ssk	Sku	Vvc	Vvv
(-)	(μm)	(-)	(-)	($\mu m^3/\mu m^2$)	($\mu m^3/\mu m^2$)
0,1	0,09605	-5,952	52,22	0,1002	0,3139
0,3	0,1124	-4,985	41,58	0,2839	0,2855
0,6	0,1333	-4,101	33,28	0,5871	0,2041

Fonte: Autor.

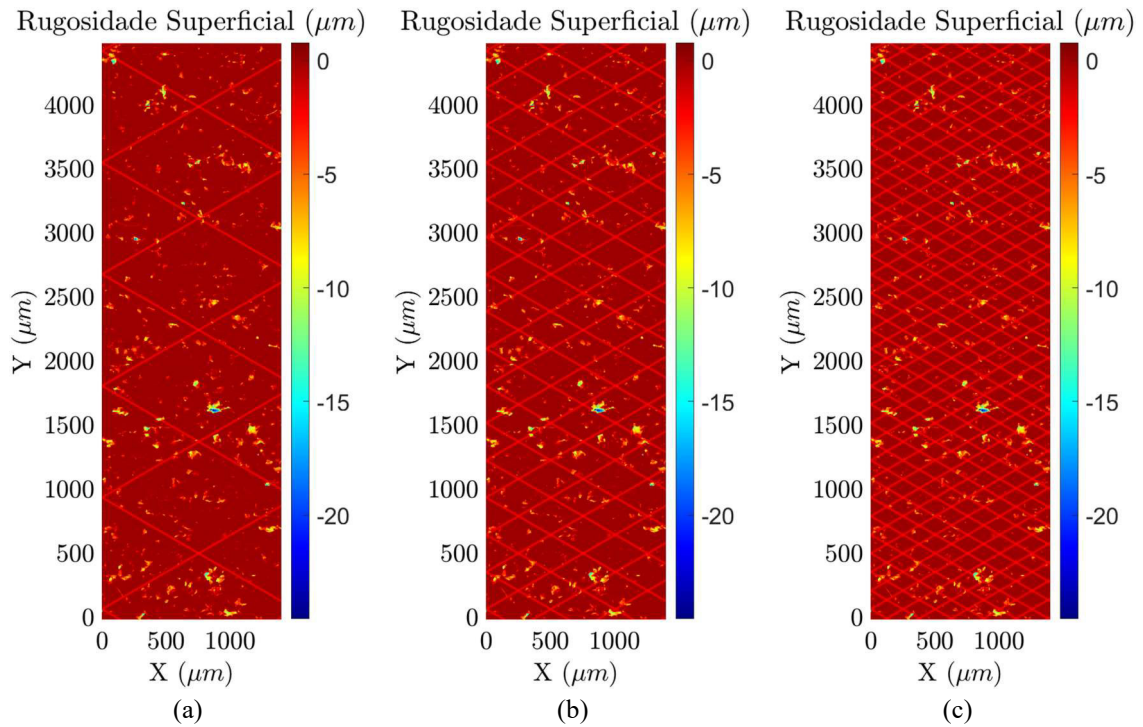


Figura 14 - Rugosidade superficial da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 60° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de (a) 0,1, (b) 0,3 e (c) 0,6. Fonte: Autor.

Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 com ângulo de sulcos de brunimento de 60° para $w = 32 \mu\text{m}$, $d_p = 2,24 \mu\text{m}$ e densidades de 0,1, 0,3 e 0,6.

d_e	Spq	Ssk	Sku	V_{vc}	V_{vv}
(-)	(μm)	(-)	(-)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)
0,1	0,09565	-5,988	52,65	0,09916	0,3108
0,3	0,1110	-5,071	42,47	0,2570	0,2958
0,6	0,1304	-4,196	34,06	0,5431	0,2163

Fonte: Autor.

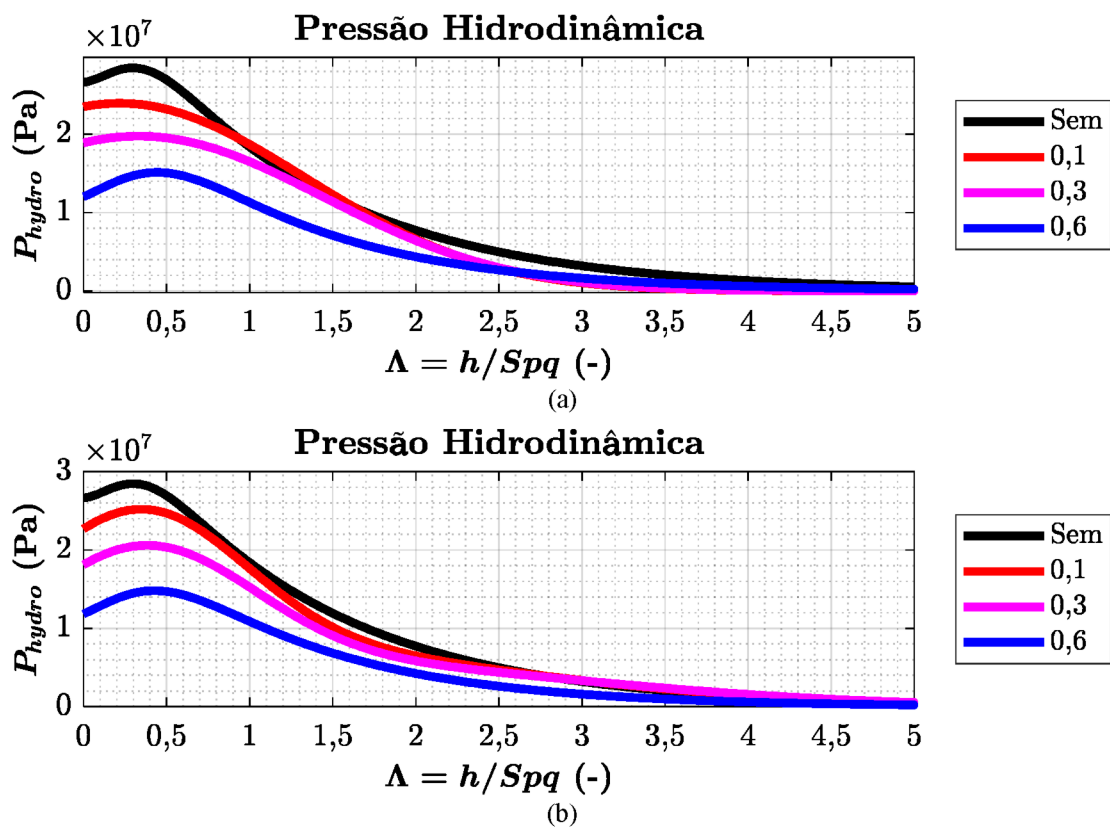
Observando as tabelas Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5, nota-se um leve aumento do Spq , Ssk , associados à elevação do valor d_e , este efeito é causado por causa da presença gradativamente maior de sulcos na amostra, visto que eles diminuem sua área de apoio e aumentam a presença de vales na superfície. Esse efeito também leva ao aumento de V_{vc} e V_{vv} , além de diminuir o Sku , indicando uma modificação na distribuição das asperezas.

4.2.1.2 Resultados das simulações do SurfLUB para diferentes ângulos entre sulcos e densidades de sulcos

A Figura 15 mostra os resultados das simulações de pressão hidrodinâmica, com a pressão média em toda a superfície (P_{hydro}) no eixo das ordenadas e o parâmetro lambda no eixo

das abscissas. A escolha de Λ no eixo das abscissas é justamente por conta do estudo dos efeitos dos sulcos de brunimento sobre o regime de lubrificação misto, sendo essa a forma mais indicada para obter-se maior clareza dos resultados de pressões hidrodinâmicas quanto ao intervalo em que ocorre este regime, $1 < \Lambda < 3$. Nestes gráficos, agrupados de acordo com o ângulo de sulco das amostras, constam os valores médios da pressão hidrodinâmica para as superfícies digitalmente brunidas representadas pelas curvas nas cores vermelho, rosa e azul (0,1, 0,3 e 0,6, respectivamente), todas sobrepostas na curva dos resultados médios da superfície original, na cor preta, sob as mesmas condições.

Em uma primeira análise, é possível notar que para todos os ângulos testados, o pior desempenho da pressão hidrodinâmica encontra-se nos casos em que a densidade é igual a 0,6, resultando em valores muito semelhantes em todos os casos. Isto provavelmente deve-se à elevada quantidade de sulcos, a qual não permite a sustentação de um filme hidrodinâmico consistente e uma adequada capacidade de apoio à face do anel do pistão, como já citado (LI; LU; MA; XU *et al.*, 2019).



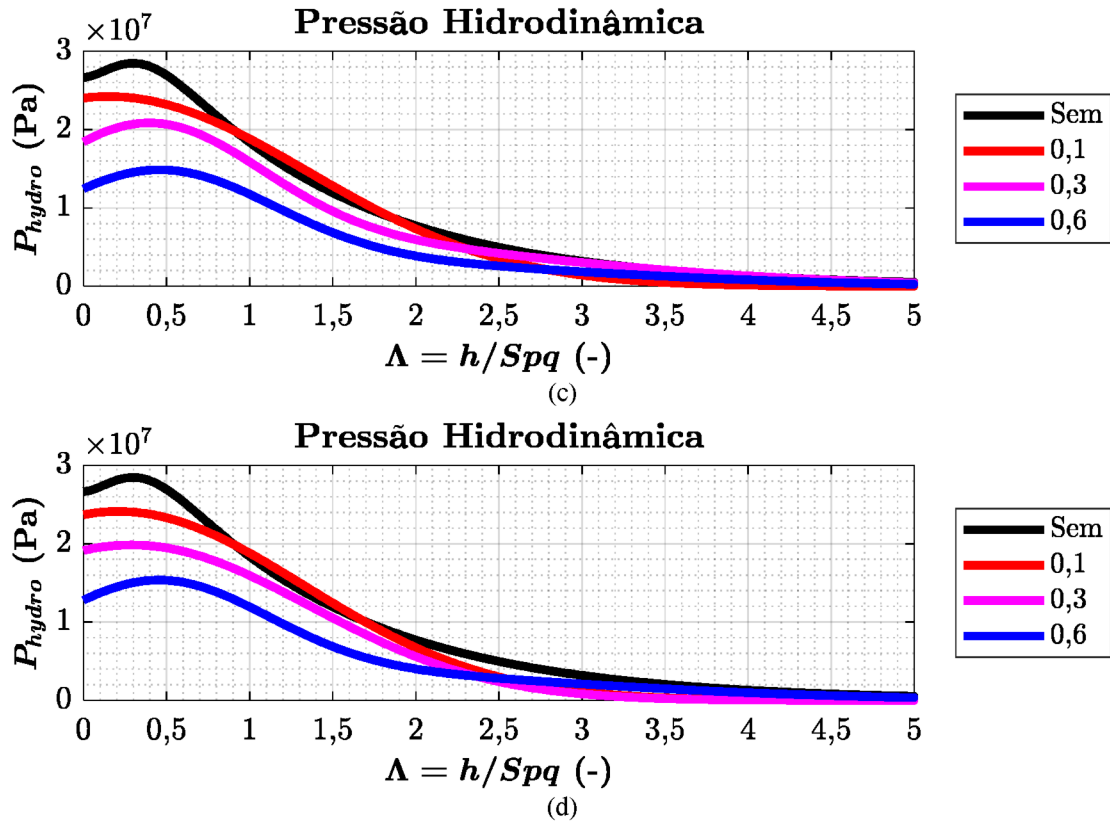


Figura 15 - Pressão hidrodinâmica média da amostra P3 para diferentes densidades de sulcos para os ângulos de: (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°. Fonte: Autor.

Considerando o regime de lubrificação misto ($1 < \Lambda < 3$), almejado neste trabalho, as superfícies com densidades de 0,1 e 0,3 obtiveram valores médios mais elevados nesta região, mesmo que as diferenças entre os resultados para cada ângulo de sulco possam poucas diferenças. Salvos os casos em que o ângulo é de 50° com densidade de 0,1 (Figura 15c), onde a curva assume valores de P_{hydro} inferiores aos de 0,6 para $\Lambda > 2,5$, e de 30° (Figura 15a) e 60° (Figura 15d) em que os valores da curva de densidade 0,1 sofrem uma queda acentuada, se equiparando aos valores de 0,6 em $\Lambda = 2,5$. Apesar de terem resultados melhores, ainda são inferiores comparadas às médias da superfície original sem sulcos.

Porém, avaliando estes resultados, pode-se assumir que os melhores comportamentos em regime misto foram das superfícies com sulcos inclinados em 40° e 60° para densidades entre 0,1 e 0,3. Isto se deve à sua melhor capacidade de sustentação do filme de lubrificante, suportando maiores cargas de pressão hidrodinâmica nesta faixa do parâmetro Λ . Entretanto, um fator determinante ocorre quando se analisa a tensão de cisalhamento hidrodinâmica média na região de regime misto de lubrificação (Figura 16), onde nota-se que para as densidades de sulco entre 0,1 e 0,3 a 40° seus resultados médios atingem valores aproximados aos da amostra sem sulcos (Figura 16b). Já para os sulcos de 60°, esta aproximação não acontece para $d_e = 0,3$ (Figura 16d). Neste caso há uma elevação desse valor e, portanto, do coeficiente de atrito.

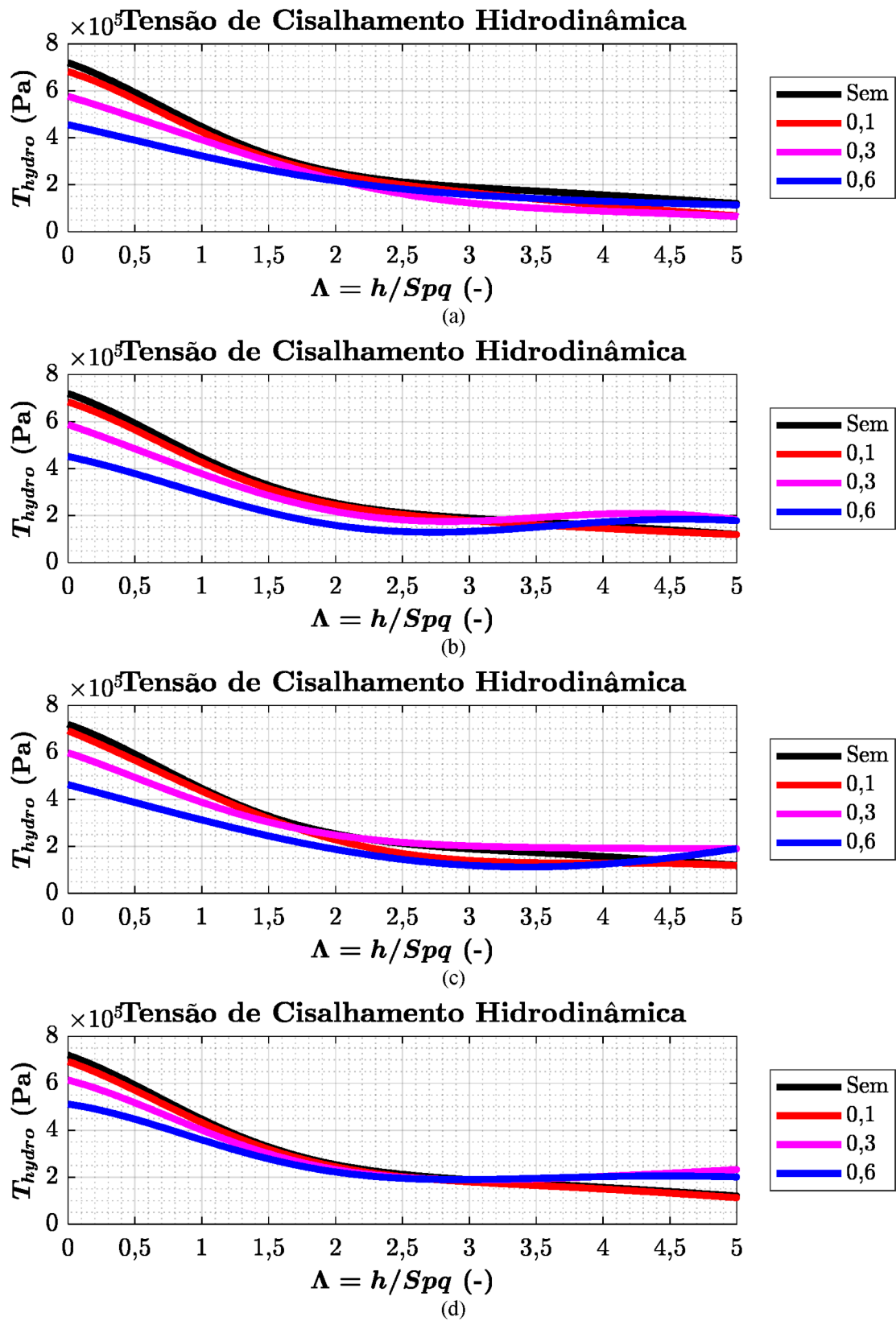


Figura 16 - Tensão de cisalhamento hidrodinâmica média da amostra P3 para diferentes densidades de sulcos para os ângulos de: (a) 30°, (b) 40°, (c) 50° e (d) 60°. Fonte: Autor.

Logo, a superfície com melhor desempenho tribológico em regime de lubrificação misto pode ser considerada a superfície com ângulo de cruzamento dos sulcos $\alpha = 40^\circ$, densidade de sulcos $0,1 < d_e < 0,3$. Para os próximos testes buscou-se reduzir a largura (w) dos sulcos para novas profundidades (d_p).

4.2.2 Superfícies com ângulo, densidade e largura de sulcos de brunimento definidos e com diferentes profundidades

Para a segunda etapa de testes realizados na superfície P3, foram observados os resultados da etapa anterior e, portanto, empregaram-se diferentes profundidades de sulcos (0,75 μm , 1,5 μm e 3 μm) para as características anteriormente selecionadas $\alpha = 40^\circ$, $d_e = 0,15$ e $w = 15 \mu\text{m}$. Em seguida, foram avaliados seus resultados médios para simulação de lubrificação.

4.2.2.1 Obtenção das novas profundidades de sulcos

Com base nos resultados dos testes anteriores, em que se obtiveram comportamentos ligeiramente melhores para densidades de sulcos menores e ângulo de 40° , buscou-se a alteração da geometria do perfil destes sulcos, como a largura e a profundidade. Para as novas medidas de largura, almejou-se valores menores que as anteriores, de aproximadamente a metade do tamanho prévio (32 μm), selecionando-se a largura de $w = 15 \mu\text{m}$, como tentativa de oferecer maior suporte ao filme de lubrificante, elevando os valores de P_{hydro} e melhorar a espessura do filme de óleo em regime misto. Quanto à profundidade dos sulcos, escolheu-se baseado no valor ótimo de $\varepsilon = 0,1$ atribuído por RONEN; ETSION e KLIGERMAN (2001), resultando em $d_p = 1,5 \mu\text{m}$. Além deste, também foram selecionados outros dois valores, com a metade e o dobro da magnitude, sendo eles $d_p = 0,75 \mu\text{m}$ ($\varepsilon = 0,05$) e $d_p = 3 \mu\text{m}$ ($\varepsilon = 0,2$), respectivamente. Tais valores foram atribuídos como forma de averiguar a influência desta característica geométrica em contato com este tipo de superfície estocástica.

A Figura 17 apresenta os perfis de rugosidade das superfícies digitalmente brunidas, a qual possibilita a observação dos sulcos de brunimento para as profundidades de 0,75 μm (Figura 17a), 1,5 μm (Figura 17b) e 3 μm (Figura 17c), além de apresentar o aspecto superficial da amostra P3 após sua texturização digital (Figura 17d), que neste caso está no sentido horizontal de deslocamento da interface do anel.

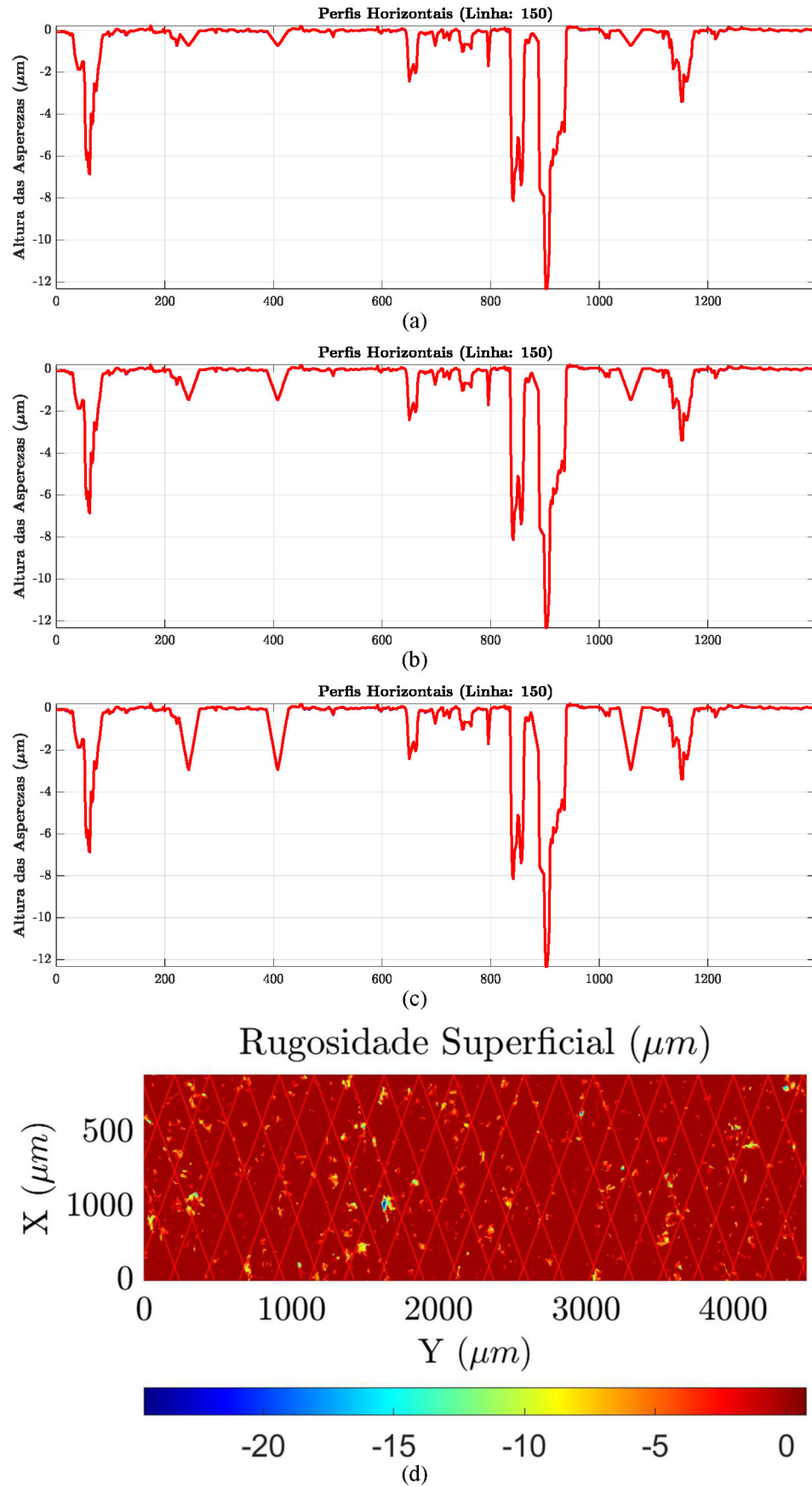


Figura 17 - Perfis de rugosidade da superfície P3 digitalmente texturizada para profundidades de sulco com (a) $d_p = 0,75 \mu\text{m}$, (b) $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ e (c) $d_p = 3 \mu\text{m}$, além da (d) superfície resultante da amostra pós-tratamento.
Fonte: Autor.

Tabela 6 - Parâmetros de rugosidade da amostra P3 digitalmente texturizada para profundidades de sulco d_p com 0,75 μm , 1,5 μm e 3 μm .

d_p (μm)	Spq (μm)	Ssk (-)	Sku (-)	Vvc ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)	Vvv ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$)
0,75	0,09784	-6,533	59,57	0,1112	0,2612
1,50	0,09953	-6,159	55,19	0,1200	0,2965
3,00	0,1014	-4,999	40,34	0,1273	0,3796

Fonte: Autor.

4.2.2.2 Resultados das simulações do SurfLUB para diferentes profundidades de sulcos de brunimento

Os resultados prévios para pressão e tensão de cisalhamento hidrodinâmicas das amostras estão presentes nas figuras Figura 18a e Figura 18b, respectivamente. Nestas figuras, os valores médios destas grandezas pela razão de separação das superfícies (Λ) para cada uma das amostras com distintas profundidades de sulcos de brunimento d_p são distinguidas através de diferentes cores, tais como vermelho (0,75 μm), rosa (1,5 μm) e verde (3 μm), sendo preto destinada à amostra original.

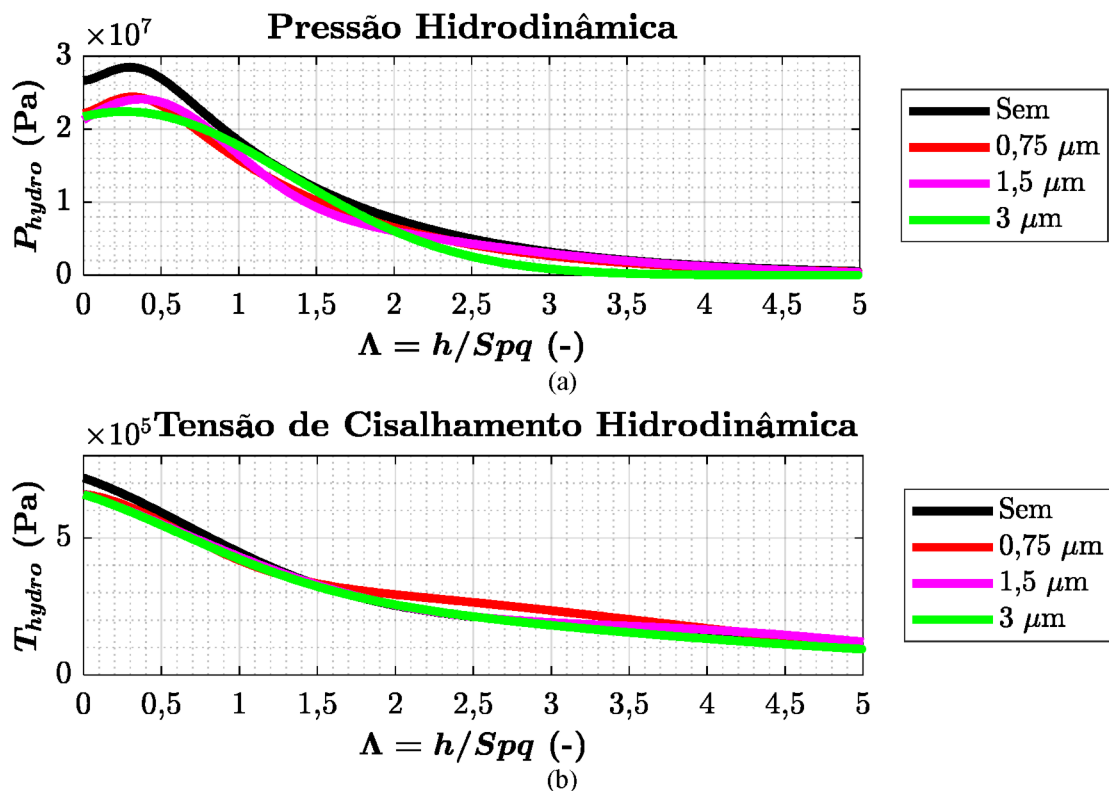


Figura 18 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 com sulco com ângulo de cruzamento $\alpha = 40^\circ$ e profundidades de sulcos d_e de 0,75 μm , 1,5 μm e 3 μm . Fonte: Autor.

Como é possível observar em ambos os gráficos, a mudança de profundidade dos sulcos não causou mudança o suficiente para haver melhorias consideráveis das propriedades de lubrificação da superfície, em comparação com a amostra original. Analisando de um modo mais atento entre as superfícies com sulcos inseridos digitalmente, houve uma leve melhoria em ambos os resultados para os testes realizados com a amostra com sulcos de brunimento com profundidade de 3 μm . Porém, mesmo deste modo, nada muito significativo em comparação com as amostras de $d_p = 0,75 \mu\text{m}$ e $d_p = 1,5 \mu\text{m}$.

4.3 SIMULAÇÕES COM ESPESSURA MAIOR DOS SEGMENTOS E VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE SIMULAÇÃO

Dentre os anéis acoplados no pistão do motor dois tempos, existem diferentes espessuras da face do anel que forma o tribossistema pistão/cilindro. Neste último passo, após seleção da geometria de sulco com $d_p = 1,5 \mu\text{m}$, foram realizadas simulações para espessura de segmento de 1200 μm , correspondente à do anel de compressão. No subtópico a seguir, comparações são realizadas entre os resultados obtidos para as novas espessuras, com os resultados obtidos anteriormente para a espessura de 200 μm , dimensão estabelecida de forma a conservar o estado da malha e diminuir distorções no resultado final, além de permitir a realização dos testes com maior número amostral para a média global dos valores resultantes da simulação.

Posteriormente, para estes mesmos segmentos de 1200 μm , variou-se a velocidade de trabalho das simulações, de 3 m/s, para 11,71 m/s e 16,66 m/s, sendo estes novos valores, os mesmos das velocidades médias de trabalho do cilindro do motor dois tempos para baixa (9500 rpm) e alta (13500 rpm) rotação, respectivamente.

4.3.1 Simulações para segmentos com 1200 μm de espessura a 3 m/s de velocidade

Primeiramente, para obtenção destes novos segmentos, foi necessária a submissão da amostra P3 com sulcos no programa SURFAT, novamente, para a produção da nova espessura de 1200 μm . Como resultado, obteve-se um total de sete segmentos, como é mostrado na Figura 19.

Logo após, os segmentos foram inseridos no programa SurfLub, onde foram realizadas simulações sob a velocidade de 3 m/s, chegando-se na solução de novos valores de pressão hidrodinâmica e tensão de cisalhamento hidrodinâmica. A seguir, na Figura 20, são

apresentados os resultados destas simulações (linha tracejada), sobrepostas aos resultados desta mesma amostra para segmentos com 200 μm de espessura (linha contínua).

A mesma sequência de trabalho foi realizada para a amostra P3 original, a qual também possui seus respectivos resultados mostrados na Figura 21, com resultados para espessura de 1200 μm (linha tracejada), sobrepostos aos resultados para espessura de 200 μm (linha contínua).

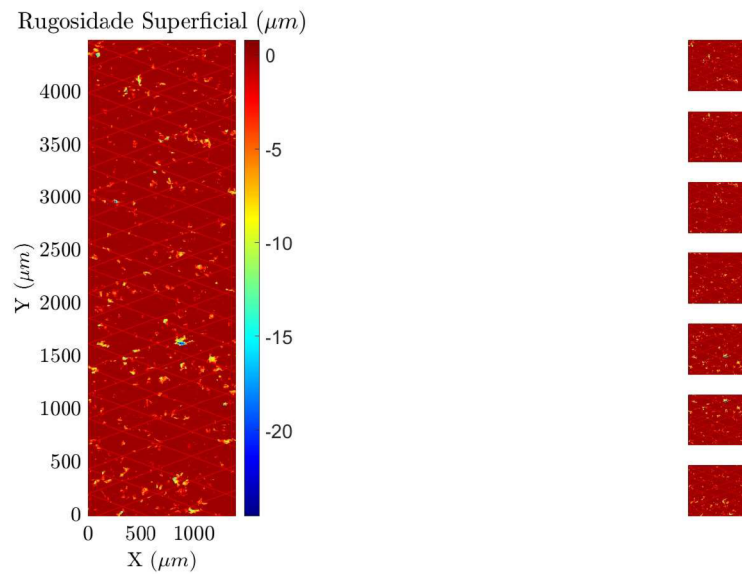
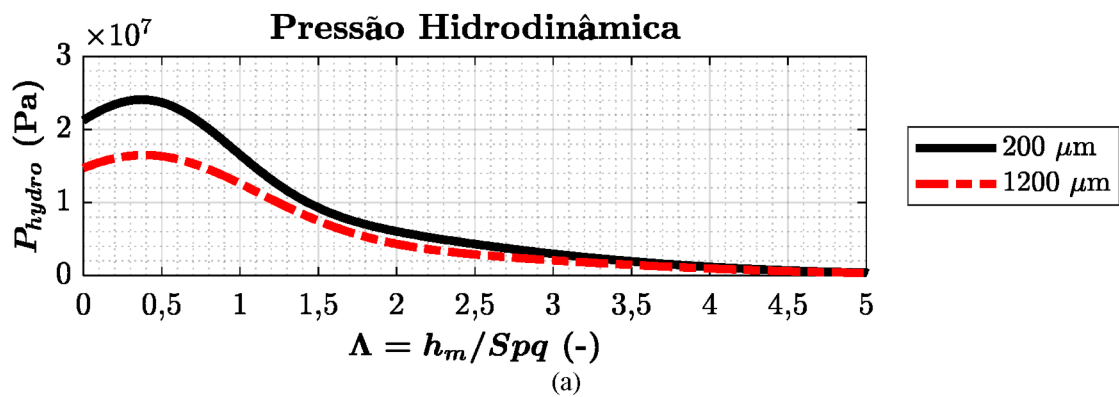


Figura 19 - Segmentos da amostra P3 com sulcos com espessura de 1200 μm . Fonte: Autor.



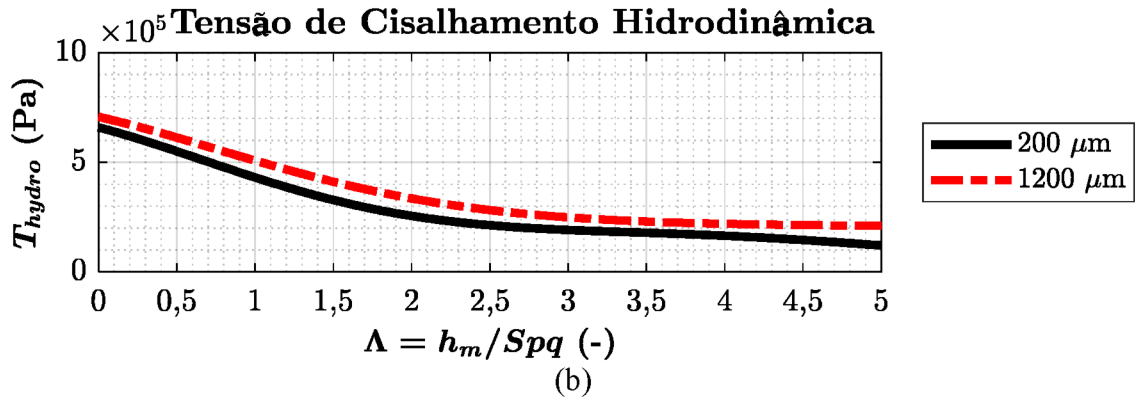


Figura 20 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 com sulcos inseridos digitalmente com segmentos de espessura de 200 μm e 1200 μm . Fonte: Autor.

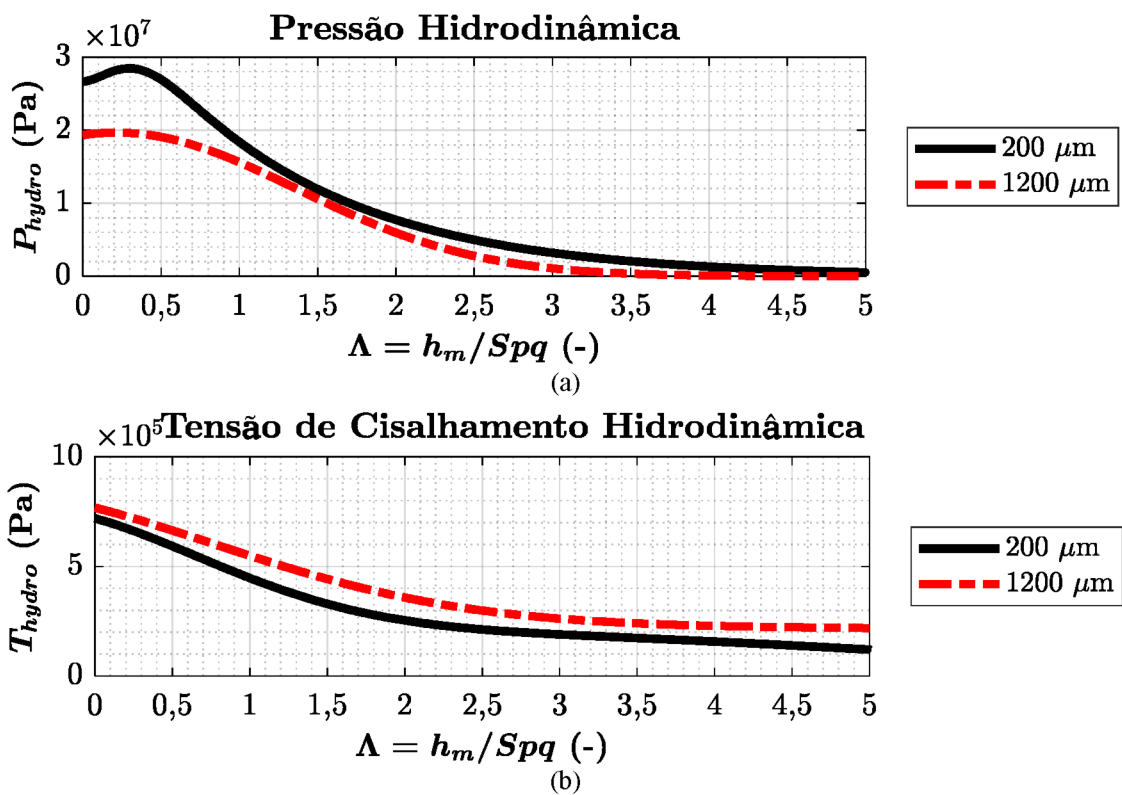


Figura 21 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica e (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica da amostra P3 original com segmentos de espessura de 200 μm e 1200 μm . Fonte: Autor.

Como é observável nas figuras acima, a mudança na espessura do segmento para 1200 μm , a mesma da face do anel do pistão, não trouxe mudança significativa nas tendências já anteriormente observadas no que se refere à diferença entre as amostras com e sem sulcos de brunimento. Isto comprova que a espessura anterior, de 200 μm , não afetou o efeito da cavitação no interior dos vales e, portanto, nem os resultados obtidos até então. Ou seja, para as duas espessuras de anel, os sulcos não obtiveram o sucesso esperado, demonstrando uma desvantagem aparente.

De todo modo, a espessura de 1200 μm resultou na mudança das médias globais, gerando diminuição da pressão hidrodinâmica e aumento da tensão de cisalhamento hidrodinâmica. Tais fenômenos são explicados pela baixa amostragem dos segmentos (ao todo, 7) que alimentam os cálculos realizados pelo SurfLUB. Vale lembrar que a espessura de 200 μm resultou em 23 segmentos, o que reduz a magnitude do erro na solução e traz maior confiabilidade ao cálculo da média global das pressões.

4.3.2 Simulações para elevadas velocidades de trabalho

Estas seguintes simulações foram realizadas para averiguar o comportamento da superfície com sulcos sob condições de velocidade média do pistão no cilindro do motor dois tempos. Foram selecionadas as velocidades médias para baixa e alta rotação do motor, sendo estas 11,71 m/s e 16,66 m/s, para 9500 rpm e 13500 rpm, respectivamente.

Para ambos os casos foi selecionada a amostra P3 com sulcos de brunimento digitalmente impressos, com geometrias de $\alpha = 40^\circ$, $d_e = 0,15$, $w = 15 \mu\text{m}$ e $d_p = 1,5 \mu\text{m}$. Estas simulações foram executadas com segmentos de 1200 μm de espessura por permitirem simulações mais rápidas, visto que já estavam sendo utilizadas na última simulação, onde verificou-se que a espessura do anel não afetou significativamente o resultado final. Posteriormente, também foram feitas simulações para a amostra P3 original.

A Figura 22 mostra o gráfico dos resultados destas simulações numéricas para cada uma das velocidades de testes, 11,71 m/s (vermelho) e 16,66 m/s (verde) sobrepostas ao gráfico das simulações de velocidade de 3 m/s (preto).

Segundo os resultados das simulações, a textura obtida através dos testes anteriores apresenta bom desempenho quanto à pressão hidrodinâmica média para ambos níveis de rotação. Tal comportamento já era esperado em níveis mais altos de velocidade, pois ela afeta diretamente na espessura do filme lubrificante, aumentando, também, a pressão hidrodinâmica na superfície de contato. Entretanto, este aumento de espessura do filme de lubrificante, combinado com elevadas velocidades, causa a elevação da tensão de cisalhamento hidrodinâmica, o que contribui no aumento do coeficiente de atrito (μ) deste tribossistema, como demonstra a Figura 22c, onde este aumento ocorre para regime de lubrificação hidrodinâmico ($\Lambda > 3$).

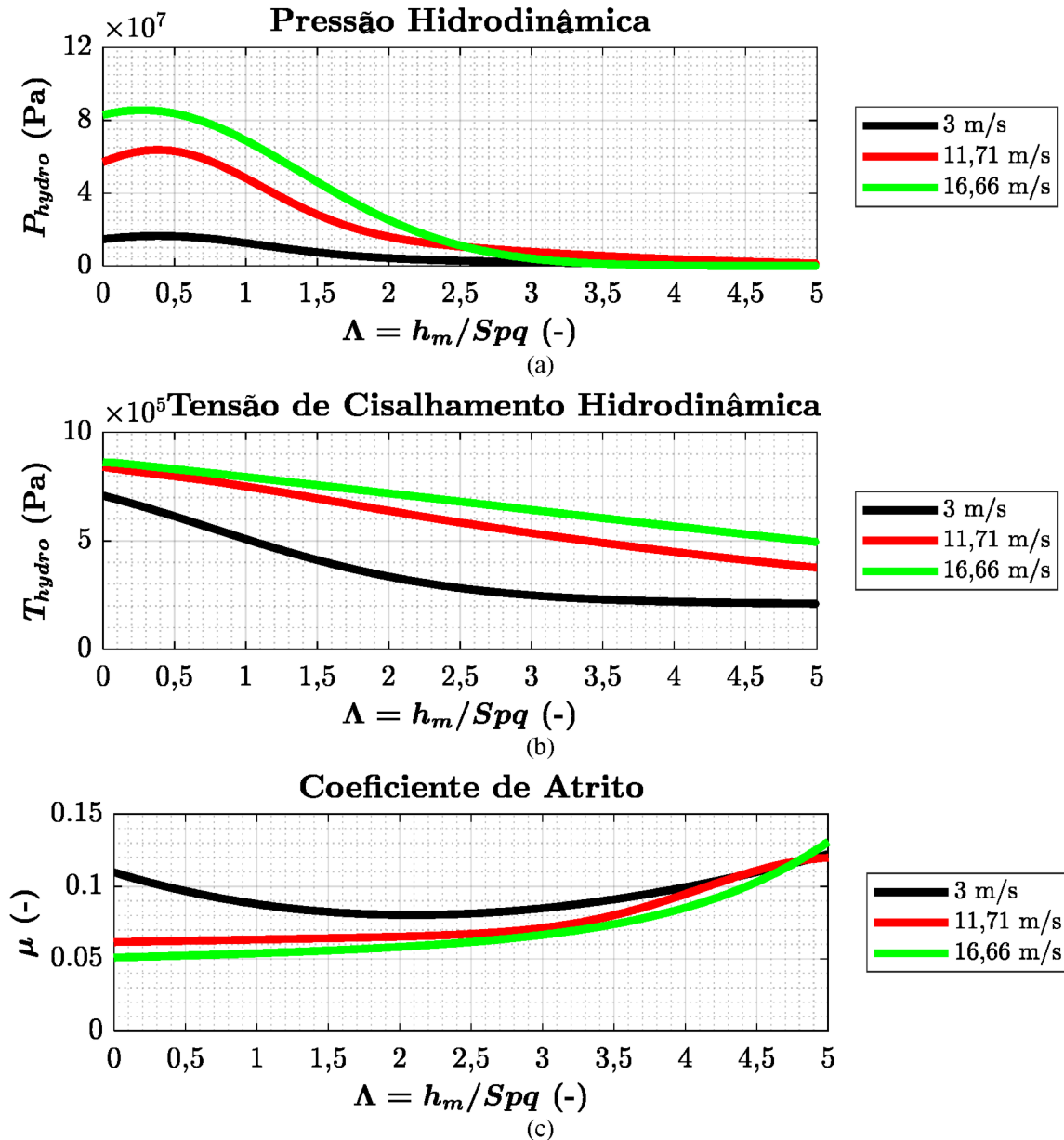


Figura 22 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica, (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica e (c) coeficiente de atrito da amostra P3 com sulcos de brunimento para velocidades de 3 m/s, 11,71 m/s e 16,66 m/s. Fonte: Autor.

A seguir, na Figura 23, são apresentados os gráficos da simulação da superfície da amostra P3 original, com espessura de 1200 μm , contendo os valores médios para os mesmos termos de comportamento de uma superfície lubrificada e mesmas velocidades de testes.

Quando os resultados da amostra com sulcos de brunimento são comparados aos da amostra original, continua evidente a disparidade entre o comportamento de cada amostra, mesmo que em velocidades maiores. Os resultados de pressão hidrodinâmica para a superfície estocástica possuem, em todos os casos, valores mais elevados em relação aos com texturas inseridas digitalmente, o que combinado ao fato de produzir tensão de cisalhamento

hidrodinâmica de valores semelhantes, resulta em um coeficiente de atrito menor em ambas velocidades de simulação.

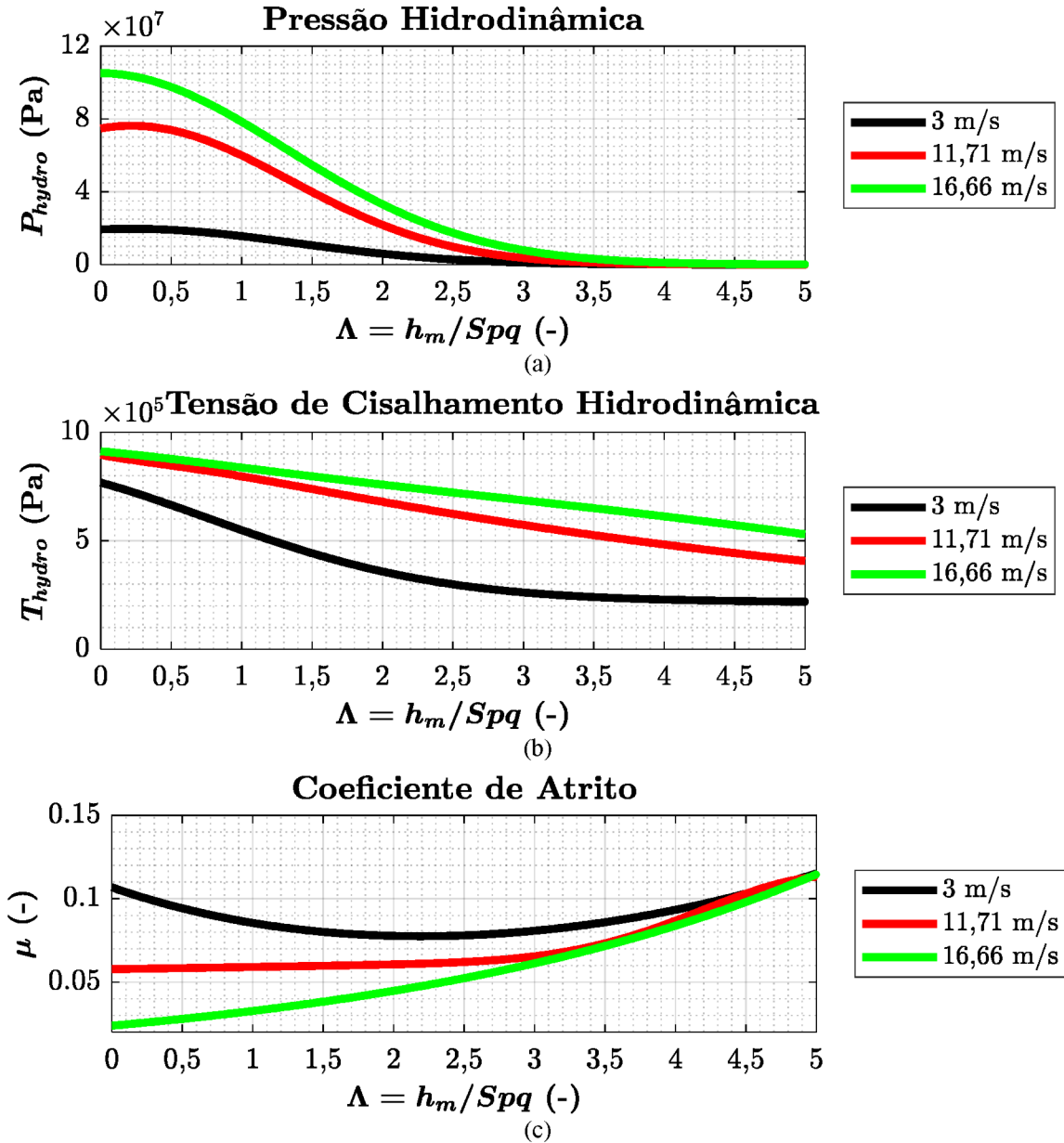


Figura 23 - Valores médios para (a) pressão hidrodinâmica, (b) tensão de cisalhamento hidrodinâmica e (c) coeficiente de atrito da amostra P3 original para velocidades de 3 m/s, 11,71 m/s e 16,66 m/s. Fonte: Autor.

Portanto, apesar de várias condições geométricas dos sulcos, de velocidade e de espessura do anel terem sido simuladas, os resultados não mostraram efeito benéfico da presença de sulcos de brunimento para as superfícies das camisas de cilindro testadas neste trabalho, as quais já possuíam uma textura estocástica prévia resultante de polimento após revestimento de cromo duro.

Este baixo desempenho pode decorrer devido á elevada quantidade de porosidade existente na amostra P3, com alguns vales possuindo profundidade maior do que os sulcos de brunimento inseridos numericamente. Tal característica é produzida pela deposição do cromo duro durante a fase de fabricação da camisa do cilindro e causa modificação da sustentação de carga do filme lubrificante, o que contribui para a perda de desempenho após a amostra receber os sulcos. Este resultado é de grande relevância industrial, uma vez que a produção de sulcos de brunimento em motores de dois tempos é uma etapa que acrescenta custos adicionais ao processo, bem como desafios tecnológicos de fabricação.

Contudo, mesmo havendo desvantagens na adoção dos sulcos de brunimento, algumas vantagens podem ocorrer. Dentre elas, há a maior retenção de fluido no núcleo da superfície devido ao aumento de volume vazio da amostra, permitindo também um maior volume de deposição de debris e impurezas do combustível. Na Tabela 7 é possível observar esta diferença entre a amostra P3 sem sulcos e com sulcos, onde nota-se o aumento do volume de vazios (V_v) em cada casos.

Tabela 7 - Volumes de vazios das amostras P3 sem sulcos e P3 com sulcos de dimensões: $\alpha = 40^\circ$; $d_e = 0,15$; $w = 15 \mu\text{m}$ e; $d_p = 1,5 \mu\text{m}$.

<i>Amostra</i>	<i>V_{vc}</i>	<i>V_{vv}</i>	<i>V_v</i>
<i>P3</i>	<i>$(\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$</i>	<i>$(\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$</i>	<i>$(\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2)$</i>
S/ sulcos	0,0842	0,2510	0,3352
C/ sulcos	0,1200	0,2965	0,4165

5 CONCLUSÕES

Através da utilização de simulações numéricas, foi possível a análise das superfícies com sulcos de brunimento numericamente inseridas sobrepostas à textura estocástica proveniente da fabricação da camisa do cilindro da amostra. Foram adotadas técnicas de inserção numérica de sulcos e diversos valores de medidas geométricas recomendadas pelas bibliografias pesquisadas.

Seguindo tais recomendações, dentre as superfícies com sulcos de brunimento sobrepostos, obtiveram melhores resultados das simulações para contato lubrificado as amostras com as seguintes dimensões: $\alpha = 40^\circ$; $d_e = 0,15$; $w = 15 \mu\text{m}$ e; $d_p = 1,5 \mu\text{m}$.

Com a análise dos resultados obtidos pelo programa SurfLUB, comparou-se a amostra P3 original estocástica com a amostra obtida com a sobreposição de sulcos de brunimento e concluiu-se que os resultados alcançados não foram satisfatórios. Mesmo que a geometria dos sulcos escolhida fosse a de melhor rendimento dentre as selecionadas, não houve mudanças que melhorassem o desempenho do tribossistema quanto a redução do atrito em regime de lubrificação mista, tendo resultados até piores do que a textura puramente estocástica já existente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto os estudos e resultados mostrados durante o desenvolvimento do presente trabalho, caso haja o autor propõe as seguintes sugestões para pesquisas frutos de temas relacionados a este e de futuras parcerias industriais:

- Estudo sobre a realização testes laboratoriais de amostras de cilindros de motores de dois tempos com sulcos de brunimento com propriedades geométricas conforme as descritas nesta dissertação;
- A simulação do comportamento da lubrificação deste tipo de motor para outras formas de texturas numericamente inseridas, como *dimples* cilíndricos, esféricos, *chevrons* etc, e;
- O estudo da viabilidade de redução da profundidade e número de poros resultante da etapa de eletrodeposição de cromo duro na superfície da amostra, tanto do ponto de vista de simulação quanto experimental.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS NOMINAIS

ARDAH, S.; PROFITO, F. J.; DINI, D. An integrated finite volume framework for thermal elasto-hydrodynamic lubrication. **Tribology International**, 177, p. 107935, 2023.

ATULKAR, A.; PANDEY, R.; SUBBARAO, P. Role of textured piston rings/liners in improving the performance behaviours of IC engines: a review with vital findings. **Surface Topography: Metrology and Properties**, 9, n. 2, p. 023002, 2021.

AUSAS, R.; RAGOT, P.; LEIVA, J.; JAI, M. *et al.* The impact of the cavitation model in the analysis of microtextured lubricated journal bearings. 2007.

AUSAS, R. F.; JAI, M.; BUSCAGLIA, G. C. A Mass-Conserving Algorithm for Dynamical Lubrication Problems With Cavitation. **J. Tribol.**, 131, n. 3, Jul 2009.

BABY, A. K.; RAJENDRAKUMAR, P. Influence of honing angle on tribological behaviour of cylinder liner–piston ring pair: Experimental investigation. **Tribology International**, 167, p. 107355, 2022.

ELROD, H. G.; ADAMS, M. L. A computer program for cavitation and starvation problems. **Cavitation and Related Phenomena in Lubrication: Proceedings of the 1st Leeds–Lyon Symposium on Tribology. Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, England 1974.**

GRABON, W.; PAWLUS, P.; WOS, S.; KOSZELA, W. *et al.* Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring–liner assembly in short time tests. **Tribology international**, 113, p. 137-148, 2016.

HOLMBERG, K.; ANDERSSON, P.; ERDEMIR, A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology international**, 47, p. 221-234, 2012.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Butterworth-heinemann, 2017. 0081009518.

KURDI, A.; ALHAZMI, N.; ALHAZMI, H.; TABBAKH, T. Practice of Simulation and Life Cycle Assessment in Tribology—A Review. **Materials**, 13, n. 16, p. 3489, 2020.

LI, T.; LU, X.; MA, X.; XU, H. *et al.* Numerical and experimental analysis of the honing texture on the lubrication performance of piston ring–cylinder liner tribosystem. **Tribology Transactions**, 62, n. 6, p. 991-1006, 2019.

LIU, Y.; LI, Y.; TIAN, T. Development and application of ring-pack model integrating global and local processes. Part 2: Ring–liner lubrication. **SAE International Journal of Engines**, 10, n. 4, p. 1969-1983, 2017.

MARTZ, L. Preliminary report of developments in interrupted surface finishes. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, 161, n. 1, p. 1-9, 1949.

MEZGHANI, S.; DEMIRCI, I.; ZAHOUANI, H.; EL MANSORI, M. The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction. **Precision Engineering**, 36, n. 2, p. 210-217, 2012.

PAWLUS, P.; REIZER, R.; WIECZOROWSKI, M. Analysis of surface texture of plateau-honed cylinder liner—A review. **Precision Engineering**, 72, p. 807-822, 2021.

PODULKA, P.; DOBRZAŃSKI, P.; PAWLUS, P.; LENART, A. The effect of reference plane on values of areal surface topography parameters from cylindrical elements. **Metrology and measurement systems**, 21, n. 2, p. 247--256, 2014.

PROFITO, F. J. **On the development of advanced techniques for mixed-elastohydrodynamic lubrication modelling of journal and sliding bearing systems**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PROFITO, F. J.; GIACOPINI, M.; ZACHARIADIS, D. C.; DINI, D. A general finite volume method for the solution of the Reynolds lubrication equation with a mass-conserving cavitation model. **Tribology Letters**, 60, p. 1-21, 2015.

PROFITO, F. J.; TOMANIK, E.; ZACHARIADIS, D. C. Effect of cylinder liner wear on the mixed lubrication regime of TLOCs. **Tribology International**, 93, p. 723-732, 2016.

REIZER, R.; PAWLUS, P. Modelling of plateau honed cylinder surface topography. **Proceedings of the Institution of Mechanical engineers, Part B: Journal of engineering Manufacture**, 226, n. 9, p. 1564-1578, 2012.

RONEN, A.; ETSION, I.; KLIGERMAN, Y. Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components. **Tribol. Trans.**, 44, n. 3, p. 359-366, 2001.

ROSENKRANZ, A.; COSTA, H. L.; PROFITO, F.; GACHOT, C. *et al.* Influence of surface texturing on hydrodynamic friction in plane converging bearings-An experimental and numerical approach. **Tribology International**, 134, p. 190-204, 2019.

ROSENKRANZ, A.; GRÜTZMACHER, P. G.; GACHOT, C.; COSTA, H. L. Surface texturing in machine elements— a critical discussion for rolling and sliding contacts. **Advanced Engineering Materials**, 21, n. 8, p. 1900194, 2019.

SILVA, S. A. N. **Comparação entre superfícies texturizadas para anel-cilindro através de simulação determinística**. 2022. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SPENCER, A.; ALMQVIST, A.; LARSSON, R. A numerical model to investigate the effect of honing angle on the hydrodynamic lubrication between a combustion engine piston ring and cylinder liner. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, 225, n. 7, p. 683-689, 2011.

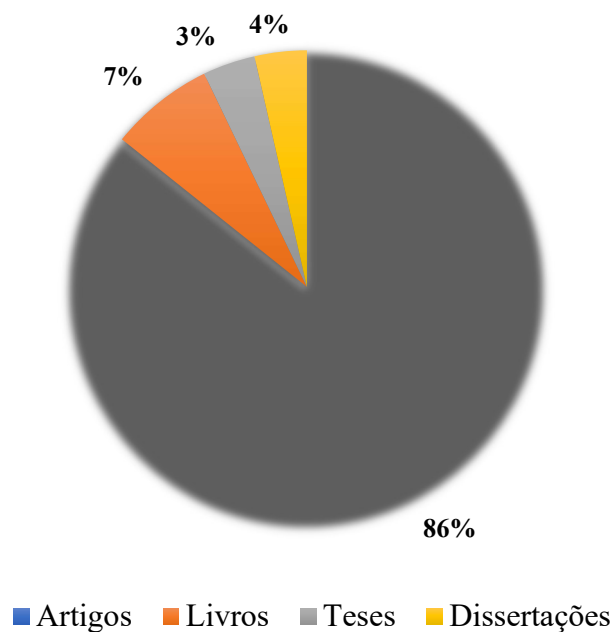
VLĂDESCU, S.-C.; MEDINA, S.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G. *et al.* Lubricant film thickness and friction force measurements in a laser surface textured reciprocating line

contact simulating the piston ring–liner pairing. **Tribology international**, 98, p. 317-329, 2016.

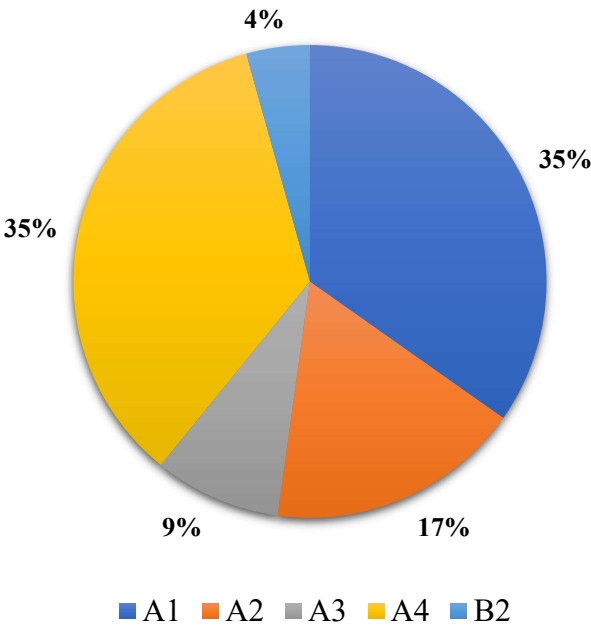
VLĂDESCU, S.-C.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G.; REDDYHOFF, T. Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing. **Wear**, 358, p. 51-61, 2016.

ZHANG, C. Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites. *In: Advances in ceramic matrix composites*: Elsevier, 2014. p. 312-339.

REFERÊNCIAS POR ESTRATO



REFERÊNCIAS POR QUALIS



REFERÊNCIAS POR DATA

