

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS À
LASER

Fabio Fruchtengarten

São Paulo
2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS À LASER

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia

Fabio Fruchtengarten

Orientador: Rodrigo Lima Stoeterau

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Fruchtengarten, Fabio

**Análise tribológica de superfícies texturizadas à laser / F.
Fruchtengarten. – São Paulo, 2014.**

99 p.

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Superfícies 2.Tribologia 3.Usinagem 4.Perdas por atrito
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica II.t.**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me apoiaram sempre na busca de meus sonhos e da melhor formação educacional e profissional. As minhas avós pelo carinho e força que me foi dado para trilhar meu caminho. A minha irmã pela admiração e ajuda nas horas difíceis. A Bruna Costa por estar sempre ao meu lado. Aos professores Rodrigo Stoeterau e Amilton, a Iramar , Roberto e Sebastian pelas orientações e pelo apoio para que a realização desse trabalho fosse possível. E a D'us por iluminar meu caminho.

RESUMO

Nos componentes com movimentos relativos, as superfícies de contato determinam grande parcela do desempenho do sistema, pois nessas interfaces a energia é transferida, convertida e dissipada. Para o bom funcionamento dessas interfaces e o desenvolvimento de superfícies mais eficientes, a tribologia têm uma importância crescente na indústria. Novas técnicas de manufatura especiais que produzem novas condições de superfície levam a uma melhora significativa na performance tribológica em contatos mecânicos. O presente trabalho visa analisar o efeito da texturização de superfícies por meio da produção de diferentes distribuições de “dimples” em corpos de prova de metal duro, e observar sua influência no coeficiente de atrito e no desgaste da superfície. Constatou-se a partir dos resultados experimentais uma piora nos coeficientes de atrito e no desgaste para as superfícies texturizadas em relação a superfícies sem texturização nas condições ensaiadas. O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Fenômenos de Superfície da USP e no instituto Fraunhofer IPT na Alemanha e viabilizado com o auxílio da CAPES.

ABSTRACT

When we analyse mechanic contacts, the contact surfaces determine great part of the system performance, that is because energy is transferred, converted and dissipated on that interfaces. For the functioning of these interfaces, the development of more tribological efficient surfaces has a growing interest in industry. New techniques for manufacturing new surface conditions, steer to a significant improvement on the tribological performance of mechanical contacts. This work aims to analyze the effect of surface texturization on Hard metal surfaces, by manufacturing different dimple distributions on samples and analyzing its effects on the friction coefficient and wear. The results from the experiments in this work gave worse friction coefficients and wear levels for the textured surfaces in comparison with non-textured surfaces for the tested conditions. The project was developed at Laboratório de Fenômenos de Superfície at USP and at the Fraunhofer IPT in Germany, with the support of CAPES.

Sumário

1	Introdução.....	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Usinagem a laser.....	15
2.1.1	Princípios de funcionamento	16
2.1.2	Configuração e elementos	16
2.1.3	Corte a laser	17
2.2	Lubrificação.....	18
2.2.1	Lubrificantes.....	18
2.2.1.1	Propriedades físicas.....	18
2.2.1.1.1	Viscosidade.....	18
2.2.1.1.2	Variação da viscosidade com a temperatura.....	19
2.2.1.1.3	Índice de viscosidade	20
2.2.1.1.4	Variação da viscosidade com a pressão	21
2.2.1.1.5	Variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento (Shear Rate)	22
2.2.1.2	Composição.....	22
2.2.1.2.1	Óleos minerais	22
2.2.1.2.2	Óleos sintéticos	22
2.2.1.2.3	Aditivos.....	23
2.2.2	Hidrodinâmica(HD) e Elastohidrodinâmica(EHD).....	23
2.2.2.1	Lubrificação hidrodinâmica	24
2.2.2.2	Lubrificação Elastohidrodinâmica	27
2.3	Texturização de superfícies	30
2.3.1	Efeitos tribológicos dos dimples	30
2.3.2	Análise do efeito tribológico dos Dimples	32
2.3.3	Fabricação.....	35
2.4	Estruturação a laser.....	35
2.5	Ensaio tribológicos.....	37
2.5.1	Testes de modelos simplificados	38
3	Materiais e métodos.....	41
3.1	Ensaio no instituto Fraunhofer IPT	41
3.1.1	Corpos de prova e lubrificante.....	41
3.1.2	Tribômetro pino disco	42
3.1.3	Distribuição e geometria dos dimples	44
3.1.4	Parâmetros dos testes.....	47
3.1.5	Procedimento experimental	47
3.1.5.1	Caracterização	48

3.1.5.2	Teste pino disco.....	48
3.2	Ensaio no Laboratório de Fenômenos de Superfície - USP	50
3.2.1	Corpos de prova e lubrificante.....	50
3.2.2	Tribômetro esfera disco	50
3.2.3	Distribuição e geometria dos dimples	51
3.2.4	Parâmetros dos testes	53
3.2.5	Procedimento experimental	54
4	Resultados.....	54
4.1	Dados ensaio Fraunhofer IPT	54
4.1.1	Análise da força de atrito	54
4.1.2	Caracterização superficial e desgaste	57
4.2	Resultados ensaio Laboratório de Fenômenos de Superfície - USP	59
4.2.1	Análise da força de atrito.....	60
4.2.2	Caracterização e desgaste	62
4.2.2.1	Desgaste do disco	63
4.2.2.2	Variação do diâmetro da esfera.....	71
4.3	Conclusões.....	73
5	Bibliografia.....	76
6	Anexo A - Características de máquinas utilizadas	78
6.1	Características da máquina laser utilizada.....	78
6.2	Detalhes tribômetro Wazau	79
7	Anexo B - Características do óleo utilizado no ensaio LFS -USP	80
8	Anexo C - Resultados dos ensaios no instituto Fraunhofer IPT.....	81
9	Anexo D - Resultados ensaio LFS.....	90
9.1	Ensaio 1 25%	90
9.2	Ensaio 1 100%	93
9.3	Ensaio 2 100%	96
9.4	Ensaio 1 Sem dimple	98
9.5	Ensaio 2 Sem dimple	99

Lista de figuras

Figura 1.1 Exemplo de dimples	15
Figura 2.1 Processo de usinagem a laser. Microfresadora Kern adaptada com conjunto óptico e laser.....	18
Figura 2.2 Modelo da lei de atrito de Newton. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	19
Figura 2.3 Dependência da viscosidade com a temperatura para óleos de diferentes viscosidades. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	20
Figura 2.4 Demonstração gráfica do índice de viscosidade. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	21
Figura 2.5 Distribuição de velocidade e pressão no filme de fluido lubrificante para duas superfícies de largura infinita convergentes. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	24
Figura 2.6 visão seccional de um mancal de rolamento axial. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	25
Figura 2.7 Curva de distribuição de pressão para contato EHD. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	28
Figura 2.8 - Exemplo de perfil de distribuição de pressão em um mancal de rolamento: 1) com superfície lisa 2) com superfície em degraus e 3) com superfície texturizada. Fonte: adaptado Etsion, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. Journal of Tribology	30
Figura 2.9 - Segmentos de anéis de pistão texturizados: (a) texturização completa e (b) texturização parcial. Fonte: adaptação de Kligerman, Y.; Etsion, I.; et al. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. Journal of Tribology, 2005	31
Figura 2.10 Esquema de dimple esférico.....	32
Figura 2.11 Comparação de resultados entre mancais texturizados e não texturizados. Fonte: (ETSION, 2005b).	33
Figura 2.12 Variação do coeficiente de atrito com o decorrer do teste tribológico. Fonte: (TANG et al., 2013).....	34
Figura 2.13 Análise por elementos finitos mostrando as tensões nas bordas dos dimples com diferentes orientações em relação ao deslocamento. Fonte (WANG et al., 2014).....	35
Figura 2.14 Esquema reproduzindo os tipos short e ultra-short pulse(CAPES, 2012)	36
Figura 2.15 Exemplos de categorias de testes. Adaptado de (JACOBS, 2012)	38
Figura 2.16 Tipos de tensões. Adaptado de (JACOBS, 2012)	39
Figura 2.17 Tipos de contatos usados em tribômetros. Adaptado (JACOBS, 2012)	40
Figura 3.1 Tribômetro WAZAU TRM 500	43
Figura 3.2 Tela do software de controle do tribômetro	44
Figura 3.3 Esquema do corpo de prova utilizado	45
Figura 3.4 Corpo de prova usinado com dimples	45
Figura 3.5 Esquema da cobertura de uma área por dimples em padrão linear	45
Figura 3.6 Distribuições de 25%, 10% e 5%	46
Figura 3.7 Dimple de 100 μm	46
Figura 3.8 Dimple de 50 μm	47
Figura 3.9 Organograma dos ensaios realizados	47
Figura 3.10 Esquema de contato pino-disco.....	48
Figura 3.11 Balança Mettler AT201	49
Figura 3.12 Imagem do pino e disco fixados	49
Figura 3.13 Tribômetro esfera disco utilizado.....	51
Figura 3.14 Disco com superfície texturizada utilizado	52

Figura 3.15 Distribuições de 25%(esq.) e 100%(dir.)	52
Figura 3.16 Texturização de 25% com padrão em arco	53
Figura 3.17 Organograma dos ensaios realizados	54
Figura 4.1 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 25%	55
Figura 4.2 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 10%	55
Figura 4.3 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 5%	56
Figura 4.4 Coeficiente de atrito para ensaio de distribuição de 25%	57
Figura 4.5 Superfície do pino após o ensaio(esq) e superfície do disco após ensaio(dir) com riscos.....	58
Figura 4.6 Gráfico do coeficiente de atrito para todas as condições ensaiadas.....	60
Figura 4.7 Coeficientes de atrito médio para as condições ensaiadas: 25%, 100% e sem dimples(SD).....	61
Figura 4.8 Deslocamento vertical do suporte da esfera ao longo do ensaio.....	62
Figura 4.9 Trilhas ensaiadas com distribuição de 25%. 1) Ensaio 1 pré ensaio; 2) Ensaio 1 pós ensaio; 3) Ensaio 2 pré ensaio; 4) Ensaio 2 pós ensaio	64
Figura 4.10 Perfil na direção 1 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio.....	65
Figura 4.11 Perfil na direção 2 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio.....	66
Figura 4.12 Detalhe do desgaste da rebarba de dimples, na distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio.....	67
Figura 4.13 Trilhas ensaiadas com distribuição de 100%. 1) Ensaio 1 pré ensaio; 2) Ensaio 1 pós ensaio; 3) Ensaio 2 pré ensaio; 4) Ensaio 2 pós ensaio.....	68
Figura 4.14 Perfil na direção 2 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 100%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio.....	69
Figura 4.15 Detalhe do desgaste da rebarba de dimples, na distribuição de 100%. A esq. antes do ensaio, a dir. após o ensaio	70
Figura 4.16 Esferas após os ensaios. 25% (esq.) 100% (centro) e sem dimples (dir.).....	71
Figura 4.17 Esfera após Ensaio 1 - 25%.....	72
Figura 4.18 Esfera após Ensaio 1 - 100%.....	72
Figura 4.19 Esfera após Ensaio 1 - SD.....	72
Figura 8.1 Repetição 1 - distribuição 25%	81
Figura 8.2 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 25%	81
Figura 8.3 Repetição 2 - distribuição 25%	82
Figura 8.4 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 25%	82
Figura 8.5 Repetição 3 - distribuição 25%	83
Figura 8.6 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 25%	83
Figura 8.7 Repetição 1 - distribuição 10%	84
Figura 8.8 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 10%	84
Figura 8.9 Repetição 2 - distribuição 10%	85
Figura 8.10 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 10%	85
Figura 8.11 Repetição 3 - distribuição 10%	86
Figura 8.12 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 10%	86
Figura 8.13 Repetição 1 - distribuição 5%	87
Figura 8.14 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 5%	87
Figura 8.15 Repetição 2 - distribuição 5%	88
Figura 8.16 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 5%	88
Figura 8.17 Repetição 3 - distribuição 5%	89
Figura 8.18 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 5%	89

Figura 9.1 Perfil da direção 1 do Ensaio 1 25%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio	90
Figura 9.2 Perfil da direção 2 do Ensaio 1 25%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio	91
Figura 9.3 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 25%	92
Figura 9.4 Perfil da direção 1 do Ensaio 1 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio.....	93
Figura 9.5 Perfil da direção 2 do Ensaio 1 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio	94
Figura 9.6 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 100%	95
Figura 9.7 Perfil da direção 1 do Ensaio 2 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio	96
Figura 9.8 Perfil da direção 2 do Ensaio 2 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio.....	97
Figura 9.9 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 2 100%	98
Figura 9.10 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 SD.....	98
Figura 9.11 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 2 SD.....	99

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Coeficientes para o calculo de h_0 . Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012	29
Tabela 2.2 Categorias de testes tribológicos	37
Tabela 3.1 Características do disco	41
Tabela 3.2 Características do pino.....	42
Tabela 3.3 Características do fluido lubrificante.....	42
Tabela 3.4 Característica trilha.....	46
Tabela 3.5 Características do disco	50
Tabela 3.6 Características da esfera	50
Tabela 3.7 Velocidades para os testes de atrito	53
Tabela 4.1 Caracterização dos pinos testados com disco de controle	57
Tabela 4.2 Caracterização dos pinos testados com dimples de 100 μ m.....	58
Tabela 4.3 Caracterização dos pinos testados com dimples de 50 μ m.....	58
Tabela 4.4 Coeficientes de atrito médios para as trilhas texturizadas ensaiadas.....	61
Tabela 4.5 Coeficientes de atrito médios para as trilhas não texturizadas	61
Tabela 4.6 Dados da superfície das trilhas sem dimples antes e após os ensaios	70
Tabela 4.7 Perda de massa nos discos ensaiados.....	70
Tabela 4.8 Diâmetro das esferas após os ensaios	71
Tabela 4.9 Dados da superfície das esferas utilizadas antes e após o ensaio	73
Tabela 8.1 Resultados Repetição 1 - distribuição 25%	81
Tabela 8.2 Resultados Repetição 2 - distribuição 25%	82
Tabela 8.3 Resultados Repetição 3 - distribuição 25%	83
Tabela 8.4 Resultados Repetição 1 - distribuição 10%	84
Tabela 8.5 Resultados Repetição 2 - distribuição 10%	85
Tabela 8.6 Resultados Repetição 3 - distribuição 10%	86
Tabela 8.7 Resultados Repetição 1 - distribuição 5%	87
Tabela 8.8 Resultados Repetição 2 - distribuição 5%	88
Tabela 8.9 Resultados Repetição 3 - distribuição 5%	89

Lista de símbolos

η - coeficiente de viscosidade dinâmica do fluído [$\frac{Ns}{m^2} = Pa.s$]

U - velocidade de deslizamento [m/s]

h- espessura do filme [μm]

h*- espessura do filme no ponto de máxima pressão [μm]

h1 - espessura do filme na saída [μm]

ho - espessura do filme na entrada [μm]

Sa - média aritmética dos picos em uma área delimitada [μm]

Sq - média quadrática dos picos em uma área delimitada [μm]

Sp - maior pico em uma área delimitada [μm]

Sv - maior vale em uma área delimitada [μm]

Sz - maior altura em uma área delimitada [μm]

r - raio dimple [μm]

d- diâmetro dimple [μm]

hp - profundidade do dimple [μm]

L - distância entre centros dos dimples [μm]

τ - tensão de cisalhamento [Pa]

ν - viscosidade cinemática [$\frac{m^2}{s}$ ou cSt]

p - pressão [Pa]

1 Introdução

Atualmente existe um esforço para criar novas tecnologias de modo a aumentar a eficiência energética nos mais diversos tipos de aplicações industriais. Podemos falar de eficiência energética como sinônimo de equipamentos e processos com maior precisão e performance, como também aumento do tempo de vida desses equipamentos e diminuição dos custos de manutenção.

Um dos focos de pesquisas no aumento da eficiência energética é a redução de perdas em contatos mecânicos, aperfeiçoando o comportamento tribológico dos mesmos. Para aperfeiçoar o contato entre duas superfícies, focamos em reduzir o atrito entre peças e o desgaste resultante de sua atuação. O atrito entre corpos gera perdas de energia em forma de calor e ondas sonoras e provoca desgaste que, com o passar da vida da peça, pode resultar em perda de eficiência ou falha da mesma.

Soluções para reduzir o atrito entre superfícies incluem a escolha adequada dos pares de materiais que estarão em contato, como também a escolha do meio no qual os materiais se encontram com a adição de lubrificante. Novos métodos para melhorar a performance tribológica dos materiais, focam em reduzir o atrito e melhorar a lubrificação na região de contato por meio da produção de texturas nas superfícies desses materiais, o que é chamado de texturização de superfícies. Segundo ETSION, a produção de texturas em certas superfícies produz uma melhora significativa nos níveis de atrito e lubrificação do contato tribológico (ETSION, 2005a). As texturas, compostas por micro cavidades chamadas "dimples" são aplicadas a superfícies em um certo padrão, de modo que ao ocorrer o movimento relativo de uma das superfícies, atuam uma série de mecanismos que contribuem para a redução do atrito na interface. A seguir a Figura 1.1 de uma superfície texturizada com dimples.

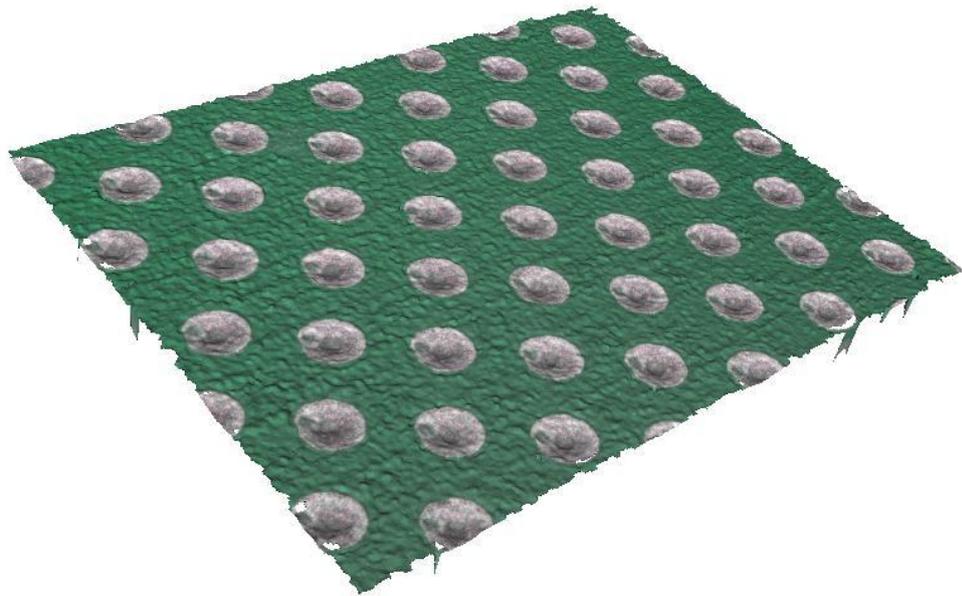


Figura 1.1 Exemplo de dimples

Essas texturas podem ser produzidas por alguns processos de usinagem como micro-usinagem, litografia, usinagem a laser, entre outros. Dentre todos esses processos a texturização a laser é um dos métodos mais avançados para a produção de dimples. Com avanços no campo de usinagem a laser, a precisão e a qualidade de produção dessas estruturas tem crescido, permitindo a aplicação dessa tecnologia em campos específicos da indústria, como por exemplo na produção de mancais texturizados.

Esse trabalho visa analisar o efeito da texturização na performance tribológica de superfícies de metal duro, por meio da produção de diferentes configurações de dimples em corpos de prova através de micro-usinagem a laser, que serão testados por meio de um tribômetro de modo a analisar como essas diferentes configurações alteram o coeficiente de atrito e o desgaste nas superfícies testadas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Usinagem a laser

A palavra laser vêm do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa a amplificação da luz por emissão de radiação estimulada. Entre as aplicações mais importantes em usinagem, encontramos o corte, a soldagem e a furação. Pode ser também utilizado para o tratamento de superfícies.

2.1.1 Princípios de funcionamento

Sabemos que a luz é emitida pela movimentação de elétrons entre as camadas energéticas de átomos. Quando a passagem se dá de um nível energético para um nível de menor energia ocorre a liberação de energia por meio de fótons. Na emissão espontânea, o espectro de irradiação possui diversos trens de onda com amplitudes diferentes. O laser é proveniente da sincronização desse espectro, a partir do uso de materiais que podem ser excitados para transpor níveis de energia mais elevados (STEEN; MAZUMDER, 2010). Ocorrendo a transposição de apenas um nível de energia, a emissão é espontânea e ocorre a irradiação de luz convencional. Se a transposição é estimulada, podemos atingir um determinado comprimento de onda de luz. Ao obter a transposição do nível de maior energia para o nível de menor energia, obtemos a irradiação de luz laser.

A utilização de luz laser para diferentes aplicações é classificada pelos comprimentos de onda emitidos e pela potência.

2.1.2 Configuração e elementos

A amplificação da luz ocorre no ressonador, equipamento constituído de dois espelhos que fazem a luz com um determinado comprimento de onda refletir seguidamente. Por interferência da luz dentro do ressonador, estimula-se a emissão de novas ondas com um mesmo comprimento de onda.

O feixe de luz sai do ressonador e é conduzido através de um sistema de refletores para o sistema de manuseio, onde o feixe deve ser moldado conforme a aplicação. O sistema de condução é composto por espelhos que podem ser esféricos, se houver a necessidade de correção de divergências no laser, ou planos que desviam o feixe do laser. Por fim o laser deve ser focalizado com a ajuda de lentes específicas conforme a atividade, para que então seja aplicado no material.

Quanto a utilização do laser na usinagem, observamos o uso de algumas configurações para os sistemas laser-peça. Uma delas possui ópticas estacionárias e peças em movimento como por exemplo um laser utilizado em uma linha de produção onde peças são movimentadas em esteiras. Outra configuração mais complexa como ópticas em movimento e peças estacionárias ou em movimento, como por exemplo no uso de laser associado a uma máquina CNC ou a robôs industriais por exemplo.

2.1.3 Corte a laser

O corte a laser se caracteriza pela alta velocidade do processo, produzindo um corte preciso e em comparação com outros processos de corte térmico, uma zona termicamente afetada no material bem limitada. Além disso não ocorre o contato entre a peça e a ferramenta, facilitando a produção de cortes mais complexos. Podemos classificar os cortes a laser em:

- Corte a laser por fusão
- Corte a laser por oxidação
- Corte a laser por sublimação

No corte por fusão, a alta concentração de energia devido ao feixe do laser provoca a fusão do material na fenda de corte. Esse material é expulso por um jato de gás inerte, prevenindo a oxidação do material na linha de corte. No corte por oxidação, o material é aquecido pelo feixe de laser e adiciona-se oxigênio, produzindo óxido que é soprado para fora da peça. O corte por sublimação é caracterizado pela evaporação do material usinado pelo laser e a remoção do material com o auxílio de um jato de gás inerte. O material sofre uma transformação direta do estado sólido para o líquido.

O corte laser é utilizado na indústria em diversas aplicações. Podemos citar, por exemplo, a usinagem de peças metálicas na indústria automobilística, o laser pode ser responsável por processos de recorte e furação. A alta velocidade dos processos de usinagem por laser faz com que essa seja uma boa alternativa em comparação a outros métodos de usinagem considerados “convencionais”. Na Figura 2.1 podemos observar uma máquina que realiza o processo de micro-usinagem a laser.

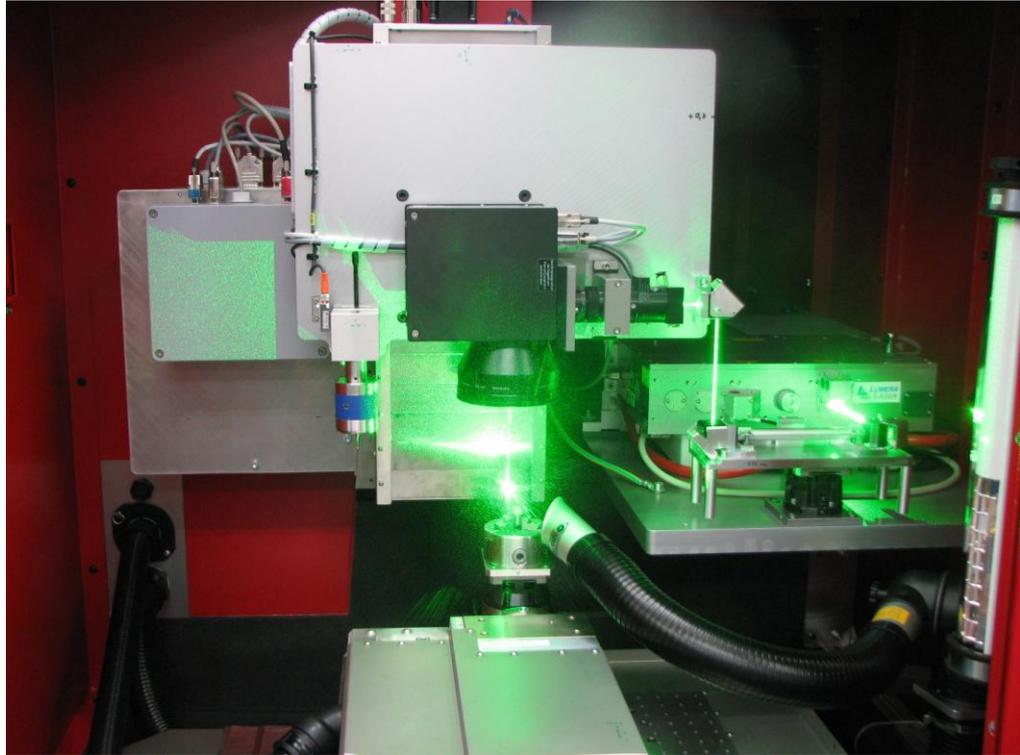


Figura 2.1 Processo de usinagem a laser. Microfresadora Kern adaptada com conjunto óptico e laser.

2.2 Lubrificação

2.2.1 Lubrificantes

As principal função do lubrificante é controlar o atrito das superfícies em contato, de forma a evitar ou reduzir o desgaste e promover a dissipação de calor. Os lubrificantes têm outras funções importantes como a proteção contra corrosão, efeito refrigerante, remoção de partículas geradas pelo contato ou provenientes de um meio externo.

2.2.1.1 Propriedades físicas

2.2.1.1.1 Viscosidade

A viscosidade é uma medida do atrito interno de um fluido e pode ser expressada pela lei de atrito de Newton. Segundo Newton, quando uma placa sem massa de área A se move em uma camada de fluido a uma velocidade u , o atrito interno do fluido resulta em uma força contrária ao movimento(JACOBS, 2012).

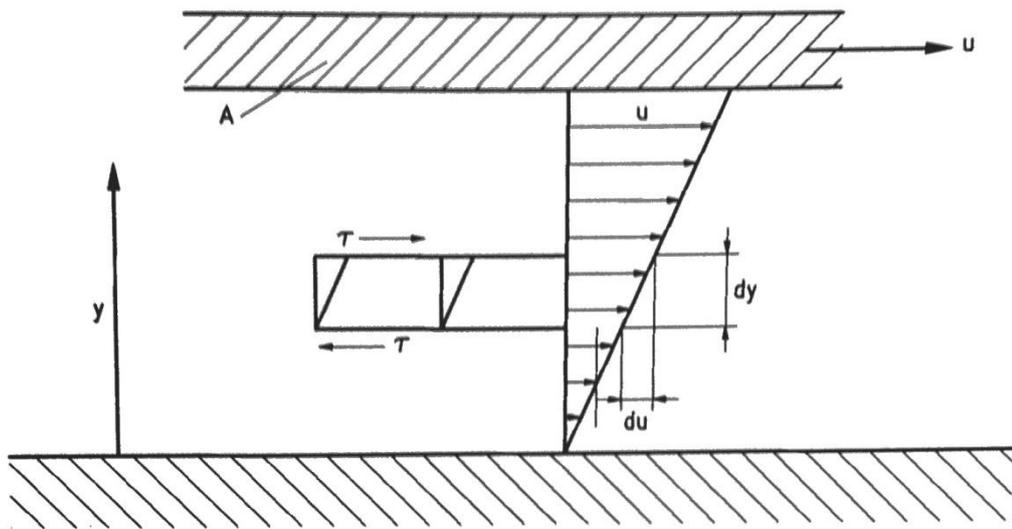


Figura 2.2 Modelo da lei de atrito de Newton. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

A viscosidade dinâmica do fluido η fica em função da tensão de cisalhamento τ e do grau de cisalhamento du/dy . Podemos expressar viscosidade também pela expressão da viscosidade cinemática, onde levamos em conta a densidade do meio.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

2.2.1.1.2 Variação da viscosidade com a temperatura

A viscosidade dos lubrificantes é muito dependente da temperatura, sendo que com o aumento da temperatura a viscosidade diminui exponencialmente. O gráfico a seguir mostra três óleos de viscosidades diferentes e seu comportamento em relação a variação da temperatura.

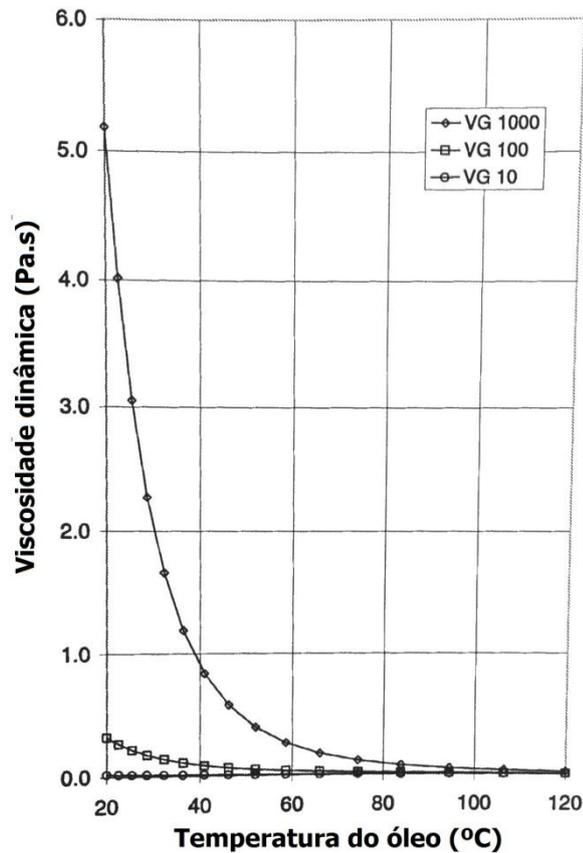


Figura 2.3 Dependência da viscosidade com a temperatura para óleos de diferentes viscosidades. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

2.2.1.1.3 Índice de viscosidade

O índice de viscosidade (V.I. - *Viscosity Index*) é utilizado para medir o comportamento do fluido quanto a variação da temperatura. Com esse índice, é possível por meio da definição de um óleo lubrificante de referência, classificar o comportamento de outros lubrificantes quanto a variação da temperatura.

O índice de viscosidade de um óleo com um VI máximo de 100 pode ser calculado a partir de:

$$VI = \frac{L-U}{L-H} * 100 \quad (2.3)$$

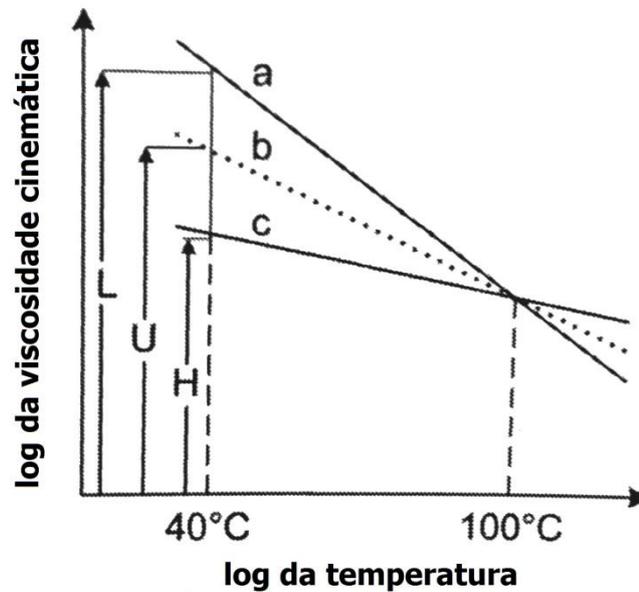


Figura 2.4 Demonstração gráfica do índice de viscosidade. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

- L é a viscosidade cinemática a 40°C de um óleo mineral com um VI de 0 que tem a mesma viscosidade cinemática a 100°C que o óleo mineral que queremos calcular.
- H é a viscosidade cinemática a 40°C de um óleo mineral com um VI de 100 que tem a mesma viscosidade cinemática a 100°C que o óleo mineral que queremos calcular.
- U é a viscosidade cinemática a 40°C do óleo do qual queremos calcular VI.

2.2.1.1.4 Variação da viscosidade com a pressão

A viscosidade de um lubrificante aumenta com o aumento da pressão. Esse efeito pode ser desprezado para pressões muito baixas, mas não pode ser desconsiderado para o caso de regime elastohidrodinâmico, como no contato de engrenagens e mancais de composição química do óleo, sendo que diferenças nessas propriedades geram o aumento da viscosidade com a pressão com ordens de grandeza diferentes.

O efeito da variação da viscosidade com a pressão, pode ser quantificado através da Lei de Barus, segundo a equação seguinte:

$$\eta_s = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (2.4)$$

Onde η_s é a viscosidade dinâmica na pressão p , η_0 a viscosidade dinâmica à pressão nula e α é o coeficiente de piezoviscosidade que é dependente da viscosidade, do tipo de óleo e aditivos.

2.2.1.1.5 Variação da viscosidade com a taxa de cisalhamento (Shear Rate)

A viscosidade de óleos minerais e da maioria dos óleos sintéticos é dependente apenas da temperatura e da pressão. Mas para fluidos considerados Não-Newtonianos, como graxas, polímeros(aditivo), apresentam uma variação na viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento. Mesmo fluidos Newtonianos a altas taxas de cisalhamento, apresentam variação na viscosidade.

2.2.1.2 Composição

Lubrificantes apresentam em sua composição um óleo base e aditivos sendo que os aditivos variam geralmente entre 10% a 20% da composição dos lubrificantes. Os lubrificantes podem ser líquidos, semi-sólidos, sólidos, gasosos.

2.2.1.2.1 Óleos minerais

Dentre os óleos lubrificantes encontramos o óleo mineral, compostos por hidrocarbonetos de cadeias longas, provenientes do refino de petróleo. É um dos óleos base mais utilizados em lubrificantes líquidos. As principais cadeias de hidrocarbonetos que compõe esses óleos são:

- Parafínicos, com baixo ponto de congelação, baixa densidade, resistência a oxidação, elevado V.I.
- Nafténicos, com alto ponto de congelação, elevada densidade, resistência a oxidação e baixo V.I.
- Aromáticos, aumenta a solubilidade e piora a relação viscosidade temperatura. Normalmente são indesejados.

2.2.1.2.2 Óleos sintéticos

Os óleos sintéticos também são refinados do petróleo, porem passam por outros processos químicos que adicionam grupos funcionais que garantem outras propriedades. Têm desempenho superior aos óleos minerais, porem a um maior custo. Os óleos podem apresentar

propriedades como a resistência a fogo, estabilidade térmica, resistência a oxidação e resistência a radiação. Os principais tipos são os Hidrocarbonetos sintéticos, os Poliglicóis, Ésteres e Silicones

2.2.1.2.3 Aditivos

Óleos minerais e sintéticos puros geralmente não conseguem atender todas as demandas dos lubrificantes para determinadas máquinas de alta performance. Por isso, aditivos (compostos químicos) são adicionados aos óleos para fornecer propriedades adicionais. Os principais tipos de aditivos são:

- Modificadores de atrito, que reduzem o coeficiente de atrito em condições limite de lubrificação
- Anti desgaste, que previnem o desgaste através de camadas protetoras geradas por reações triboquímicas durante o esfregamento das superfícies.
- Extrema pressão, que previnem falhas por adesão em situações de elevada temperatura e pressão
- Modificador de viscosidade, que varia o índice de viscosidade reduzindo a variação da viscosidade com a temperatura
- Anti oxidante, que previnem a deterioração do lubrificante com a oxidação
- Detergentes, que aprisionam impurezas com moléculas insolúveis em óleo, prevenindo a sua deposição sobre a superfície.
- Dispersantes, que previnem a formação de depósitos nas superfícies

2.2.2 Hidrodinâmica(HD) e Elastohidrodinâmica(EHD)

Lubrificantes são utilizados para reduzir o atrito entre as superfícies e para prevenir o desgaste, o que é possível devido a uma propriedade básica do lubrificante que é a separação de duas superfícies em movimento relativo. O processo do movimento das superfícies de contato e a formação do filme de lubrificante é dinâmico, portanto para projetar sistemas que utilizam fluido lubrificante, é necessário entender o comportamento do fluido. A teoria Hidrodinâmica é utilizada para calcular a espessura do filme de fluido e o atrito em condições moderadas de baixa pressão como por exemplo em mancais simples. Já a teoria Elastohidrodinâmica considera a deformação dos corpos em contato e portanto é utilizada

para calcular contatos com elevadas pressões como engrenagens e mancais de rolamento. Ambas teorias têm a origem de suas equações derivadas na equação diferencial de Reynolds, que por sua vez é derivada da equação de Navier Stokes (JACOBS, 2012).

2.2.2.1 Lubrificação hidrodinâmica

Para que ocorra a lubrificação hidrodinâmica, segundo a dedução de Osbourne Reynolds são necessárias as seguintes condições:

- Deve ocorrer velocidade relativa entre as duas superfícies
- Superfícies devem ser convergentes (não paralelas, em cunha).

Quando essas condições são satisfeitas, ocorre a formação de um filme lubrificante cujas forças viscosas permitem exercer pressões que suportam cargas normais (HUTCHINGS, 1992).

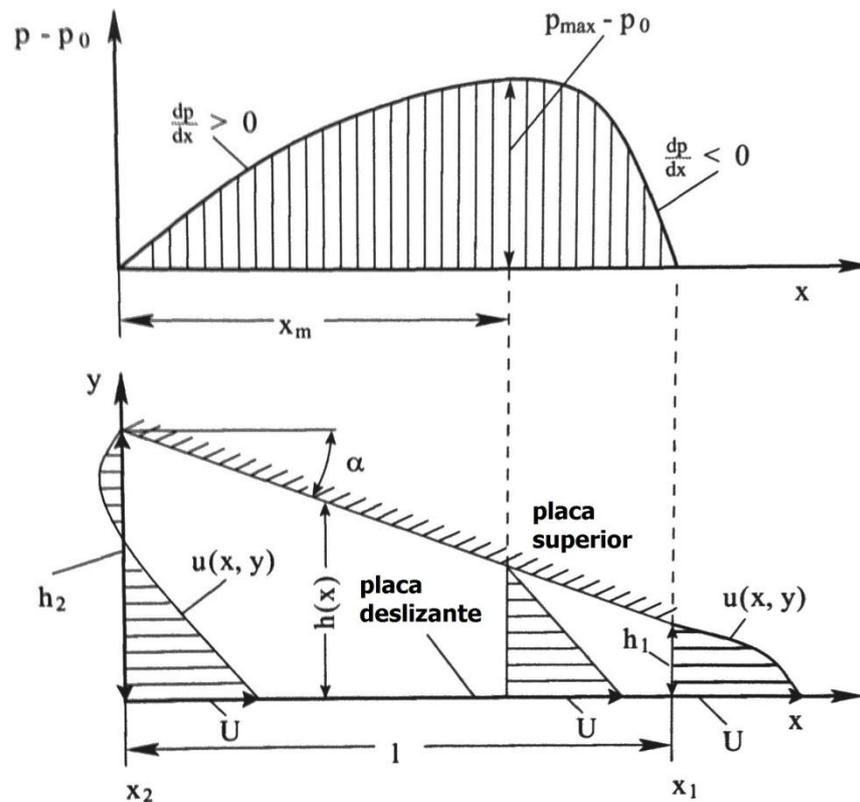


Figura 2.5 Distribuição de velocidade e pressão no filme de fluido lubrificante para duas superfícies de largura infinita convergentes. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

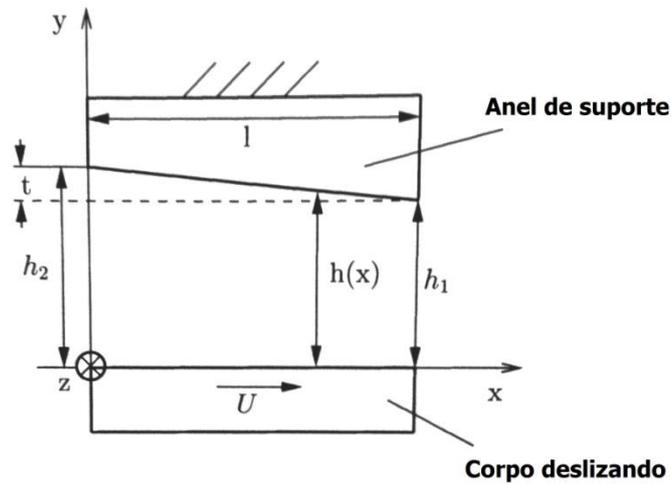


Figura 2.6 visão seccional de um mancal de rolamento axial. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

Para a derivação da equação de Reynolds considera-se um perfil de velocidades para o caso de duas superfícies em cunha e largura infinita. Pode se descrever o perfil de velocidades pela seguinte expressão:

$$u(x, y) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} (y^2 - yh) + U \left(1 - \frac{y}{h}\right) \quad (2.5)$$

A demonstração da obtenção da equação de Reynolds está descrita em (JACOBS, 2012). A partir de iterações na expressão anterior obtemos a equação diferencial de Reynolds para duas superfícies em cunha de largura infinita.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \frac{\partial h}{\partial t} + 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.6)$$

Com essa equação, conseguimos através de condições de contorno adequadas, calcular parâmetros de mancais como a distribuição de pressões e a capacidade de carregamento de carga de um mancal por exemplo.

Para o cálculo do perfil de pressões consideramos uma condição de operação estacionária ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$). Portanto a nova expressão obtida é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.7)$$

Integramos a equação em x e obtemos:

$$\frac{h^3(x)}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} - 6U h(x) + C_1 = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{com } h(x) = -\alpha x + h_2 \quad (2.9)$$

$$\text{sendo } \alpha = \frac{t}{l} = \frac{h_2 - h_1}{l} \quad (2.10)$$

Para determinar C_1 consideramos a condição limite $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ para um ponto $x = x_0$ com $h(x_0) = h_0$. Assim $C_1 = 6U h_0$.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 6U \eta \frac{h(x) - h_0}{h^3(x)} \quad (2.11)$$

Integramos a equação anterior, e obtemos:

$$p(x) = \frac{6U\eta}{\alpha} \left(\frac{h_0}{2h(x)^2} - \frac{1}{h(x)} \right) + C_2 \quad (2.12)$$

Para determinar C_2 e h_0 escolhemos as condições de contorno $p(x_1) = 0$ com $h(x_1) = h_1$ e $p(x_2) = 0$ com $h(x_2) = h_2$.

$$h_0 = 2 \frac{h_2 h_1}{h_2 + h_1} \quad (2.13)$$

$$C_2 = \frac{6U\eta}{\alpha} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{h_1}{h_2} \frac{1}{h_2 + h_1} \right) = \frac{6U\eta}{\alpha} \left(\frac{1}{h_1} - \frac{h_2}{h_1} \frac{1}{h_2 + h_1} \right) \quad (2.14)$$

Obtemos então a expressão da distribuição de pressão para duas superfícies em cunha de largura infinita.

$$p(x) = \frac{6U\eta}{\alpha} \frac{(h_1 - h(x))(h_2 - h(x))}{(h_1 + h_2)h(x)^2} \quad (2.15)$$

A capacidade de carregamento de um mancal de largura infinita B pode ser calculado integrando a expressão anterior:

$$F = B \int_{x=0}^{x=l} p(x) dx \quad (2.16)$$

A expressão da distribuição de pressões pode ser calculada a partir da equação de Reynolds para diversos tipos de contatos em mancais, cada qual com sua característica específica.

2.2.2.2 Lubrificação Elastohidrodinâmica

Nesse tipo de lubrificação ocorre pressão de contato elevada, as geometrias de contato não são conformes e o filme de lubrificante tem espessura que varia entre $0,1\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$. Uma grande diferença entre a lubrificação hidrodinâmica e a elastohidrodinâmica é que ocorre deformação plástica dos corpos em contato, e ocorrem mudanças na viscosidade do fluido devido a carga aplicada. Portanto nem todas as premissas adotadas para o equacionamento dos contatos hidrodinâmicos podem ser aplicadas.

No regime EHD existe sempre um filme fluido separando as superfícies de contato, portanto ocorre atrito apenas no filme de fluido e não ocorre o contato de superfícies. A zona central do filme fluido entre as duas superfícies se comporta como um sólido devido as elevadas pressões, e as zonas próximas as superfícies de contato se comportam como camadas viscosas. O atrito no filme fluido ocorre no caso do EHD entre essas duas zonas. Portanto o lubrificante atua tanto como um corpo sólido elástico e um fluido viscoso, comportamento de um fluido não Newtoniano.

Nos contatos em que ocorre EHD, as pressões elevadas podem ser modeladas como pressões de Hertz. Para isso consideramos que o material é homogêneo no regime elástico, a tensão aplicada é normal ao plano de contato, a área de contato é muito menor que as dimensões dos corpos. Também consideramos os corpos em equilíbrio e a rugosidade superficial pode ser considerada desprezível. A seguir um gráfico demonstrando a distribuição de pressão em um regime EHD.

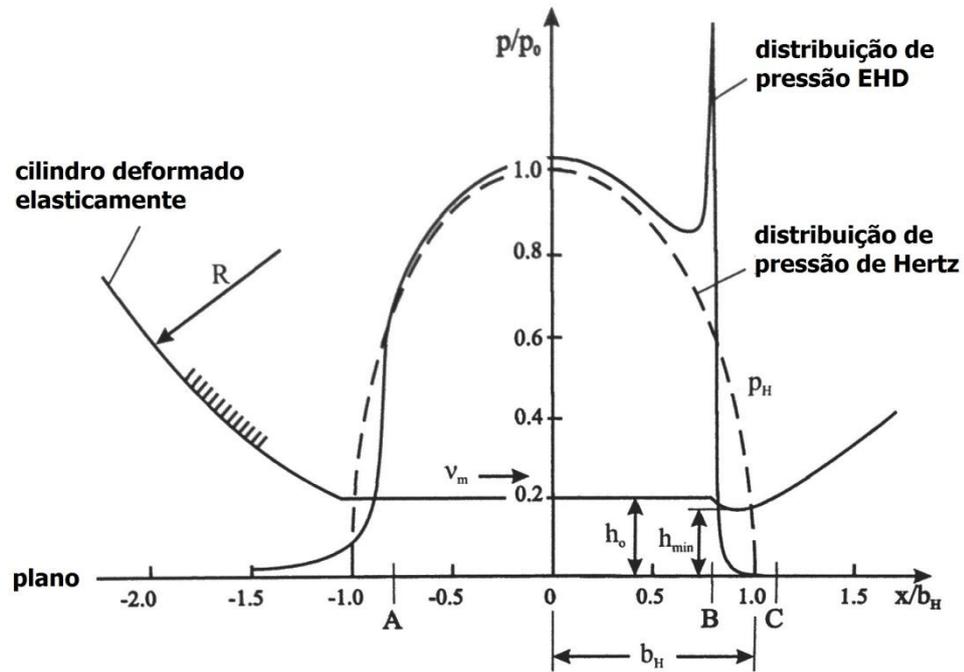


Figura 2.7 Curva de distribuição de pressão para contato EHD. Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

Observamos que na saída do contato lubrificado, ocorre um aumento da pressão formando um pico logo antes do ponto mais estreito do contato, e logo após esse pico, a pressão cai bruscamente voltando a valores ambientes. Esse aumento de pressão provoca um aumento na viscosidade do fluido e deformações elásticas nos corpos em contato, resultando num aumento da espessura do *gap* entre as superfícies.

Fatores que influenciam a curva de distribuição de pressão são a velocidade relativa, a carga e o lubrificante aplicado. Em cargas elevadas, ocorre o predomínio de deformações elásticas, aproximando a distribuição de pressão para a curva de Hertz. Em velocidades relativas elevadas, a pressão máxima tende a se deslocar mais ao centro da curva. As propriedades do lubrificante selecionado influenciam na distribuição da pressão e no pico de pressão principalmente devido a viscosidade e a composição do lubrificante.

Para o cálculo da espessura média do filme de lubrificante para o contato EHD, um dos modelos mais utilizados é o de DOWNSON.

$$h_0 = R. (g_1. G^{g_2}. U^{g_3}. W^{-g_4}) \quad (2.17)$$

Raio de curvatura reduzido:

$$R = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (2.18)$$

Modulo de elasticidade reduzido:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2.19)$$

Parâmetro de elasticidade (com α_p coeficiente de viscosidade-pressão):

$$G = \alpha_p \cdot E' \quad (2.20)$$

Parâmetro de velocidade:

$$U = \frac{\eta_0 \cdot u_s}{2 \cdot E' \cdot R} \quad (2.21)$$

Parâmetro de carregamento:

$$W = \frac{F_N}{l_{ef} \cdot E' \cdot R} \quad (\text{contato em linha}) \quad (2.22)$$

$$W = \frac{F_N}{E' \cdot R^2} \quad (\text{contato em ponto}) \quad (2.23)$$

Os coeficientes g_1 , g_2 , g_3 e g_4 são tabelados para os contatos em linha e em ponto:

Tabela 2.1 Coeficientes para o calculo de h_0 . Fonte: Jacobs, G. Lecture documentation Tribology 2012

Tipo de contato	Autor	g1	g2	g3	g4
Linha	Downson	1.60	0.60	0.70	0.13
	Ertl/Grubin	1.95	0.73	0.73	0.091
	Crook	2.14	0.75	0.75	0.125
	Hamrock/ Dowson	2.69	0.53	0.67	0.067
Ponto	Archard	1.40	0.74	0.74	0.074
	Hamrock/ Dowson	1.90	0.53	0.67	0.067
	Cheng	2.21	0.725	0.725	0.058
	Cameron	5.81	1.00	1.00	0.33

Observamos que para o cálculo da espessura de filme de lubrificante, o parâmetro de velocidade U é elevado a uma potência g_3 de ordem de até 10 vezes maior do que a potência g_4 do parâmetro de carga W . Portanto podemos concluir que a variação da velocidade tem uma influência maior na espessura de filme de lubrificante em contatos EHD.

2.3 Texturização de superfícies

A texturização é uma técnica que modifica a superfície, produzindo padrões de dimples para melhorar o comportamento tribológico de uma superfície. Atualmente diversas técnicas são usadas em pesquisas que tem como meta descobrir como dimples podem ser utilizados para melhorar a interação entre superfícies(ETSION, 2005a).

2.3.1 Efeitos tribológicos dos dimples

A utilização de superfícies texturizadas em situações com contatos lubrificados, como selos mecânicos, mancais de rolamento, entre outros, mostram algumas vantagens. Em um regime de lubrificação hidrodinâmica com a presença de dimples, verifica-se que ocorre um efeito adicional de sustentação, além da pressão proveniente do mecanismo de lubrificação(ETSION; HALPERIN, 2002). Segundo ETSION (ETSION, 2005) isso se deve ao mecanismo de micro-mancais hidrodinâmicos que é presente nos dimples. Esse efeito ocorre pois os dimples produzem uma assimetria no perfil de pressão hidrodinâmico, gerado por cavitações nas cavidades dos dimples, que é exemplificado a figura 2.8.

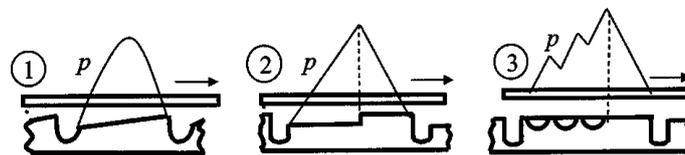


Figura 2.8 - Exemplo de perfil de distribuição de pressão em um mancal de rolamento: 1) com superfície lisa 2) com superfície em degraus e 3) com superfície texturizada. Fonte: adaptado Etsion, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. Journal of Tribology

ETSION e KLIGERMAN (KLIGERMAN et al., 2005) realizaram experimentos com selos mecânicos texturizados, estudando diferentes parâmetros de texturização. Foi proposto um modelo de texturização completa e outro de texturização parcial (Figura 2.9 - Segmentos de anéis de pistão texturizados: (a) texturização completa e (b) texturização parcial. Fonte: adaptação de), que resultam em dois efeitos diferentes na lubrificação:

- O efeito individual ocorre na texturização completa, onde cada dimple gera uma capacidade adicional de sustentação. A sustentação hidrodinâmica

significativa ocorre apenas em situações onde temos a razão entre largura e comprimento na região de contato menor do que 0.5.

- O efeito coletivo dos dimples ocorre na texturização parcial de uma superfície, e gera sustentação hidrodinâmica significativa para contatos com razão entre largura e comprimento maiores do que 0.5.

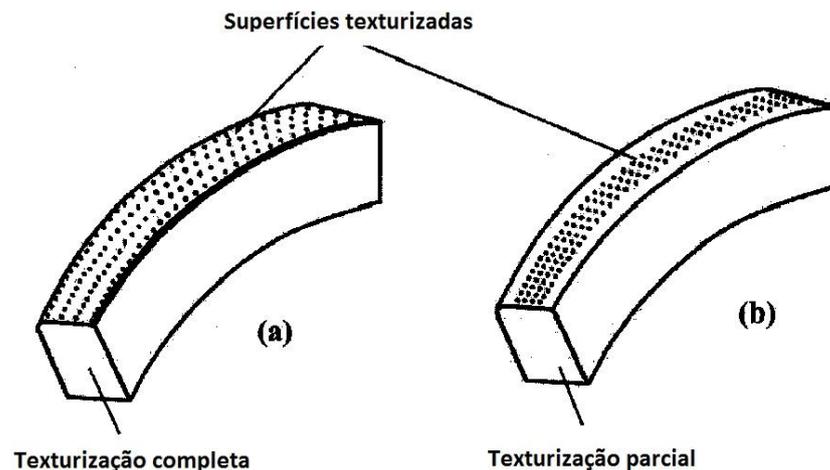


Figura 2.9 - Segmentos de anéis de pistão texturizados: (a) texturização completa e (b) texturização parcial. Fonte: adaptação de Kligerman, Y.; Etsion, I.; et al. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. Journal of Tribology, 2005

Outro mecanismo importante dos dimples é o de micro-reservatório de lubrificante, onde cada micro-cavidade funciona como um reservatório, promovendo proteção as superfícies em contato contra o desgaste. Para que esse mecanismo possa funcionar, a razão de aspecto deve ser pequena, da ordem de 0.1 e 0.2, segundo ETSION, RYK e KLIGERMAN (RYK et al., 2002), para que o escoamento de lubrificante para fora dos dimples seja facilitado. A eficiência desse mecanismo é maior com lubrificantes de baixa viscosidade, para maior facilidade do escoamento desse lubrificante para fora dos dimples.

Podemos citar também o mecanismo capturador de debris de um dimple, que ocorre devido ao seu potencial de armazenar partículas de capacidade abrasiva presentes nos contatos entre superfícies lubrificadas dentro de sua microcavidade, melhorando a resistência ao desgaste do contato mecânico.

Todos os mecanismos mencionados, são influenciados por uma serie de fatores relacionados aos dimples, desde a área da superfície de contato coberta por dimples, ao diâmetro, profundidade, formato, distribuição e material. No item 2.2.3 podemos analisar

alguns estudos mostrando por meio de resultados experimentais e simulações a influência desses fatores.

2.3.2 Análise do efeito tribológico dos Dimples

Dimples são micro cavidades que podem tomar diversas formas quando produzidos sobre uma superfície. O formato mais comumente estudado é o semiesférico, que pode ser observado na Figura 2.10 Esquema de dimple esférico sendo que outros formatos podem ser produzidos.

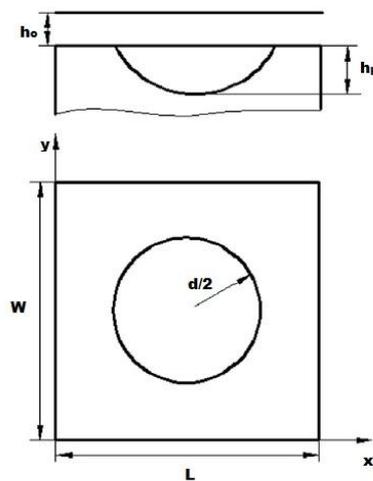


Figura 2.10 Esquema de dimple esférico

Podemos encontrar estudos experimentais e analíticos que mostram os efeitos da texturização de superfícies no coeficiente de atrito de contatos mecânicos.

Testes com superfícies texturizadas em mancais de rolamento, que possuem contatos entre superfícies metálicas em condições extremas de temperatura e pressões de contato elevadas, também foram realizados por ETSION (ETSION, 2005b). Em um experimento, mancais de rolamento simples de uma bomba foram texturizados parcialmente e o coeficiente de atrito do contato entre as superfícies do mancal foi medido para uma condição de 1500 a 3000 rpm com lubrificação pela água do próprio processo das bombas. Os resultados mostraram uma melhora na capacidade de sustentação adicional nos mancais em que havia presença dos dimples. Essa capacidade adicional chegou a produzir uma separação entre as superfícies devido a lubrificação hidrodinâmica três vezes maior do que com o mancal não texturizado, podendo comparar o mancal com dimples a mancais mais complexos com

superfícies em degraus. Além da separação das superfícies, identificou-se também um coeficiente de atrito três vezes menor nas superfícies texturizadas.

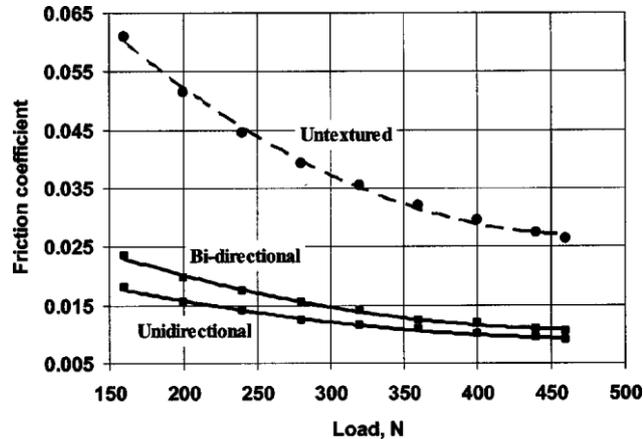


Figura 2.11 Comparação de resultados entre mancais texturizados e não texturizados. Fonte: (ETSION, 2005b).

Testes de caráter investigativo em corpos de prova mais simplificados são realizados também para encontrar parâmetros de texturização que sejam ótimos para certos tipos de materiais.

TANG W.(TANG et al., 2013) realizou testes de atrito em um tribômetro linear com uma amostra de aço alta liga com dureza HRC 62 contra uma superfície texturizada de aço carbono com dureza HRC 20, em regime de lubrificação completa. Foram testadas superfícies texturizadas com dimples de diâmetro 300 μ m, 500 μ m, 700 μ m e 50 μ m de profundidade, com uma cobertura de área de 2%, 5%, 10% e uma superfície não texturizada para controle. Foi aplicada uma força de 150 N, velocidade média de 0,24m/s a temperatura ambiente e com lubrificante de viscosidade dinâmica de 0.04678 Pa.s. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 2.12, mostram que das superfícies testadas, as texturizadas apresentaram menores coeficientes de atrito no experimento, sendo que a configuração de 5% mostrou um coeficiente de atrito de 0.08, 38% menor do que a amostra não texturizada.

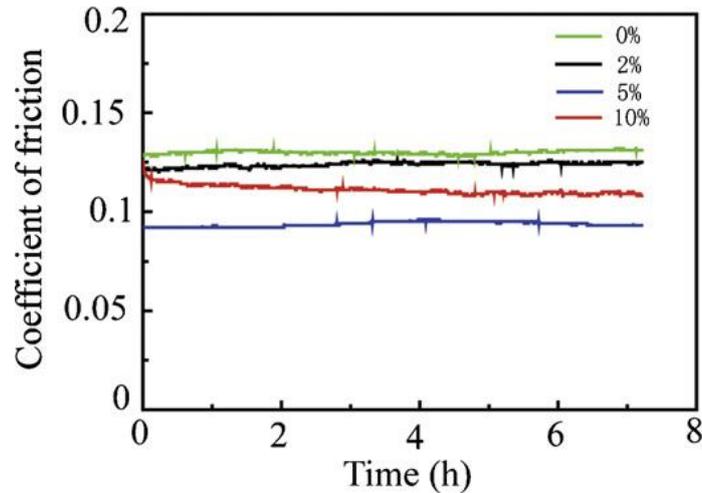


Figura 2.12 Variação do coeficiente de atrito com o decorrer do teste tribológico. Fonte: (TANG et al., 2013)

Quanto ao desgaste, as configurações texturizadas mostraram menores índices e a configuração de 5% mostrou menores partículas de desgaste após o teste. Esses resultados indicam que a texturização claramente influencia nos níveis de atrito e desgaste de contatos mecânicos.

Segundo WANG diversos estudos experimentais (WANG et al., 2014) conduzidos com densidades de dimples variados sugerem que para pares metálicos lubrificados por óleo, as distribuições entre 5% e 13% são preferíveis para redução do coeficiente de atrito, e uma área com densidade acima de 20% pode gerar aumento nesse coeficiente. Mas se a intenção é a diminuição do coeficiente de atrito em situações de lubrificação limítrofe, uma alta densidade de dimples pode resultar em uma boa performance tribológica devido ao mecanismo de reservatório de lubrificante dos dimples.

WANG também realizou estudos (WANG et al., 2014) para identificar a influência da orientação dos dimples em relação a direção do deslocamento. Em uma análise por elementos finitos, resultados indicam uma concentração de tensões nas bordas dos dimples quando essas são perpendiculares à direção de deslocamento, o que pode ser observado na Figura 2.13. Quando as bordas estão alinhadas com o deslocamento, as pressões são praticamente inexistentes nas bordas. Essa concentração de tensões é causada pela descontinuidade na pressão devida a mudança brusca do perfil da superfície e também devido ao deslizamento. Esse efeito é mais significativo, quando o dimple tem formatos não circulares.

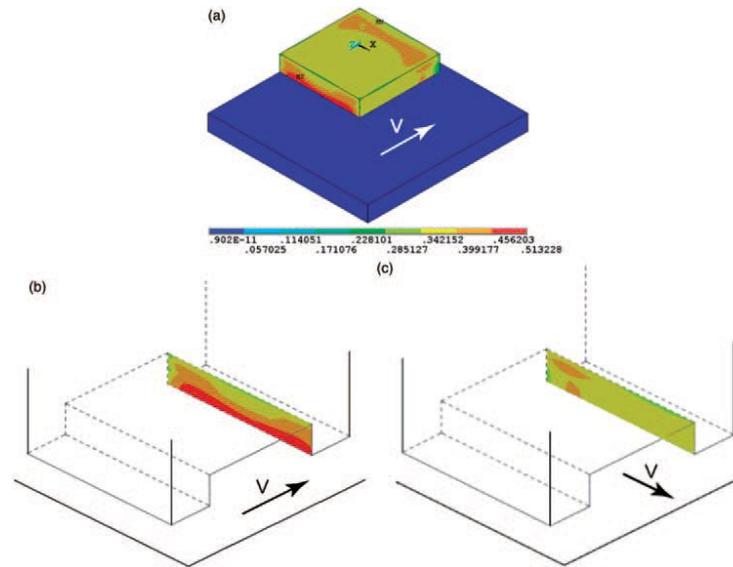


Figura 2.13 Análise por elementos finitos mostrando as tensões nas bordas dos dimples com diferentes orientações em relação ao deslocamento. Fonte (WANG et al., 2014)

No mesmo estudo, simulações foram feitas para comparar o efeito da dureza do material texturizado combinado com a densidade da texturização. A simulação foi feita desprezando o efeito de rugosidade da superfície e com um dimple de 50 μm de diâmetro. Para o material de alta dureza, foi usado SiC com módulo de Young $E=450\text{GPa}$ e para baixa dureza UHMWPE com $E=0.69\text{GPa}$, ambos deslizando contra uma superfície de aço 316 de $E=199\text{GPa}$. Os resultados mostram que as tensões são mais elevadas nas bordas no caso do material de maior dureza (SiC), e no caso do material menos duro, as tensões se encontram mais espalhadas ao redor da borda do dimple, sendo que isso ocorre apesar das pressões de contato médias serem as mesmas. Portanto nas superfícies mais duras com uma maior densidade de dimples, temos uma maior área sobre elevadas tensões, o que pode levar a deformações e aumento nos níveis de atrito. Assim, WANG conclui que para materiais de elevada dureza, o nível ótimo de densidade de dimples será menor do que em materiais de dureza mais baixa.

2.3.3 Fabricação

2.4 Estruturação a laser

A técnica LST provavelmente é a técnica mais usada atualmente para a produção de dimples por sua rapidez e eficiência. Com essa tecnologia, é possível variar os parâmetros do feixe laser para obter diferentes tamanhos e geometrias de dimples em superfícies variadas.

O feixe de laser é focado na superfície do material e sua energia é absorvida pelos elétrons na camada superficial do material. Isso provoca a agitação desses elétrons, dissipando calor. O material influencia na performance do laser, sendo que dependendo da absorvidade do material, a profundidade de penetração da energia proveniente do feixe de laser é diferente. Nessa profundidade que ocorre a difusão térmica.

A duração do pulso de laser é muito importante e pode definir como o processo de remoção de material ocorre. Em lasers do tipo “short-pulse”, com duração do pulso da ordem de nanosegundos, a energia é focada na superfície e é absorvida pelo material, aquecendo-o rapidamente e resultando no derretimento e em seguida vaporização do material. Portanto ocorre a remoção do material, sendo que cada pulso pode originar um dimple, mas também uma região irregular no entorno do dimple afetada pela refusão do material.

Em lasers do tipo “ultra-short-pulse”, com duração do pulso de ordem abaixo de 100 femtosegundos, a energia é absorvida pelos elétrons na superfície mas a duração do pulso é tão curta que a difusão de energia no material é impedida. Isso resulta na evaporação direta do material na superfície. A remoção de material comparada ao laser de nanosegundo é mais lenta, porém não existe região afetada pela refusão, trazendo portanto melhor precisão e qualidade na produção de dimples. A apresenta um esquema de como ocorre a remoção do material nos lasers "short pulse" e "ultra short pulse".

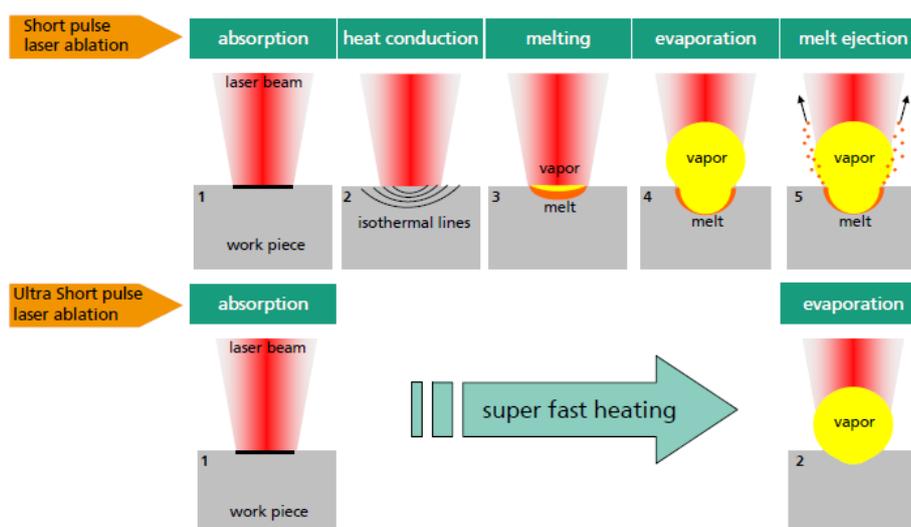


Figura 2.14 Esquema reproduzindo os tipos short e ultra-short pulse(CAPES, 2012)

2.5 Ensaios tribológicos

Para análise e otimização do processo de atrito e desgaste em materiais, componentes e construções, é necessário ter métodos de medição e técnicas para teste que trazem resultados compreensivos (JACOBS, 2012). Por mais que a tecnologia de testes tribológicos e os métodos de análise sejam de alto padrão, ainda existe grande insegurança em transferir resultados medidos para outros sistemas de testes ou componentes e estruturas reais. Portanto resultados encontrados devem ser aplicados apenas para o caso individual analisado. É recomendado que as condições dos testes sejam as mais próximas possíveis das condições reais.

Testes tribológicos podem ser divididos nas 6 categorias observadas na Tabela 2.2, segundo a norma DIN 50322.

Tabela 2.2 Categorias de testes tribológicos

Categoria	Descrição
I	Teste de campo
II	Teste em bancada com sistema completo
III	Teste de bancada com parte do sistema ou grupos de componentes
IV	Teste com modelos em escala menor ou sem mudanças dos componentes
V	Teste com cargas similares em corpos de prova
VI	Teste de modelo em corpos de prova simplificados

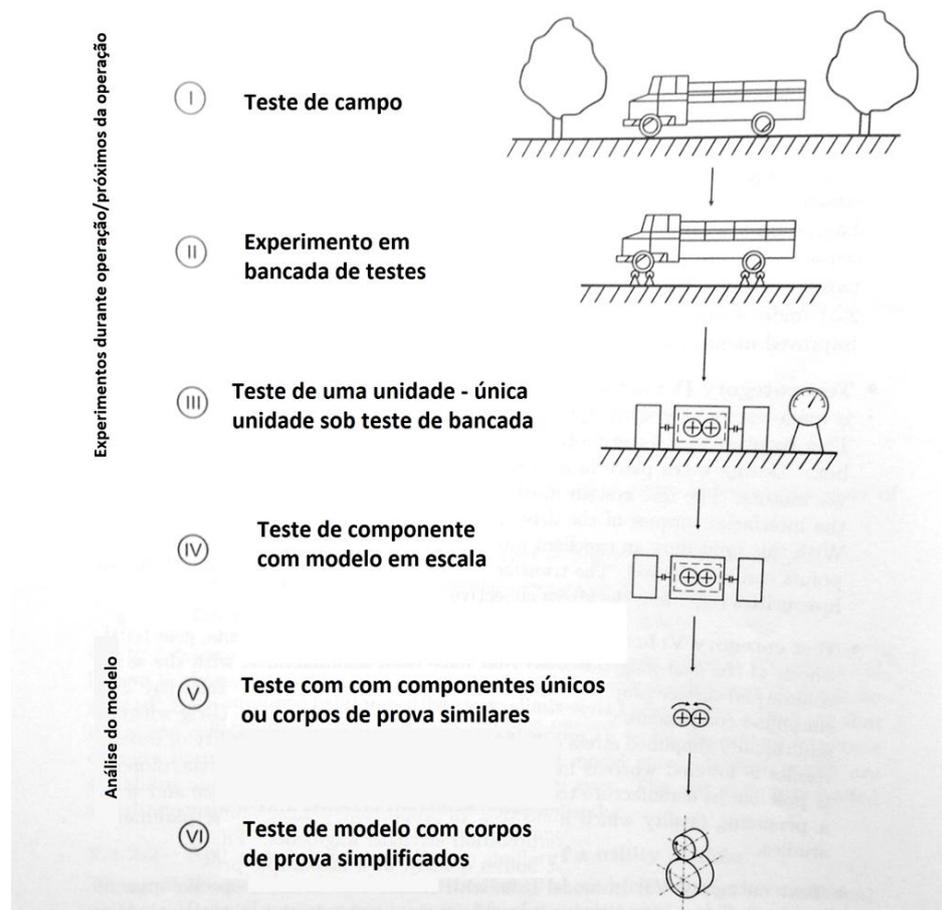


Figura 2.15 Exemplos de categorias de testes. Adaptado de (JACOBS, 2012)

2.5.1 Testes de modelos simplificados

Os chamados tribômetros são usados na categoria VI de testes, onde modelos simplificados de baixo custo são utilizados. O teste de um componente real ou um sistema completo geralmente traz custos elevados, portanto tribômetros são muito utilizados por produzirem resultados satisfatórios a baixo custo.

O conhecimento da geometria de contato e o tipo de movimento são um pré-requisito para a seleção do tribômetro. Essa seleção é de grande dificuldade para encontrar um sistema que seja compatível e representativo para o sistema tribológico que desejamos testar.

Podemos observar na Figura 2.16 os principais tipos de tensões que podem ser aplicadas e que devem ser simuladas.

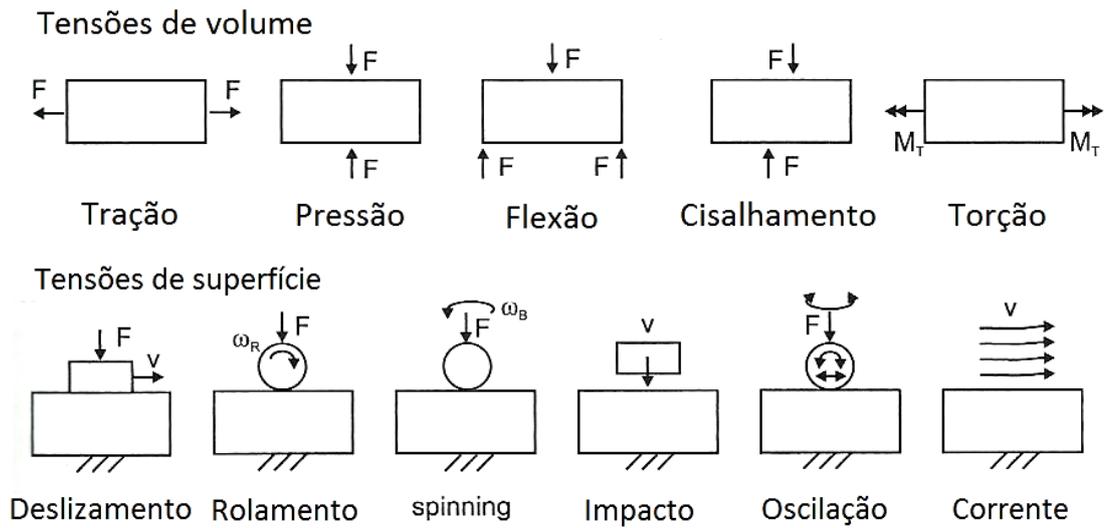


Figura 2.16 Tipos de tensões. Adaptado de (JACOBS, 2012)

É importante também saber o regime de desgaste que ocorre no sistema tribológico real para que o efeito comparativo seja significativo. Assim o tribômetro é construído para simular todos os parâmetros relevantes para o sistema a ser testado. Essas máquinas podem apresentar diversas configurações, como exemplificado na Figura 2.17.

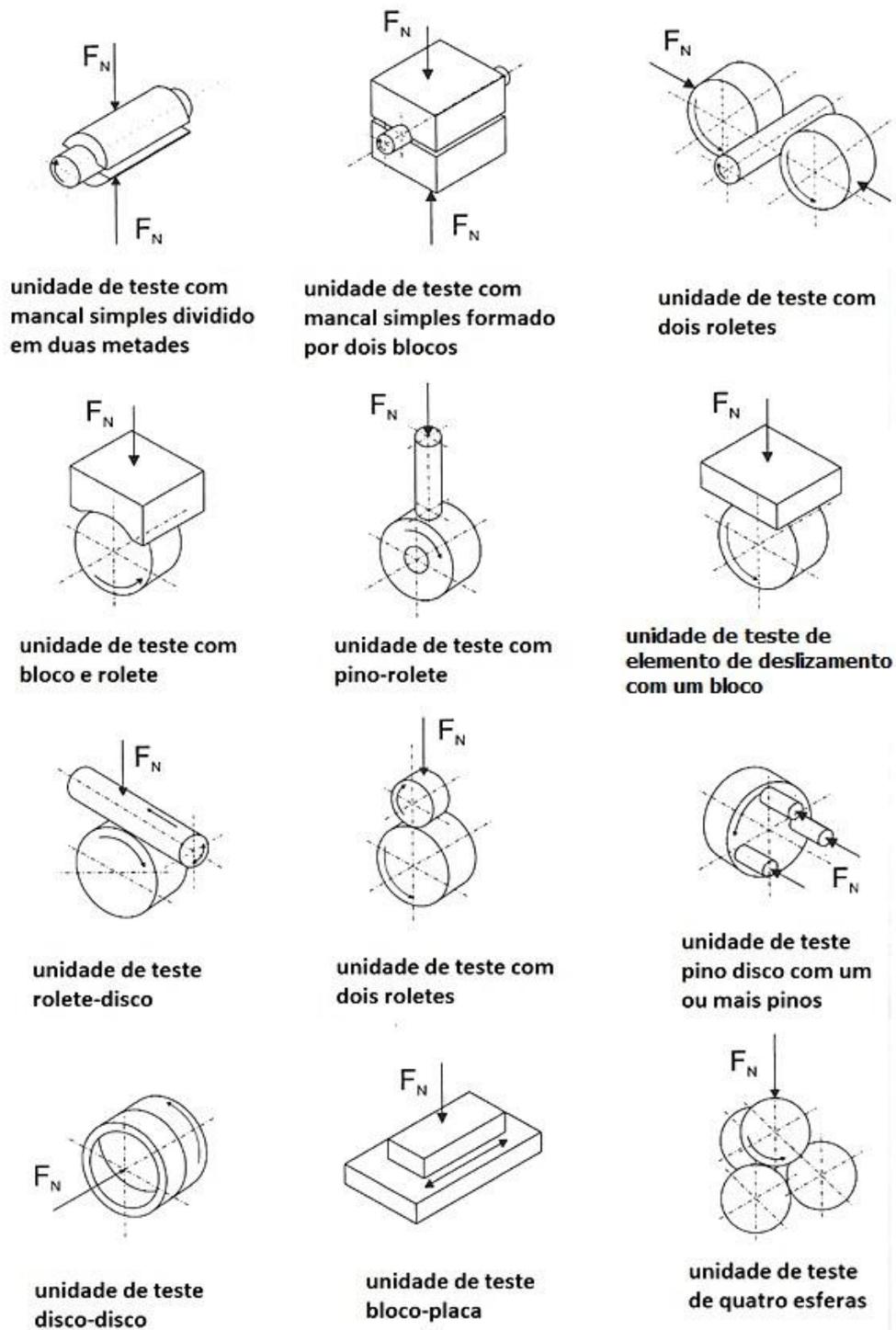


Figura 2.17 Tipos de contatos usados em tribômetros. Adaptado (JACOBS, 2012)

3 Materiais e métodos

O objetivo desse trabalho é investigar o efeito da texturização de superfícies pelo método LST no coeficiente de atrito de uma superfície de metal duro. Para isso foram propostos dois ensaios com abordagens diferentes, um no instituto Fraunhofer IPT na Alemanha e outro no Laboratório de Fenômenos de Superfície da USP .

No ensaio realizado no Fraunhofer IPT, aplicou-se diferentes carregamentos a velocidade constante e observou-se o comportamento do coeficiente de atrito para diferentes distribuições e diâmetros de dimples, Nesse ensaio, os dimples foram estruturados com laser de picosegundo, sem região irregular afetada pela refusão(rebarbas). Foi usado fluido de lubrificante durante o ensaio, porem sem controle de temperatura.

No ensaio realizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície, o carregamento foi constante e variou-se a velocidade em degraus observando o coeficiente de atrito para distribuições de dimples diferentes. Foi usado óleo lubrificante mineral simples, com controle de temperatura. Os dimples foram fabricados com laser de nanosegundo, e portanto possuíam uma região irregular no entorno dos dimples.

3.1 Ensaio no instituto Fraunhofer IPT

3.1.1 Corpos de prova e lubrificante

Os corpos de prova utilizados foram discos de metal duro e pinos de aço, projetados para serem utilizados com um tribômetro pino disco. As características dos materiais são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 3.1 Características do disco

Material do disco	Metal Duro ISO P25
WC	68%
TiC Ta(Nb)C	22,0%
Co	10,0 %
Transverse Rupture Strenght	2000 N/mm2
Densidade	12,5 (g/cm3)
Dureza	91,3 HRA
Diâmetro	55 mm
Massa	129 g

Tabela 3.2 Características do pino

Material do Pino	Aço 1.3505 DIN (Misumi)
Dureza	HRC58 - 653HV
Massa	0,34 g
Diâmetro	2 mm

O teste foi realizado com a presença de lubrificante, e foi utilizado fluido de corte de modo a simular uma das condições de uma ferramenta de corte de metal duro. As características do óleo “Blaser B-Cool 9665, Art 19665-01” são apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 3.3 Características do fluido lubrificante

	Água
Características	Livre de cloro
	Semi sintético
	Baixo teor mineral
	Baixa produção de espuma
	Boa estabilidade
	Utilizado para usinagem pesada
	Viscosidade dinâmica 14 mm ² /s (40°C)
	ASTM D445

3.1.2 Tribômetro pino disco

O tribômetro escolhido para testar os corpos de prova desse estudo foi o pino-disco. Esse tipo de contato simula tensões no deslizamento e permite uma área pequena de contato, gerando altas pressões.

O modelo utilizado foi o TRM 500 da WAZAU adaptado para realizar testes pino disco.

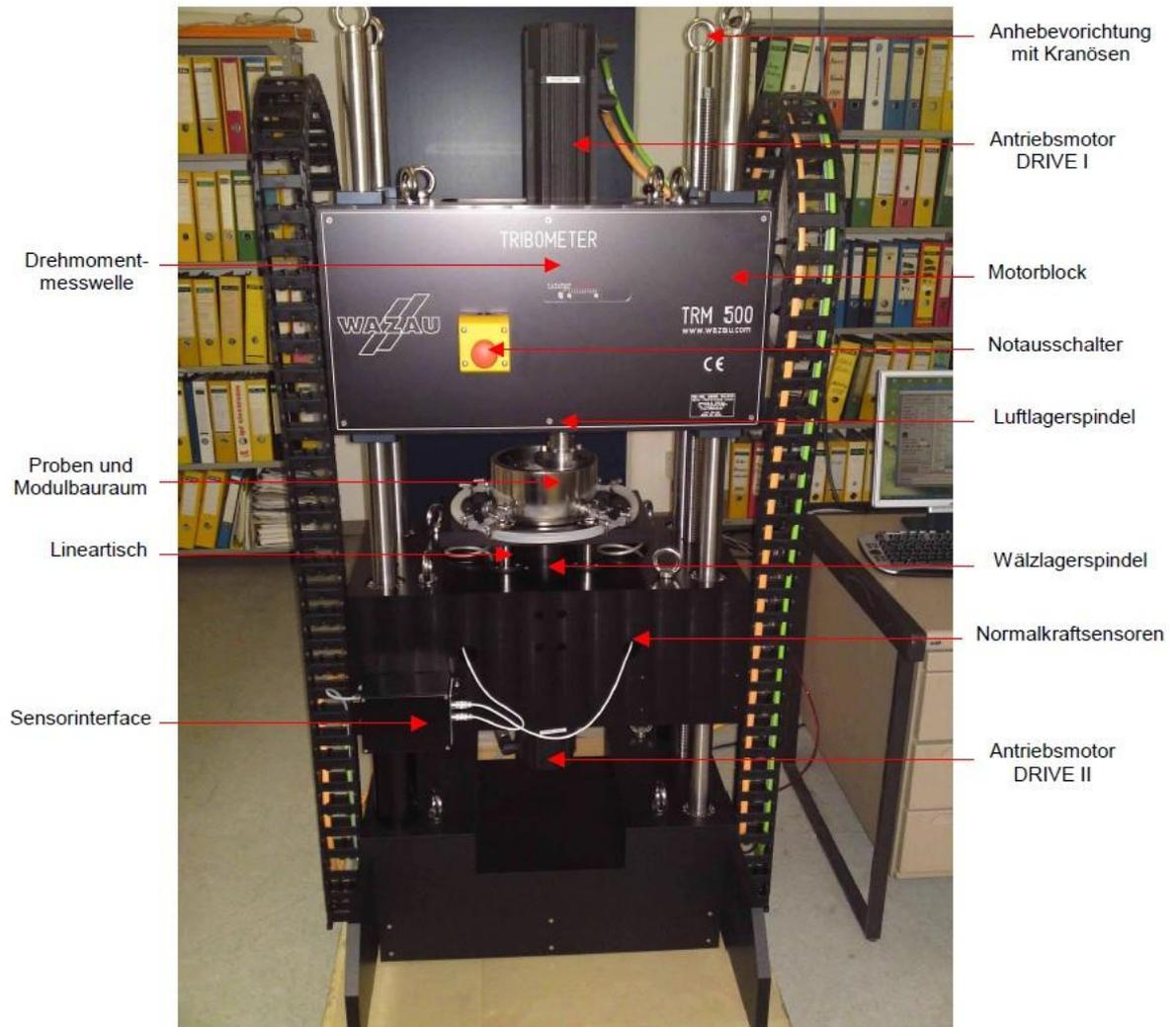


Figura 3.1 Tribômetro WAZAU TRM 500

Nesse modelo ambos os eixos, superior e inferior, podiam ser controlados alterando velocidade aplicada de 0 a 6000min⁻¹. O eixo superior aplica a força normal na superfície com auxílio de molas ativadas por controle eletrônico, atingindo forças de 5 a 500N. As informações de Torque, força normal e coeficiente de atrito são captadas por sensores no eixo superior e enviadas a um software que faz a análise dos dados. As informações coletadas podem ser exportadas para análise em maior detalhe. A figura a seguir mostra a tela do programa utilizado para coletar os dados do tribômetro. É possível acompanhar a captação de dados em tempo real. Anexo a este trabalho se encontra a ficha de especificação desse tribômetro.

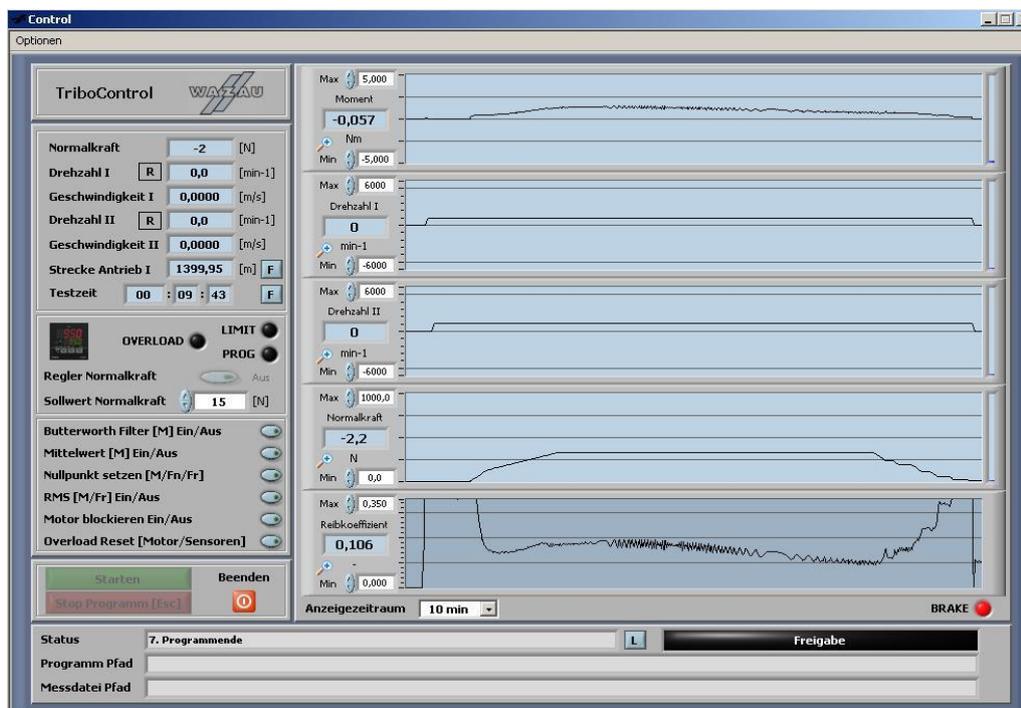


Figura 3.2 Tela do software de controle do tribômetro

O tribômetro disponível foi adaptado de uma configuração disco-disco para pino-disco, e portanto apresentava uma configuração invertida em relação a tribômetros pino-disco tradicionais. O disco foi fixado no cabeçote superior, que sofria rotação enquanto o pino foi fixado na mesa inferior, com o eixo fixo. Esse fato impediu, devido a ação da gravidade, que a lubrificação do sistema fosse completa, limitando apenas a uma lubrificação limítrofe e com isso dificultando a análise do mecanismo de mancais hidrodinâmicos dos dimples.

3.1.3 Distribuição e geometria dos dimples

Para a realização do maior número possível de testes por disco, foram produzidas três trilhas estruturadas com dimples em cada disco. Para a produção dos dimples foi utilizado um laser de pulsos de picosegundo adaptado a uma micro-fresadora Kern. Os detalhes do equipamento se encontram em anexo.

A divisão em trilhas é relevante para utilizar o corpo de prova no tribômetro visto que ele possui um dos eixos com possibilidade de movimentação na direção horizontal, habilitando a realização de vários testes por disco. Cada trilha têm características únicas, como a densidade dimples por área diferente. Além da densidade, foi variado o diâmetro dos dimples, utilizando 100 μm e 50 μm . As imagens a seguir exemplificam o layout utilizado.

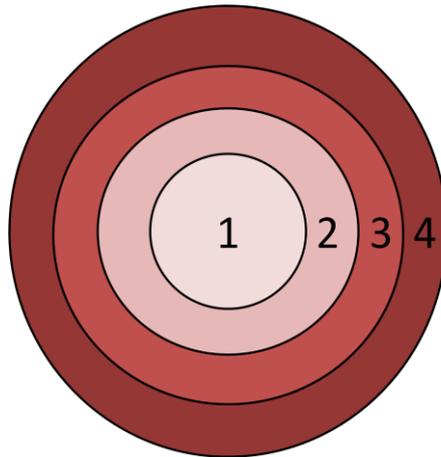


Figura 3.3 Esquema do corpo de prova utilizado

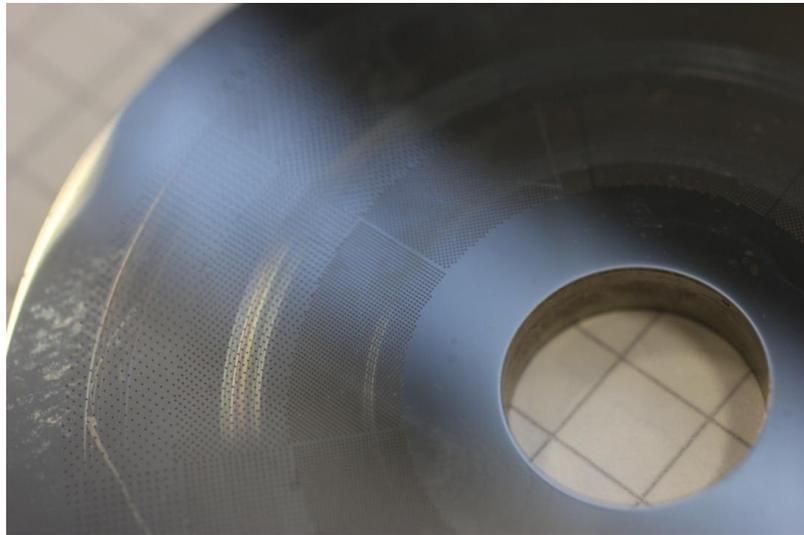


Figura 3.4 Corpo de prova usinado com dimples

A densidade de dimples em % (ou distribuição, cobertura) significa a área coberta por dimples em referência a área total. Podemos calcular a cobertura para um padrão linear de dimples segundo o esquema da Figura 3.5.

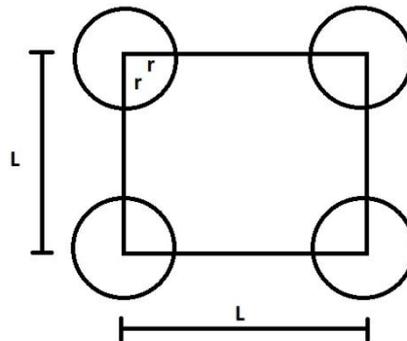


Figura 3.5 Esquema da cobertura de uma área por dimples em padrão linear

$$Area\ coberta = \frac{\pi \cdot r^2}{L^2} \quad (3.1)$$

Para os corpos de prova do experimento, foram utilizadas as seguintes distribuições em cada trilha de dimples segundo a Tabela 3.4

Tabela 3.4 Característica trilha

Area texturizada %	Trilha
25	4
10	3
5	2
0 (controle)	1

Em seguida imagens feitas com auxílio de um microscópio das superfícies texturizadas com cada uma das distribuições utilizadas nos ensaios e os perfis dos dimples de 50 μm e 100 μm de diâmetro e 10 μm de profundidade.

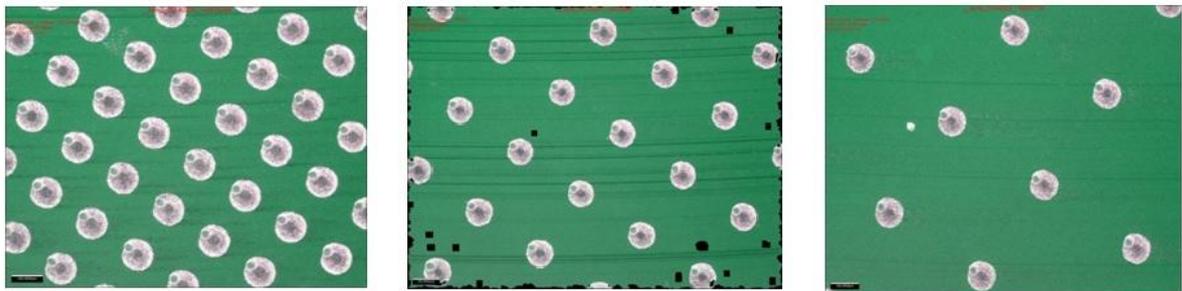


Figura 3.6 Distribuições de 25%, 10% e 5%

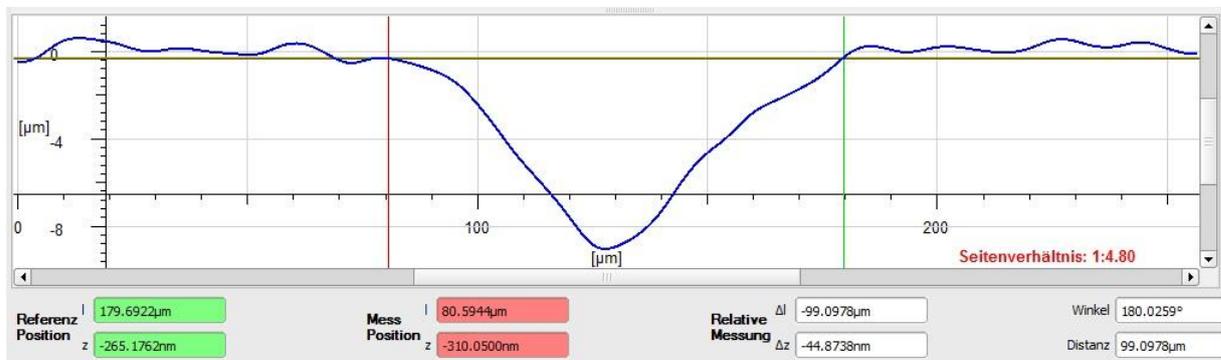


Figura 3.7 Dimple de 100 μm

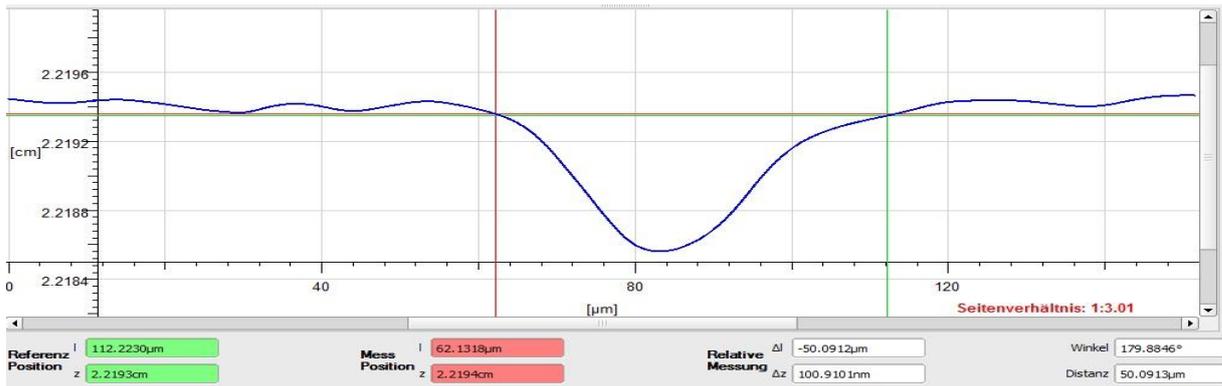


Figura 3.8 Dimple de 50 μm

3.1.4 Parâmetros dos testes

Foram estruturadas 6 faces de discos de metal duro, cada um com 55mm de diâmetro e um furo no centro para fixação. Cada ensaio consistia em variar a força normal aplicada de forma a dobrar seu valor a um intervalo de 30 minutos. As forças utilizadas foram 50N, 100N, 200N e 400N. A velocidade foi mantida constante a 100rpm durante todo o ensaio e a temperatura durante a realização do ensaio foi a ambiente, próxima dos 20°C. Cada configuração ensaiada para as trilhas estruturadas foi repetida 3 vezes. Foi ensaiado também um disco sem estruturação para controle.

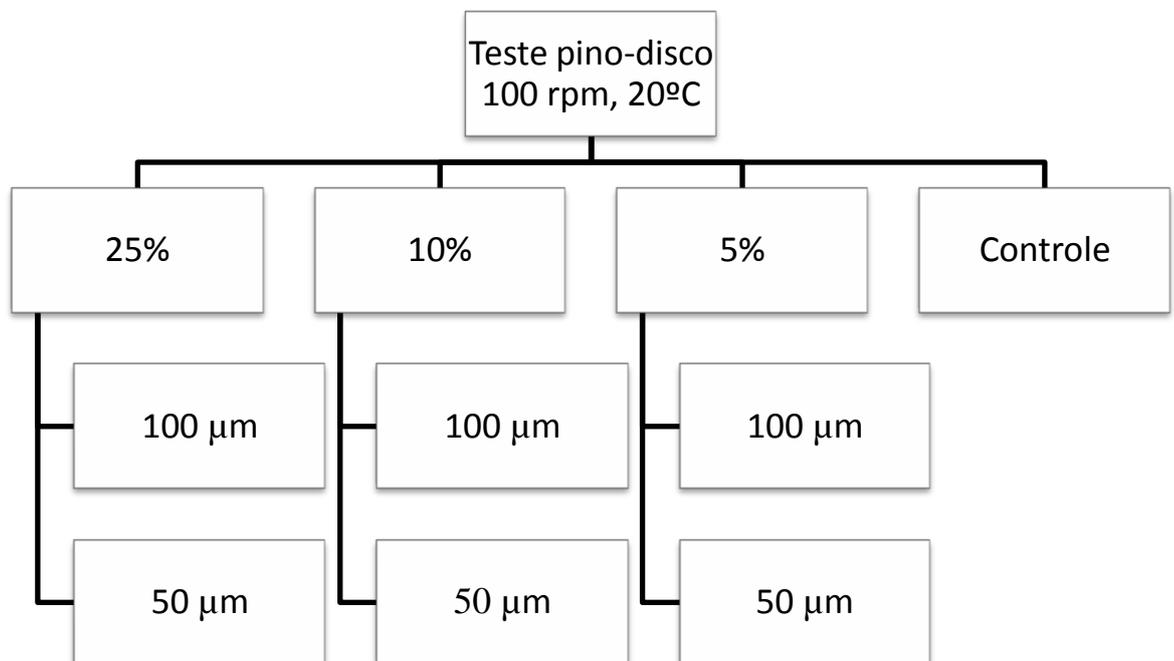


Figura 3.9 Organograma dos ensaios realizados

3.1.5 Procedimento experimental

3.1.5.1 Caracterização

Antes da realização do ensaio foi feita a caracterização da superfície das amostras de modo a acompanhar parâmetros de rugosidade e identificar a ocorrência de desgaste nas peças após a realização do ensaio. Para essa caracterização, foi utilizado um equipamento de microscopia 3D, registrando imagens das trilhas e dos pinos.

São registradas imagens de mesma área em cada uma das trilhas ensaiadas nos 4 quadrantes dos discos.

3.1.5.2 Teste pino disco

O teste pino disco foi realizado de acordo com a norma ASTM G99 (ASTM, 2010) e o procedimento para a realização do teste é explicado a seguir.

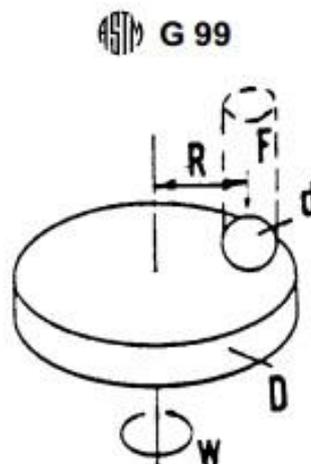


Figura 3.10 Esquema de contato pino-disco

Corpo de prova e pino foram higienizados e posteriormente lavados em banho de ultrassom por cerca de 10 minutos para retirar todas as impurezas, e em seguida completamente secos por um soprador de calor. Amostras foram pesadas em seguida em balanças eletrônicas de alta precisão, sendo que o modelo utilizado foi o Mettler at201.



Figura 3.11 Balança Mettler AT201

O disco e o pino foram fixados em seus devidos suportes, sendo o pino perpendicular ao disco e com o seu maior eixo na vertical. Deve se verificar a perpendicularidade do disco a ser ensaiado medindo sua inclinação com um relógio comparador, e no caso de desvio maior que $\pm 1^\circ$, devemos ajustar a fixação para que o disco esteja perpendicular ao pino. O pino, no caso de superfície com acabamento irregular, deve ser assentado com o auxílio de uma lixa.



Figura 3.12 Imagem do pino e disco fixados

Após a fixação, foram selecionados a carga a ser aplicada, a velocidade de rotação do eixo e o tempo de ensaio. Após o termino do ensaio, foi executado novamente o processo de limpeza, pesagem e foram refeitas a caracterização das trilhas e do pino ensaiados.

3.2 Ensaio no Laboratório de Fenômenos de Superfície - USP

3.2.1 Corpos de prova e lubrificante

Os corpos de prova utilizados foram os mesmos discos de metal duro e esferas de aço, projetados para serem utilizados com um tribômetro esfera disco. As características dos materiais são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 3.5 Características do disco

Material do disco	Metal Duro ISO P25
WC	68%
TiC Ta(Nb)C	22,0%
Co	10,0 %
Transverse Rupture Strenght	2000 N/mm2
Densidade	12,5 (g/cm3)
Dureza	91,3 HRA - 1500HV
Diâmetro	55 mm
Massa	129 g

Tabela 3.6 Características da esfera

Material do Pino	Aço SAE 52100 (rolamento)
Dureza	HRC66 - 865HV
Massa	4,0 g
Diâmetro	10 mm

O teste foi realizado com a presença de óleo lubrificante LUBRAX OB PNL30, de viscosidade 29,01cSt a 40°C. Mais informações sobre o óleo utilizado se encontram no anexo desse trabalho.

3.2.2 Tribômetro esfera disco

O tribômetro utilizado para o teste foi o modelo TE-67 Plint & Partners LTD, instalado no Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola da USP. O princípio de funcionamento é o mesmo do que o tribômetro utilizado no experimento do Fraunhofer IPT,

mas pelo fato de utilizar uma esfera para contato, as pressões alcançadas são mais elevadas. A seguir a Figura 3.13 mostra o equipamento utilizado.

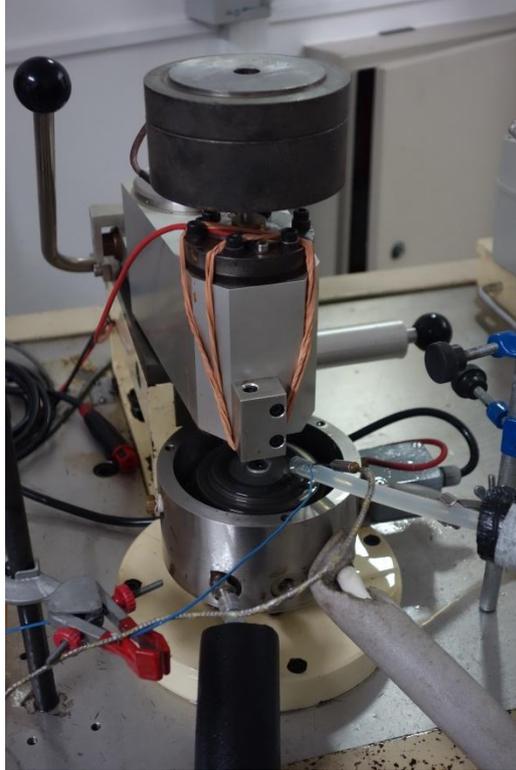


Figura 3.13 Tribômetro esfera disco utilizado

O tribômetro possui um eixo inferior ligado a um motor para fornecer rotação ao disco e um braço de alavanca na parte superior onde é fixada a esfera. Esse equipamento pode alcançar rotações de 2000rpm, porém o motor funciona com uma chave de restrição que permite a variação da rotação de 0 a 1000rpm ou de 1000 a 2000 rpm, de modo que a variação durante o ensaio se restringe apenas a um desses intervalos.

O suporte fornece a fixação da esfera e possui uma célula de carga para medir a força normal aplicada no disco e calcular com o auxílio de um software, o coeficiente de atrito. A força é aplicada através de um peso morto colocado sobre o braço que suporta a esfera, de modo que a força permanece constante durante o ensaio.

3.2.3 Distribuição e geometria dos dimples

Como no ensaio realizado no Fraunhofer IPT, a texturização foi aplicada em trilhas em um disco de metal duro de modo a maximizar o número de ensaios por disco. Cada disco possui 3 trilhas texturizadas como podemos observar na Figura 3.14.



Figura 3.14 Disco com superfície texturizada utilizado

Foram utilizadas distribuições de 25% e 100%, sendo que cada disco possui apenas um tipo de dimple estruturado. Os dimples possuem 100 μm de diâmetro e 25 μm de profundidade. Na Figura 3.15 podemos observar as distribuições usadas.

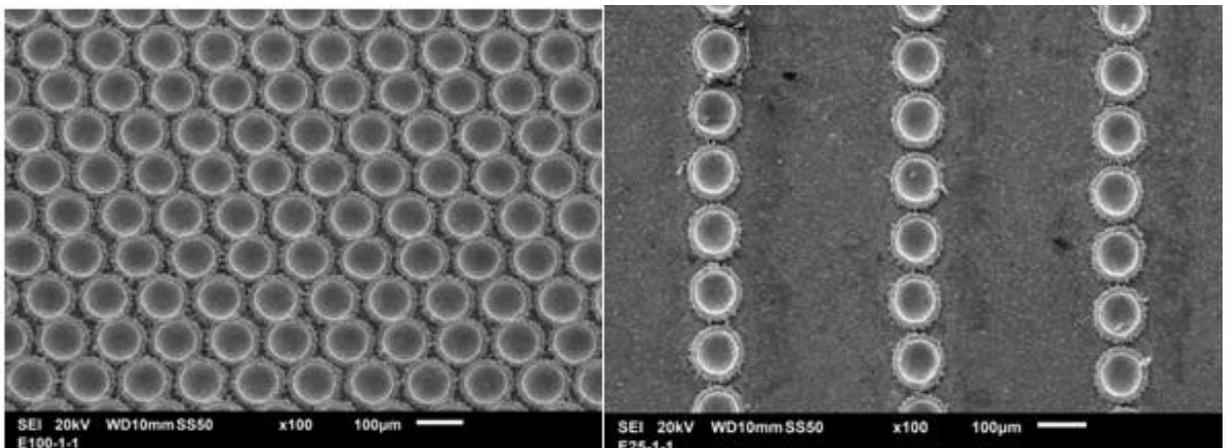


Figura 3.15 Distribuições de 25%(esq.) e 100%(dir.)

Para esse experimento, a distribuição dos dimples tem padrão de um arco circular. Isso permite um menor espaçamento entre dimples, garantindo que a esfera sempre tenha contato com a mesma quantidade de dimples. O padrão de arco pode ser observado na Figura 3.16.

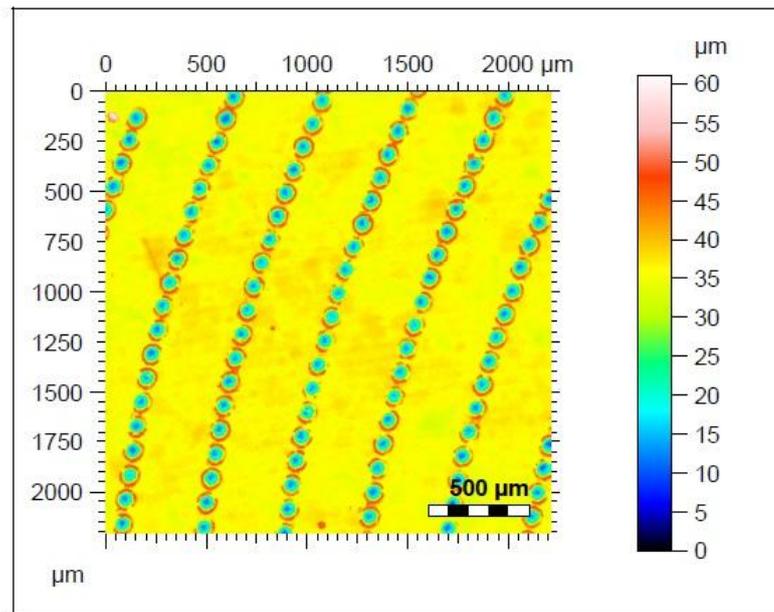


Figura 3.16 Texturização de 25% com padrão em arco

3.2.4 Parâmetros dos testes

Foram estruturadas 2 faces de discos de metal duro, cada um com 55mm de diâmetro e um furo no centro para fixação. Cada ensaio consistia manter a força normal aplicada em 35 N e variar a velocidade aplicada. A velocidade foi variada em degraus, sendo que cada etapa tinha duração de 1 hora. O detalhamento pode ser observado na Tabela 3.7. As rotações para cada pista de teste foram obtidas de modo a igualar a velocidade do teste, independente do raio de localização da pista.

Tabela 3.7 Velocidades para os testes de atrito

Etapa	Rotação (rpm)			Velocidade (m/s)
	Pista 1 (14,5mm)	Pista 2 (19,5mm)	Pista 3 (25,5mm)	Todas
1	900	669,23	511,76	1,37
2	650	483,33	369,61	0,99
3	400	297,44	227,45	0,61
4	150	111,54	85,29	0,23

A temperatura do ensaio foi controlada através de um sistema de lubrificação de cavitação fechado, onde o óleo foi mantido a uma temperatura constante de 40°C. Cada

configuração ensaiada para as trilhas estruturadas foi repetida 2 vezes. Foi ensaiado também um disco sem estruturação para controle.

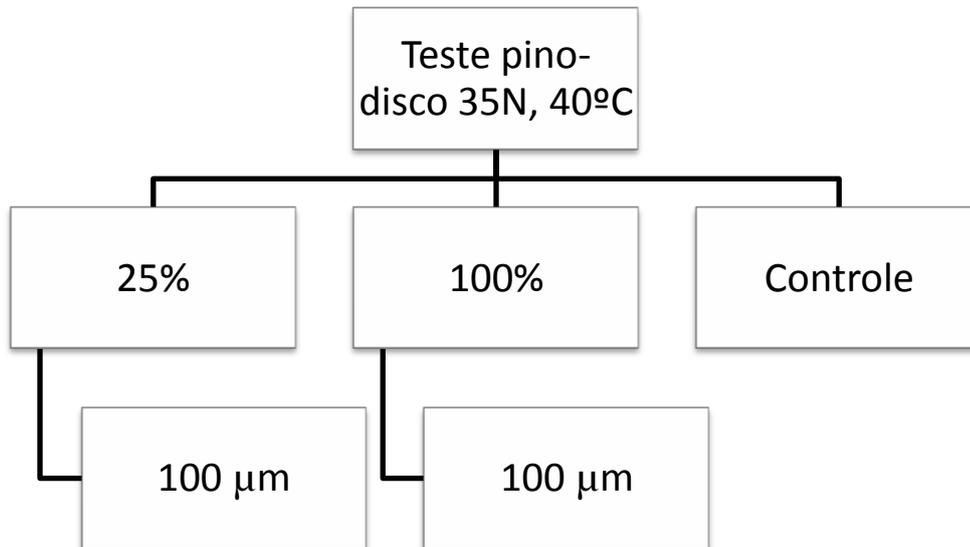


Figura 3.17 Organograma dos ensaios realizados

3.2.5 Procedimento experimental

O procedimento experimental desse teste foi idêntico ao utilizado no item 3.1.5 baseado na norma ASTM G99 (ASTM, 2010).

4 Resultados

4.1 Dados ensaio Fraunhofer IPT

4.1.1 Análise da força de atrito

Em seguida os gráficos obtidos com a variação do coeficiente de atrito conforme cada patamar de força aplicado. São apresentados valores médios para cada configuração e um disco de controle não estruturado. As médias e desvios padrão dos dados coletados estão relacionados no anexo deste trabalho.

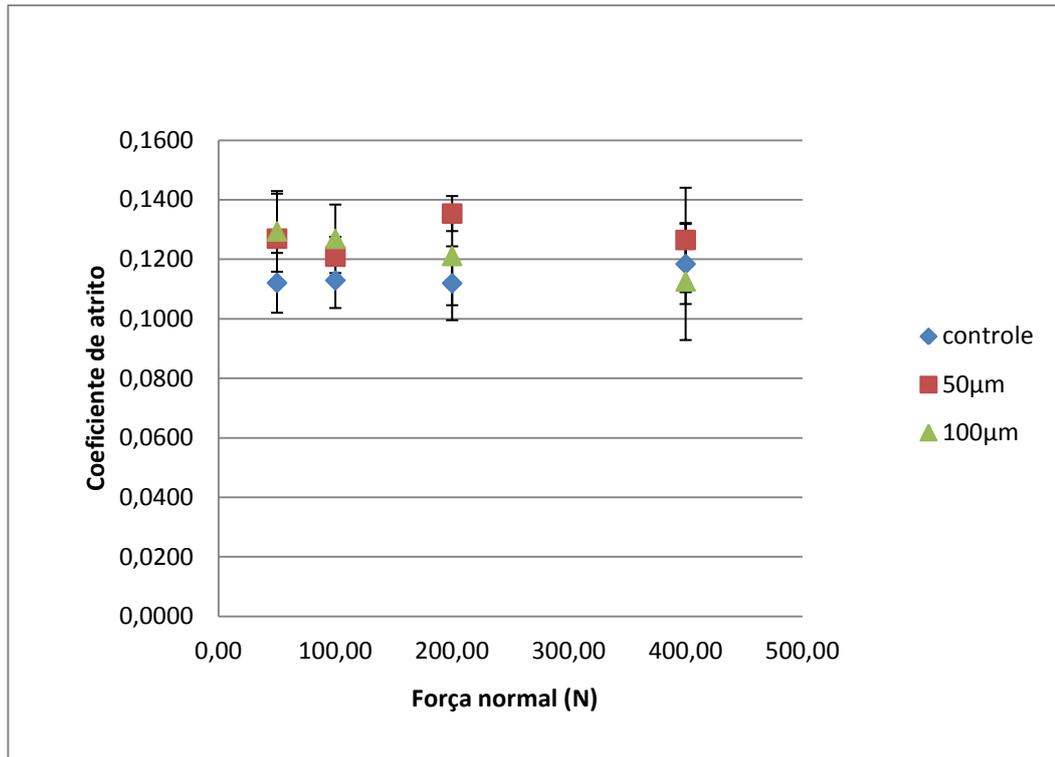


Figura 4.1 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 25%

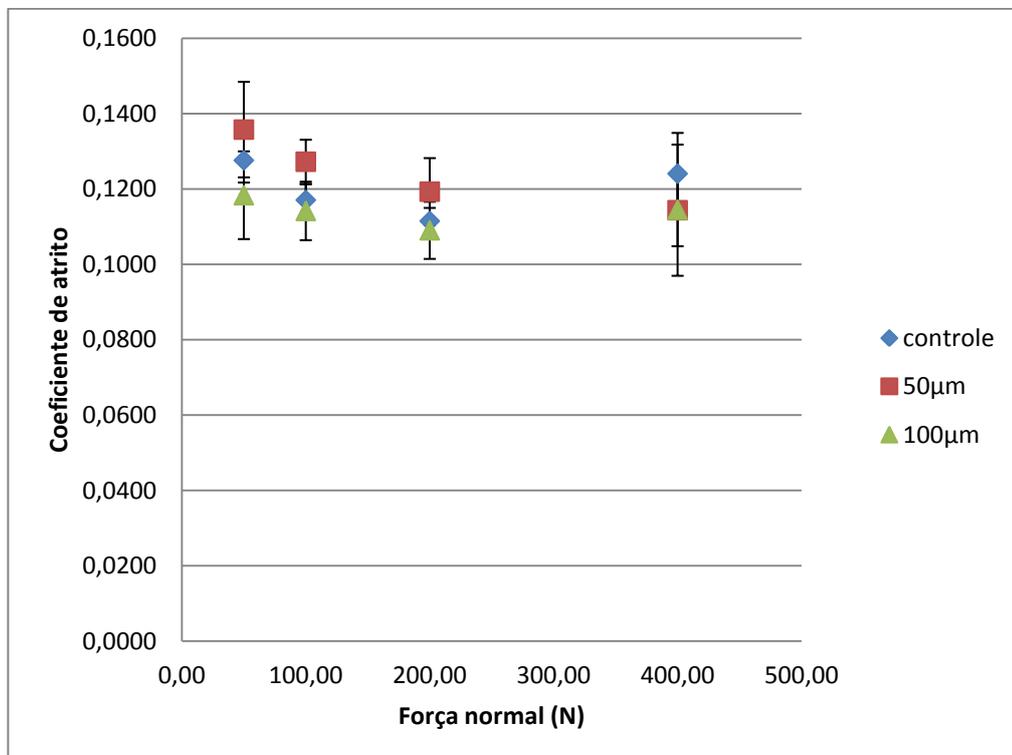


Figura 4.2 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 10%

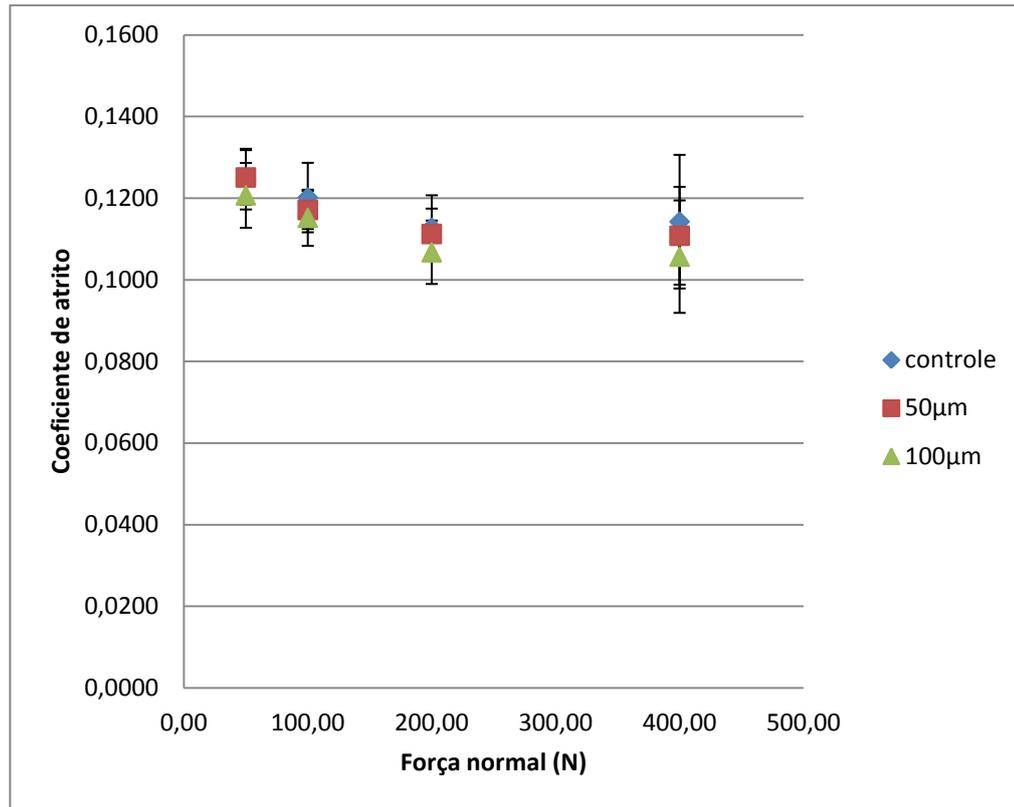


Figura 4.3 Coeficiente de atrito médio para distribuição de 5%

Em uma análise inicial, os dados dos gráficos de atrito médio mostram que os discos com distribuições de dimples de 25%, tanto de 100 µm quanto de 50 µm, demonstraram em geral um comportamento pior quanto ao coeficiente de atrito do que o disco de controle.

Quanto a distribuição de 10%, percebemos que para carregamentos de até 200N os dimples de 100 µm de diâmetro apresentaram um desempenho no coeficiente de atrito melhor que o disco de controle e que os dimples de 50 µm, sendo que os últimos tiveram desempenho pior do que o disco de controle.

Com 5 % de distribuição, os dimples de 100 µm e 50 µm apresentaram desempenho superior do que o teste de controle sem dimples, sendo que os testes com 100 µm de diâmetro apresentaram os níveis mais baixos de atrito.

Quando comparamos o comportamento dos diâmetros, em quase todos os casos as superfícies estruturadas com dimples de 100 µm tiveram coeficientes de atrito menores do que as superfícies estruturadas com dimples de 50 µm.

Contudo, ao considerarmos o desvio padrão das medidas observamos que todos os dados médios apresentados estão dentro do intervalo do desvio padrão. Portanto todos os valores são muito próximos, o que invalida os resultados. Em uma análise mais detalhada dos

dados coletados, podemos observar na Figura 4.4 um exemplo de gráfico do coeficiente de atrito durante um ensaio completo.

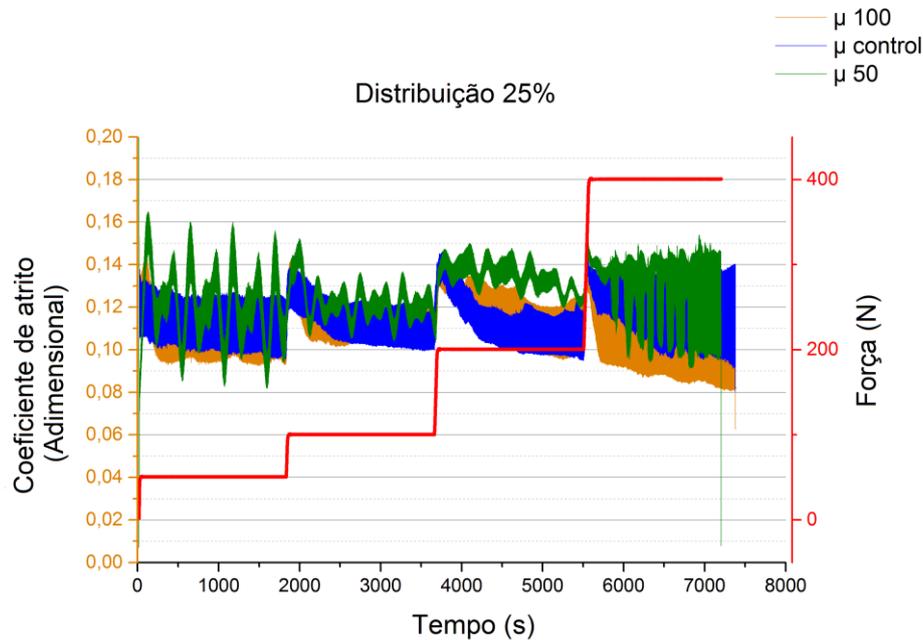


Figura 4.4 Coeficiente de atrito para ensaio de distribuição de 25%

Observa-se uma alta instabilidade do sinal do coeficiente de atrito nos ensaios realizados nos discos texturizados e nos ensaios de controle, o que causa o elevado desvio padrão das medidas. Após a finalização desses ensaios, foram realizados testes no tribômetro que constataram uma série de problemas. O eixo do pino estava 3,5mm fora do eixo de giro da máquina e o eixo do disco estava deslocado 0,5mm do eixo de giro da máquina. Portanto a confiabilidade dos ensaios se torna muito baixa e os dados coletados para os coeficientes de atrito não podem levar a conclusões exatas.

4.1.2 Caracterização superficial e desgaste

Foi feita a caracterização da superfícies dos pinos através de um microscópio de varredura 3D. Foram selecionadas 3 áreas de 0,7mmX0,5mm em cada pino ensaiado para obter os parâmetros da superfície. Os resultados obtidos estão nas tabelas abaixo, em valores médios.

Tabela 4.1 Caracterização dos pinos testados com disco de controle

Teste	Parâmetro	depois do teste	antes do teste	[u]	Varição
Controle	Sa	17,12	19,22	μm	-11%
	Sq	17,31	22,10	μm	-22%

Tabela 4.2 Caracterização dos pinos testados com dimples de 100 μ m

Teste	Parâmetro	depois do teste	antes do teste	[u]	Variação
25% 100um	Sa	166,47	639,14	nm	-74%
	Sq	156,63	402,59	nm	-61%
10% 100um	Sa	205,94	437,42	nm	-53%
	Sq	276,31	548,37	nm	-50%
5% 100um	Sa	106,23	339,61	nm	-69%
	Sq	132,02	427,51	nm	-69%

Tabela 4.3 Caracterização dos pinos testados com dimples de 50 μ m

Teste	Parâmetro	depois do teste	antes do teste	[u]	Variação
25% 50um	Sa	147,88	806,45	nm	-82%
	Sq	133,37	602,14	nm	-78%
10% 50um	Sa	215,61	666,54	nm	-68%
	Sq	180,25	496,86	nm	-64%
5% 50um	Sa	108,32	429,30	nm	-75%
	Sq	71,32	179,69	nm	-60%

O desgaste é evidente na superfície do pino e das trilhas, sendo que todos experimentos mostraram que a remoção de material não foi uniforme para a superfície do pino como um todo. Isso é esperado devido a inclinação entre o pino e o disco como constatado anteriormente. O disco de metal duro apresentou riscos nas pistas de teste, o que pode ter ocorrido pela presença de partículas aderidas ao pino ou partículas de impurezas presentes no meio. Esses efeitos podem ser observados na Figura 4.5.

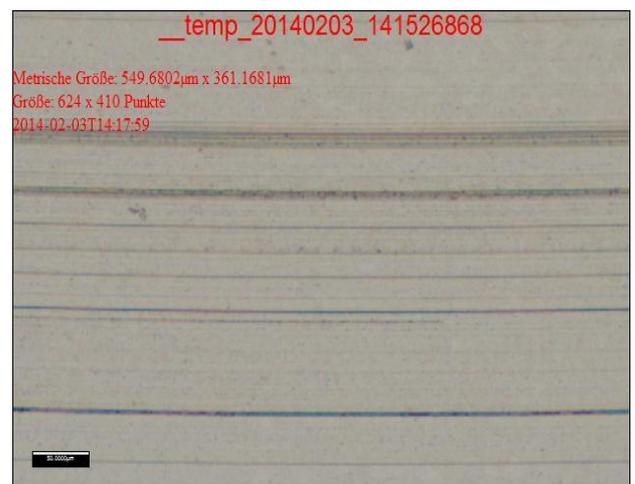
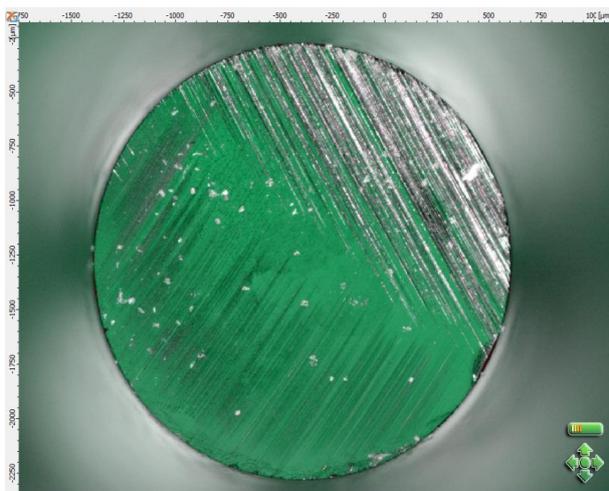


Figura 4.5 Superfície do pino após o ensaio(esq) e superfície do disco após ensaio(dir) com riscos

Os coeficientes de atrito obtidos foram elevados e a velocidade no ensaio era baixa, evidenciando que não houve a formação de um filme hidrodinâmico. Portanto, ocorre lubrificação limite e é esperado que os corpos de prova apresentem desgaste.

Comparando os efeitos no discos estruturados com os discos de controle, observamos na Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3 que as superfícies dos pinos testadas com discos estruturados apresentaram uma redução na rugosidade da superfície indicando desgaste. Percebe-se também que as configurações de 25% e de dimples de 50 μ m de diâmetro apresentaram uma maior variação no parâmetro Sa, com alterações de 80% em comparação ao estado original da superfície. Podemos atribuir esse resultado ao fato que uma maior quantidade de dimples reduz a área aparente de contato com o pino, gerando pressões maiores. Isso pode resultar em uma força de atrito maior do que em outras distribuições.

Em suma, não foi possível tirar conclusões sobre o efeito dos dimples no coeficiente de atrito devido aos problemas do arranjo experimental utilizado. Apenas com a análise do desgaste da superfície, é possível inferir que as superfícies com dimples contribuíram para um desgaste maior da superfície quando comparadas as superfícies não texturizadas para os parâmetros utilizados.

Para estudar com maior confiabilidade o efeito da texturização no coeficiente de atrito em uma superfície de metal duro, se viu necessária a realização de novos experimentos. Nesse novo arranjo, contudo não foi possível manter as mesmas condições de ensaio, pois o Laboratório de Fenômenos de Superfície da USP não possuía o mesmo tribômetro e a mesma máquina de usinagem a laser. Com isso foi proposta uma abordagem diferente, que está detalhada item 4.2.

4.2 Resultados ensaio Laboratório de Fenômenos de Superfície - USP

Os ensaios realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície tem o objetivo verificar os efeitos dos dimples no coeficiente de atrito em uma superfície de metal duro em ambiente lubrificado. Como mencionado anteriormente no item 2.2.2.2, a velocidade tem uma influência de ordem de grandeza muito maior do que a carga na espessura do filme de lubrificante. Portanto, optou-se por manter a carga constante e variar a velocidade do ensaio em degraus e manter a temperatura do lubrificante controlada, permitindo uma viscosidade constante e conhecida. O lubrificante não possuía aditivos, pois não é o objetivo desse trabalho analisar a influência de outros parâmetros que não sejam a variação da densidade de dimples no coeficiente de atrito.

Nesse ensaio foram estudados dois casos extremos de texturização, com alta densidade de dimples (100%) e baixa densidade de dimples (25%) e trilhas com superfície não texturizada.

4.2.1 Análise da força de atrito

A seguir, a Figura 4.6 mostra o comportamento do coeficiente de atrito para todas as condições ensaiadas. Iniciou-se o ensaio com a maior velocidade que foi diminuída a cada etapa. Dessa maneira, no início do ensaio o filme de lubrificante seria maior e nas etapas seguintes diminuiria em espessura, tornando o coeficiente de atrito maior. Portanto no gráfico observamos os coeficientes de atrito para todas as condições ensaiadas aumentando com o tempo.

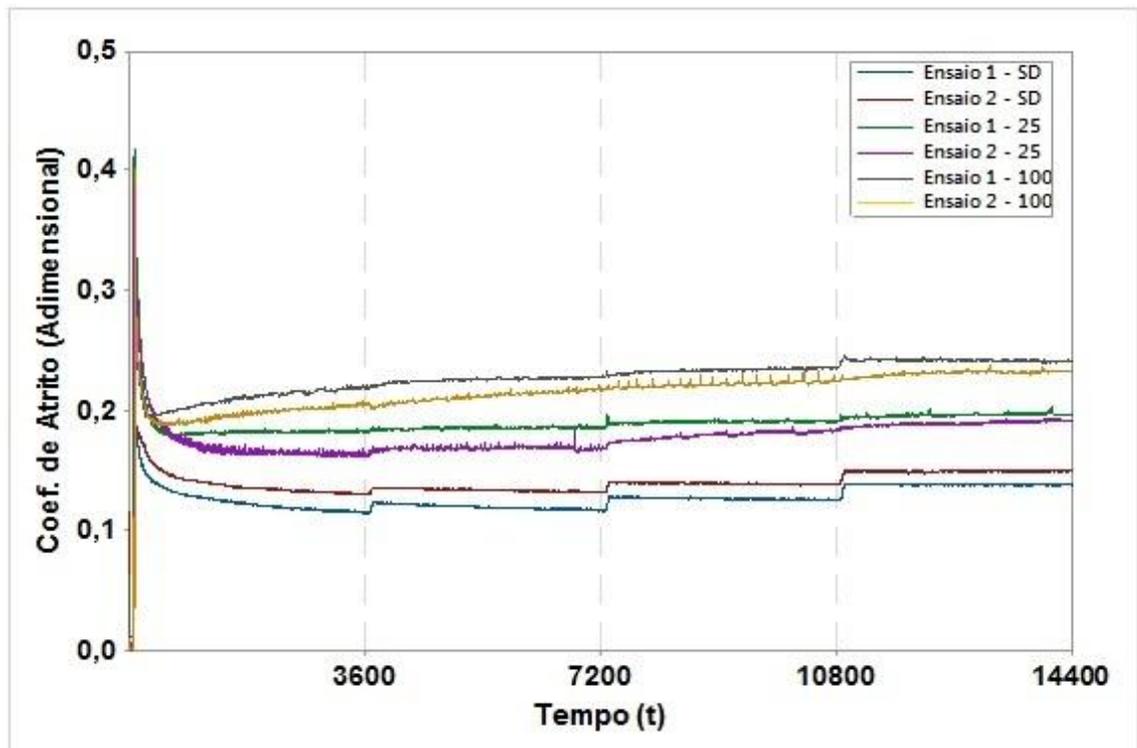


Figura 4.6 Gráfico do coeficiente de atrito para todas as condições ensaiadas

Analisando os dados de coeficiente de atrito ao longo dos ensaios realizados, notamos que em todos os casos, as trilhas não texturizadas apresentaram coeficientes de atrito mais baixos do que as trilhas texturizadas. No Ensaio 1 com texturização de 25%, o coeficiente de atrito foi em média 35% maior que a superfície de controle, sendo que no ensaio 1 com texturização de 100%, o coeficiente de atrito foi em média até 63% maior. Na Figura 4.7 observamos os coeficientes de atrito médios para cada condição de velocidade e seus valores se encontram na Tabela 4.4 e Tabela 4.5. Em comparação ao ensaio realizado no instituto

Fraunhofer IPT, as medidas tiveram um desvio padrão muito menor, dando alta confiabilidade aos resultados obtidos. Uma maior quantidade de repetições poderia reforçar os resultados, porem a quantidade limitada de corpos de prova disponíveis e a dificuldade para obter superfícies texturizadas devido a falta de equipamento de usinagem a laser no laboratório, limitou a obtenção de mais amostras.

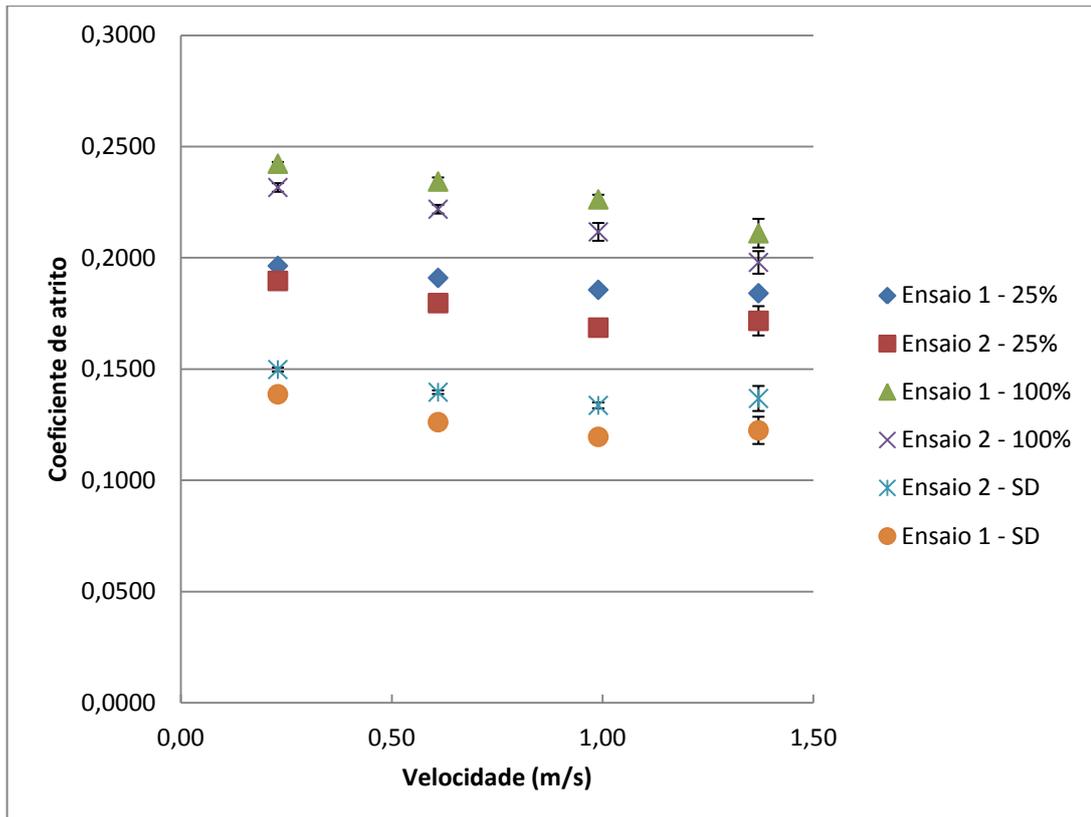


Figura 4.7 Coeficientes de atrito médio para as condições ensaiadas: 25%, 100% e sem dimples(SD)

Tabela 4.4 Coeficientes de atrito médios para as trilhas texturizadas ensaiadas

	Teste 25% - Ensaio 1		Teste 25% - Ensaio 2		Teste 100% - Ensaio 1		Teste 100% - Ensaio 2	
Velocidade (m/s)	Coeficiente de atrito médio	Desvio padrão						
1,37	0,1840	0,0010	0,1717	0,0066	0,2110	0,0065	0,1979	0,0051
0,99	0,1856	0,0007	0,1686	0,0010	0,2262	0,0021	0,2116	0,0040
0,61	0,1910	0,0008	0,1796	0,0030	0,2343	0,0018	0,2218	0,0019
0,23	0,1963	0,0012	0,1896	0,0017	0,2423	0,0008	0,2316	0,0019

Tabela 4.5 Coeficientes de atrito médios para as trilhas não texturizadas

	Teste SD- Ensaio 2	Teste SD- Ensaio 2

Velocidade (m/s)	Coefficiente de atrito médio	Desvio padrão	Coefficiente de atrito médio	Desvio padrão
1,37	0,1367	0,0056	0,1224	0,0061
0,99	0,1337	0,0013	0,1195	0,0019
0,61	0,1396	0,0008	0,1261	0,0010
0,23	0,1497	0,0009	0,1386	0,0012

Outro parâmetro medido foi o deslocamento vertical da esfera, que pode ser encontrado na Figura 4.8. Na trilha texturizada com distribuição de 25% e na trilha de controle(SD), observamos que o aumento do desgaste ocorre principalmente na mudança de etapa onde se reduz a velocidade do teste. Mas para a distribuição de 25%, o deslocamento se estabiliza a partir da velocidade de 0,61m/s e 0,23m/s. Na trilha com distribuição de 100%, o deslocamento ocorre de maneira linear, concluindo que o desgaste ocorre de maneira praticamente constante ao longo do ensaio.

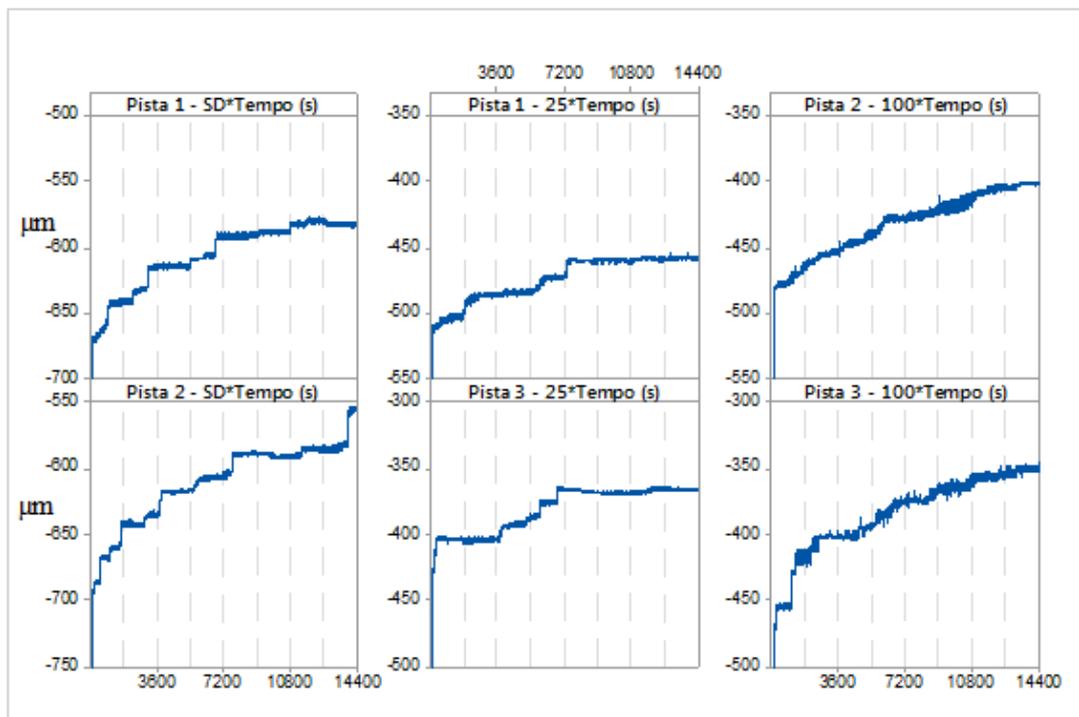


Figura 4.8 Deslocamento vertical do suporte da esfera ao longo do ensaio

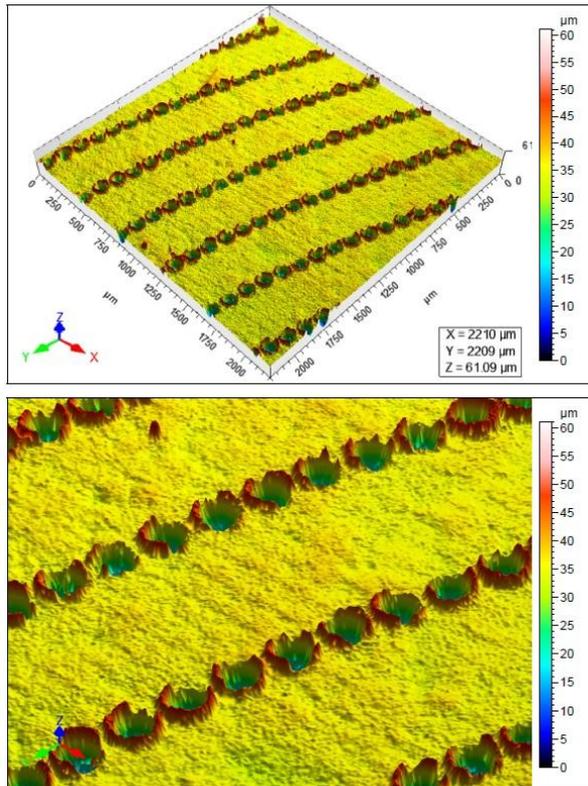
4.2.2 Caracterização e desgaste

Para a caracterização das amostras ensaiadas foram feitas imagens em microscópios eletrônicos de varredura e interferômetros 3D. Para maior confiabilidade para as medidas de parâmetros de superfície nos discos, foram registradas áreas de 2,2mm x 2,2mm antes e após os ensaios nas trilhas. Para as esferas, toda a superfície desgastada foi registrada.

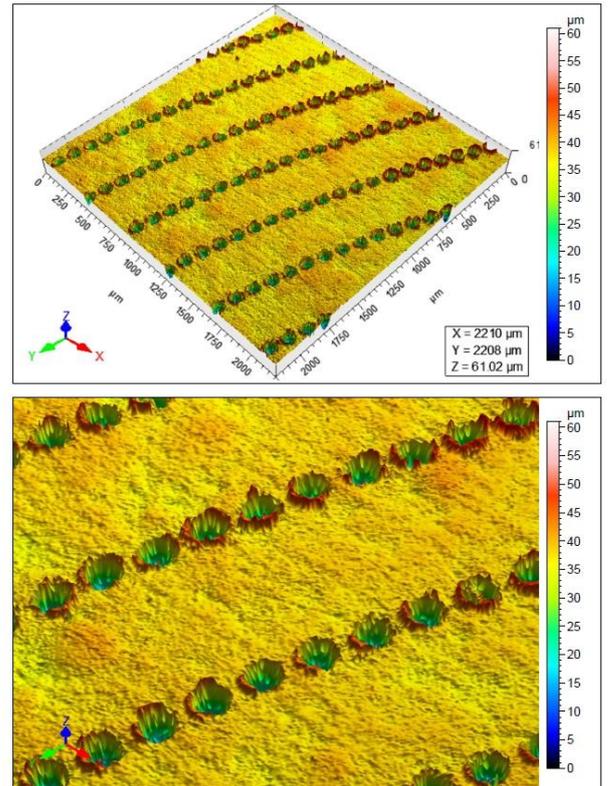
4.2.2.1 Desgaste do disco

Na Figura 4.9 observamos imagens antes e após os ensaios das trilhas com distribuição de 25%.

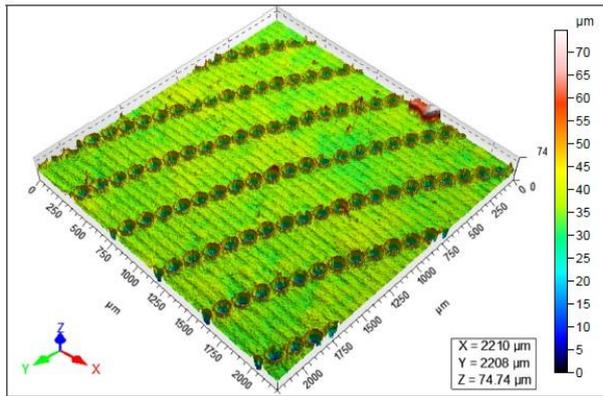
1



2



3



4

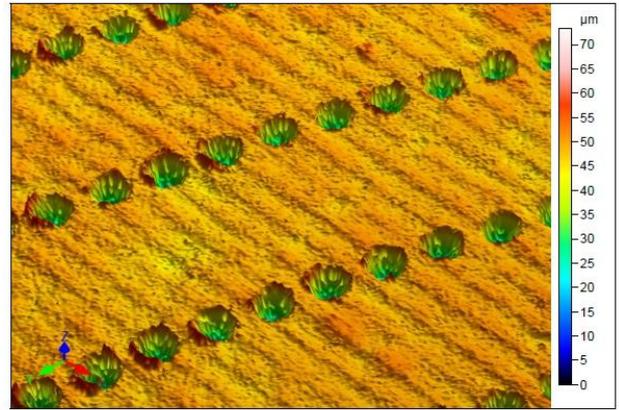
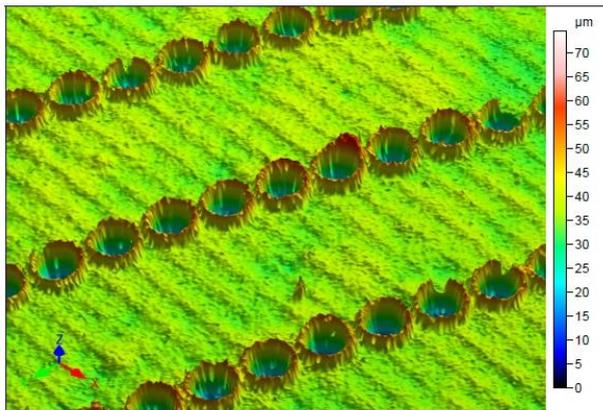
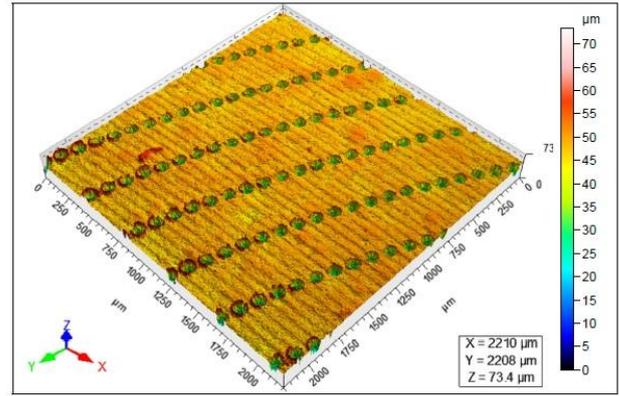


Figura 4.9 Trilhas ensaiadas com distribuição de 25%. 1) Ensaio 1 pré ensaio; 2) Ensaio 1 pós ensaio; 3) Ensaio 2 pré ensaio; 4) Ensaio 2 pós ensaio

Notamos que ocorre pouca alteração na superfície do disco, contudo quando observamos os dimples em detalhe, percebemos uma alteração nas rebarbas provocadas pelo método de fabricação (laser de nanosegundo). Essas rebarbas são desgastadas e praticamente removidas do contorno dos dimples. Na Figura 4.10 e Figura 4.11, uma visão de perfil do dimple em duas direções (direção 1 ao longo do arco de dimples e direção 2 transversal ao arco de dimples) nos permite analisar essa variação na altura dos picos do perfil da superfície. Após o ensaio essa altura diminui, como demonstrado pelos picos achatados do perfil. A totalidade dos dados do perfil das superfícies ensaiadas se encontra no anexo desse trabalho.

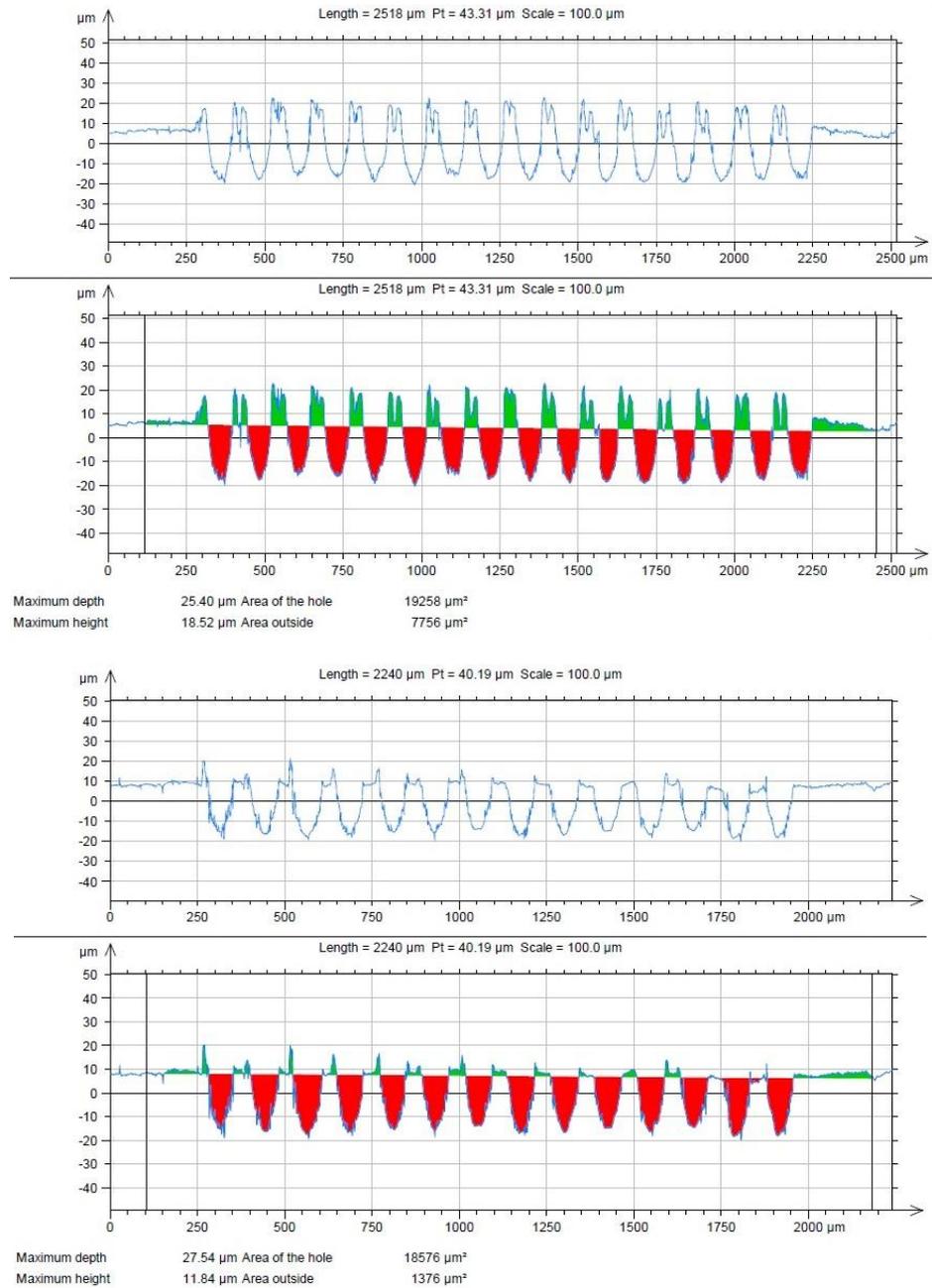


Figura 4.10 Perfil na direção 1 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio

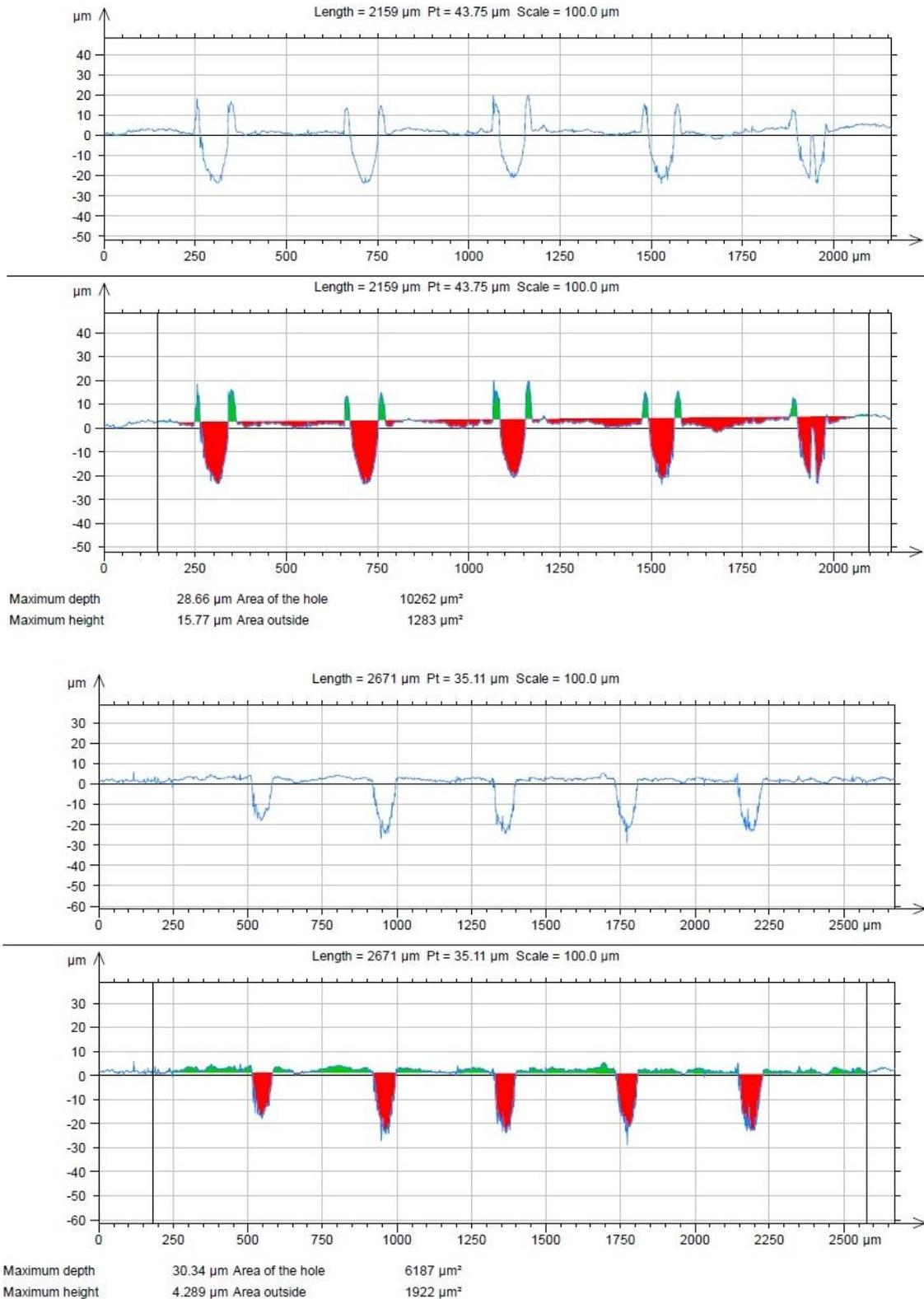


Figura 4.11 Perfil na direção 2 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio

Na Figura 4.12 em uma imagem mais detalhada feita por um microscópio de varredura, podemos notar claramente o desgaste da rebarba e sua remoção para uma amostra dos dimples presentes na superfície.

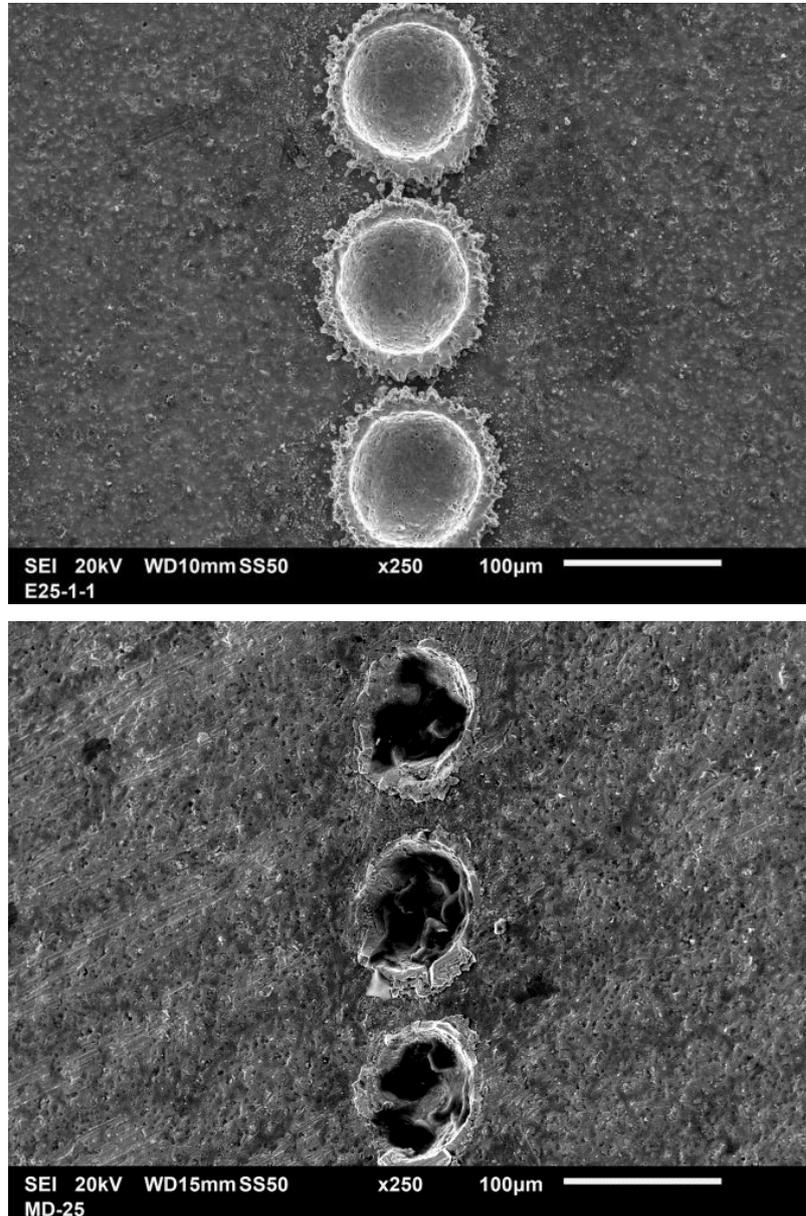
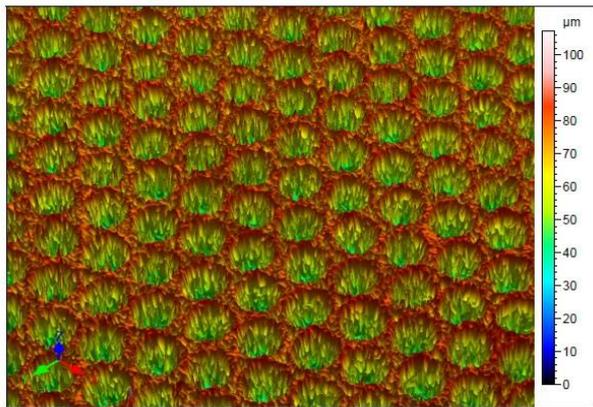
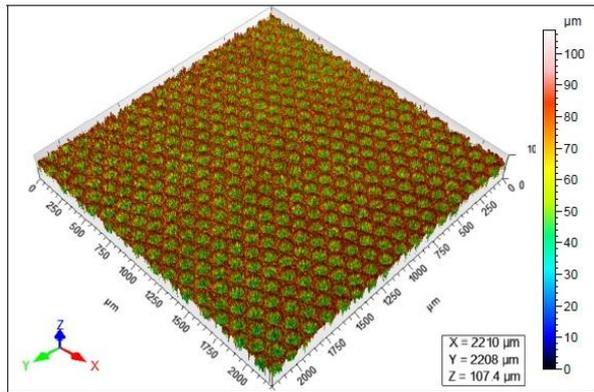


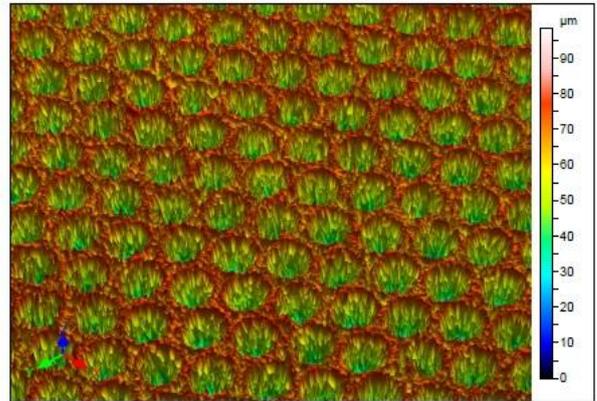
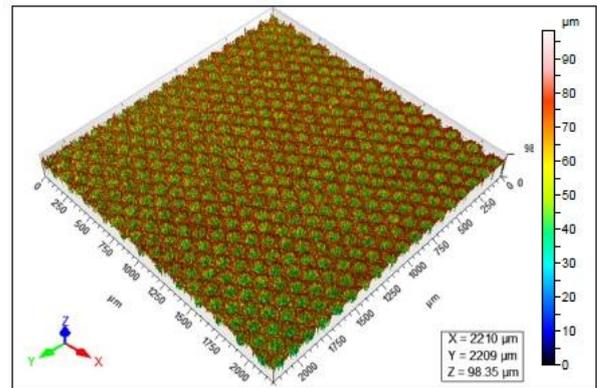
Figura 4.12 Detalhe do desgaste da rebarba de dimples, na distribuição de 25%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio

Na Figura 4.13 observamos imagens antes e após os ensaios das trilhas com distribuição de 100%.

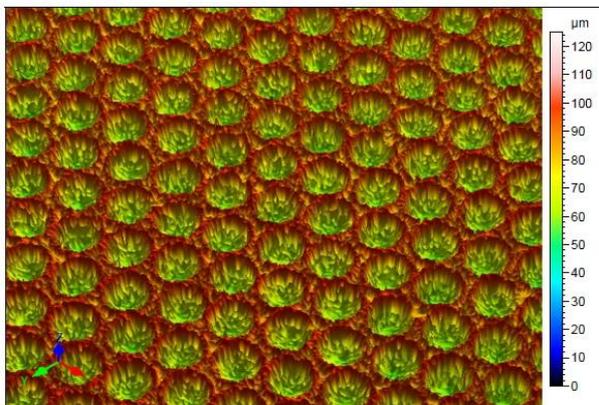
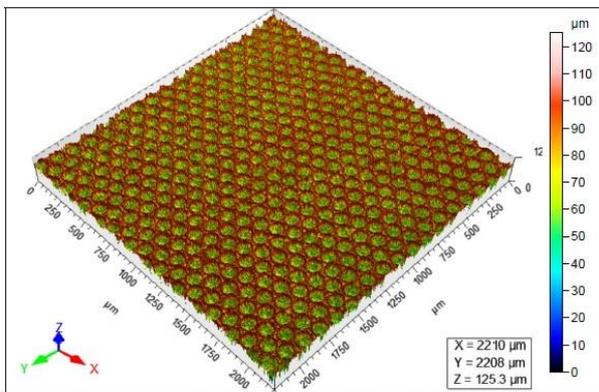
1



2



3



4

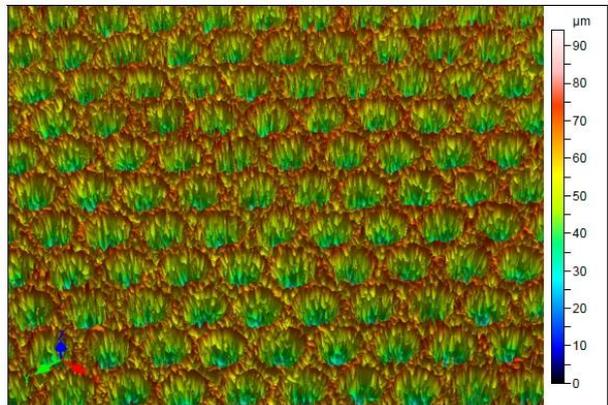
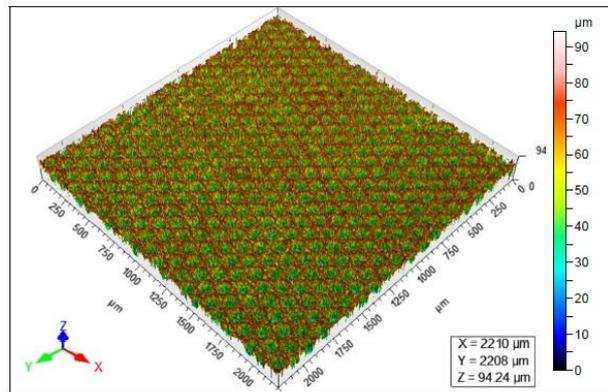


Figura 4.13 Trilhas ensaiadas com distribuição de 100%. 1) Ensaio 1 pré ensaio; 2) Ensaio 1 pós ensaio; 3) Ensaio 2 pré ensaio; 4) Ensaio 2 pós ensaio

Observamos que a superfície do disco no caso da distribuição de 100%, não sofre alteração significativa, sendo que as rebarbas permanecem mesmo após o ensaio. Isso é observado também na Figura 4.14 que mostram que não ocorre uma alteração significativa nos picos do perfil da superfície.

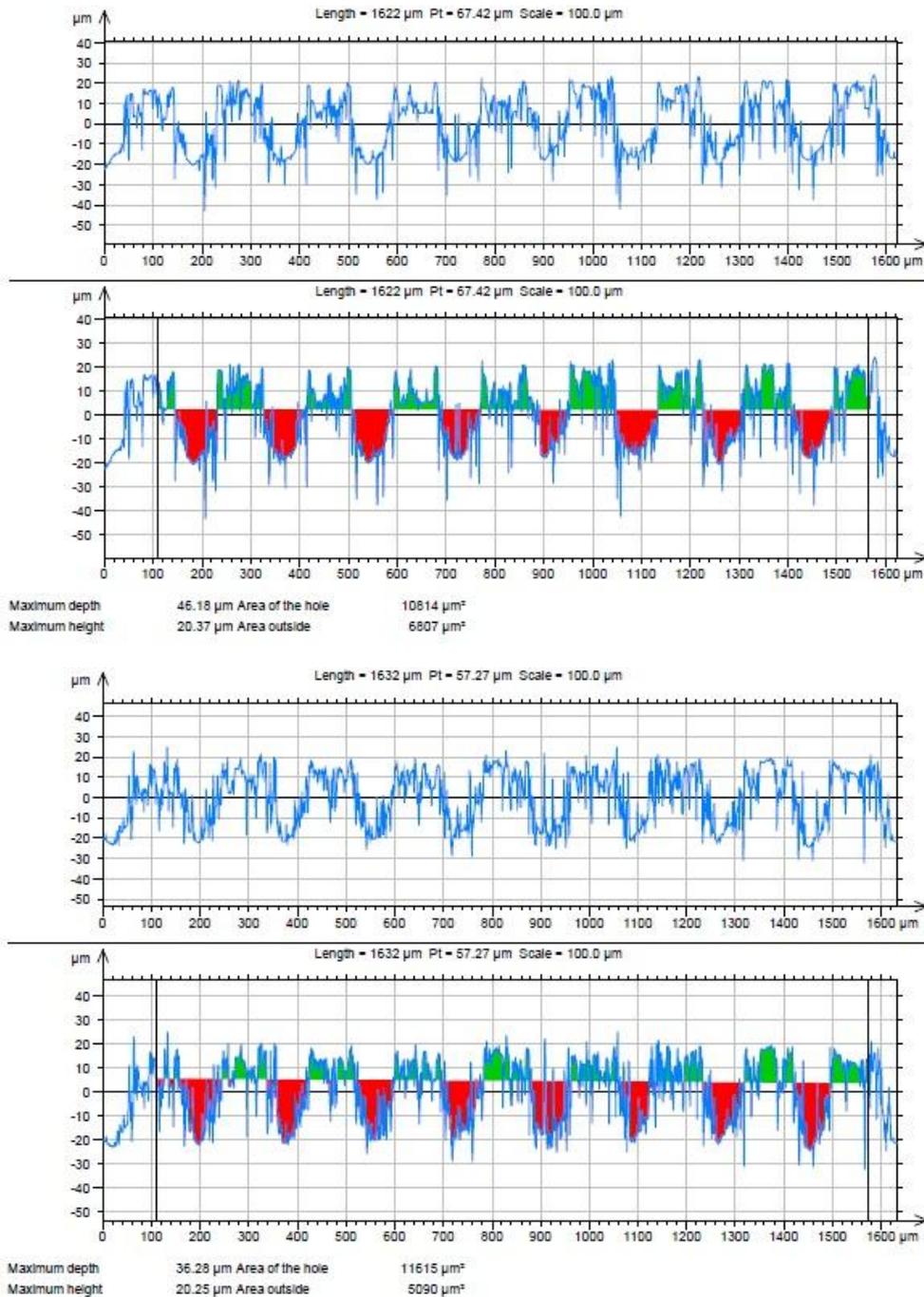


Figura 4.14 Perfil na direção 2 da superfície do Ensaio 2 com distribuição de 100%. Acima antes do ensaio, abaixo após o ensaio

Na Figura 4.15 observamos em detalhe as rebarbas presentes em torno dos dimples na distribuição de 100%. Confirmamos que não ocorre desgaste significativo na superfície texturizada, e não é possível notar remoção de rebarbas como no caso da distribuição de 25%.

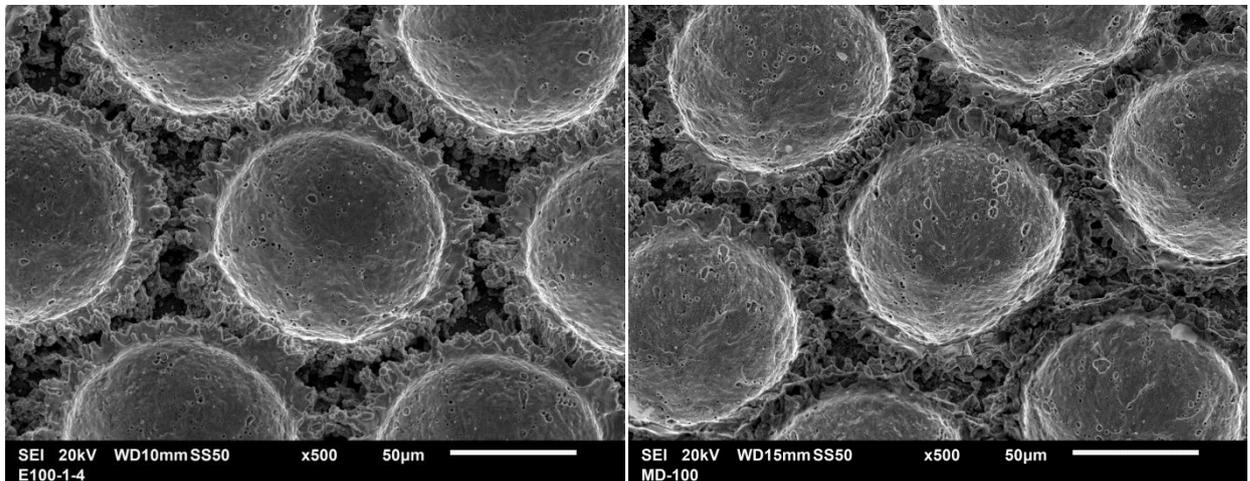


Figura 4.15 Detalhe do desgaste da rebarba de dimples, na distribuição de 100%. A esq. antes do ensaio, a dir. após o ensaio

A superfície de controle não mostrou desgaste significativo, como mostra a Tabela 4.6 com os dados da superfície. Na Tabela 4.7 Perda de massa nos discos ensaiados Tabela 4.7 os dados de perda de massa nos discos ensaiados demonstram que o desgaste nos discos em geral é muito pequeno, independentemente do disco ser texturizado ou não.

Tabela 4.6 Dados da superfície das trilhas sem dimples antes e após os ensaios

Parâmetro	Pré ensaio	Ensaio 1	Ensaio 2
Sq	1,23	0,93	1,05
Ssk	1,46	0,03	0,10
Sku	10,69	3,69	5,39
Sp	11,87	11,02	18,27
Sv	6,90	5,65	8,22
Sz	18,77	16,67	26,48
Sa	0,88	0,73	0,83

Tabela 4.7 Perda de massa nos discos ensaiados

Distribuição	Ensaio	Perda de massa
25%	Ensaio 1	0,0002%
	Ensaio 2	0,0018%
100%	Ensaio 1	0,0021%
	Ensaio 2	0,0013%
SD	Ensaio 1	0,0004%
	Ensaio 2	0,0008%

4.2.2.2 Variação do diâmetro da esfera

Ao contrário do disco ensaiado, as esferas sofreram desgaste acentuado, de modo houve variação da área de contato com a superfície da trilha. De modo a quantificar o desgaste, foram medidos os diâmetros finais das esferas após o ensaio e os dados se encontram na Tabela 4.8. Observamos que o diâmetro para os ensaios com trilhas de 25% e 100% é maior do que no caso da trilha não estruturada o que condiz com os dados de atrito apresentados. Os diâmetros para as distribuições texturizadas foram próximos, sendo na distribuição de 25% um pouco maiores. Como os valores são próximos, seriam necessários uma maior quantidade de ensaios para obter uma resposta estatística diferenciando a distribuição de 25% de 100%, contudo pode-se dizer que os níveis de desgaste para as duas configurações são equivalentes.

Tabela 4.8 Diâmetro das esferas após os ensaios

Distribuição	Ensaio	Diametro (mm)
25%	Ensaio 1	4,22
	Ensaio 2	4,29
100%	Ensaio 1	4,03
	Ensaio 2	4,12
SD	Ensaio 1	3,44
	Ensaio 2	3,35

Podemos observar na Figura 4.16 , Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19, imagens das esferas após o Ensaio 1 para a distribuição de 25%, 100% e sem dimples respectivamente. Imagens referentes a totalidade dos ensaios se encontram no anexo deste trabalho.

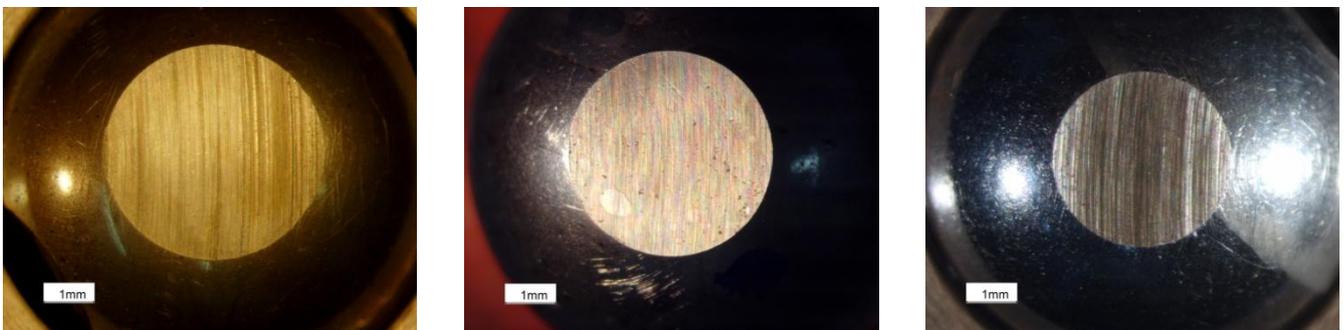


Figura 4.16 Esferas após os ensaios. 25% (esq.) 100% (centro) e sem dimples (dir.)

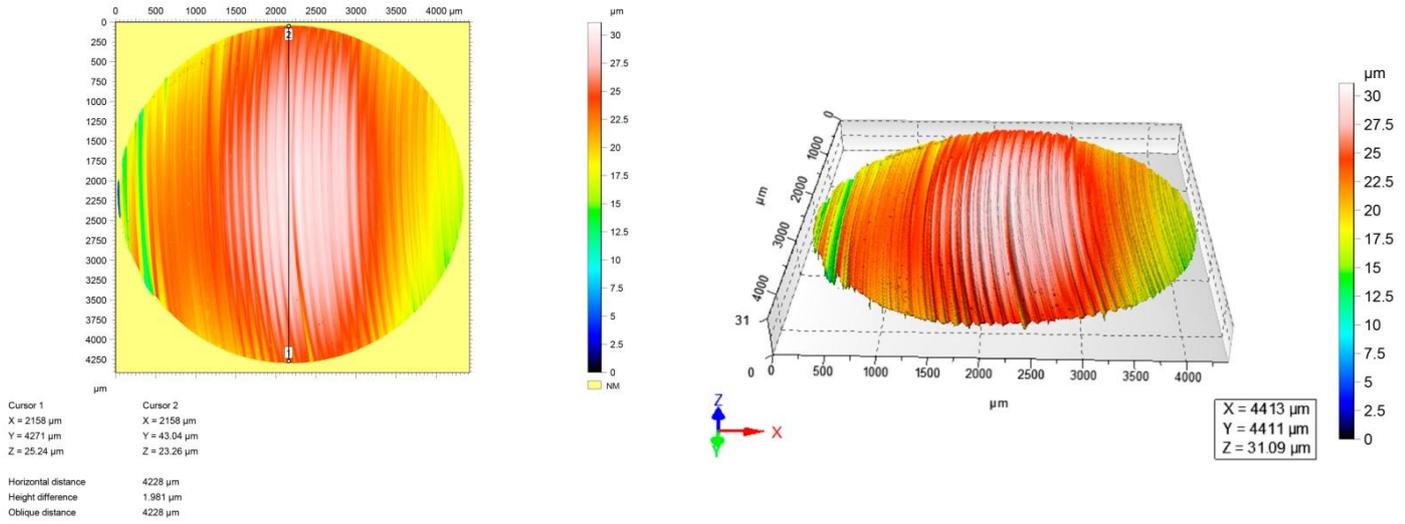


Figura 4.17 Esfera após Ensaio 1 - 25%

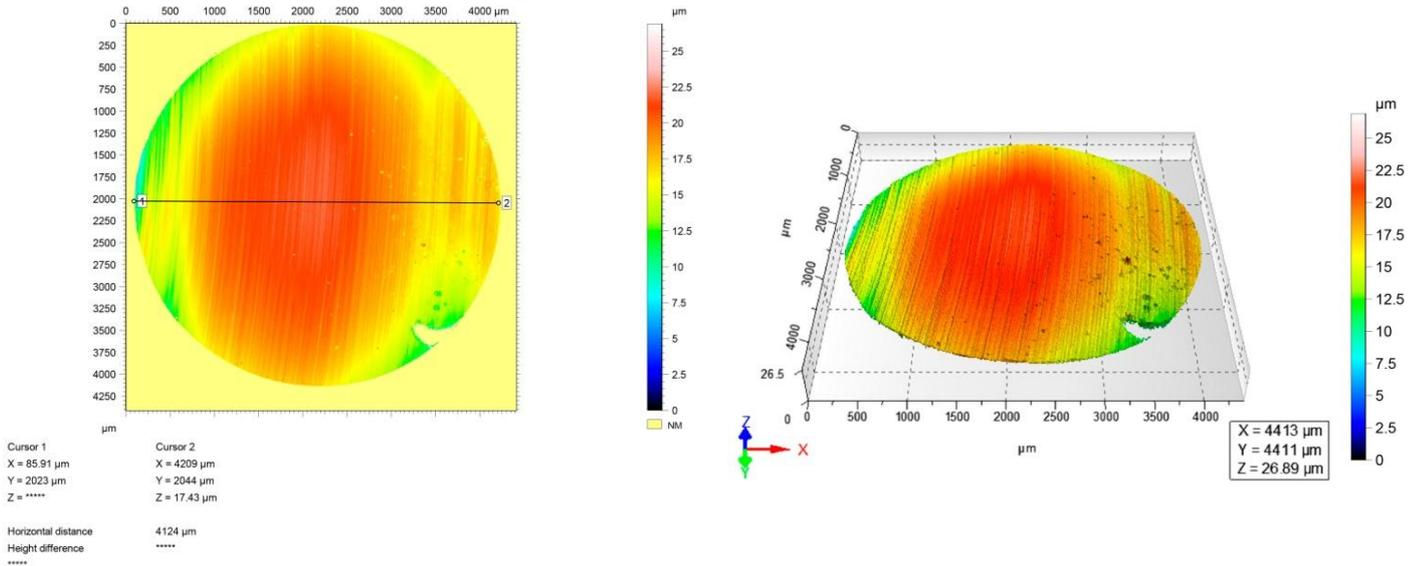


Figura 4.18 Esfera após Ensaio 1 - 100%

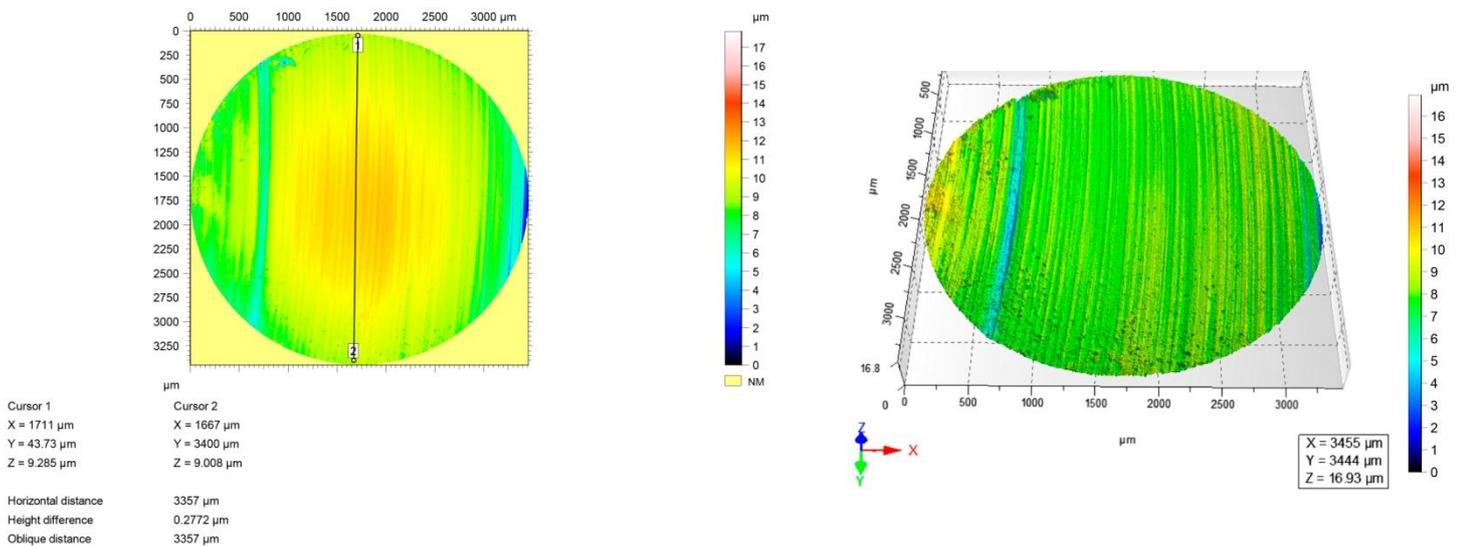


Figura 4.19 Esfera após Ensaio 1 - SD

Foram obtidos também os parâmetros da superfície da esfera, que seguem na Tabela 4.9. Como constatado anteriormente, as superfícies desgastadas pelas trilhas texturizadas apresentaram níveis de desgaste semelhantes, o que pode ser também observado nos parâmetros de rugosidade da superfície para as distribuições de 25% e 100%. As trilhas sem texturização mostram parâmetros de superfície diferentes com uma média de picos menor na superfície analisada. Considerando que as rebarbas presentes nos dimples atuam de uma maneira abrasiva na superfície, a superfície sem texturização o desgaste é menos severo, o que deixa a superfície menos rugosa após o ensaio.

Tabela 4.9 Dados da superfície das esferas utilizadas antes e após o ensaio

	Superfície original	25%		100%		SD	
	Antes do ensaio	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
Sq	0,21	1,42	2,26	2,39	1,11	0,57	0,71
Ssk	0,43	-0,30	-2,07	-0,33	0,12	-0,88	-2,14
Sku	17,35	5,11	11,22	3,03	5,54	20,24	13,53
Sp	5,08	7,15	7,27	12,69	10,16	17,00	9,05
Sv	4,54	14,14	16,27	12,67	13,76	8,53	7,88
Sz	9,61	21,29	23,54	25,36	23,92	25,53	16,93
Sa	0,15	1,13	1,46	1,91	0,84	0,40	0,42

4.3 Conclusões

O presente trabalho apresenta resultados que mostram que a presença de dimples em uma superfície influencia no coeficiente de atrito e o desgaste da mesma. Todas as superfícies de metal duro texturizadas testadas nos ensaios no Laboratório de Fenômenos de Superfície da USP e no instituto Fraunhofer IPT mostraram um maior nível de desgaste para superfícies texturizadas, quando comparadas a superfícies sem texturização.

A caracterização da superfície do disco feita no item 4.2.2 mostra que os dimples fabricados com lasers de nanosegundo produzem uma região irregular afetada pela refusão do material, que é evidenciada pela presença de elevações no perfil em torno dos dimples(rebarbas). Essas rebarbas quando em contato com a esfera ensaiada reduzem a superfície de contato, gerando elevadas pressões em um contato metal-metal entre as superfícies da esfera e do disco, impedindo a formação de um filme de lubrificante e provocando um efeito abrasivo que desgasta a esfera ensaiada.

Resultados semelhantes foram obtidos em outro estudo (STOETERAU, R.L.; SINATORA, A.; TERTULIANO, I.; PAVESI, C.; FRUCHTENGARTEN, F.; ONO, 2014) conduzido no Laboratório de Fenômenos de Superfície, onde foram realizados experimentos,

com discos de mesmo material(metal duro) e texturização com dimples de 100 μm com distribuição de 50% e 100% porem sem adição de lubrificante. Nesse caso, com a ausência de lubrificante, os testes realizados também identificaram uma piora no coeficiente de atrito e ocorrência de desgaste atribuído a rebarbas nas bordas dos dimples. É observado uma variação de massa significativa para o pino e o disco, com sinais de adesão no disco.

Os resultados obtidos nesse trabalho condizem também com os estudos experimentais conduzidos por WANG(WANG et al., 2014), que constatam que em alguns casos uma densidade de dimples em área acima de 20% pode gerar aumento no coeficiente de atrito. Como mostrado no item 4.2.1, para densidades de 25% e 100% os coeficientes de atrito foram sempre maiores do que nos ensaios não texturizados. No mesmo estudo, simulações foram feitas para comparar o efeito da dureza do material texturizado combinado com a densidade da texturização e constatou-se que superfícies duras e com alta densidade de dimples pode levar a um aumento do coeficiente de atrito como constatado no item 2.3.2. O presente trabalho utilizou-se corpos de prova de elevada dureza, e portanto o efeito descrito por WANG pode ter gerado elevadas tensões nas bordas dos dimples, contribuindo assim para um aumento dos coeficientes de atrito nos casos ensaiados.

Estudos(CHAE, 2007), (WANG et al., 2009) e (GALDA et al., 2009) conduzidos com superfícies texturizadas na presença de fluido lubrificante verificam que existe uma redução no coeficiente de atrito, relacionada com a distribuição dos dimples, assim como com a razão entre diâmetro e profundidade. Contudo ainda não existe um entendimento completo dos mecanismos de funcionamento dos dimples, sendo que resultados experimentais positivos ocorrem apenas para algumas condições.

Outro ponto importante a ser considerado é que o método de fabricação dos dimples influencia no acabamento superficial, podendo gerar desgaste. Dimples produzidos com laser de nanosegundo possuem uma região irregular no entorno dos dimples que influencia no desempenho tribológico da superfície texturizada. Para eliminar esse efeito indesejável, deve-se utilizar lasers de tipo picosegundo ou femtosegundo. Devido ao elevado custo de máquinas laser para a produção de dimples sem rebarbas, e ao conhecimento limitado dos mecanismos tribológicos dos dimples que dificultam prever seu comportamento em uma grande gama de condições, a aplicação de texturas para uso industrial ainda é restrita.

Como sugestão de próximos trabalhos a serem realizados, ensaios com dimples produzidos sem rebarbas e com presença de lubrificante. Variar uma maior gama de densidades de dimples, principalmente densidades menores que já mostraram bons resultados

nos estudos de WANG. Estudar também a influência da variação do diâmetro e da forma de dimples nos coeficientes de atrito e o desgaste

5 Bibliografia

ASTM. ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. **ASTM Standards**, v. G99, p. 1–5, 2010.

CAPES. **Surface conditioning and texturing of cutting tools for the optimization of machining processes ConTexTool**. 2012.

CHAE, Y. H. Effect of Size for Micro-Scale Dimples on Surface under Lubricated Sliding Contact. **Key Engineering Materials**, v. 345-346, p. 765–768, 2007. Disponível em: <<http://www.scientific.net/KEM.345-346.765>>. Acesso em: 5/6/2014.

ETSION, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248, 2005a. Disponível em: <<http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1467274>>. Acesso em: 2/10/2013.

ETSION, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 1, p. 248, 2005b. Disponível em: <<http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1467274>>. .

ETSION, I.; HALPERIN, G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal. , v. 45, p. 430–434, 2002.

GALDA, L.; PAWLUS, P.; SEP, J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve. **Tribology International**, v. 42, n. 10, p. 1505–1512, 2009. Elsevier. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09001765>>. Acesso em: 6/10/2013.

HUTCHINGS, I. Tribology-Friction and Wear of Engineering Materials. 1992. **Arnold, London**, 1992. Butterworth Heinemann.

JACOBS, G. **Lecture documentation Tribology**. 3rd ed. Druck & Verlagshaus Mainz, 2012.

JOS, F. MODELAGEM UNIDIMENSIONAL DO REGIME MISTO DE LUBRIFICAÇÃO APLICADA A SUPERFÍCIES TEXTURIZADAS. ,2010.

KLIGERMAN, Y.; ETSION, I.; SHINKARENKO, A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. **Journal of Tribology**, v. 127, n. 3, p. 632, 2005. Disponível em: <<http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1467382>>. Acesso em: 2/10/2014.

RYK, G.; KLIGERMAN, Y.; ETSION, I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. **Tribology Transactions**, v. 45(4), p. 444–449, 2002.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**. 2010.

STOETERAU, R.L.; SINATORA, A.; TERTULIANO, I.; PAVESI, C.; FRUCHTENGARTEN, F.; ONO, F. S. Study of dimple texturized surfaces operating without lubrication. **SAE International**, 2014.

TANG, W.; ZHOU, Y.; ZHU, H.; YANG, H. The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact. **Applied Surface Science**, v. 273, p. 199–204, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433213003061>>. Acesso em: 6/10/2013.

WANG, X.; LIU, W.; ZHOU, F.; ZHU, D. Preliminary investigation of the effect of dimple size on friction in line contacts. **Tribology International**, v. 42, n. 7, p. 1118–1123, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09000553>>. Acesso em: 6/10/2013.

WANG, X.; WANG, J.; ZHANG, B.; HUANG, W. Design principles for the area density of dimple patterns. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, 2014. Disponível em: <<http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/1350650114531939>>. Acesso em: 11/10/2014.

6 Anexo A - Características de máquinas utilizadas

6.1 Características da máquina laser utilizada

Pikosekunden-Laserstrahlstrukturiersystem

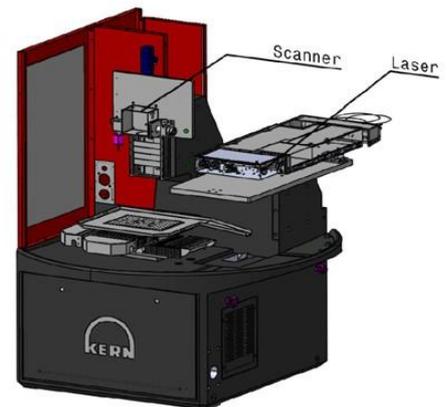
Laser module for 3D surface structuring

Laser source: Lumera Super-Rapid
 Wavelength: 1064 nm / 532 nm
 Repetition rate: 80 kHz - 1 MHz
 Pulse width: <15 ps
 Average output power: 18 W @ 1MHz

Scanner: Scanlab IntelliScan 10
 Marking speed: 3.0 m/s
 Jumping speed: 15 m/s
 Tracking error: 0.12 ms

Dynamical beam expander: Scanlab VarioScan 20

Laser operating volume: 50 x 50 x 2.5 mm³
 Optical lens: f=100 mm telecentric
 Focus diameter: 14 µm @ 1064 nm



6.2 Detalhes tribômetro Wazau

Technical specifications

Type of motion:	Sliding
Kind of motion:	Continuous - rotating / oscillating / vibrating
Overlapping movement:	Oscillation / Vibration
Geometry of specimen:	Pin - disc / disc - disc / ring - disc / ball - disc / four ball mechanism
Lubricant:	Without / fluids
Actuating elements:	Normal force / rotational speed / temperature
Sensory functions:	Normal force / active torque / distance / temperature / rotational speed
Normal force:	5 - 500 N (dynamic transfer of force)
Rotational speed:	0,1 - 3000 min ⁻¹ / 0,1 - 4000 min ⁻¹ / 0,1 - 6000 min ⁻¹ (depending on model)
Temperature:	RT - 150° C
Friction radius:	0 - 45 mm
Active torque:	0,5 / 1 / 2 / 5 Nm torque shaft (depending on model)
Spindle drive unit:	Air bearing spindle
Power input:	3 ~ 400 VAC / 5,5 kVA (depending on model) Compressed air
Dimensions (testing device):	ca. 850 x 1000 x 2200 mm (W x D x H)
Weight (testing device):	ca. 250 kg

[Show product leaflet](#)

7 Anexo B - Características do óleo utilizado no ensaio LFS -USP

ANÁLISES TÍPICAS*

Óleos Básicos		PARAFÍNICOS								NAFTENICOS			
Nomenclatura ANP		OBT	PSP09	PNL30	PNM55	PNP95	PBS33	PTL25	PTP85	PCL45	NH-10	NH-20	NH-140
GRAU		0-OBT	9	29	54	100	440	25	87	1000	8	19	118
Densidade @ 20/4°C		0,8415	0,8537	0,8713	0,8705	0,8846	0,9023	0,8586	0,8765	0,9340	0,8970	0,9017	0,9140
Ponto de Fulgor (VA)	(°C)	160	182	228	242	272	326	232	268	316	152	160	232
Ponto de Fluidez	(°C)	-6	-12	-6	-6	-6	-9	-6	-6	0	-39	-33	-18
Viscosidade @ 40°C	(cSt)	13,5	9,90	29,01	52,55	96,35	502,1	26,67	83,95	1.000	10,13	20,38	142,2
Viscosidade @ 100°C	(cSt)	3,20	2,61	5,06	7,22	10,8	32,46	4,96	10,23	43,0	2,39	3,59	9,96
Índice de Viscosidade		107	96	104	99	97	95	111	103	77	23	13	7
Cinzas Oxidadas	(% máss.)	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004	0,001	0,002	0,006	0,002	0,004	0,005
Índice de Acidez Total	(mgKOH/g)	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02
Resíduo de Carbono Ramsbottom	(% peso)	0,05	0,04	0,05	0,06	0,09	0,7	0,07	0,07	-	0,04	0,1	0,1
Corrosão em Lâmina de Cobre @ 3Hs e 100°C		1b	1b	1b	1b	1b	1b	1b	1b	1a	1b	1b	1b

* As Análises Típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações. Para informações mais detalhadas primeiramente consulte nossa assistência técnica.

Novembro/00

8 Anexo C - Resultados dos ensaios no instituto Fraunhofer IPT

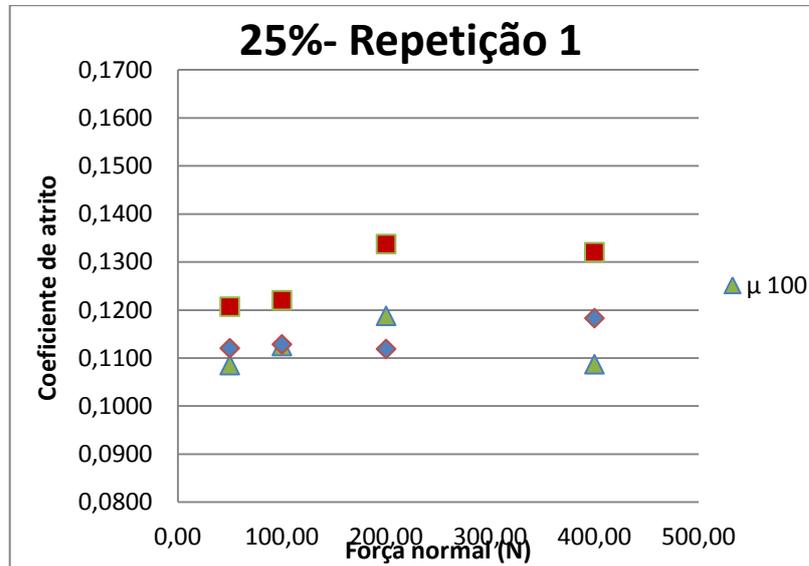


Figura 8.1 Repetição 1 - distribuição 25%

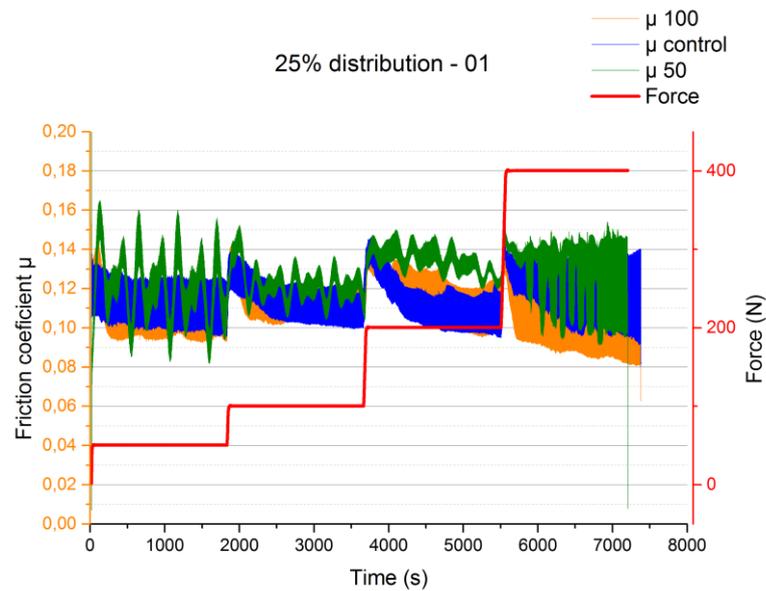


Figura 8.2 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 25%

Tabela 8.1 Resultados Repetição 1 - distribuição 25%

25% T01						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	100μm	controle	50μm	100μm	controle	50μm
50,00	0,1085	0,1121	0,1207	0,0102	0,0101	0,0164
100,00	0,1125	0,1129	0,1220	0,0076	0,0093	0,0084
200,00	0,1188	0,1119	0,1337	0,0110	0,0124	0,0061
400,00	0,1087	0,1183	0,1320	0,0165	0,0134	0,0156

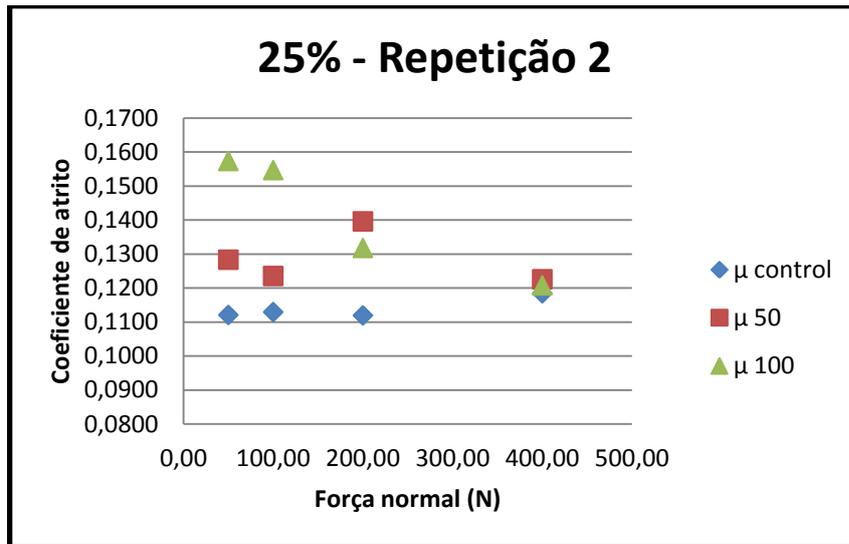


Figura 8.3 Repetição 2 - distribuição 25%

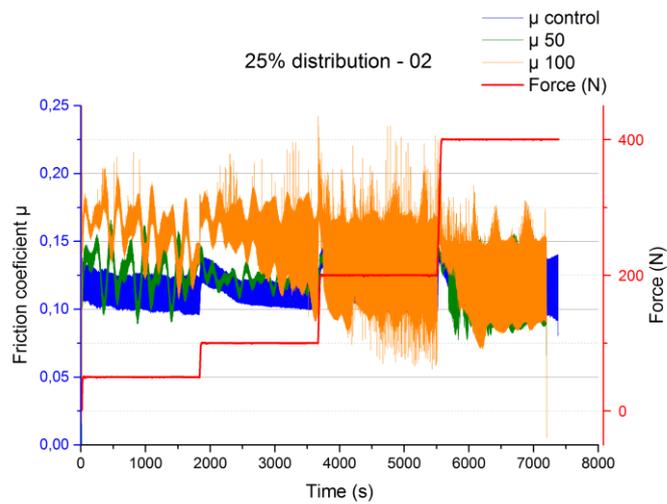


Figura 8.4 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 25%

Tabela 8.2 Resultados Repetição 2 - distribuição 25%

25% T02						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50μm	100μm	controle	50μm	100μm
50,00	0,1121	0,1283	0,1573	0,0101	0,0140	0,0162
100,00	0,1129	0,1235	0,1547	0,0093	0,0059	0,0210
200,00	0,1119	0,1396	0,1318	0,0124	0,0054	0,0312
400,00	0,1184	0,1226	0,1208	0,0134	0,0207	0,0254

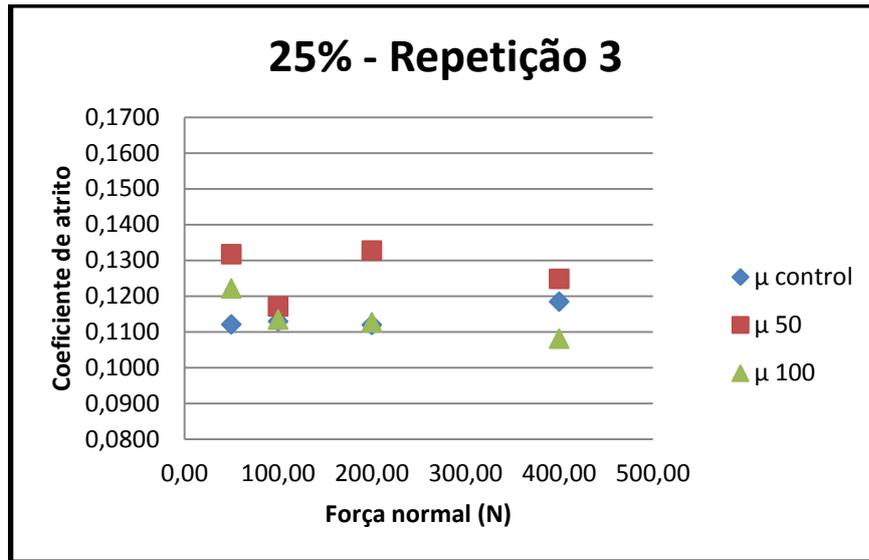


Figura 8.5 Repetição 3 - distribuição 25%

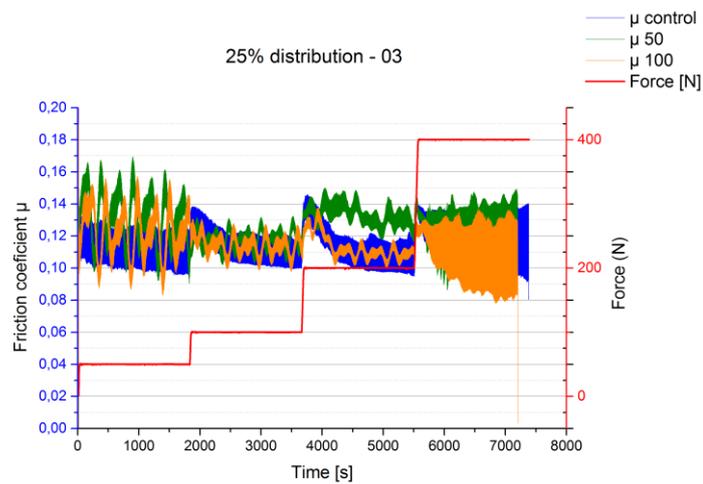


Figura 8.6 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 25%

Tabela 8.3 Resultados Repetição 3 - distribuição 25%

25% T03						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50 μ m	100 μ m	controle	50 μ m	100 μ m
50,00	0,1121	0,1317	0,1221	0,0101	0,0149	0,0142
100,00	0,1129	0,1171	0,1134	0,0093	0,0056	0,0059
200,00	0,1119	0,1327	0,1127	0,0124	0,0062	0,0074
400,00	0,1184	0,1248	0,1081	0,0134	0,0164	0,0171

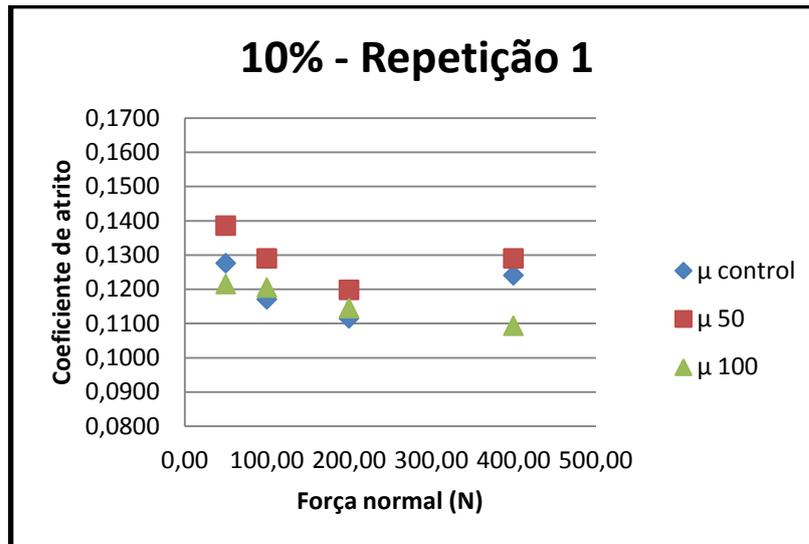


Figura 8.7 Repetição 1 - distribuição 10%

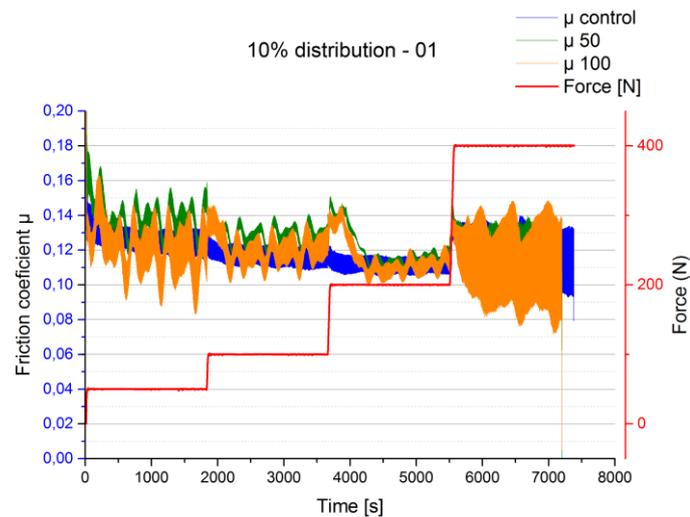


Figura 8.8 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 10%

Tabela 8.4 Resultados Repetição 1 - distribuição 10%

10% T01						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50 μ m	100 μ m	controle	50 μ m	100 μ m
50,00	0,1276	0,1386	0,1215	0,0059	0,0104	0,0132
100,00	0,1171	0,1290	0,1205	0,0042	0,0050	0,0083
200,00	0,1115	0,1198	0,1145	0,0035	0,0106	0,0101
400,00	0,1241	0,1290	0,1093	0,0108	0,0049	0,0193

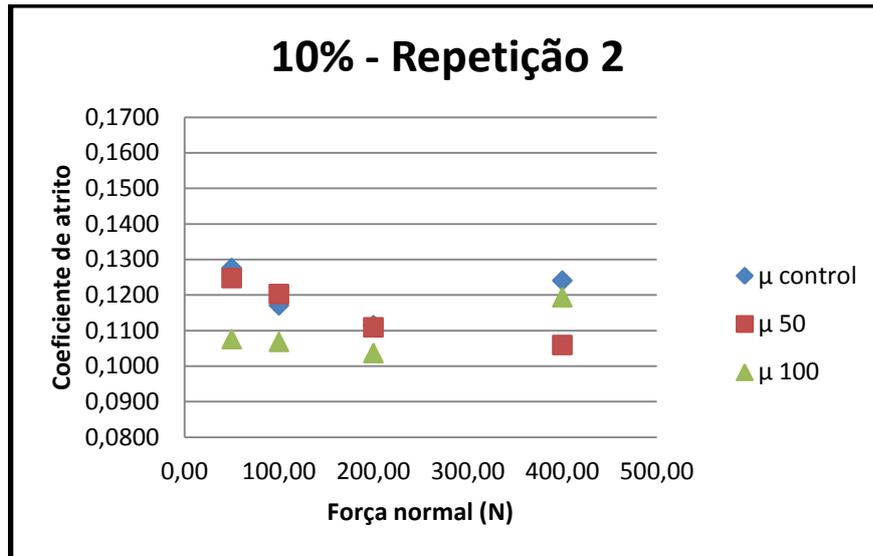


Figura 8.9 Repetição 2 - distribuição 10%

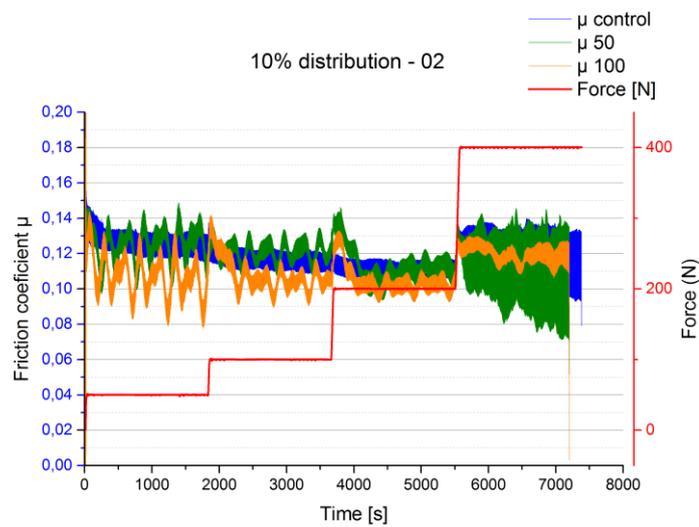


Figura 8.10 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 10%

Tabela 8.5 Resultados Repetição 2 - distribuição 10%

10% T02						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50μm	100μm	controle	50μm	100μm
50,00	0,1276	0,1248	0,1076	0,0059	0,0094	0,0112
100,00	0,1171	0,1203	0,1068	0,0042	0,0060	0,0092
200,00	0,1115	0,1109	0,1037	0,0035	0,0106	0,0080
400,00	0,1241	0,1059	0,1194	0,0108	0,0196	0,0051

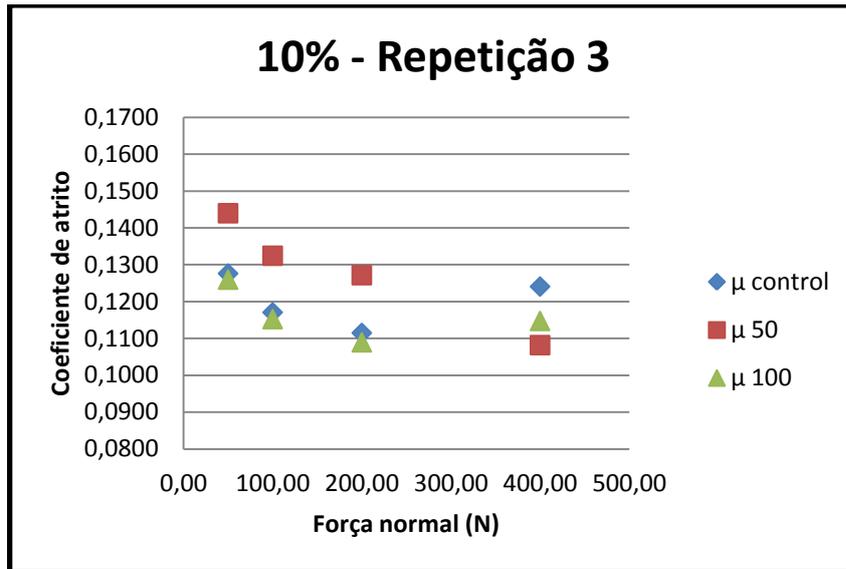


Figura 8.11 Repetição 3 - distribuição 10%

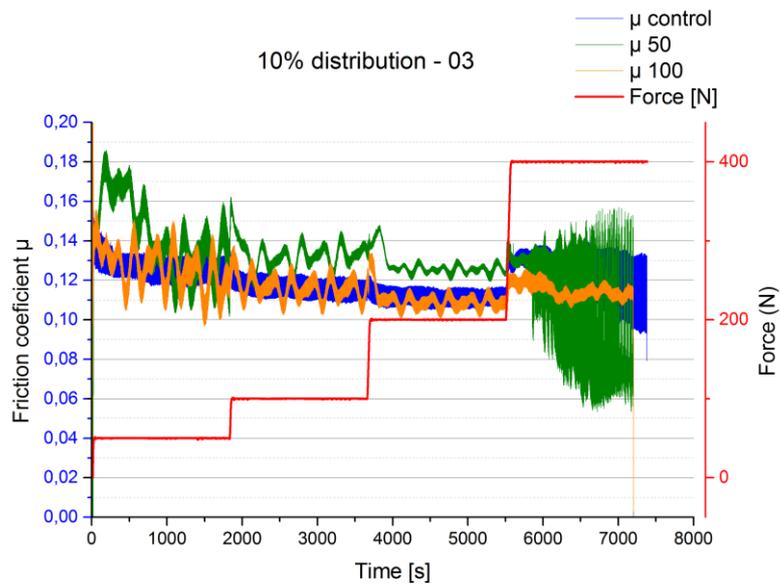


Figura 8.12 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 10%

Tabela 8.6 Resultados Repetição 3 - distribuição 10%

10% T03						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50µm	100µm	controle	50µm	100µm
50,00	0,1276	0,1440	0,1259	0,0059	0,0182	0,0105
100,00	0,1171	0,1324	0,1152	0,0042	0,0065	0,0058
200,00	0,1115	0,1272	0,1089	0,0035	0,0055	0,0047
400,00	0,1241	0,1082	0,1147	0,0108	0,0278	0,0046

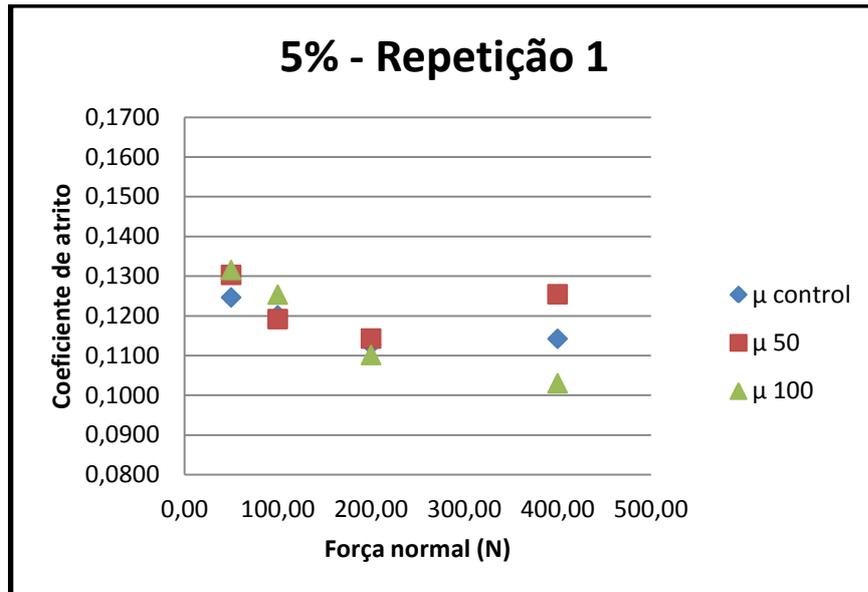


Figura 8.13 Repetição 1 - distribuição 5%

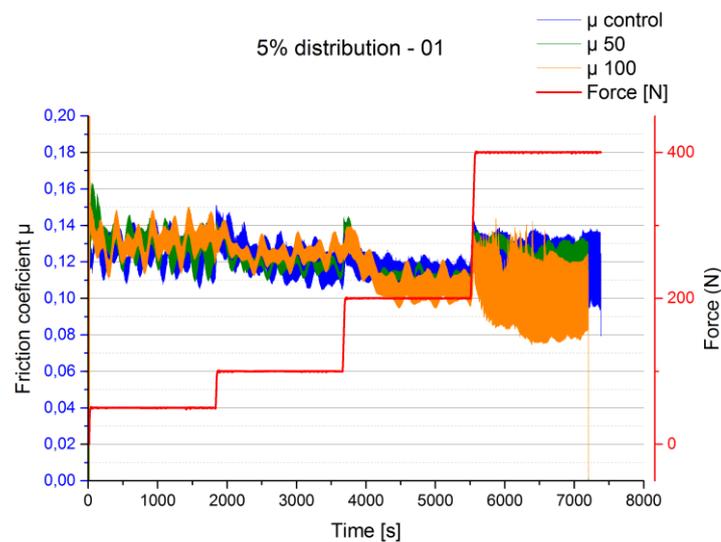


Figura 8.14 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 1 5%

Tabela 8.7 Resultados Repetição 1 - distribuição 5%

5% T01						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50 μ m	100 μ m	controle	50 μ m	100 μ m
50,00	0,1246	0,1303	0,1315	0,0074	0,0083	0,0074
100,00	0,1201	0,1192	0,1254	0,0085	0,0055	0,0051
200,00	0,1128	0,1143	0,1101	0,0079	0,0078	0,0097
400,00	0,1142	0,1254	0,1030	0,0164	0,0062	0,0172

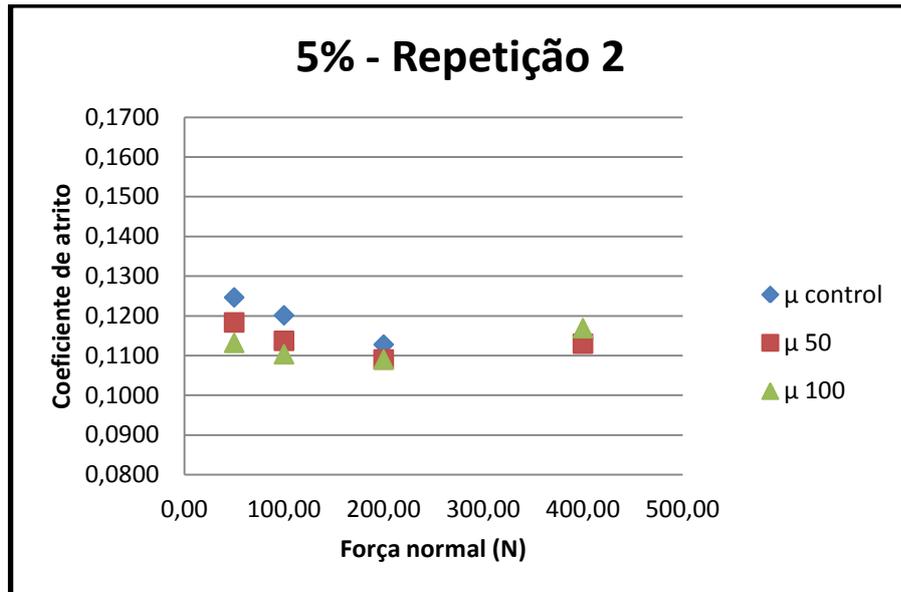


Figura 8.15 Repetição 2 - distribuição 5%

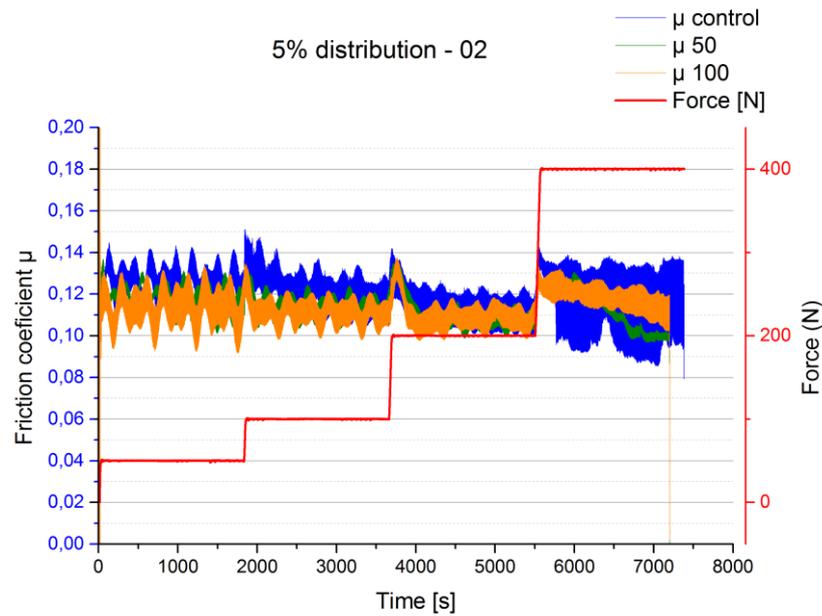


Figura 8.16 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 2 5%

Tabela 8.8 Resultados Repetição 2 - distribuição 5%

5% T02						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50 μ m	100 μ m	controle	50 μ m	100 μ m
50,00	0,1246	0,1183	0,1132	0,0074	0,0057	0,0082
100,00	0,1201	0,1137	0,1103	0,0085	0,0045	0,0056
200,00	0,1128	0,1090	0,1090	0,0079	0,0074	0,0071
400,00	0,1142	0,1130	0,1169	0,0164	0,0108	0,0067

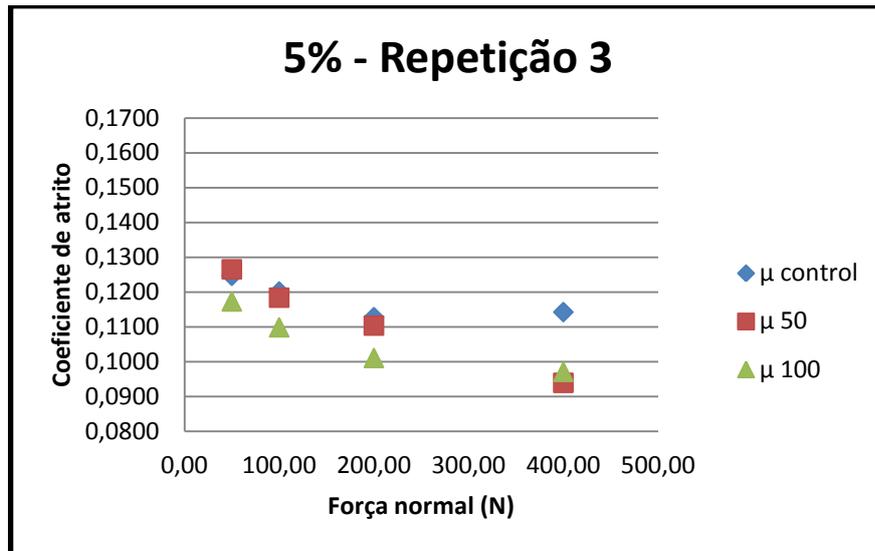


Figura 8.17 Repetição 3 - distribuição 5%

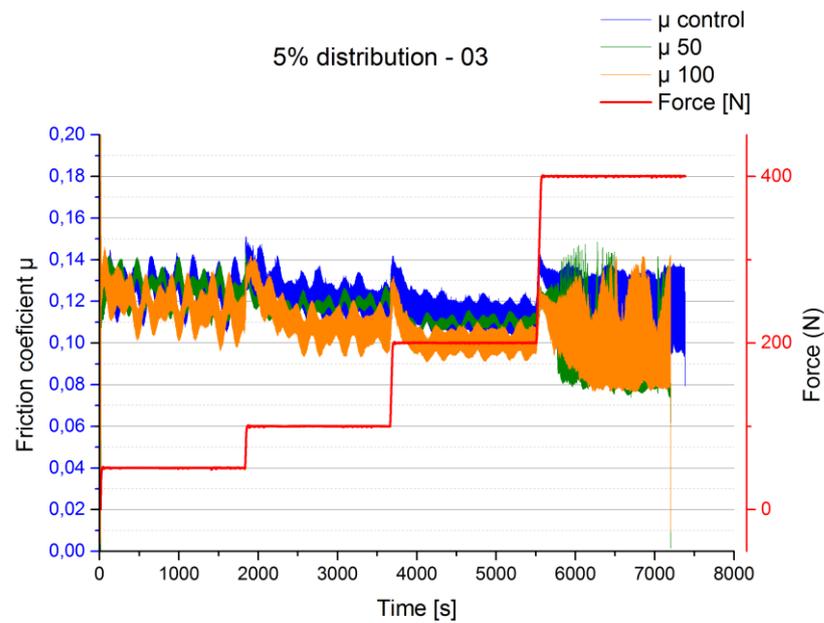


Figura 8.18 Coeficiente de atrito ao longo da repetição 3 5%

Tabela 8.9 Resultados Repetição 3 - distribuição 5%

5% T03						
Força normal (N)	Coeficiente de atrito			Desvio padrão		
Force	controle	50μm	100μm	controle	50μm	100μm
50,00	0,1246	0,1265	0,1173	0,0074	0,0061	0,0083
100,00	0,1201	0,1184	0,1098	0,0085	0,0039	0,0099
200,00	0,1128	0,1103	0,1010	0,0079	0,0035	0,0065
400,00	0,1142	0,0939	0,0970	0,0164	0,0190	0,0174

9 Anexo D - Resultados ensaio LFS

Os resultados que não foram apresentados no texto se encontram neste anexo.

9.1 Ensaio 1 25%

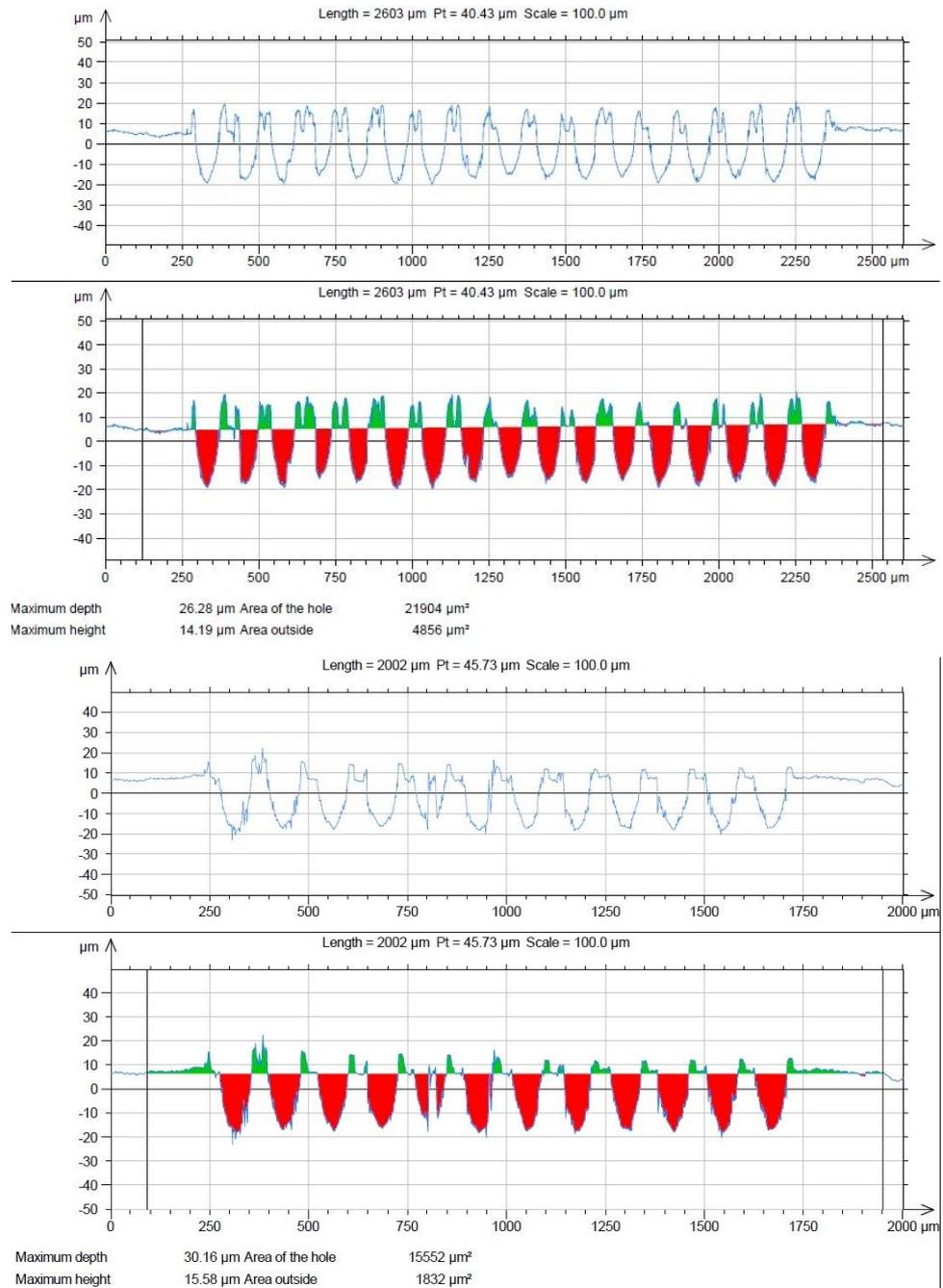


Figura 9.1 Perfil da direção 1 do Ensaio 1 25%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

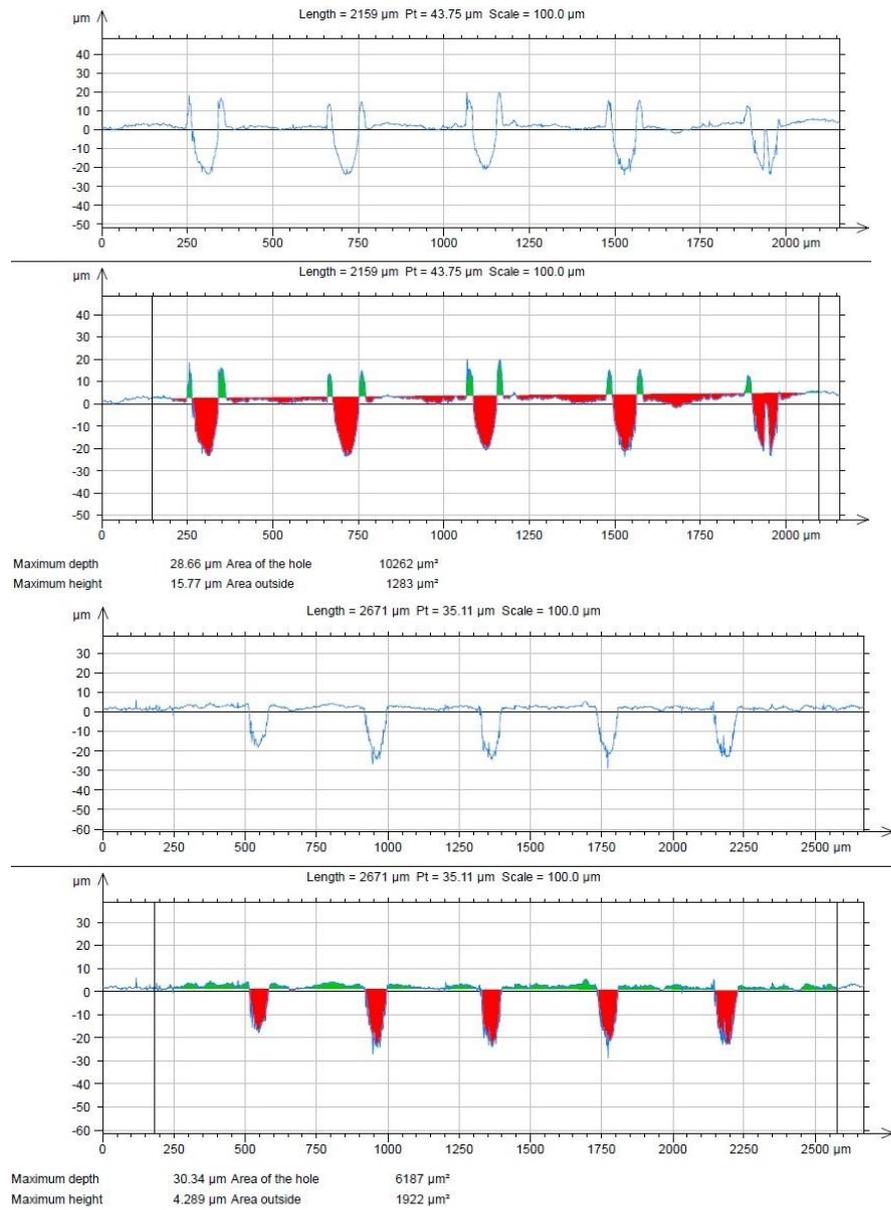


Figura 9.2 Perfil da direção 2 do Ensaio 1 25%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

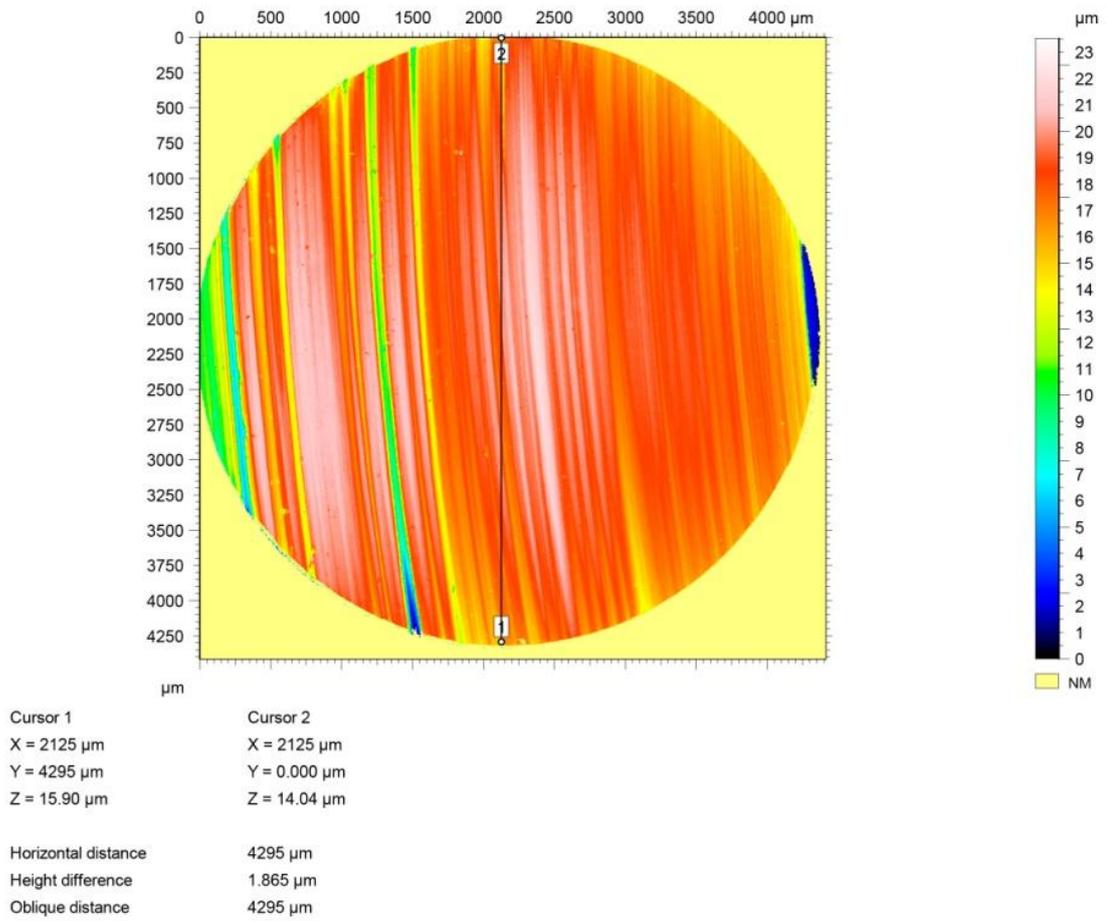


Figura 9.3 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 25%

9.2 Ensaio 1 100%

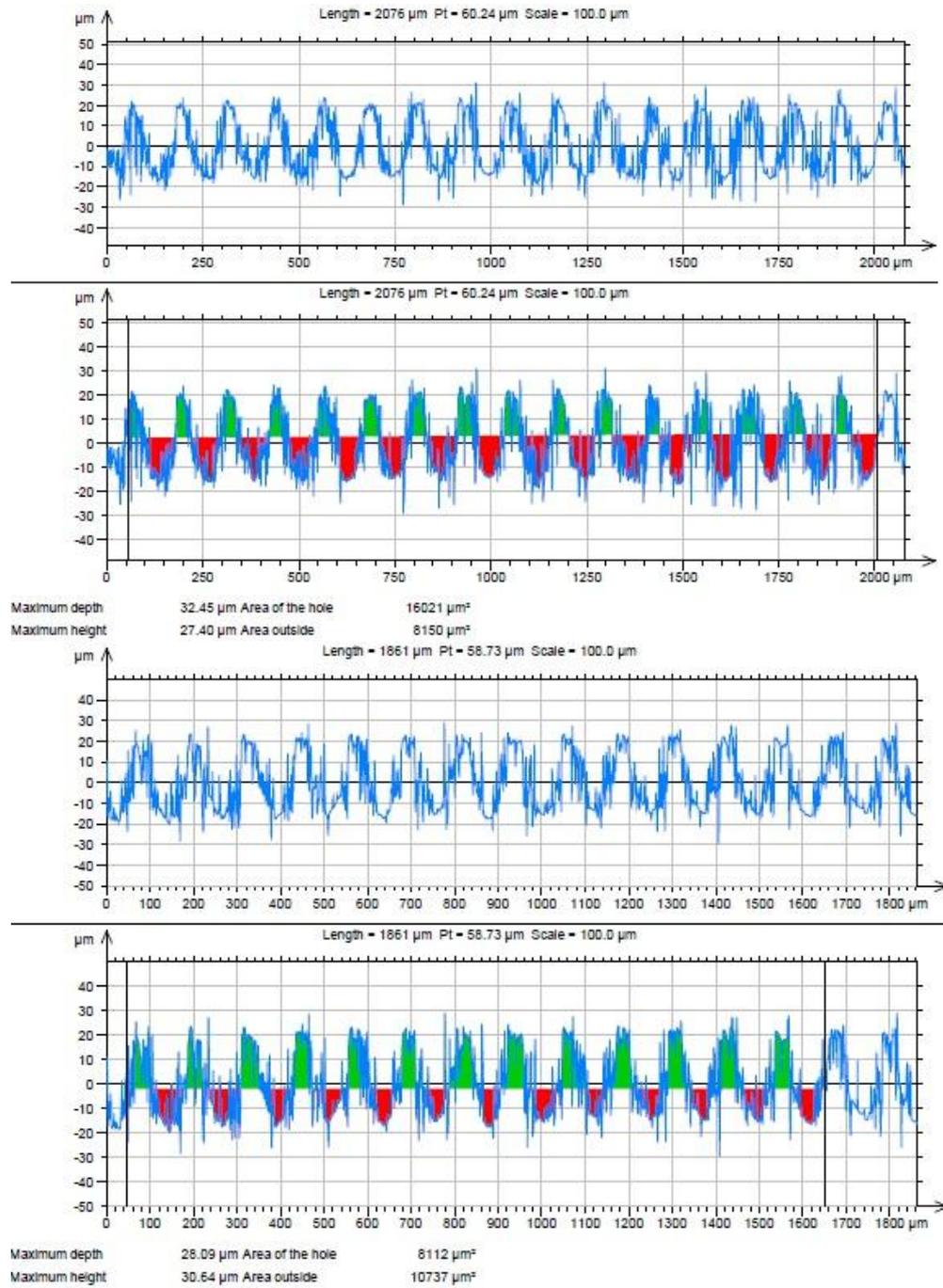


Figura 9.4 Perfil da direção 1 do Ensaio 1 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

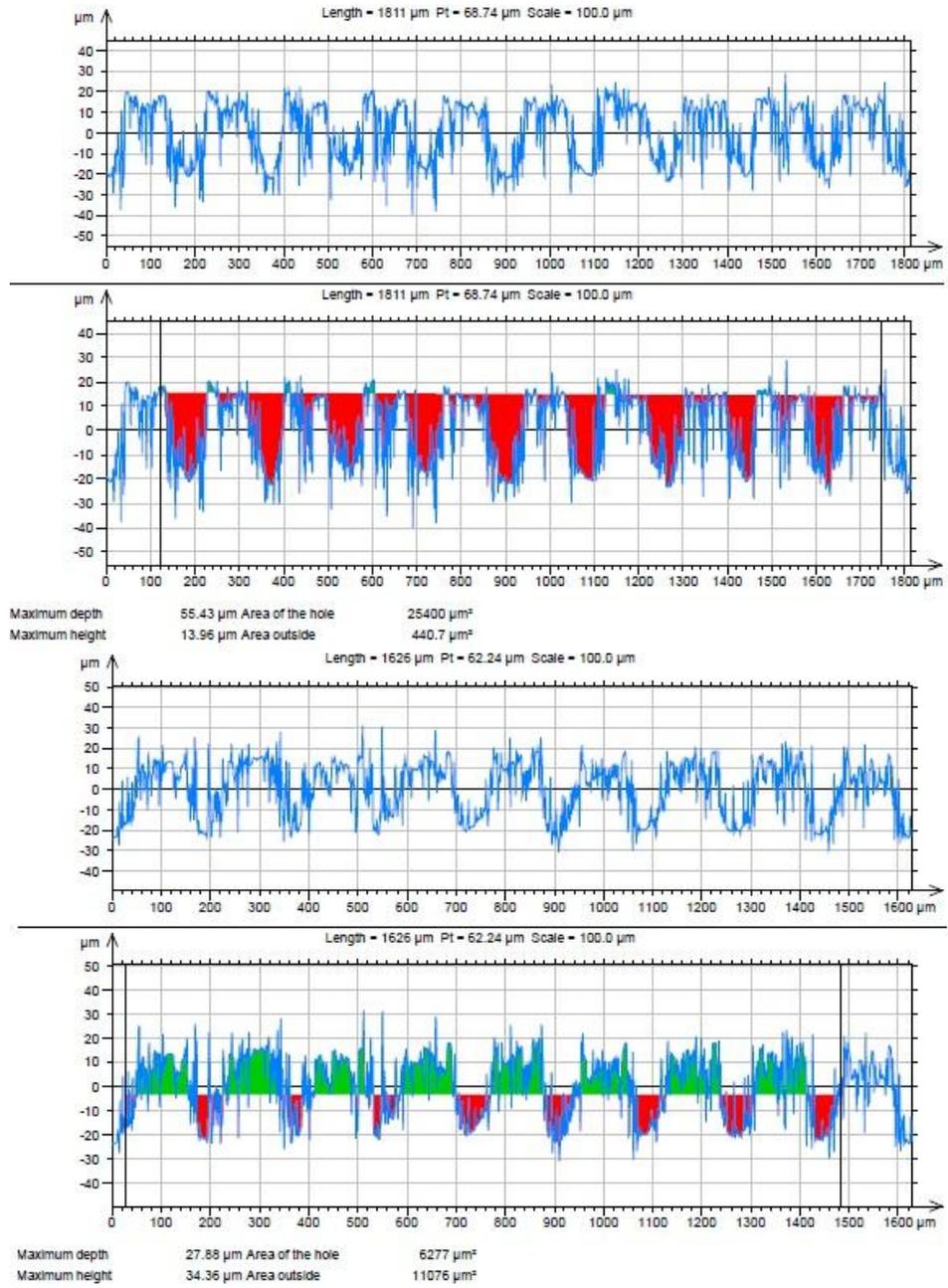


Figura 9.5 Perfil da direção 2 do Ensaio 1 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

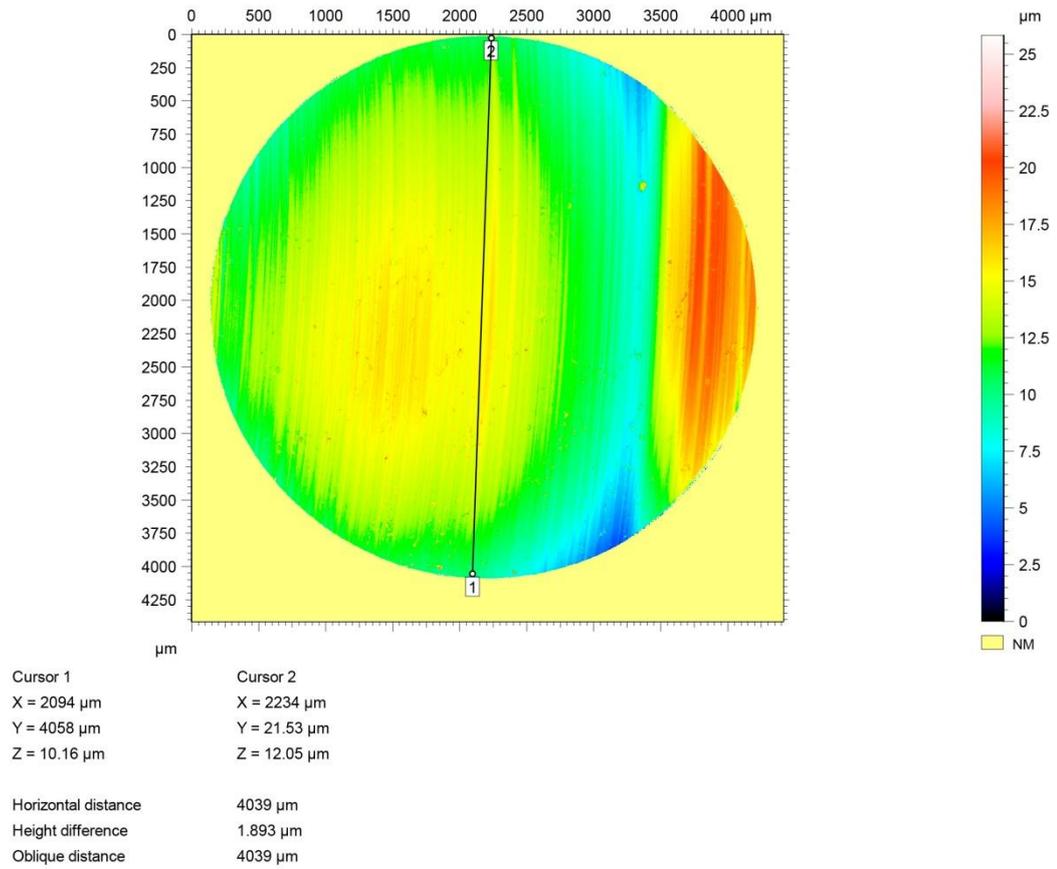


Figura 9.6 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 100%

9.3 Ensaio 2 100%

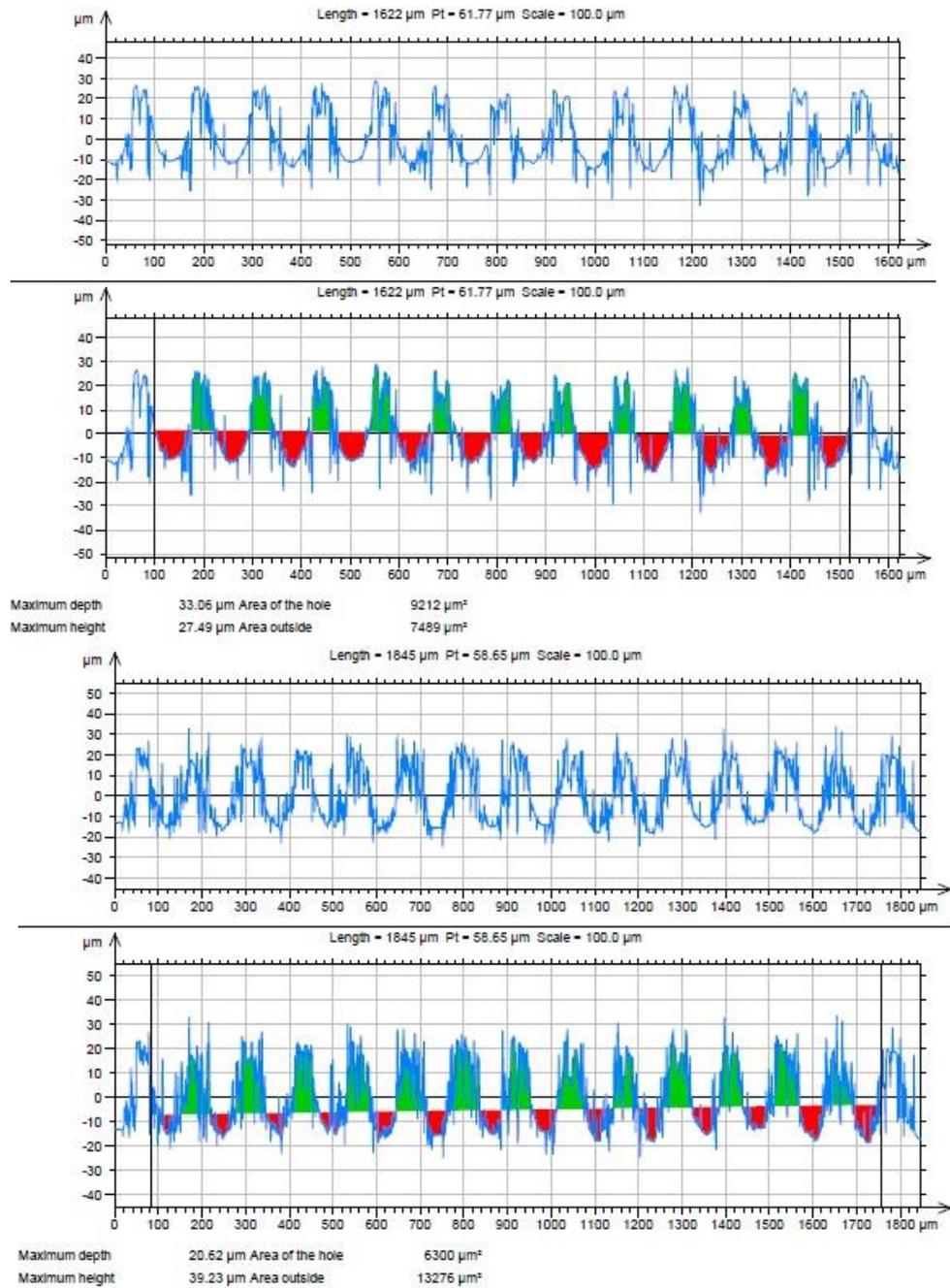


Figura 9.7 Perfil da direção 1 do Ensaio 2 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

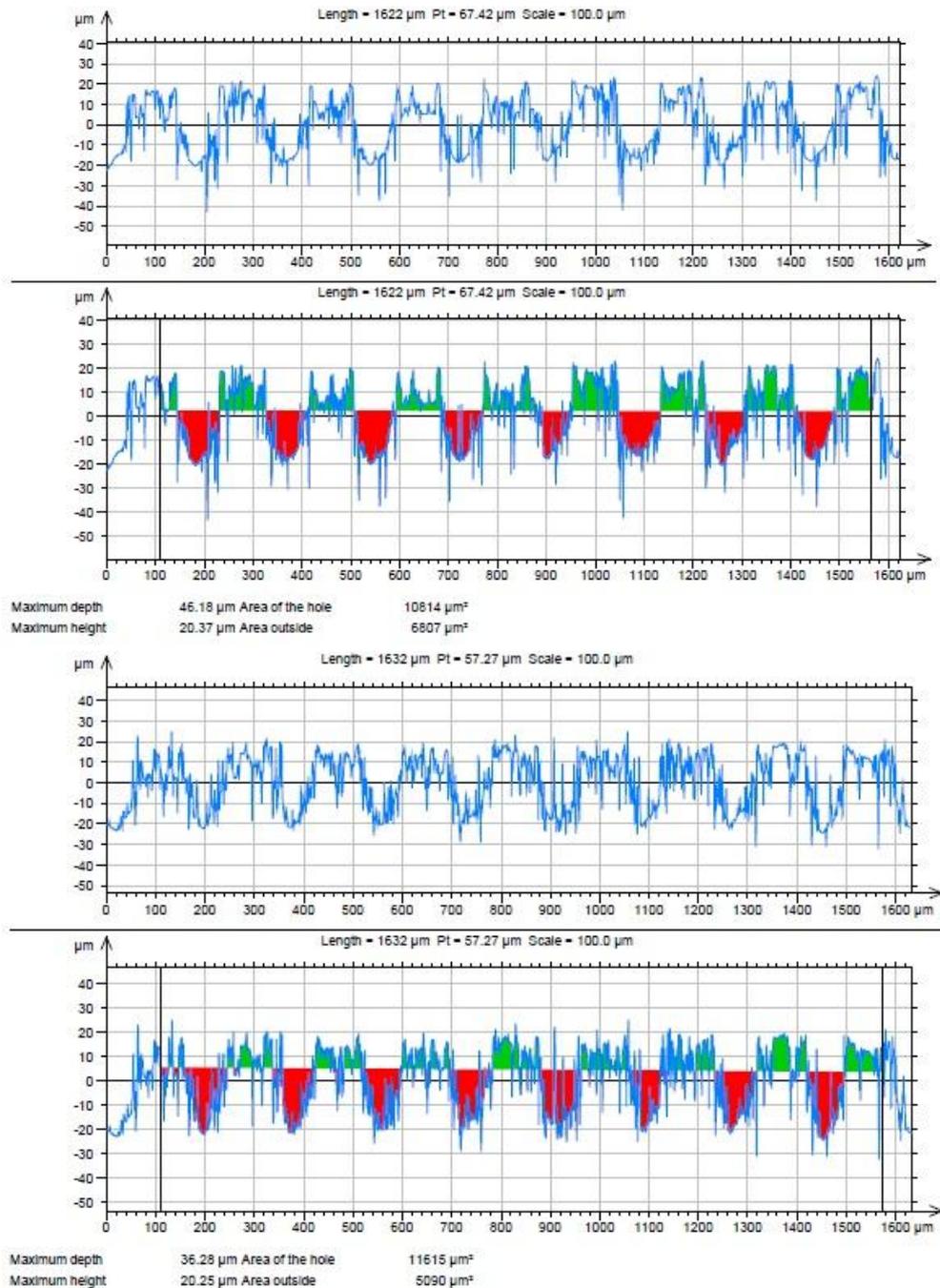


Figura 9.8 Perfil da direção 2 do Ensaio 2 100%. Acima antes do ensaio e abaixo após o ensaio

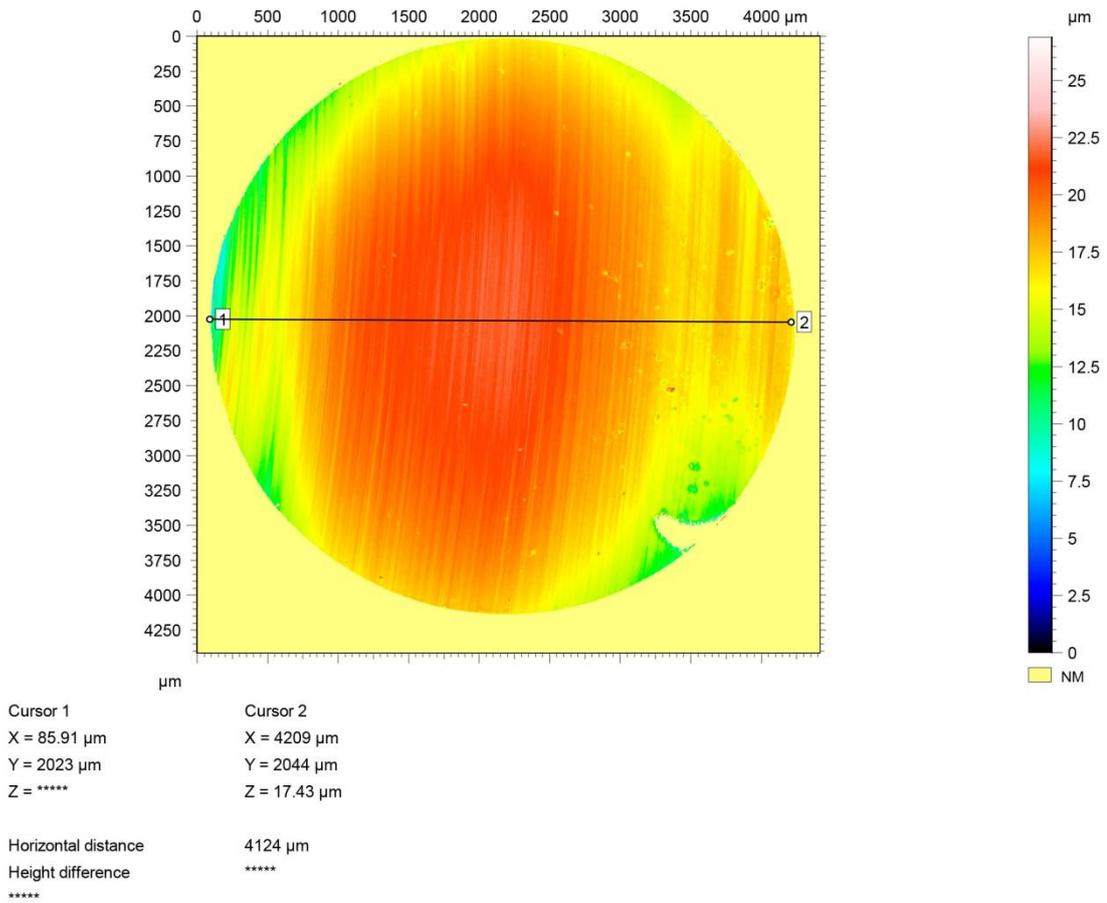


Figura 9.9 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 2 100%

9.4 Ensaio 1 Sem diple

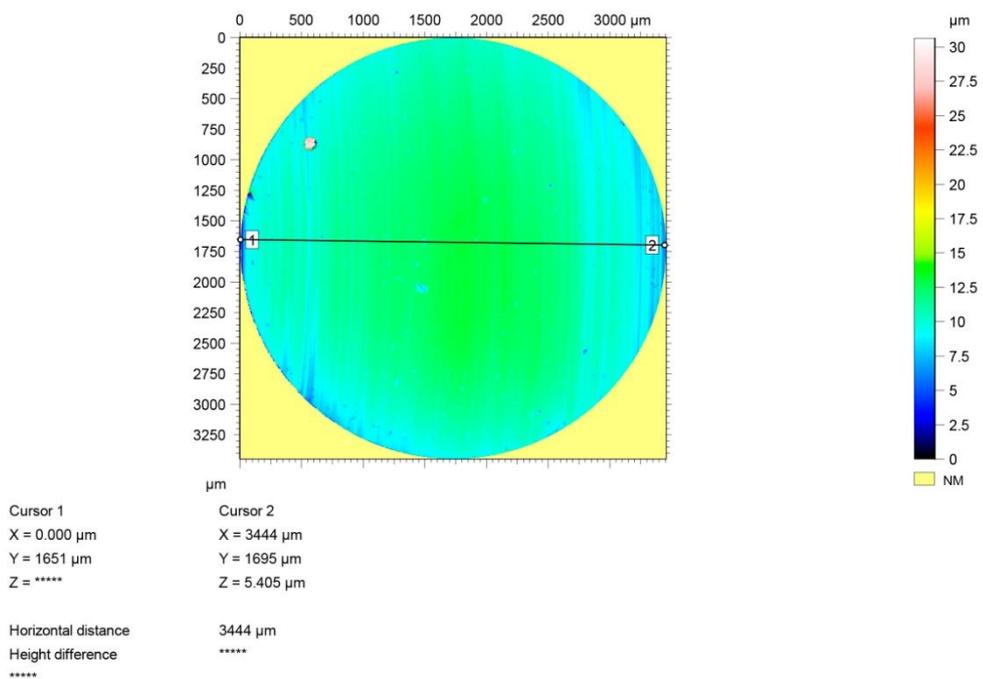


Figura 9.10 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 1 SD

9.5 Ensaio 2 Sem dimple

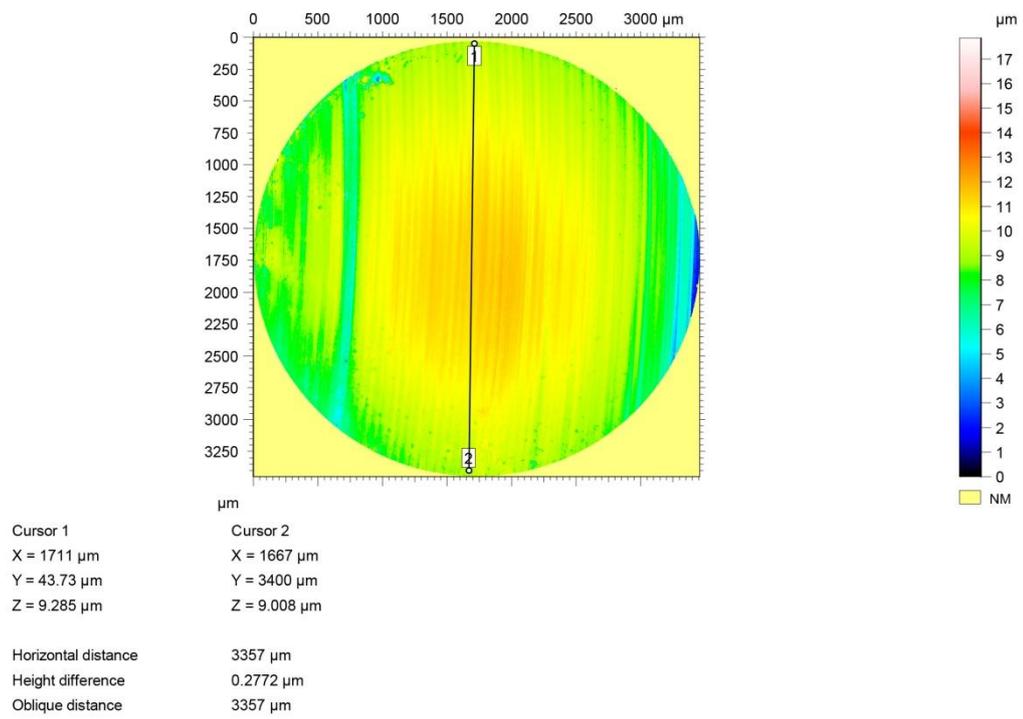


Figura 9.1 Imagem do diâmetro da esfera após o Ensaio 2 SD