

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME DE CASTRO SANCHES

RAFAEL GODOY CATISTI

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS NO DESEMPENHO DE AÇO
PERLÍTICO EM DESLIZAMENTO LUBRIFICADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(TCC2)

CURITIBA

2019

GUILHERME DE CASTRO SANCHES

RAFAEL GODOY CATISTI

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS NO DESEMPENHO DE AÇO
PERLÍTICO EM DESLIZAMENTO LUBRIFICADO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Cousseau

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Influência de parâmetros topográficos no desempenho de aço perlítico em deslizamento lubrificado”, realizada pelos alunos Guilherme de Castro Sanches e Rafael Godoy Catisti como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Tiago Cousseau
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Orientador

Profa. Dra. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliadora

Prof. Dr. Euclides Alexandre Bernardelli
Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 03 de julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Desejamos aqui expressar os mais sinceros agradecimentos à todas as pessoas que fizeram parte da execução deste trabalho:

Primeiramente ao Prof. Tiago Cousseau, pela apresentação do tema e pela orientação desde o projeto de pesquisa à conclusão da monografia, estando sempre disponível para discussão e esclarecimento de dúvidas durante o período de execução da mesma. Ao mestrando Bruno Ferrer, pelo compartilhamento dos conhecimentos do seu programa de mestrado correlacionados ao tema deste trabalho, além dos conhecimentos de operação dos equipamentos utilizados.

Aos professores Giuseppe Pintaúde e Julio Klein pela avaliação inicial do trabalho e pelas recomendações na execução das etapas experimentais. Ao Professor Euclides Bernardelli e à Professora Ana Paula pelas recomendações e avaliação final deste trabalho.

Aos familiares, que sempre estiveram aos nossos lados oferecendo enorme apoio e compreendem que, não somente durante a elaboração do trabalho de conclusão de curso, mas durante todo o curso da graduação, em certos momentos esta jornada significou abdicções e ausências.

Eu, Guilherme, presto agradecimentos em especial aos amigos Bruno Andreatta, Eliseu Ramos e Felipe Possoli pelo companheirismo desde o início da graduação.

Eu, Rafael, presto agradecimentos em especial à minha namorada Bruna Tibes e ao amigo Leanard.

RESUMO

Catisti, Rafael Godoy; Sanches, Guilherme de Castro. Influência de parâmetros topográficos no desempenho de aço perlítico em deslizamento lubrificado. 83 f. Trabalho de conclusão de curso – TCC2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O transporte ferroviário no Brasil é o segundo maior meio de transporte de cargas, ficando atrás apenas do transporte rodoviário, transportando mais de 500 milhões de toneladas por ano. O sistema de contato entre roda de trem e o trilho possui uma grande importância no funcionamento das ferrovias, visto que é o local que recebe toda a carga do trem. Em situações em que o atrito é alto, como em curvas, pode haver um grande desgaste do sistema. O desgaste destes elementos gera um grande custo para a manutenção das ferrovias, além de servirem como um empecilho para um possível aumento de cargas ou velocidades, pois ao aumentarem, resultam em maiores valores de atrito e desgaste. A literatura indica que há uma relação entre parâmetros como a rugosidade média (S_a) e o coeficiente de atrito, assim como estudos apontam a relação de outros parâmetros como *Skewness* (S_{sk}) e *Kurtosis* (S_{ku}). Todavia, existem muitos parâmetros que definem a textura de uma superfície e não se tem na literatura relações exatas entre estes parâmetros e sua influência no coeficiente de atrito e no desgaste. Este trabalho tem como objetivo encontrar uma relação entre parâmetros de rugosidade e o coeficiente de atrito e desgaste para este caso específico do sistema roda-trilho de trem, replicando a interação deste conjunto através de ensaio pino-disco lubrificado.

Palavras-chave: Ferrovia, Textura de superfície, Atrito, Lubrificação, Desgaste.

ABSTRACT

Catisti, Rafael Godoy; Sanches, Guilherme de Castro. Influence of surface parameters on performance of pearlitic steel in lubricated sliding. 83 p. Undergraduate thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Railway transport in Brazil is its second largest means of cargo transport, behind only to road transport, transporting more than 500 million tons per year. The train wheel to rail contact system is very important in the operation of the railways, this is a place that receives all the load of the train, so in situations of friction as occurs during curves, there can be a great wear of the system. The wear of these elements generates a great cost for the maintenance of the railroads, besides serving as a barrier for a possible increase of loads or speeds, as these increases result in higher values of friction. The literature indicates that there is a relationship between parameters such as mean roughness (S_a) and the coefficient of friction, as well as studies shows the relationship of other parameters such as Skewness (S_{sk}) and Kurtosis (S_{ku}). However, there are many parameters that define a surface's texture and there is no exact relationship between these parameters and their influence on the coefficient of friction and wear. This work aims to find a relationship between roughness parameters and the coefficient of friction and wear for this specific case of the train wheel-rail system, replicating the interaction of this pair through lubricated pin-disk test.

Keywords: Railway, Surface texture, Friction, Lubrication, Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ilustração do contato roda-trilho e das faces bitola da flange e do trilho.....	15
Figura 2: Regiões de contato entre a roda e o trilho de trem.	15
Figura 3: Ensaio realizado por Rabinowicz para superfícies de cobre contra cobre, com carga de 10N e velocidade 0,1mm/s, sem lubrificação.	20
Figura 4: Áreas reais de contato (A_j) entre duas superfícies sólidas.....	20
Figura 5: Elementos constituintes da topografia de uma superfície metálica.	22
Figura 6: Efeito de suavização provocado pela dimensão e forma do apalpador.	23
Figura 7: Funcionamento básico de um interferômetro ótico.	24
Figura 8: Distorção do perfil devido à relação entre escalas horizontal e vertical.	25
Figura 9: Representação da divisão da textura em triângulos.....	27
Figura 10: Diferença de textura em superfícies de S_a semelhantes.....	29
Figura 11: Força de adesão entre metais de diferentes estruturas cristalinas.	31
Figura 12: Exemplificação de uma junta de adesão entre asperezas de duas superfícies.	32
Figura 13: Ilustração do filme de transferência (a) e partícula de desgaste (b).....	32
Figura 14: Geometrias de contato.	33
Figura 15: Contato da roda com o trilho.	34
Figura 16: Regimes de lubrificação. Gráfico conhecido como Curva de Stribeck.	35
Figura 17: Coeficiente de atrito e de desgaste em função de λ	36
Figura 18: Ação da pressão hidrodinâmica no lubrificante.....	38
Figura 19: Fluxograma de preparação dos discos.	39
Figura 20: Obtenção dos corpos de prova.	40
Figura 21: Contato roda trilho (esquerda) e contato pino-disco (direita).	42
Figura 22: Tribômetro UMT.	42
Figura 23: Interferômetro CCI lite.	43
Figura 24: Durômetro EMCOTEST	44
Figura 25: Funcionamento do retentor de graxa.	47
Figura 26: Retentor de graxa.....	47
Figura 27: Superfície característica do grupo X.	51
Figura 28: Superfície característica do grupo Y.	51
Figura 29: Superfície característica do grupo Z.....	52
Figura 30: Ensaio do grupo X no tribômetro.....	57

Figura 31: Ensaio do grupo Y no tribômetro.....	57
Figura 32: Ensaio do grupo Z no tribômetro.....	58
Figura 33: Exemplo de segmento considerado para obtenção da média do coeficiente de atrito.	58
Figura 34: Gráfico coeficiente de atrito por V_{vc}	59
Figura 35: Gráfico coeficiente de atrito por V_{mc}	59
Figura 36: Coeficiente de atrito (COF) por S_{dq} , medido em graus.	61
Figura 37: Coeficiente de atrito (COF) por S_{dr}	61
Figura 38: Coeficiente de atrito (COF) por S_{pc}	62
Figura 39: Coeficiente de atrito (COF) por S_v	62
Figura 40: Coeficiente de atrito (COF) por S_z	63
Figura 41: Coeficiente de atrito (COF) pela perda de massa dos discos.	63
Figura 42: Caracterização dos discos após ensaio.	69
Figura 43: Caracterização dos pinos após ensaio.....	70
Figura 44: Definição do parâmetro R_{sk}	72
Figura 45: Definição do parâmetro R_{ku}	73
Figura 46: Exemplificação do parâmetro Str	74
Figura 47: Exemplificação do parâmetro Std	75
Figura 48: Exemplificação do parâmetro S_{pk} , S_k , S_{vk} , S_{mr1} , S_{mr2}	76
Figura 49: Exemplificação do parâmetro V_m	77
Figura 50: Exemplificação dos parâmetros V_{mp} e V_{mc}	78
Figura 51: Exemplificação do parâmetro S_{ds}	79
Figura 52: Definição do parâmetro R_{3z}	79
Figura 53: Parâmetro S_{xp} mostrado na curva de razão de material, para mr_1 2,5% e mr_2 50%.	81
Figura 54: Exemplificação dos parâmetros de volume V_{vc} , V_{vv} , V_{mc} e V_{mp} na curva de razão de material.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição dos aços para fabricação de rodas ferroviárias.	18
Tabela 2: Composição química dos aços para fabricação de trilhos ferroviários.	18
Tabela 3: Composição química nominal, em peso, de trilhos convencionais.	40
Tabela 4: Composição química nominal, em peso, de rodas ferroviárias, por classe.	41
Tabela 5: Sumarização do tempo empregado em laboratório.	48
Tabela 6: Dureza dos discos.	50
Tabela 7: Caracterização da superfície de todas as amostras.	53
Tabela 8: Índice de plasticidade das amostras.	54
Tabela 9: Massa dos discos, em gramas.	54
Tabela 10: Massa dos pinos em gramas.	55
Tabela 11: Perda de massa dos pinos.	55
Tabela 12: Perda de massa dos discos.	56
Tabela 13: Coeficiente de desgaste k.	56
Tabela 14: Valores do coeficiente de correlação R ²	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Justificativa	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Sistema roda-trilho	14
2.2	<i>Material da Roda</i>	17
2.3	Material do trilho	18
2.4	Contato de superfícies	19
2.5	Topografia de superfície	21
2.6	Medição da topografia da superfície	23
2.7	Definição dos parâmetros de superfície.....	26
2.7.1	<i>Raiz quadrada do gradiente da superfície (Sdq)</i>	26
2.7.2	<i>Razão de área interfacial desenvolvida (Sdr)</i>	26
2.7.3	<i>Curvatura de pico (Spc)</i>	27
2.7.4	<i>Máxima altura da superfície (Sz) e máxima profundidade de vale (Sv)</i>	27
2.8	Parâmetros de rugosidade relacionados ao Coeficiente de Atrito	28
2.9	Desgaste de superfícies.....	29
2.9.1	<i>Desgaste por deslizamento</i>	30
2.9.2	<i>Adesão e desgaste por adesão</i>	30
2.10	Lubrificação.....	33
2.10.1	<i>Graxa</i>	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais dos corpos de prova	39
3.2	Equipamentos	41
3.2.1	<i>Tribômetro</i>	41
3.2.2	<i>Interferômetro</i>	43
3.2.3	<i>Durômetro</i>	44
3.3	Procedimento experimental	44
3.3.1	<i>Medição da dureza dos pinos e discos</i>	45
3.3.2	<i>Lixamento</i>	45
3.3.3	<i>Caracterização da superfície</i>	46

3.3.4	Medição da massa dos discos e pinos	46
3.3.5	Retentor de graxa.....	46
3.3.6	Ensaio no Tribômetro	48
4	RESULTADOS.....	50
4.1	Dureza	50
4.2	Caracterização da superfície	51
4.3	Índice de plasticidade.....	53
4.4	Massa das amostras	54
4.5	Ensaio no Tribômetro	56
4.6	Comportamento do atrito em função dos parâmetros	59
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE	69
	ANEXO A	71
	Parâmetros de rugosidade média e raiz quadrada da rugosidade média	71
	Parâmetros de rugosidade de Skewness e o Kurtosis.....	71
	Parâmetros de autocorrelação de comprimento	74
	Parâmetros de Razão de Aspecto da Textura	74
	Parâmetro direção da textura.....	75
	Parâmetros da curva de relação material da área	75
	Parâmetros de volume de material	77
	Parâmetro de densidade do cume	78
	Parâmetro da média do terceiro ponto de altura	79
	Parâmetro altura do décimo ponto.....	80
	Parâmetro densidade de picos	80
	Parâmetro Altura Extrema de Pico.....	80
	Parâmetros de Volume	81
	Outros parâmetros para a análise do coeficiente de atrito.....	83

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário possui uma grande importância na economia de um grande país, no Brasil a construção da malha ferroviária teve seu início em 1835 com a Lei nº 101, que propunha privilégios a empresas que tivessem interesse nas obras. Porém não houve interessados até 1845, quando o Barão de Mauá recebeu a concessão do governo imperial para a construção, inaugurando assim a primeira seção em 1854. (DNIT, 2018).

Em 1922 o Brasil já possuía uma malha ferroviária de 29 mil quilômetros de extensão. Durante o século 20 muitas atualizações na malha foram realizadas, tais como a introdução da tração elétrica e substituição da tração a vapor pela diesel-elétrica. Quanto ao tamanho da malha não houve um grande avanço, durante todo o século 20 apenas 700 novos quilômetros de malha foram construídos. (ANTT, 2018).

A desestatização da malha ferroviária teve início no ano de 1992, tendo o processo finalizado em 1998, com isso a rede ferroviária se manterá privatizada por 30 anos, podendo ser prorrogada por mais 30 anos. Durante os 19 anos seguintes a realização da desestatização, o transporte de cargas pelas ferrovias brasileiras obteve um crescimento de 112% na quantidade de cargas transportadas, aumentando de 253 milhões de toneladas em 1998 para 538 milhões em 2017. (ANTT, 2018).

Entre 2006 e 2013 ocorreram 8738 acidentes segundo o sistema de acompanhamento e fiscalização do transporte ferroviário da Agência Nacional De Transporte Terrestre. Destes acidentes 1283 ocorrem por falha no material rodante (ANTT, 2018). Quando se tenta maximizar o funcionamento de algum elemento, deve-se avaliar muito bem todos os tipos de esforços principalmente aqueles que causam o desgaste de materiais, como é o caso do atrito.

Para manter o bom funcionamento de um trem é necessário manter uma boa manutenção de seus componentes, como por exemplo as rodas, que devem ter seu desgaste sempre monitorados. Com um desgaste excessivo de material têm-se a maior necessidade de manutenção e aumento do risco de acidentes por conta de falha nos rodeiros, que condizem com 14% dos acidentes ferroviários (ANTT, 2018). Um melhor entendimento dos parâmetros de rugosidade superficiais pode auxiliar no

desenvolvimento de novos processos de fabricação ou acabamento superficiais que resultem em um sistema com menos desgaste e menor atrito (AAR, 2005).

A relação entre os parâmetros de rugosidade e o desempenho de elementos mecânicos é uma área de pesquisas que ainda está relativamente no começo de seus avanços, pois esta área dependeu muito dos avanços tecnológicos para crescer. Nos dias atuais têm-se acesso a equipamentos como o interferômetro que mede e fornece dados sobre os vários parâmetros de rugosidade existentes. Apesar de já ser possível quantificar a maioria dos parâmetros de rugosidade presentes nas superfícies, pouco se encontra na literatura sobre o quanto cada parâmetro influencia em aspectos como o desgaste de material e a variação no coeficiente de atrito.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é avaliar a influência dos parâmetros de rugosidade no coeficiente de atrito e no desgaste do contato entre flange da roda e canto de bitola de trilho, através de um ensaio pino-disco com materiais retirados de rodas e trilhos reais. Como é de costume na aplicação ferroviária, para curvas de raio fechado, o contato é lubrificado por graxa.

1.2 Justificativa

Sendo responsável por 20% do transporte de cargas do Brasil, o segundo maior, perdendo apenas para o transporte rodoviário, o transporte ferroviário é de importância muito grande para a economia do país, portanto qualquer melhoria em seu funcionamento resultará em um grande impacto no setor de transportes. Uma redução no desgaste das rodas de trem pode trazer outros benefícios para a indústria ferroviária, não apenas a redução no custo de manutenção, como o aumento das cargas a serem carregadas bem como o aumento da velocidade dos trens.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

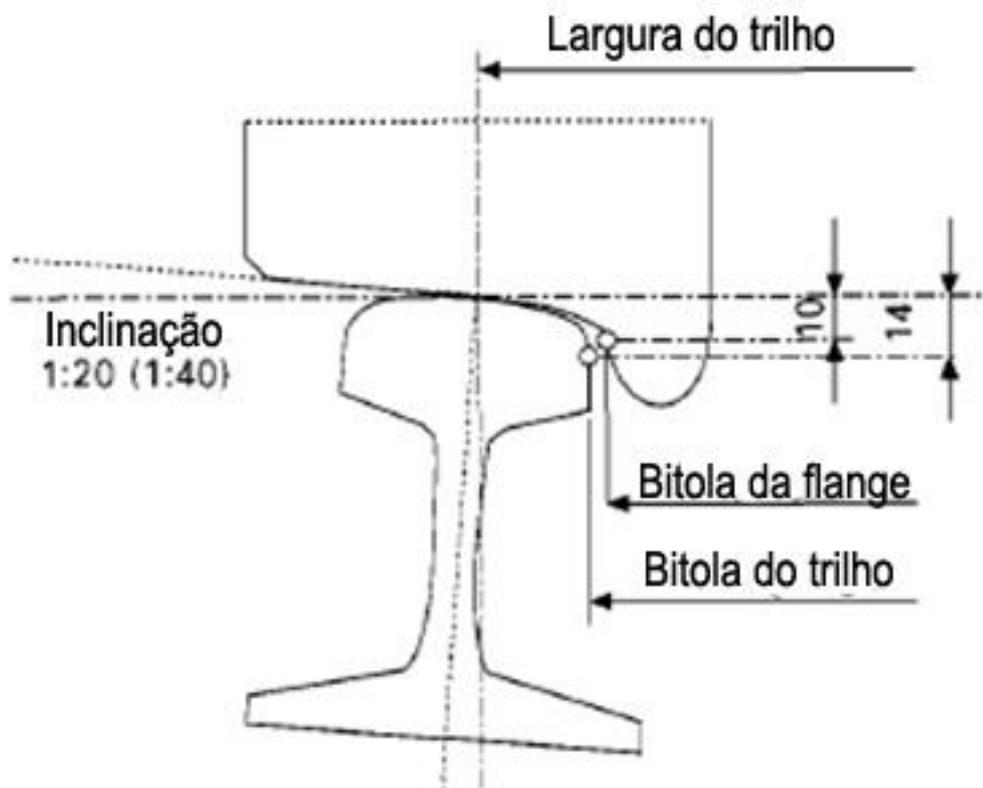
O objetivo desta seção do trabalho é apresentar e sobretudo fundamentar os aspectos teóricos mais relevantes dos assuntos abordados nesta monografia. Será discorrido sobre o sistema de contato entre roda de trem e trilho, mostrando algumas de suas características de como acontece o tal contato, bem como os materiais comumente utilizados. Posteriormente, traz-se o viés mais voltado à tribologia, abordando os princípios e fenômenos ocorrentes entre duas superfícies em contato, assim como os principais parâmetros que as caracterizam e podem ser atribuídos à uma superfície.

Em seguida, aborda-se sobre o desgaste, que é uma consequência intrínseca da interação de superfícies metálicas. Por fim, será apresentado o embasamento teórico referente aos conceitos de lubrificação por graxa, uma situação ocorrente durante a operação do sistema de contato roda-trilho, sendo um ponto essencial para a execução deste trabalho.

2.1 Sistema roda-trilho

Sendo uma parte específica de um sistema maior que é o transporte ferroviário, o sistema roda-trilho é construído de forma que resista às tensões, tanto devido à sustentação do peso do conjunto trem, bem como devido à transmissão de potência nos eixos motrizes da locomotiva, onde é essencial uma condição de atrito para aceleração e frenagem. Além disso, deve permitir que o trem contorne curvas, o que é possível através da forma cônica da roda em conjunto com uma inclinação de 1,5 a 3 graus da superfície de contato do trilho (LEWIS, 2009). A Figura 1 exemplifica este acoplamento da roda e trilho, em uma situação de trajetória retilínea:

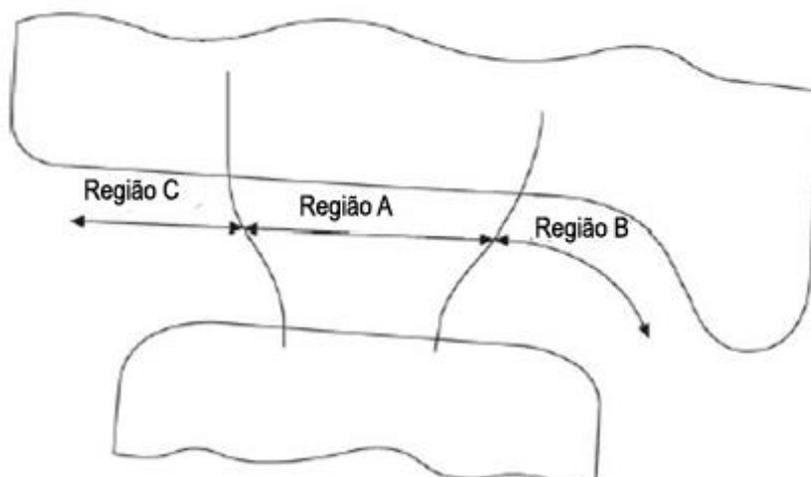
Figura 1: Ilustração do contato roda-trilho e das faces bitola da flange e do trilho.



Fonte: adaptado de Lewis, 2009.

A região de contato da roda com o trilho pode variar dependendo da trajetória percorrida pelo trem. A Figura 2 ilustra as regiões de contato para o sistema:

Figura 2: Regiões de contato entre a roda e o trilho de trem.



Fonte: adaptado de Tournay, 2001.

Conforme mostrado na figura 2, Tournay (2001) define as três regiões de contato como:

- Região A – Banda de rodagem–topo do trilho: região onde o contato mais acontece, com o movimento de rolamento da roda sobre o trilho, ocorre em trajetórias retas ou curvas de raios muito longos. Produz as menores tensões de contato e forças laterais.
- Região B – Flange da roda-canto da bitola: ocorre em curvas de raio pequeno e produz o deslizamento da flange da roda sobre a bitola do trilho, sua área de contato é menor que na região A, por consequência, o contato é mais severo, ocasionando maiores tensões e desgaste (tópico de estudo desta pesquisa).
- Região C – Laterais da roda e trilho: região cujo contato é menos provável de acontecer, levando à altas tensões e possíveis problemas de direcionamento do eixo.

Segundo Lewis (2009), as forças de contato e movimento relativo entre roda e trilho irão provocar danos em ambos, especialmente em curvas, onde há algum deslizamento entre a superfície dos dois componentes. O contato entre a flange de roda-canto da bitola, que pode ocorrer em curvas de raio fechado, é o mais severo, podendo atingir tensões Hertzianas na ordem de 2700 MPa (TELLISKIVI e OLOFSSON, 2001).

Tendo em vista tamanhos esforços ocorrentes nas superfícies do sistema, pesquisas em tribologia são fundamentais para a otimização da interface roda-trilho, tanto em regime seco quanto lubrificado, uma vez que é importante se controlar o coeficiente de atrito. Coeficientes baixos além de limitar a aceleração e frenagem podem gerar patinações e escorregamentos, ocasionando deformações nas rodas. Coeficientes altos podem levar a um elevado consumo de energia e desgaste excessivo do conjunto roda-trilho (LEWIS, 2009).

O controle do coeficiente de atrito é feito através dos modificadores de atrito, que são produtos deliberadamente inseridos no contato roda-trilho dependendo da situação. Conforme afirmam Kalousec e Magel (1999), a diminuição do coeficiente de atrito pode ser necessária quando as taxas de desgaste são altas, como em curvas de raio fechado; o aumento do coeficiente de atrito é desejável em situações onde a

perda de adesão é prevalente, como em frenagens e tração. Os autores classificam os modificadores em três grupos:

- Modificadores de baixo atrito (lubrificantes): usados para obter coeficientes de atrito menores de 0,2 na interface flange da roda – bitola do trilho, e objeto de estudo deste TCC.
- Modificadores de alto atrito: com coeficientes de atrito entre 0,2 e 0,4, são usados na interface da banda de rodagem - topo do trilho para diminuir consumo energético e reduzir barulho e vibrações.
- Modificadores de muito alto atrito (arenosos): usados na banda de rodagem para aumentar a área de contato da roda com o trilho, aumentam o poder de tração e frenagem por reduzir patinações e escorregamentos.

2.2 Material da Roda

O material mais amplamente utilizado para a fabricação das rodas ferroviárias é o aço-carbono de microestrutura perlítica, cuja fabricação pode ser feita através dos processos de fundição ou forjamento. Todas as rodas devem passar pelo tratamento de têmpera superficial e revenido na banda de rodagem, de acordo com a classe de uso mostrada na Tabela 1 (LEWIS, 2009). Segundo Colpaert (2008), as tensões compressivas resultantes do processo de têmpera têm o propósito de inibir o crescimento de trincas no sentido radial da roda.

Quando da necessidade de uma superfície endurecida, com melhores propriedades de resistência ao desgaste, aços de microestrutura totalmente perlíticos são preferíveis. O processo de têmpera é feito por chamas ou um forno de indução, usualmente a 900°C e posterior resfriamento por borrifadores de água. O aço usado para a fabricação de rodas ferroviárias entra na classificação de aços estruturais de alta resistência, tendo tipicamente de 290 a 690 MPa de limite de resistência (ASM, 1990).

Tabela 1: Composição dos aços para fabricação de rodas ferroviárias.

Classe da Roda	L	A	B	C
Composição em peso de Carbono (%)	0,47 máx	0,47 – 0,57	0,57-0,67	0,67-0,77
Dureza Brinell (HB)	197-277	255-321	277-341	321-363

Fonte: adaptado de Lewis, 2009.

2.3 Material do trilho

Sendo um componente estrutural semelhante a uma viga, o trilho ferroviário deve possuir ductilidade e resistência suficientes para suportar os esforços fletores causados pela passagem do trem. Ainda, o topo do trilho, onde ocorre o contato com as rodas, deve ser resistente ao desgaste e a fadiga de contato de rolamento (LEWIS, 2009).

O material mais comum utilizado é o aço perlítico (usualmente entre 0,75 e 0,85% em peso), conformado por laminação à quente e posterior têmpera e revenido. Possui elementos de liga como níquel, cromo, manganês e silício para aumentar as propriedades de resistência ao desgaste e resistência mecânica. Alguns trilhos podem ser fabricados também por forjamento. A Tabela 2 traz a composição de um trilho convencional padrão AREMA/AAR:

Tabela 2: Composição química dos aços para fabricação de trilhos ferroviários.

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	V	Al
Composição em peso (%)	0,74-0,86	0,75-1,25	0,1-0,6	0,3 máx.	0,25 máx.	0,06 máx.	0,02 máx.	0,02 máx.	0,01 máx.	0,01 máx.

Fonte: adaptado da norma AREMA/AAR (2014).

A dureza desse componente pode variar com a classe de uso, que abrange as faixas de 255 a 321 HB para as aplicações mais leves até 362 a 401 HB para aplicações mais severas (LEWIS, 2009).

2.4 Contato de superfícies

A superfície dos sólidos representa uma complexa forma de matéria, muito além de um mero plano. Há uma variedade de imperfeições e detalhes em uma superfície real que exercem influência no atrito e desgaste. Uma das características fundamentais que influenciam no atrito e desgaste é a rugosidade, a qual confina, em uma pequena fração da área total de contato disponível, o contato entre dois sólidos (STACHOWIAK, 2005).

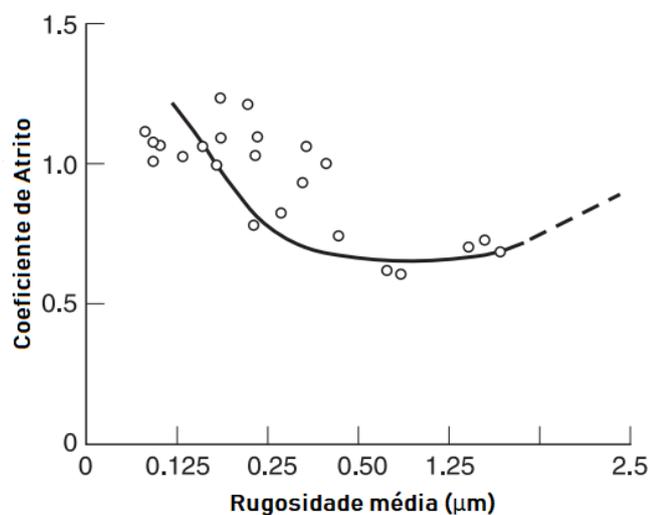
Quando duas superfícies nominalmente planas e paralelas são colocadas juntas, o contato inicialmente ocorre em alguns poucos pontos. Conforme a força normal é aumentada, as superfícies se aproximam e um número maior de áreas altas, denominadas asperezas, entram em contato. Tais asperezas podem ser consideradas como suaves protuberâncias de forma esférica, cônica ou piramidal (HUTCHINGS, 2017).

Conforme Stachowiak (2005) e Hutchings (2017), o contato entre as asperezas de uma superfície, em um panorama geral, pode se dar de forma elástica ou plástica. Entretanto, observações experimentais sugerem que no contato de duas superfícies metálicas a deformação plástica é predominante, limitando a deformação elástica apenas para superfícies extremamente polidas ou de materiais cerâmicos, por exemplo.

De maneira geral, no contato plástico entre superfícies, o atrito costuma ser bastante elevado tanto para superfícies de baixa rugosidade, devido ao aumento da área de contato, quanto para rugosidades altas em consequência do intertravamento mecânico (BHUSHAN, 2013). Para rugosidades moderadas, o coeficiente de atrito tende a ser mais baixo, como pode ser observado na Figura 3, que é um experimento realizado por Rabinowicz (1995) onde foi medido o coeficiente de atrito em função da rugosidade média, para o deslizamento entre superfícies de cobre sem lubrificação.

Mesmo que as asperezas sofram deformação plástica localizada, a área real de contato das superfícies ainda permanece linearmente proporcional à carga aplicada (PULLEN e WILLIAMSON, 1972).

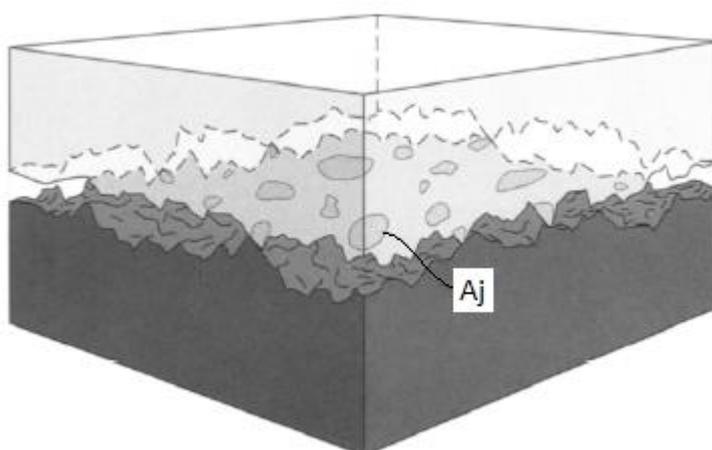
Figura 3: Ensaio realizado por Rabinowicz para superfícies de cobre contra cobre, com carga de 10N e velocidade 0,1mm/s, sem lubrificação.



Fonte: adaptado de Rabinowicz, 1995.

A Figura 4 representa, em linhas gerais, o contato entre duas superfícies rugosas de corpos sólidos. A área de contato real é sempre menor que a área total da superfície.

Figura 4: Áreas reais de contato (A_j) entre duas superfícies sólidas.



Fonte: adaptado de Czichos, 1978.

O contato mecânico é um assunto complexo e qualquer solução para um problema de contato é restrito a um caso especial com algumas simplificações

fundamentais e está ligado à uma grande variedade de situações, como por exemplo (CZICHOS, 1978):

- o número de corpos envolvidos no contato;
- a geometria dos corpos (problema bi ou tridimensional, superfície rugosa ou lisa);
- as propriedades do material (parâmetros constantes ou variáveis, camadas e revestimentos);
- o modo de deformação (puramente elástico, plástico ou elástico-plástico);
- as forças de contato (normais ou tangenciais);
- o tipo de movimento relativo (estático, rolamento, deslizamento etc.);
- a velocidade do movimento relativo.

Conforme Hutchings (2017), uma forma de se estimar a característica do contato de superfícies é através do índice de plasticidade ψ , que determina se as asperidades irão sofrer deformação elástica ou plástica quando submetidas à uma carga contra outra superfície. Para valores de ψ abaixo de 0,6 a deformação é predominantemente elástica, havendo deformação plástica apenas sob extrema carga. Para valores de ψ maiores que 1, a maioria das asperidades sofrerão deformação plástica mesmo sob qualquer carga. O índice de plasticidade ψ é dado pela equação 1:

$$\psi = \frac{E^*}{H} \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Onde E^* é o modulo de elasticidade combinado, dos dois materiais em contato, H é a dureza do material mais macio, em Pa e a quantidade $(\sigma/r)^{1/2}$ é a raiz quadrada do desvio padrão da altura das picos sobre o raio de curvatura dos picos. Este valor é aproximadamente igual à inclinação média dos picos, caracterizada pelo parâmetro Sdq , obtido experimentalmente através da medição de topografia.

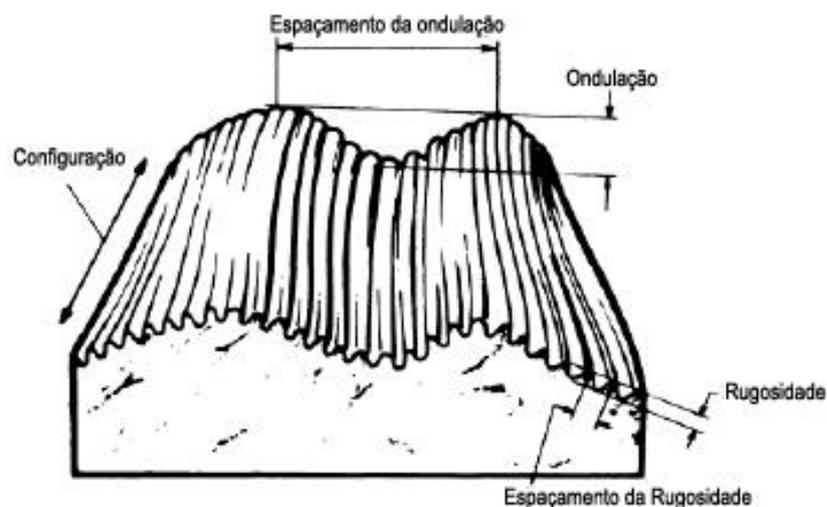
2.5 Topografia de superfície

Quando estudadas em uma escala suficientemente refinada, percebe-se que todas as superfícies dos sólidos são irregulares. Mesmo a superfície extremamente

polida de alguns componentes de engenharia apresenta irregularidades notavelmente maiores que dimensões atômicas (HUTCHINGS, 2017).

Estas irregularidades, por sua vez, apresentam um padrão de repetição de picos e vales que caracterizam a textura (rugosidade, ondulação e direção) de uma superfície. Conforme Morton (1994) as irregularidades apresentadas em uma superfície são geradas a partir da uma combinação de vários fatores, majoritariamente relacionados ao processo de fabricação como a ação da ferramenta de corte, parâmetros e estabilidade da usinagem, e também atribuídos à microestrutura do material. A topografia de superfície é constituída de quatro elementos, ilustrados pela Figura 5.

Figura 5: Elementos constituintes da topografia de uma superfície metálica.



Fonte: adaptado de ASM, 1994.

- **Rugosidade da superfície:** caracterizada pelas irregularidades de alta frequência, é causada principalmente pela interação da ferramenta de corte e microestrutura do material;
- **Ondulação da superfície:** caracterizada pelas irregularidades de média frequência, sobre as quais a rugosidade está sobreposta, é causada devido à instabilidade na usinagem e erros nas guias do maquinário;
- **Forma da superfície:** é a forma geral da superfície (esférica, inclinada etc.) desconsiderando a rugosidade e ondulação. Produzida principalmente por erros nas guias da máquina de usinagem ou por tensões no componente;

- **Direção:** é o padrão produzido pelo processo de fabricação, que resulta em uma característica direcional definida (circular, paralela, radial ou multidirecional).

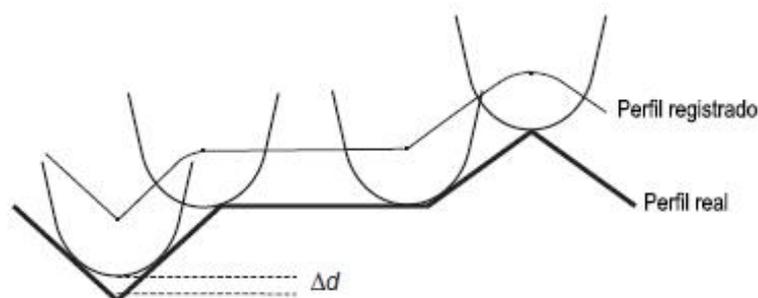
2.6 Medição da topografia da superfície

Componentes diferentes estão sujeitos a operações diferentes, e cada aplicação possui características às quais se pode atribuir um ou vários parâmetros predominantes relacionados à sua funcionalidade. Componentes que operam com lubrificação, por exemplo, se beneficiam de superfícies cuja topografia favoreça a retenção do elemento lubrificante. O principal motivo de se medir uma superfície é tentar prever o desempenho deste componente (ASM, 1994).

Conforme Hutchings (2017), existe basicamente dois métodos de se medir uma superfície, sendo eles:

Medição com contato: uma agulha (ou apalpador), usualmente de forma cônica ou piramidal feita de diamante, é utilizada para percorrer a superfície a ser medida. Um mecanismo ligado a esta agulha filtra e registra o perfil da superfície. Inevitavelmente, algumas limitações são provenientes devido às dimensões e formato desta agulha, que comumente possui raio de ponta de 1 a 2,5 μm e ângulo de 60°. Além de poder riscar a superfície medida, esta combinação de ângulo e raio de ponta finito impede que a agulha penetre completamente em elementos mais profundos da superfície, o que acaba gerando alguma suavização da superfície. A Figura 6 ilustra este efeito de suavização:

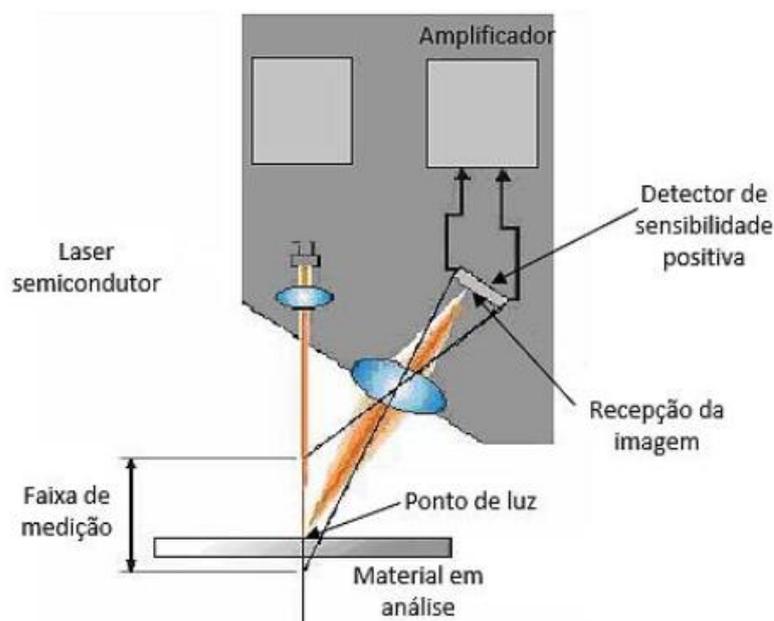
Figura 6: Efeito de suavização provocado pela dimensão e forma do apalpador.



Fonte: adaptado de Hutchings, 2017.

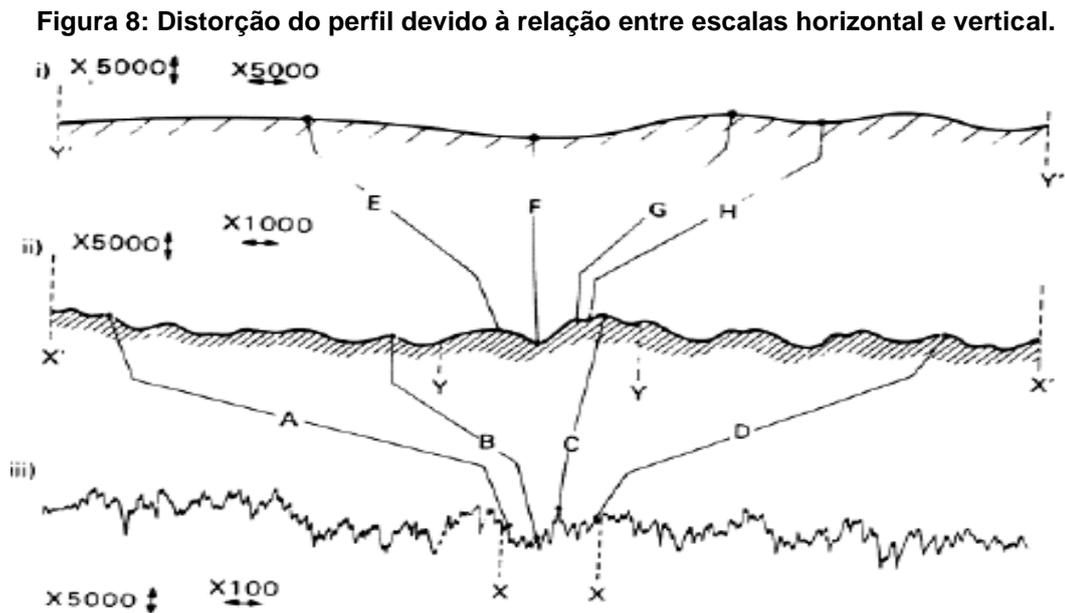
Medição sem contato: baseado em medições óticas, usa a técnica de foco ou interferometria auxiliada por um microscópio para determinar a posição da superfície. O feixe de luz é emitido sobre a superfície, que o reflete e é captado por sensores que irão determinar a posição e altura da superfície para cada pixel da imagem através de um processamento computadorizado. A Figura 7 mostra o funcionamento básico deste método.

Figura 7: Funcionamento básico de um interferômetro ótico.



Fonte: adaptado de Taylor Hobson, 2000.

Um importante fator se faz necessário apresentar ao se medir um perfil de uma superfície. Como o perfil topográfico envolve medidas de altura ou amplitude ao longo de um comprimento relativamente muito maior da seção transversal dessa superfície, a razão entre as escalas horizontal e vertical podem chegar até uma proporção de 50:1. Essa compressão do comprimento em relação à extensão do perfil de altura faz parecer que a rugosidade consiste em picos e vales extremamente agudos, quando na realidade a inclinação desses elementos na superfície raramente passam de 10° (HUTCHINGS, 2017). A Figura 8 ilustra esse efeito de distorção das escalas.



Fonte: ASM, 1994.

Na tentativa de se entender sua funcionalidade, a medição de uma superfície pode ser realizada para gerar vários dados de interesse. Para uma caracterização e análise efetiva, utilizam-se os parâmetros de superfície, cujo propósito é atribuir um número que possa caracterizar um certo aspecto da superfície, sem que haja um entendimento subjetivo (ASM, 1994). Tais parâmetros são obtidos através de fórmulas matemáticas envolvendo os aspectos da textura da superfície.

Dada a complexidade da textura de uma superfície, é impossível caracterizá-la com apenas um parâmetro. De fato, em torno de 100 parâmetros para aplicação de engenharia já foram definidos para uso industrial (ASM, 1992). Segundo Michigan (2018) e Leach (2013) tais parâmetros de superfície são usualmente separados nos seguintes grupos:

- **Parâmetros de Altura:** são medidas dos desvios verticais do perfil da superfície, como S_q , S_a , S_{sk} , S_{ku} , S_p , S_z e S_{xp} .
- **Parâmetros Espaciais:** caracterizam as irregularidades ao longo de uma superfície desconsiderando sua amplitude, como S_{al} , S_{tr} , S_{td}
- **Parâmetros Híbridos:** são parâmetros que analisam dados tanto de amplitude quanto espaciais, como S_{dq} , S_{dr}

- **Parâmetros Funcionais:** são parâmetros relacionados à funcionalidade da superfície, ao invés de seu perfil. São eles Sdc, Smr, Spk, Svk, Sk, Vv, Vm, Vmv, Vmp, Vvv e Vvc.

A definição de cada um dos parâmetros abordados nesta pesquisa é apresentada na seção 2.7. A definição e características dos demais parâmetros mencionados é apresentada no Anexo A.

2.7 Definição dos parâmetros de superfície

2.7.1 Raiz quadrada do gradiente da superfície (S_{dq})

O parâmetro da raiz quadrada do gradiente da superfície, S_{dq} , pode ser calculado pela equação 2, os pontos em x e y são definidos por $\frac{\partial z}{\partial x}$ e $\frac{\partial z}{\partial y}$ (WHITEHOUSE, 2011).

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \int \int \left(\frac{\partial z^2}{\partial x} + \frac{\partial z^2}{\partial y} \right) dx dy} \quad (2)$$

Este parâmetro tem a utilidade na avaliação de superfícies em aplicações de vedação assim como também na aparência da superfície (LEACH, 2013) e representa a inclinação média dos picos da superfície. A Figura 10 apresentada na seção 2.8 mostra duas superfícies com distintos valores de S_{dq} .

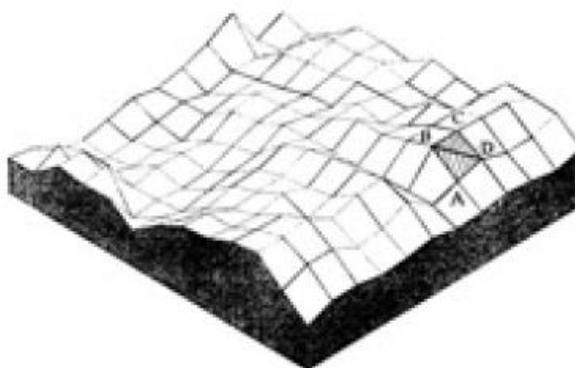
2.7.2 Razão de área interfacial desenvolvida (S_{dr})

O parâmetro S_{dr} representa a área adicional desenvolvida pela textura da superfície em relação à área da seção transversal. Transformando a textura em triângulos e somando suas áreas, calcula-se o valor do parâmetro em relação à área nominal, resultando em um percentual positivo, geralmente menor que 10%. Uma superfície totalmente plana possui $S_{dr} = 0\%$ (LEACH, 2013). A Figura 9 ilustra a contagem de área da superfície através dos triângulos.

Este é um parâmetro útil em aplicações de revestimento superficial ou aplicações onde ocorre adesão, assim como em aplicações que envolvam fluidos ou lubrificação,

sendo afetado principalmente pela amplitude e espaçamento da textura (MICHIGAN, 2018).

Figura 9: Representação da divisão da textura em triângulos.



Fonte: Michigan, 2018.

2.7.3 Curvatura de pico (S_{pc})

O parâmetro S_{pc} representa a curvatura média dos picos significantes da superfície, sendo o inverso do raio de curvatura dos picos. Desta forma, um S_{pc} alto caracteriza um pico bastante pontiagudo, mais susceptível à deformação plástica ou desgaste quando ocorre contato, enquanto um S_{pc} pequeno significa que o pico é mais largo, sendo mais provável a ocorrência de deformação elástica (LEACH, 2013).

2.7.4 Máxima altura da superfície (S_z) e máxima profundidade de vale (S_v)

O parâmetro S_z representa a medida de amplitude medida do vale mais profundo ao pico mais alto da superfície, sendo igual à soma absoluta dos parâmetros S_p e S_v (Equação 3). Medidos a partir do plano média da superfície, o parâmetro S_p será sempre positivo e o parâmetro S_v , negativo.

$$S_z = S_p + |S_v| \quad (3)$$

2.8 Parâmetros de rugosidade relacionados ao Coeficiente de Atrito

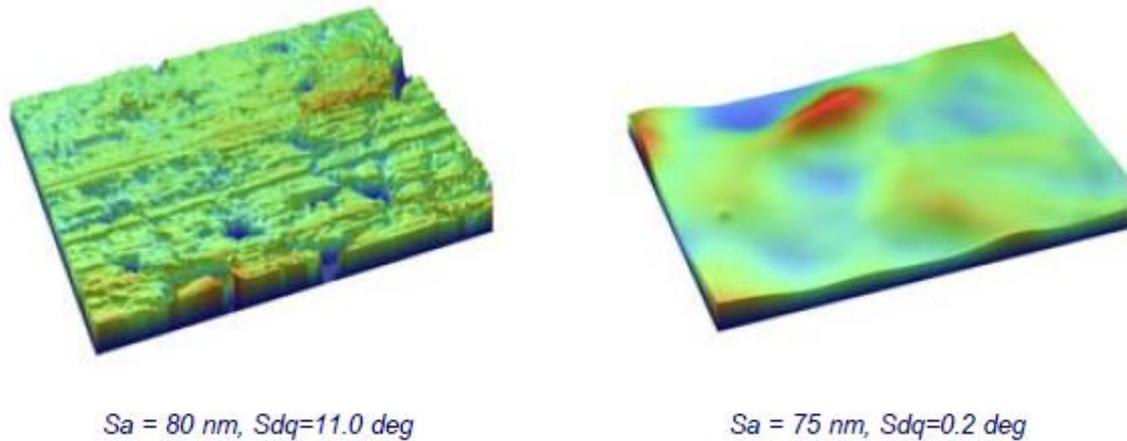
Os parâmetros de rugosidade mais amplamente utilizados são, sem dúvida, os parâmetros de altura (amplitude) da superfície, S_a e S_q , representando uma medição geral dos desvios de altura da superfície, sendo bons parâmetros para controle de processo de usinagem, porém de acordo com Michigan (2018), tais parâmetros falham em diferenciar picos e vales, tendo duas superfícies de mesmo S_a e S_q textura e funcionalidade completamente diferentes, que só serão evidenciados por outros parâmetros. A Figura 10 representa esta característica

Por conta desta falta de informações em relação a superfície, para a discussão a ser realizada a rugosidade média e raiz quadrada da rugosidade média não tem muita relevância (por si só), pois conforme Menezes (2006) em seu estudo através de ensaio pino-disco lubrificado, para uma pequena gama de rugosidade o coeficiente de atrito não tem grandes variações com o S_a , mas sim com a textura da superfície.

Ainda, Menezes (2008) em um ensaio pino-disco lubrificado para vários materiais metálicos diferentes, mostra que o coeficiente de atrito está mais fortemente ligado a um parâmetro de inclinação da textura Δa , sendo mais alto quanto maior a inclinação.

Para Sedlaček (2012) em ensaios pino-disco em lubrificação limítrofe, o comportamento do coeficiente de atrito não pode ser definido pelo parâmetro S_a , mesmo utilizando uma gama maior de valores, apenas uma leve tendência foi de aumento do atrito com o aumento da rugosidade média foi observada. Em relação ao parâmetro de Kurtosis (S_{ku}) e profundidade dos vales reduzido (S_{vk}), foi observada diminuição do coeficiente de atrito com o aumento de ambos os parâmetros. A relação inversa foi observada para o parâmetro de Skewness (S_{sk}), o qual contribui na redução do coeficiente de atrito com a diminuição (valores mais negativos) de S_{sk} (SEDLAČEK, 2009).

Figura 10: Diferença de textura em superfícies de S_a semelhantes.



Fonte: Michigan, 2018.

2.9 Desgaste de superfícies

Talvez o maior desafio em solucionar problemas de desgaste seja prever os tipos de desgaste cujos materiais serão submetidos. A perda de material da superfície de um sólido pode ocorrer em apenas três maneiras: por dissolução química, por fusão e por separação física dos átomos da superfície (ASM, 1992).

Conforme descreve Stolarski (1990), pode-se dividir em quatro principais classes os tipos de desgaste das aplicações de engenharia, sendo estes o desgaste por adesão, desgaste por abrasão, desgaste por fadiga e desgaste químico. Características como material e geometria dos corpos, ambiente e condições operacionais irão governar o processo de desgaste.

Nesta seção, será apresentada as características do desgaste por deslizamento (ou desgaste deslizante), cujo principal modo de desgaste é o desgaste por adesão e abrasão. Ainda, será abordado também a situação da condição do deslizamento lubrificado, pois conforme Hutchings (2017), na maioria dos casos práticos onde há o contato de superfícies em deslizamento existe algum tipo de lubrificação. A lubrificação produz um filme que reduz ou até mesmo impede o contato entre as asperezas das duas superfícies, reduzindo o efeito de adesão.

2.9.1 Desgaste por deslizamento

Quando um sistema é constituído de componentes cujas superfícies que estão em contato possuem movimento relativo de deslizamento, pode-se dizer que o tipo de dano que ocorrerá entre estas superfícies é a perda de material por desgaste deslizante.

Apesar de empregados como sinônimos, o desgaste por adesão e desgaste por deslizamento não são totalmente equivalentes. Hutchings (2017) afirma que a adesão constitui uma parte muito importante no desgaste por deslizamento, porém é apenas um de todos os fatores físicos e químicos que podem estar envolvidos. Aparentemente, a adesão é o tipo de desgaste que “sobra” após identificados os outros agentes de desgaste por abrasão, fadiga e processos químicos (ASM, 1992).

2.9.2 Adesão e desgaste por adesão

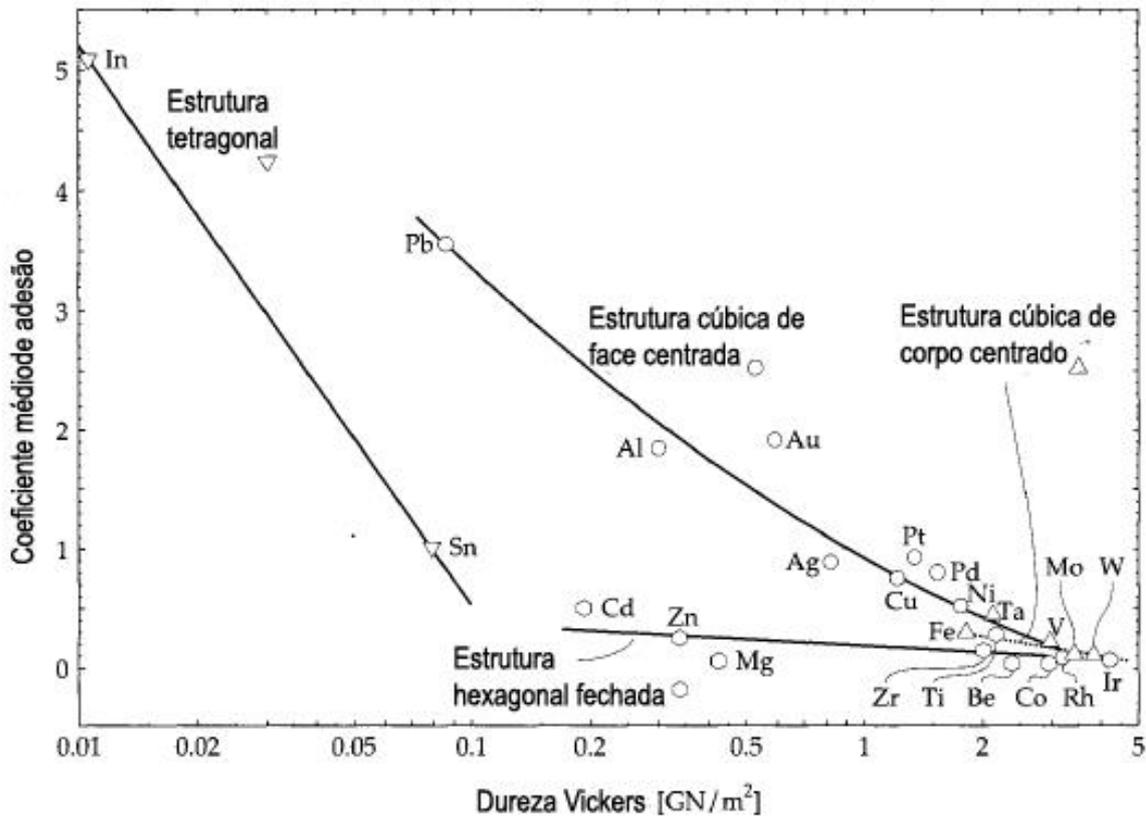
A maioria dos sólidos irão aderir no contato com outro sólido, quando certas condições são satisfeitas. Em linhas gerais, dois objetos casualmente colocados juntos não sofrerão adesão, uma vez que camadas de contaminante (oxigênio, água e óleos) previnem a ocorrência da adesão. O fenômeno pode ser observado em sistemas de alto vácuo, onde as superfícies estão livres de contaminantes, principalmente no contato entre metais. Altas rugosidades e elevadas durezas superficiais dificultam a ocorrência da adesão (STACHOWIAK, 2005).

A maior ocorrência da adesão se dá em materiais semelhantes, como por exemplo no contato ferro-ferro. No contato de materiais não semelhantes as forças de adesão são menores, mas nunca menor que a força de contato. A relação entre a força de adesão (ou separação dos corpos) e a força de contato (força aplicada aos corpos para estabelecer o contato) pode ser tão alta quanto 20 vezes em alguns casos (BUCKLEY, 1981).

A adesão é explicada pela existência dos elétrons livres em um sólido metálico. Quando as superfícies entram em contato efetivo ou estão a uma distância suficientemente pequena, a ligação entre as duas superfícies é gerada através da troca de elétrons entre as mesmas. Neste panorama, a estrutura cristalina do material e a dureza, como já mencionado anteriormente, exercem importante influência sobre

a força de adesão. A Figura 11 mostra o coeficiente de adesão (força de adesão dividida pela força de contato) em função da dureza, para metais de diferentes arranjos cristalinos.

Figura 11: Força de adesão entre metais de diferentes estruturas cristalinas.



Fonte: Stachowiak, 2005.

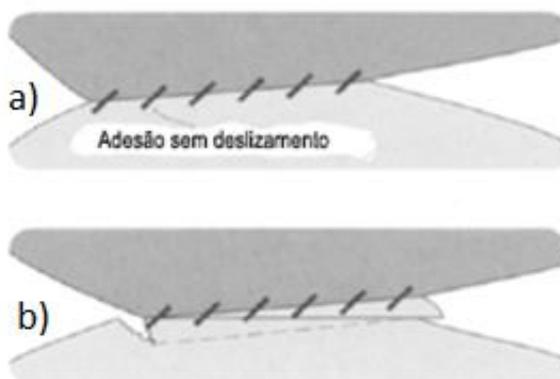
O desgaste por adesão ocorre quando asperezas de duas superfícies se tocam e a ligação entre elas é estabelecida. Como definido por Stolarski (1990), existem seis passos bem definidos no desenvolvimento de desgaste por adesão:

- i. Deformação das asperezas em contato;
- ii. Remoção dos filmes superficiais;
- iii. Formação da junta de adesão (Figura 12a);
- iv. Elevação da tensão até a ruptura da junta (Figura 12b);
- v. Modificação dos fragmentos resultantes (filme de transferência);
- vi. Remoção dos fragmentos, criando um particulado livre.

Após a junta atingir seu limite de resistência, o material de menor dureza se destaca, sendo arrastado pelo material mais duro na forma de uma partícula. Este

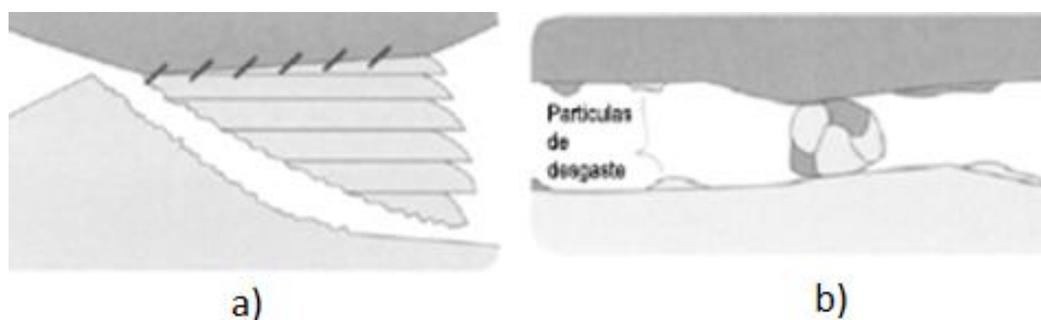
efeito de transferência de material entre as superfícies é chamado de filme de transferência. Quando o filme se destaca da nova superfície, este é liberado como partícula de desgaste (STACHOWIAK, 2005), conforme mostrado na Figura 13.

Figura 12: Exemplificação de uma junta de adesão entre asperezas de duas superfícies.



Fonte: adaptado de Stachowiak, 2005.

Figura 13: Ilustração do filme de transferência (a) e partícula de desgaste (b).



Fonte: adaptado de Stachowiak, 2005.

Existem algumas orientações para evitar ou diminuir a magnitude do desgaste por adesão, como, evitar materiais que possuam fases de dureza elevadas, usar materiais dissimilares e, por fim, adotar o emprego de lubrificação. O principal propósito de um lubrificante é inibir a ação adesiva por formar uma espécie superior de “contaminação” nas superfícies metálicas (BOWDEN, 1964). Mesmo que aplicada inadequadamente, a lubrificação irá gerar uma atmosfera corrosiva no metal de modo a se formarem filmes superficiais, os quais possuem menor atrito e conseqüentemente, menor desgaste (ASM, 1992).

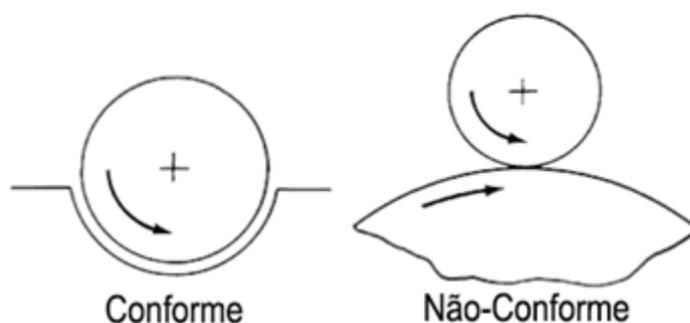
2.10 Lubrificação

O funcionamento da lubrificação ocorre por adicionar entre superfícies que deslizam entre si uma camada de material com menor resistência ao cisalhamento, podendo ser lubrificantes de consistência gasosa, líquida ou sólida (HUTCHINGS, 2017). A aplicação de lubrificantes tem as funcionalidades de reduzir o atrito e o desgaste de material, aumentar a dissipação de calor e ajudar na remoção de detritos (ASM,1992).

O processo de lubrificação pode ocorrer de diferentes formas e dependendo de muitos fatores, sendo os principais a geometria dos corpos em contato, a rugosidade superficial deles e a carga aplicada. Além desses fatores a temperatura também tem importância pois com sua variação ocorre alterações na viscosidade do lubrificante, sendo essa propriedade muito importante para o desempenho do mesmo (ASM,1992).

A lubrificação pode ocorrer em contatos conforme e não-conforme. O contato conforme ocorre em mancais de deslizamento, operando normalmente com espessura de filme lubrificante alta (até 10 vezes a rugosidade superficial). Na lubrificação não-conforme o contato ocorre em uma área muito pequena e concentrada conhecida como junção hertziana, neste caso a espessura de filme lubrificante é extremamente fina, da mesma ordem da rugosidade superficial (ASM,1992). A Figura 14 representa os dois casos.

Figura 14: Geometrias de contato.

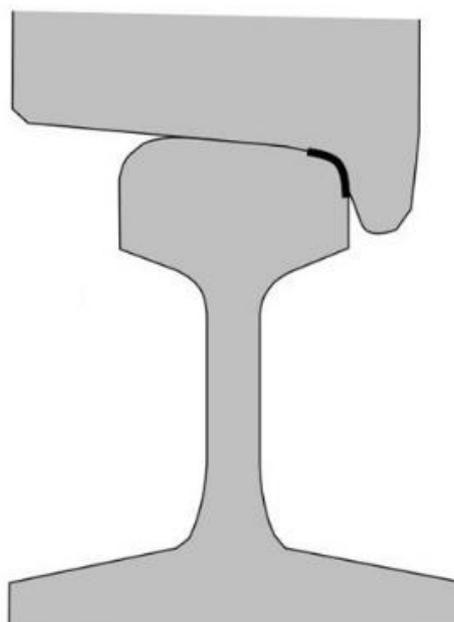


Fonte: adaptado de ASM,1992.

Devido à geometria do trilho e da roda ferroviária, em curvas, ocorre contato entre o canto de bitola do trilho e o flange da roda, como é destacado na Figura 15. Tal situação é caracterizada por alto escorregamento, e por tanto altas taxas de

desgaste, sendo então comum a aplicação de lubrificantes nos trilhos para reduzir o desgaste nesses locais (LEWIS, 2009).

Figura 15: Contato da roda com o trilho.



Fonte: apresentação equipe projeto cátedra, 2018.

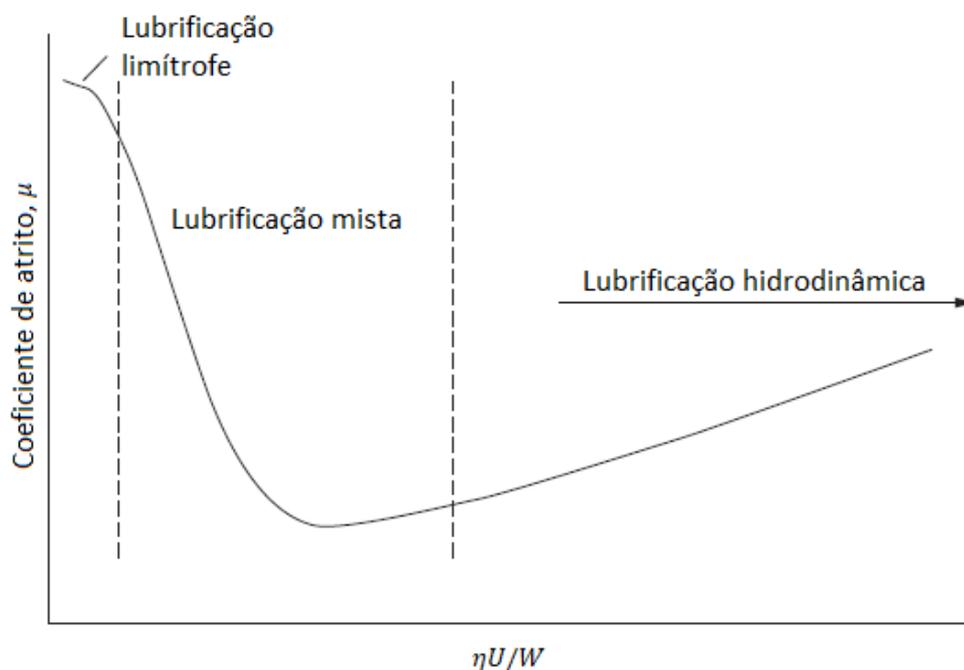
Conforme Hutchings (2017), a lubrificação através de óleo e graxa pode ser classificada em três cenários, sendo eles:

- Lubrificação hidrodinâmica: quando as superfícies são separadas por um espesso filme de lubrificante em relação às asperidades da superfície, havendo mínima deformação elástica nas superfícies.
- Lubrificação Elastohidrodinâmica: quando a pressão é alta e o filme lubrificante muito fino, causando importantes deformações elásticas nas superfícies.
- Lubrificação limítrofe: quando as superfícies são separadas apenas por camadas moleculares de lubrificante e o contato de asperezas ocorrem com frequência.

Neste trabalho o regime de lubrificação encontrado é o limítrofe, que ocorre quando a velocidade é baixa ou a carga muito alta, fazendo com que seja mínimo o suporte exercido pelo filme lubrificante. A Figura 16 mostra o comportamento do coeficiente de atrito em função do produto $\eta U/W$, que é a viscosidade do lubrificante

η multiplicado pela velocidade da superfície U sobre a carga W . Este gráfico é conhecido também como curva de Stribeck.

Figura 16: Regimes de lubrificação. Gráfico conhecido como Curva de Stribeck.

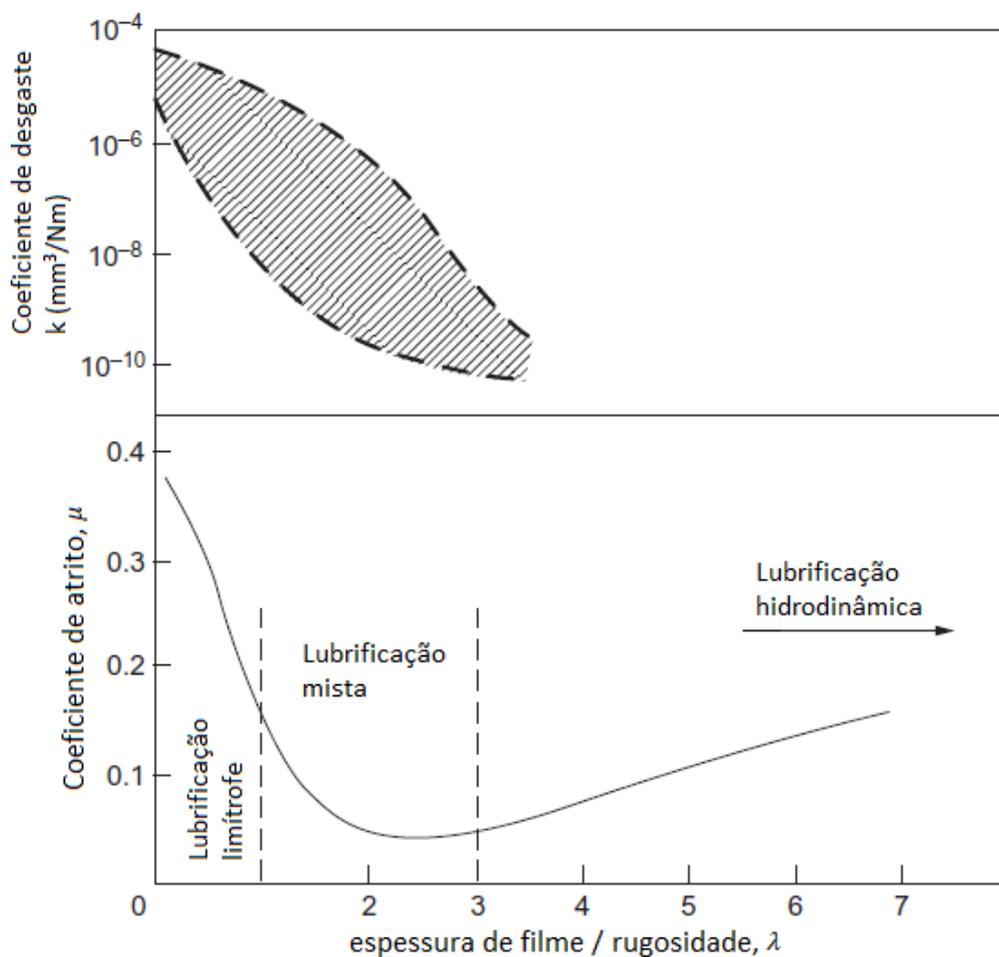


Fonte: adaptado de Hutchings, 2017.

O regime de lubrificação pode ser também definido através da razão λ entre a espessura de filme e a rugosidade média quadrática (R_q , S_q), como pode ser observado na Figura 17.

Através da Figura 17 percebe-se também que a variação do coeficiente de atrito μ segue o mesmo padrão da curva de Stribeck. Em relação ao coeficiente de desgaste k observa-se que para a situação de lubrificação limítrofe, regime no qual as asperezas têm maior probabilidade de se tocarem, o desgaste é maior. Conforme a espessura do filme lubrificante aumenta e as superfícies se afastam, o coeficiente de desgaste diminui, até uma situação de separação total das superfícies onde a taxa de desgaste será muito pequena. (HUTCHINGS, 2017).

Figura 17: Coeficiente de atrito e de desgaste em função de λ .



Fonte: adaptado de Hutchings, 2017.

2.10.1 Graxa

A lubrificação entre flange de roda e canto de bitola de trilho é realizada por graxa. Graxa é definida como um sólido para semifluido, obtida pelo produto da dispersão de um agente espessante em um líquido lubrificante, podendo conter outros ingredientes que conferem propriedades especiais (ASTM, 1982).

De acordo com Stachowiak (2005), graxas não são simplesmente óleos extremamente viscosos, mas sim uma mistura coloidal de óleo-base, espessante e aditivos, podendo possuir também enchimentos. Em muitos casos o óleo-base faz o papel principal na determinação das propriedades da graxa, porém em outros casos a influência dos espessantes e aditivos é crítica.

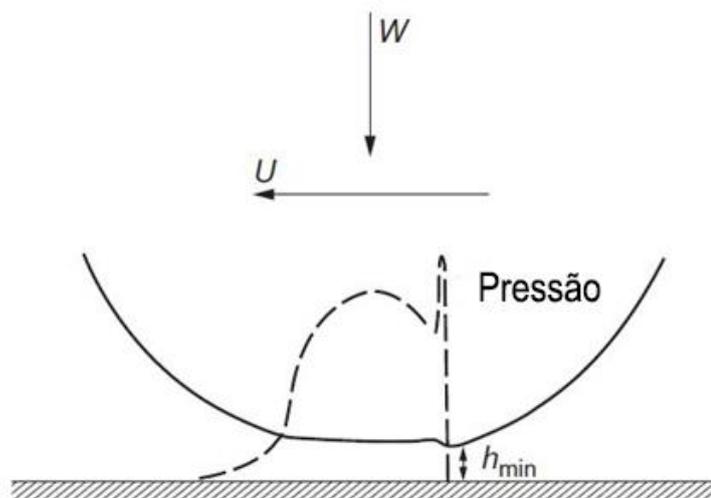
- Óleo-base: usualmente são óleos minerais, porém em casos específicos podem ser utilizados óleos sintéticos;
- Espessante: constitui usualmente 5 a 20% da graxa e é o elemento chave na formulação da sua consistência;
- Aditivos: São usados para mudar as características tanto dos espessantes quanto do óleo-base, com a finalidade de melhorar o desempenho em relação a corrosão, desgaste ou oxidação;
- Enchimentos: elementos adicionais cuja finalidade é melhorar o desempenho da graxa, sendo comumente grafite, óxidos metálicos ou sulfetos. Muitas vezes denominados aditivos sólidos.

Entre os agentes espessantes utilizados na produção de graxa têm-se o cálcio e o lítio como principais. Enquanto o cálcio possui um baixo custo e boa resistência a água o lítio possui um maior alcance de temperaturas de trabalho e resistência a poeira e sujeiras (ASM,1992).

Por possuir uma consistência entre sólido e semifluido, a graxa é menos propensa a ser retirada da superfície que óleos, sendo, portanto, ideal para lubrificação de canto de bitola (posição vertical). A distribuição de pressão que irá ocorrer no filme lubrificante pode ser descrita pela equação de Reynolds, a qual é obtida da equação de Navier-Stokes para um caso de escoamento laminar, que a espessura da filme é muito pequena em relação as outras dimensões e que as forças predominantes são resultadas da viscosidade (HUTCHINGS, 2017). Na Figura 18 observa-se uma representação da ação da pressão no filme de lubrificante.

A lubrificação por graxa também tem a desvantagem de não ser tão eficiente na dissipação de calor como na lubrificação por óleo, por exemplo (HUTCHINGS, 2017). É importante destacar que no contato entre friso de roda e canto de bitola a espessura de filme lubrificante é limítrofe (LEWIS, 2009) e o contato pode ser tanto conforme, quanto não conforme.

Figura 18: Ação da pressão hidrodinâmica no lubrificante.

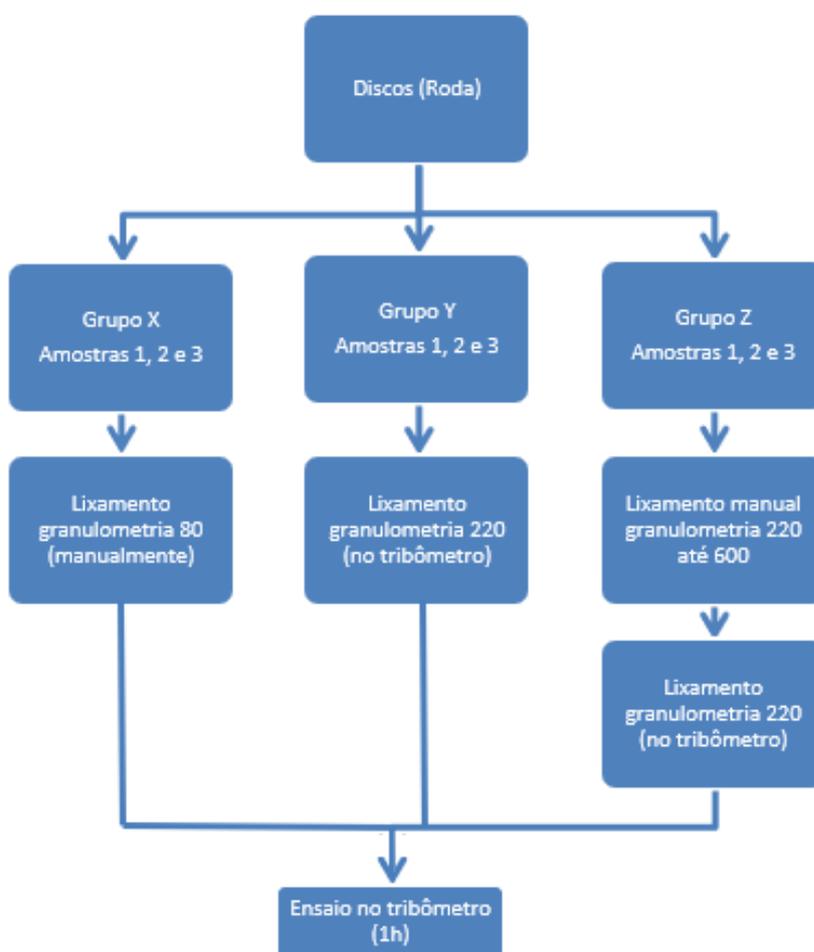


Fonte: adaptado de Hutchings, 2017.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão abordados os materiais escolhidos para serem utilizados nos ensaios assim como a metodologia a ser aplicada para a realização da avaliação dos parâmetros superficiais em relação ao atrito e desgaste. A Figura 19 mostra um breve fluxograma da preparação das amostras, que totalizaram 9 unidades separadas em 3 grupos distintos (X, Y e Z).

Figura 19: Fluxograma de preparação dos discos.



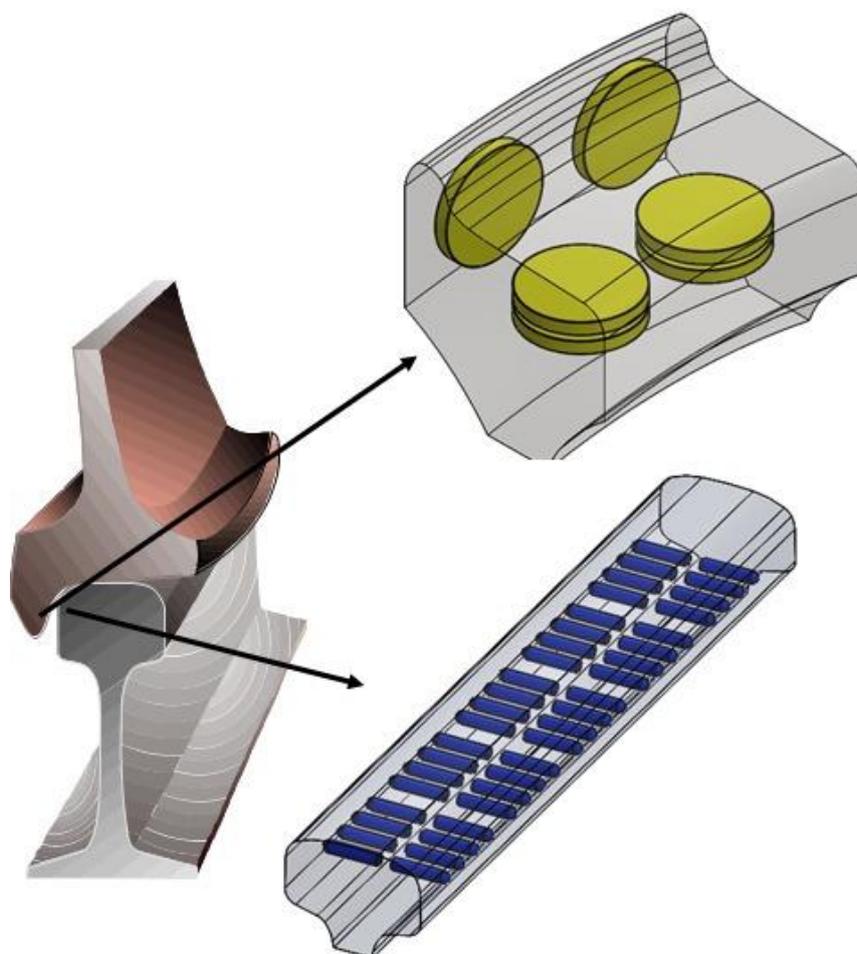
Fonte: autores.

3.1 Materiais dos corpos de prova

Na realização de pesquisa foram utilizados dois tipos de corpos de prova, que representam o trilho e a roda ferroviária. Para representar o trilho, foram produzidos corpos de prova no formato de pino. Para representar a roda, foram produzidos corpos

de prova no formato de disco. Todas as amostras foram produzidas com materiais de rodas e trilho ferroviário reais, como mostra a Figura 20. O material dos trilhos é o aço forjado, conforme mostrado na Tabela 3, e para as rodas, o material utilizado é o aço fundido classe C, cuja composição é mostrada na Tabela 4:

Figura 20: Obtenção dos corpos de prova.



Fonte: apresentação equipe projeto cátedra, 2018.

Tabela 3: Composição química nominal, em peso, de trilhos convencionais.

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	V [%]	Al [%]
0,74-0,86	0,75-1,25	0,10-0,6	Máx. 0,02	Máx. 0,02	Máx. 0,3	Máx. 0,25	Máx. 0,06	Máx. 0,01	Máx. 0,01

Fonte: adaptado da norma AREMA/AAR, 2014.

Tabela 4: Composição química nominal, em peso, de rodas ferroviárias, por classe.

Elemento	Classe L	Classe A	Classe B	Classe C
C [%]	Máx. 0,47	0,47	0,57-0,67	0,67-0,77
Mn [%]	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90	0,60-0,90
P [%]	Máx. 0,03	0,03	0,03	Máx. 0,03
S [%]	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040	0,005-0,040
Si [%]	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00	0,15-1,00
Ni [%]	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25
Cr [%]	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25	Máx. 0,25
Mo [%]	Máx. 0,1	Máx. 0,1	Máx. 0,1	Máx. 0,1
V [%]	Máx. 0,04	Máx. 0,04	Máx. 0,04	Máx. 0,04
Cu [%]	Máx. 0,35	Máx. 0,35	Máx. 0,35	Máx. 0,35
Al [%]	Máx. 0,06	Máx. 0,06	Máx. 0,06	Máx. 0,06
Ti [%]	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03	Máx. 0,03
Nb [%]	Máx. 0,05	Máx. 0,05	Máx. 0,05	Máx. 0,05

Fonte: adaptado da norma AREMA/AAR, 2014.

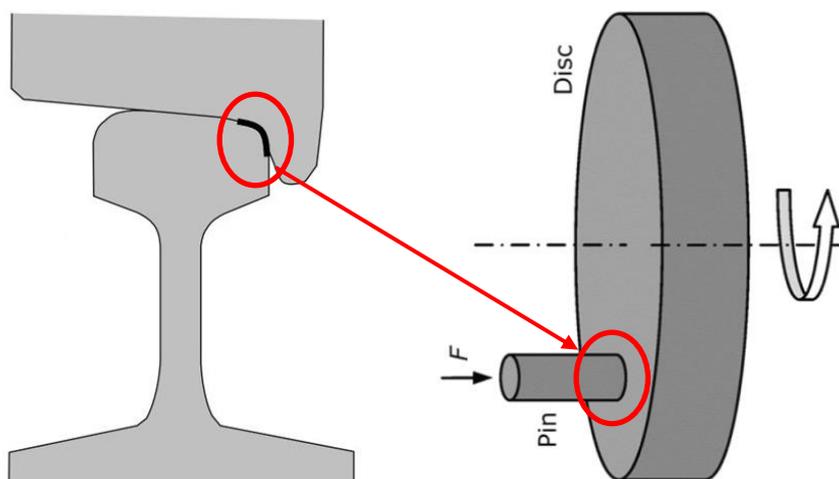
3.2 Equipamentos

Para a efetivação da pesquisa quatro equipamentos foram utilizados, o durômetro, o tribômetro para realizar as medições do coeficiente de atrito, o interferômetro que possui a função de avaliar a superfície a ser estudada e finalmente uma balança de precisão para analisar o desgaste através da perda de massa.

3.2.1 Tribômetro

O tribômetro utilizado é o modelo CETR-UMT da marca Brunner. Este equipamento pode utilizar vários módulos de testes, para a pesquisa em questão foi utilizado o módulo pino-disco, pois possui uma boa representação do contato ocorrido, podemos ver a comparação do contato real com o do pino-disco na Figura 21. A Figura 22 mostra o equipamento.

Figura 21: Contato roda trilho (esquerda) e contato pino-disco (direita).



Fonte: adaptado da apresentação equipe projeto cátedra, 2018.

Figura 22: Tribômetro UMT.



Fonte: adaptado de UMT, 2018.

Para a realização do ensaio no tribômetro foi estabelecida a carga de 70 N no contato do pino-disco com uma velocidade de deslizamento de 0,9 m/s, condições de

ensaio que representam o funcionamento em condições usuais do sistema roda – trilho de trem (OLOFSSON, 2003). A duração do ensaio foi definida em uma hora, para que com isso ocorra a estabilização do atrito, pois nos ensaios realizados no tribômetro ocorre uma certa variação nos valores obtidos ao longo do tempo (MENEZES, 2009). A temperatura do ambiente foi mantida em 32 °C.

O módulo de ensaio pino-disco consiste em um pino que desliza contra um disco em rotação, cinética que representa o movimento da flange da roda com a bitola do trilho. Durante o teste, a UMT permite o monitoramento da carga normal, a força de atrito, o coeficiente de atrito e a profundidade de desgaste.

3.2.2 Interferômetro

O interferômetro utilizado foi o CCI Lite da Taylor Hobson®, representado pela Figura 23, este possui um avançado tipo de medição em três dimensões sem a realização de contato. Todos os tipos de superfícies podem ser medidas por esse interferômetro, contanto que possuam uma refletividade entre 0,3% e 100%. A área de medição utilizada foi de 0,833 x 0,833 mm, maior área mensurável com a lente instalada no equipamento.

Figura 23: Interferômetro CCI lite.



Fonte: Taylor Hobson Brasil, 2018.

3.2.3 Durômetro

O durômetro utilizado na pesquisa foi da marca EmcoTest na escala Vickers HV 30, mostrado na Figura 24.

Figura 24: Durômetro EMCOTEST



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.3 Procedimento experimental

Em pesquisas experimentais existem dois tipos procedimentos: aqueles que caracterizam materiais e aqueles de natureza funcional que elucidam os mecanismos pelos quais a energia é convertida (RUSNAK, 1970). Para esta pesquisa foi realizada a etapa de caracterização de material, para tal foram alteradas as superfícies dos discos utilizados e mantidos constantes todos os outros parâmetros, como temperatura, batimento do disco, força de operação do equipamento, tempo de teste, tipo de graxa, quantidade de graxa e velocidade de rotação do disco.

3.3.1 Medição da dureza dos pinos e discos

Para verificação das durezas das amostras dos discos foram feitas 4 medidas nas faces de cada disco a um raio de aproximadamente 20 mm, dividindo o disco em 4 quadrantes, das quais foram realizadas médias aritméticas. Para a medição da dureza dos pinos foram medidas apenas 3 amostras, pois apresentaram resultados muito constantes. Foram feitas 3 medidas em cada um destes pinos. Mediu-se a dureza na face dos discos, que representam a flange da roda, e na face dos pinos, que representa a bitola do trilho.

3.3.2 Lixamento

Para a criação de diferentes superfícies e rugosidades foram utilizados três procedimentos diferentes. No primeiro processo, 3 discos denominados de X1, X2 e X3 foram lixados manualmente com lixas de granulometria 80 da norma CAMI. No segundo procedimento 3 discos denominados de Y1, Y2 e Y3 foram lixados diretamente no tribômetro utilizando-se lixas de granulometria 220 da norma CAMI, com uma duração de 300 segundos e uma carga de 12N. No Terceiro procedimento 3 discos denominados de Z1, Z2 e Z3 foram lixados manualmente utilizando as lixas de granulometria 220, 320, 400 e 600 da norma CAMI na respectiva ordem, e posteriormente passando novamente à lixa de granulometria de 220 com a utilização do tribômetro, sendo realizadas 10 repetições com a duração de 30 segundos cada e carga de 12 N, para com isso gerar um padrão uniforme.

Esses 3 procedimentos diferentes foram utilizados para conferir aos distintos grupos de amostras uma grande variedade de parâmetros de rugosidade. Para averiguar que não foram criados planos na superfície dos discos em virtude do lixamento manual, foi medido com um micrômetro, em 5 pontos diferentes, a espessura dos discos a cada troca de tamanho de grão das lixas e calculado o desvio padrão em comparação com as medidas anteriores.

Como o objetivo do estudo é a avaliação dos parâmetros de rugosidade no disco, lixou-se a superfície de todos os pinos em um mesmo procedimento, o qual consistiu na utilização de lixas de granulometria 120 da norma CAMI no tribômetro. Foram duas etapas de lixamento em cada pino, sendo ambas com carga de 7 N a uma velocidade

160 RPM durante 15 segundos, diferenciando as duas etapas por seus raios de atuação, onde na primeira foi com um raio de 18 mm e na segunda um raio de 30 mm. O primeiro raio foi utilizado para dar um desbaste inicial na superfície do pino e o segundo para gerar um padrão no mesmo raio no qual os testes com os discos seriam realizados.

3.3.3 Caracterização da superfície

Os 9 discos e 3 pinos foram então analisados no interferômetro para adquirir os valores dos parâmetros de rugosidade alcançados com os processos de lixamento, utilizou-se 3 pinos apenas pois após a análise destes constatou-se que suas superfícies não possuíam diferenças significativas entre si, com isso não havendo necessidade de avaliar os 9 pinos. Os valores foram adquiridos com o propósito de compará-los com o coeficiente de atrito a ser obtido no tribômetro e assim avaliar quais parâmetros possuem alguma relação com sua variação.

3.3.4 Medição da massa dos discos e pinos

Com ambas as amostras dos discos e amostras dos pinos prontas, utilizou-se uma balança de precisão para realizar a pesagem das mesmas. Tal pesagem foi realizada antes e após a realização dos ensaios no tribômetro com o propósito de averiguar quanto de massa foi perdida por desgaste durante os ensaios. Antes de serem realizadas as pesagens as amostras foram submetidas a um processo de limpeza com a utilização de querosene para retirar qualquer resquício de óleo, o qual estava presente nas amostras antes dos testes para a proteção contra oxidação, e da graxa utilizada durante o ensaio e em seguida utilizou-se álcool para eliminar o querosene e qualquer impureza que tenha restado.

3.3.5 Retentor de graxa

Para manter a quantidade de graxa constante durante os ensaios foi feito um desenho tridimensional de um retentor de graxa (Figura 25), utilizando um programa de CAD, o qual foi impresso em uma impressora 3D. Este retentor realizou a função

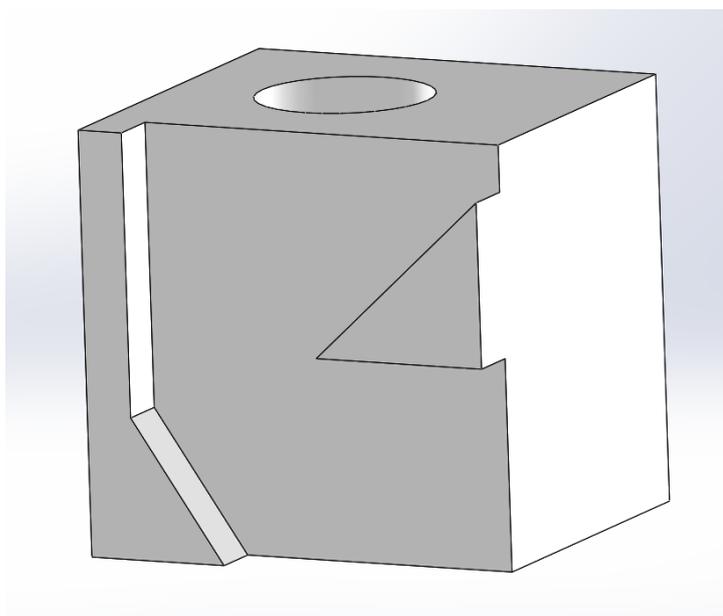
de direcionar a graxa no disco para o caminho do pino, assim mantendo o ensaio em estado de lubrificação em abundância. Na Figura 25 pode-se ver o funcionamento do retentor, direcionado a graxa da superfície do disco para a posição do pino.

Figura 25: Funcionamento do retentor de graxa.



Fonte: Ferrer et al., 2018.

Figura 26: Retentor de graxa.



Fonte: autores.

3.3.6 Ensaio no Tribômetro

Para a realização do ensaio no tribômetro os pinos foram colocados na mesma posição de lixamento, alinhando dessa forma o padrão criado pela lixa com a direção de contato com o disco. Em seguida, os discos foram montados no tribômetro e realizou-se uma medição com um relógio comparador para averiguar seu batimento, tendo sido estipulado a necessidade de um batimento menor que 0,05 mm, validando dessa forma que não foi criado algum plano durante o processo de lixamento. Foi montado o retentor de graxa e testado girando manualmente o disco e avaliando se o direcionamento de graxa estava adequado.

Para realizar todos os testes em uma mesma condição de temperatura, foi decidido utilizar a temperatura de 32 °C ao invés da temperatura ambiente, pois o laboratório onde foram realizados os ensaios possui outros equipamentos além do tribômetro, dentre estes equipamentos um forno, que quando utilizado elevava a temperatura ambiente. Para o aquecimento, foi usado um aquecedor elétrico portátil.

Diferentemente da pesquisa bibliográfica, algumas etapas do trabalho requerem a disponibilidade de ambientes, pessoas e equipamentos externos para serem realizadas, o que vem a estender o trabalho e esforço requerido na execução de uma pesquisa. Foi feita uma tabela (Tabela 5) resumizando o tempo necessário para conclusão das etapas desta pesquisa, com intuito de mostrar por exemplo, o quanto um projeto pode consumir de tempo de um laboratório e demais dependências de uma instituição de ensino. Todos as etapas foram realizadas nos laboratórios da UTFPR, com exceção apenas da criação do modelo 3D do retentor de graxa.

Tabela 5: Sumarização do tempo empregado em laboratório.

Etapas	Tempo necessário por amostra	Tempo total
Medição da dureza dos discos	15 minutos	135 minutos
Medição da dureza dos pinos	5 minutos	15 minutos
Lixamento das amostras grupo Z	50 minutos	150 minutos
Lixamento das amostras grupos X e Y	15 minutos	90 minutos

Continuação da Tabela 5		
Lixamento dos pinos	5 minutos	45 minutos
Análise no CCI (3 pinos, 9 discos)	Aprox. 15 minutos	180 minutos
Medição de massa (pinos e discos, antes e após ensaio)	5 minutos	90 minutos
Modelagem e fabricação do retentor de graxa	90 minutos	90 minutos
Ensaio tribológico	90 minutos	810 minutos
Tempo total estimado		1605 min (aprox. 27h)

Fonte: autores.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados que foram obtidos na pesquisa realizada. Inicialmente são apresentados os valores de dureza e os parâmetros de rugosidade encontrados tanto nos discos quanto nos pinos. Posteriormente os gráficos resultantes do coeficiente de atrito de cada grupo de amostras, a partir dos quais foram geradas médias dos valores para com isso criar gráficos de dispersão de pontos relacionando os parâmetros de rugosidade com o coeficiente de atrito de seus respectivos testes.

4.1 Dureza

Na Tabela 6 são apresentados os valores das durezas medidas nos discos, para garantir a confiabilidade das medidas as mesmas foram refeitas quando os valores das 4 durezas divergiam muito entre si, tais eventualidades aconteciam por possíveis falhas do equipamento ou do operador, visto que após repetição verificou-se boa repetibilidade entre medições. Quanto à dureza dos pinos foi obtida uma média 354 HV, sendo a variação entre medições num mesmo pino de no máximo 5 HV. Para os discos, o valor médio foi de 364,76 HV, com desvio padrão de 17,97 HV.

Tabela 6: Dureza dos discos.

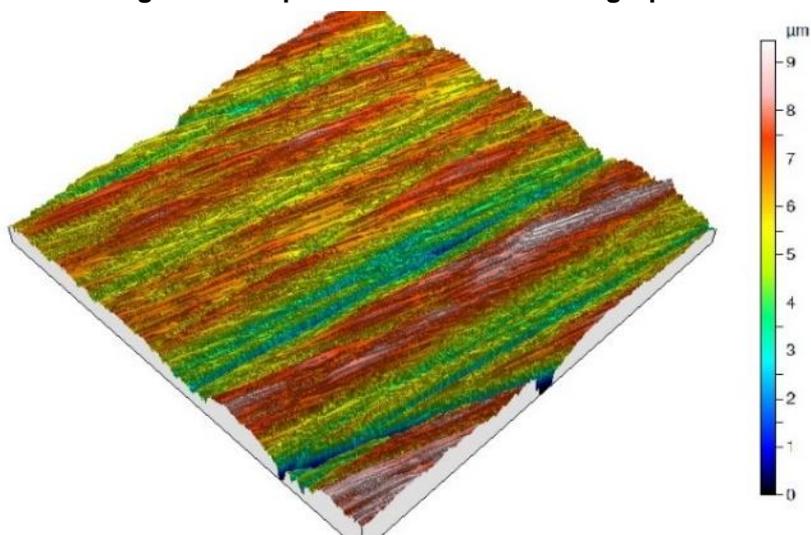
Medidas de Dureza (HV 30) - R= 20mm					
Amostra	1	2	3	4	Média
x1	359,00	390,00	426,00	385,00	390,00
x2	345,00	360,00	364,00	355,00	356,00
x3	374,00	341,00	353,00	351,00	354,75
y1	356,00	341,00	360,00	363,00	355,00
y2	375,00	379,00	360,00	379,00	373,25
y3	395,00	400,00	413,00	375,00	395,75
z1	373,00	357,00	352,00	355,00	359,25
z2	370,00	340,00	332,00	322,00	341,00
z3	363,00	374,00	352,00	343,00	358,00
Média	367,78	364,67	368,00	358,67	364,78

Fonte: autores.

4.2 Caracterização da superfície

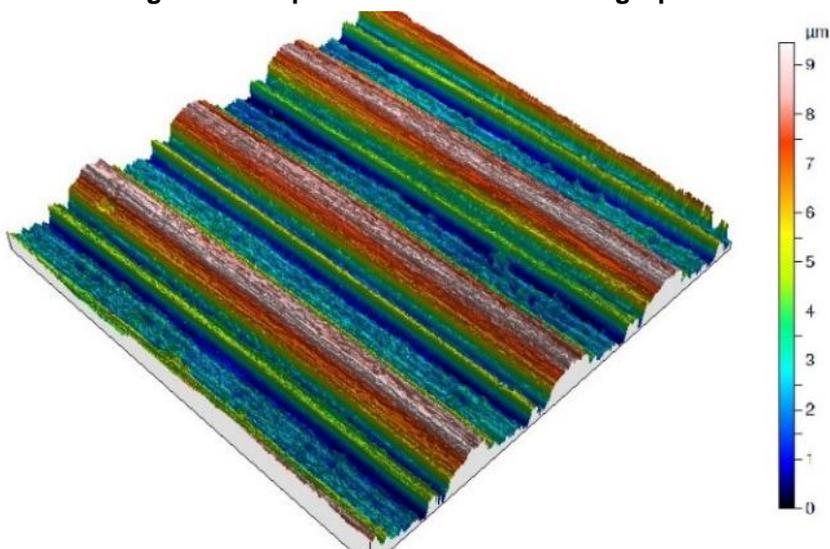
As Figuras 27, 28 e 29 representam as superfícies características dos grupos X, Y e Z respectivamente. Estas imagens foram obtidas na análise realizada pelo interferômetro. A partir dessas imagens cada parâmetro é calculado pelo software TalyMap. Analisando as 3 imagens é possível verificar que os grupos de amostras ficaram com aparências bem diferentes uns dos outros, o que era pretendido com a variação dos processos de lixamento.

Figura 27: Superfície característica do grupo X.



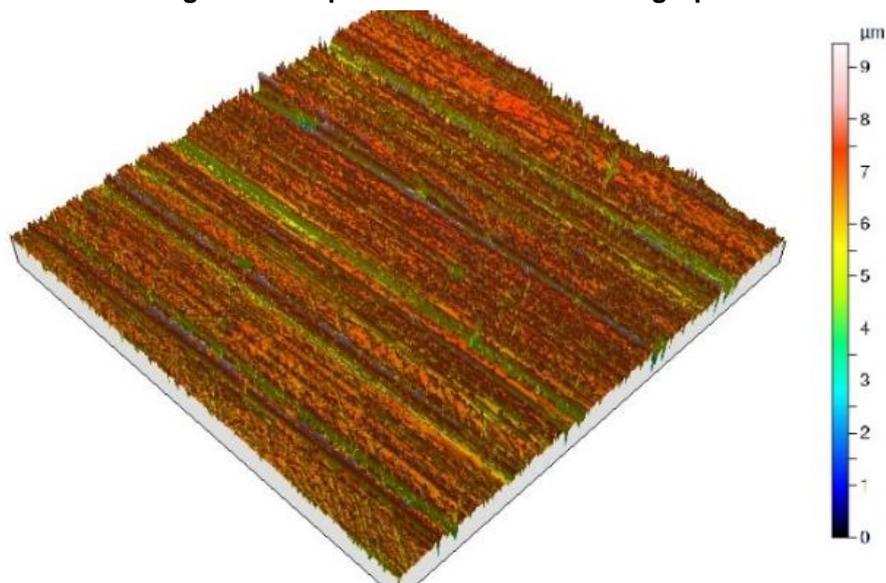
Fonte: autores.

Figura 28: Superfície característica do grupo Y.



Fonte: autores.

Figura 29: Superfície característica do grupo Z



Fonte: autores.

Na Tabela 7 apresenta-se a média dos valores dos parâmetros de rugosidade identificados na superfície das amostras dos discos, onde em cada amostra foram realizadas quatro medições em pontos distintos.

A partir da comparação dos valores apresentados na Tabela 7 com os valores obtidos de coeficiente de atrito dos ensaios no tribômetro, foi possível averiguar se algum parâmetro possui alguma relação com o coeficiente. Para aqueles que apresentaram boa correlação (R^2) buscou-se entender conceitualmente como tal parâmetro pode estar relacionado com o atrito.

Tabela 7: Caracterização da superfície de todas as amostras.

ISO 25178									
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2	Z3
Parâmetros de altura									
Sq [μm]	2,15E-01	7,12E-01	1,46E+00	2,07E+00	1,35E+00	2,86E+00	2,15E-01	2,39E-01	2,15E-01
Ssk	-1,80E+00	-1,36E+00	-5,95E-01	8,06E-01	7,15E-01	3,70E-01	-1,62E+00	-1,87E+00	-1,80E+00
Sku	1,17E+01	7,25E+00	3,39E+00	2,89E+00	2,66E+00	1,85E+00	1,70E+01	1,13E+01	1,17E+01
Sp [μm]	1,28E+00	1,86E+00	5,53E+00	6,82E+00	4,34E+00	6,45E+00	2,30E+00	1,36E+00	1,28E+00
Sv [μm]	2,69E+00	4,55E+00	6,12E+00	4,69E+00	4,03E+00	6,73E+00	3,01E+00	2,06E+00	2,69E+00
Sz [μm]	3,97E+00	6,41E+00	1,16E+01	1,15E+01	8,36E+00	1,32E+01	5,31E+00	3,41E+00	3,97E+00
Sa [μm]	1,56E-01	5,20E-01	1,15E+00	1,71E+00	1,12E+00	2,51E+00	1,53E-01	1,68E-01	1,56E-01
Parâmetros funcionais									
Smr [%]	3,99E+01	6,13E+00	1,20E+00	6,74E-01	1,23E+00	1,71E+00	2,74E+01	1,93E+01	3,99E+01
Smc [μm]	1,83E-01	7,44E-01	1,60E+00	3,13E+00	1,99E+00	4,26E+00	2,16E-01	2,13E-01	1,83E-01
Sxp [μm]	5,69E-01	1,82E+00	3,50E+00	2,08E+00	1,46E+00	3,40E+00	5,36E-01	6,09E-01	5,69E-01
Parâmetros espaciais									
Sal [mm]	4,74E-03	2,57E-02	4,59E-02	3,93E-02	3,75E-02	4,28E-02	5,56E-03	4,95E-03	4,74E-03
Str	1,30E-01	7,19E-02	1,23E-01	9,94E-02	9,48E-02	1,08E-01	1,31E-01	1,65E-02	1,30E-01
Std [°]	4,82E+01	1,01E+02	8,41E+01	9,13E+01	4,60E+01	1,75E+00	1,20E+01	1,29E+01	4,82E+01
Parâmetros híbridos									
Sdq	1,54E-01	2,01E-01	2,11E-01	2,88E-01	2,63E-01	4,04E-01	1,72E-01	1,53E-01	1,54E-01
Sdr [%]	1,18E+00	2,03E+00	2,16E+00	3,89E+00	3,35E+00	7,14E+00	1,46E+00	1,15E+00	1,18E+00
Parâmetros funcionais volumétricos									
Vm [mm^3/mm^2]	8,81E-06	1,82E-05	3,60E-05	1,07E-04	6,99E-05	6,83E-05	9,23E-06	1,07E-05	8,81E-06
Vv [mm^3/mm^2]	1,92E-04	7,62E-04	1,64E-03	3,24E-03	2,06E-03	4,33E-03	2,26E-04	2,23E-04	1,92E-04
Vmp [mm^3/mm^2]	8,81E-06	1,82E-05	3,60E-05	1,07E-04	6,99E-05	6,83E-05	9,23E-06	1,07E-05	8,81E-06
Vmc [mm^3/mm^2]	1,78E-04	5,35E-04	1,19E-03	1,83E-03	1,15E-03	2,79E-03	1,66E-04	1,84E-04	1,78E-04
Vvc [mm^3/mm^2]	1,56E-04	6,26E-04	1,38E-03	3,16E-03	1,98E-03	4,19E-03	1,91E-04	1,83E-04	1,56E-04
Vvv [mm^3/mm^2]	3,58E-05	1,35E-04	2,55E-04	8,15E-05	7,36E-05	1,38E-04	3,44E-05	4,06E-05	3,58E-05
Parâmetros de recursos									
Spd [1/ mm^2]	4,69E+03	1,39E+03	4,13E+02	6,53E+02	1,85E+03	6,75E+02	3,99E+03	4,44E+03	4,69E+03
Spc [1/mm]	2,80E+02	3,79E+02	4,96E+02	5,43E+02	4,86E+02	7,40E+02	3,53E+02	3,03E+02	2,80E+02
S10z [μm]	1,97E+00	2,53E+00	3,97E+00	3,83E+00	3,41E+00	5,29E+00	3,17E+00	1,76E+00	1,97E+00
S5p [μm]	8,42E-01	1,02E+00	2,19E+00	2,21E+00	1,94E+00	2,69E+00	1,65E+00	9,19E-01	8,42E-01
S5v [μm]	1,13E+00	1,51E+00	1,78E+00	1,62E+00	1,47E+00	2,59E+00	1,52E+00	8,42E-01	1,13E+00
Das [mm^2]	1,71E-04	5,71E-04	1,36E-03	1,02E-03	4,23E-04	1,06E-03	2,63E-04	1,83E-04	1,71E-04
Sha [mm^2]	2,32E-04	1,12E-03	1,26E-03	1,55E-03	5,02E-04	1,07E-03	3,73E-04	2,11E-04	2,32E-04
Sdv [mm^3]	4,71E-09	1,44E-08	4,74E-08	3,80E-08	1,52E-08	4,86E-08	9,25E-09	3,92E-09	4,71E-09
Shv [mm^3]	3,89E-09	4,79E-08	1,93E-07	6,19E-08	1,78E-08	5,89E-08	1,17E-08	2,73E-09	3,89E-09

4.3 Índice de plasticidade

De posse dos valores dos parâmetros de superfícies obtidos pelo interferômetro, em especial o Sdq, pôde-se averiguar a característica do contato pino-disco, utilizando a equação 1 (seção 2.4). Para o cálculo de E^* , foi utilizado $E = 206 \text{ GPa}$ e $\nu = 0,29$. A Tabela 8 mostra o valor do índice de plasticidade para todas as amostras:

Tabela 8: Índice de plasticidade das amostras.

Amostras									
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2	Z3
Sdq	0,211	0,201	0,211	0,288	0,263	0,404	0,172	0,153	0,155
ψ	6,89	6,56	6,90	9,41	8,60	13,20	5,63	5,00	5,04

Fonte: autores.

Através do índice de plasticidade, pode-se observar que todas as amostras se enquadram no regime de deformação plástica, com ψ acima de 1,0, conforme esperado para as condições de operação e ensaio.

4.4 Massa das amostras

Nas tabelas 9 e 10 apresenta-se os pesos medidos tanto dos discos quanto dos pinos, respectivamente. As tabelas foram divididas em duas partes, as medidas feitas antes dos ensaios de atrito e as medidas após realizados os ensaios no tribômetro, foram feitas ambas as medidas com a intenção de analisar o desgaste causado nas amostras.

Tabela 9: Massa dos discos, em gramas.

Peso inicial					Peso após ensaio				
Amostra	1	2	3	Média	Amostra	1	2	3	Média
x1	206,8300	206,8298	206,8300	206,8299	x1	206,8297	206,8298	206,8298	206,8298
x2	209,1828	209,1827	209,1826	209,1827	x2	209,1827	209,1826	209,1820	209,1824
x3	205,6065	205,6064	205,6064	205,6064	x3	205,6065	205,6065	205,6069	205,6066
y1	203,5542	203,5545	203,5545	203,5544	y1	203,5531	203,5529	203,5530	203,5530
y2	208,6695	208,6694	208,6696	208,6695	y2	208,6693	208,6693	208,6695	208,6694
y3	207,5878	207,5879	207,5877	207,5878	y3	207,5877	207,5875	207,5874	207,5875
z1	203,2383	203,2384	203,2383	203,2383	z1	203,2369	203,2371	203,2370	203,2370
z2	204,3409	204,3410	204,3410	204,3410	z2	204,3382	204,3382	204,3383	204,3382
z3	206,8004	206,8004	206,8003	206,8004	z3	206,7996	206,7994	206,7997	206,7996

Fonte: autores.

Tabela 10: Massa dos pinos em gramas.

Peso inicial					Peso após ensaio				
Amostra	1	2	3	Média	Amostra	1	2	3	Média
x1	2,8256	2,8256	2,8257	2,8256	x1	2,8257	2,8255	2,8256	2,8256
x2	2,8268	2,8269	2,8269	2,8269	x2	2,8268	2,8268	2,8266	2,8267
x3	2,8263	2,8265	2,8263	2,8264	x3	2,8263	2,8264	2,8263	2,8263
y1	2,8234	2,8232	2,8234	2,8233	y1	2,8230	2,8230	2,8230	2,8230
y2	2,8000	2,8000	2,8001	2,8000	y2	2,7998	2,7999	2,7999	2,7999
y3	2,8218	2,8219	2,8218	2,8218	y3	2,8216	2,8216	2,8217	2,8216
z1	2,8275	2,8276	2,8276	2,8276	z1	2,8275	2,8275	2,8274	2,8275
z2	2,8271	2,8271	2,8272	2,8271	z2	2,8271	2,8270	2,8272	2,8271
z3	2,8276	2,8275	2,8275	2,8275	z3	2,8275	2,8274	2,8274	2,8274

Fonte: autores.

Nas Tabelas 11 e 12 tem-se os valores de perda da massa nos pinos e nos discos respectivamente, as perdas de massa foram proporcionalmente mais significativas nos pinos quanto nos discos, provavelmente devido a maior dureza dos discos. Tal perda de massa produz um fator de desgaste k de 1×10^{-8} a 1×10^{-6} , o que indica desgaste moderado, tal como os observados em campo. Pode-se observar os valores de k obtidos nos ensaios através da Tabela 11.

Tabela 11: Perda de massa dos pinos.

Perda de massa dos pinos			
Amostra	Inicial [g]	Após [g]	Perda [mg]
x1	2,8256	2,8256	0,0333
x2	2,8269	2,8267	0,1333
x3	2,8264	2,8263	0,0333
y1	2,8233	2,8230	0,3333
y2	2,8000	2,7999	0,1667
y3	2,8218	2,8216	0,2000
z1	2,8276	2,8275	0,1000
z2	2,8271	2,8271	0,0333
z3	2,8275	2,8274	0,1000

Fonte: autores.

Tabela 12: Perda de massa dos discos

Perda de massa dos Discos			
Amostra	Inicial [g]	Após [g]	Perda [mg]
x1	206,8299	206,8298	0,1667
x2	209,1827	209,1824	0,2667
x3	205,6064	205,6066	-0,2000
y1	203,5544	203,5530	1,4000
y2	208,6695	208,6694	0,1333
y3	207,5878	207,5875	0,2667
z1	203,2383	203,2370	1,3333
z2	204,3410	204,3382	2,7333
z3	206,8004	206,7996	0,8000

Fonte: autores.

Tabela 13: Coeficiente de desgaste k.

Amostra	K
x1	1,7E-07
x2	2,7E-07
x3	-2,0E-07
y1	1,4E-06
y2	1,3E-07
y3	2,7E-07
z1	1,3E-06
z2	2,8E-06
z3	8,1E-07

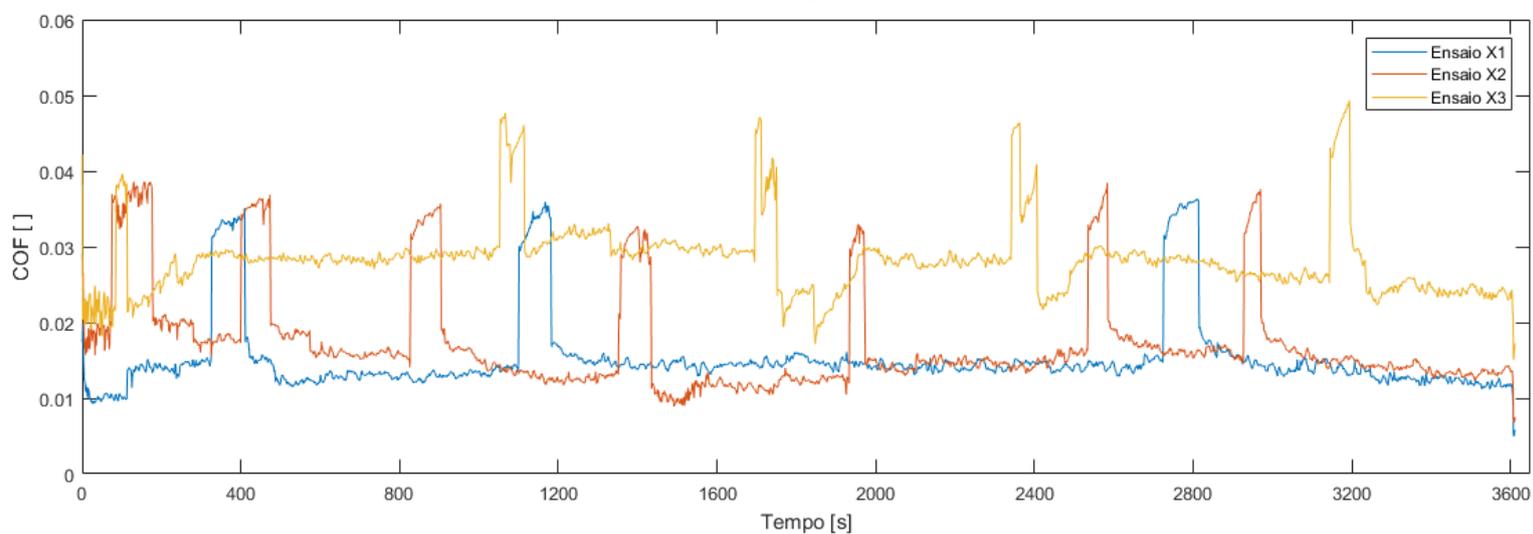
Fonte: autores.

4.5 Ensaio no Tribômetro

Para a apresentação dos resultados obtidos no tribômetro foi utilizado o software MatLab para reduzir a quantidade de pontos obtidos assim como gerar gráficos precisos. Houve a necessidade de reduzir a quantidade de pontos devido à taxa de aquisição de 1000 pontos por segundo pelo tribômetro. As Figuras 30, 31 e 32, representam respectivamente os grupos X, Y e Z. Após análise dos testes no tribômetro, observou-se que as amostras X3, Y3 e Z3 apresentaram resultados bem diferentes de seus respectivos grupos, tal inconsistência pode ter ocorrido por alguma falha na realização dos testes, como por exemplo uma montagem errada do pino,

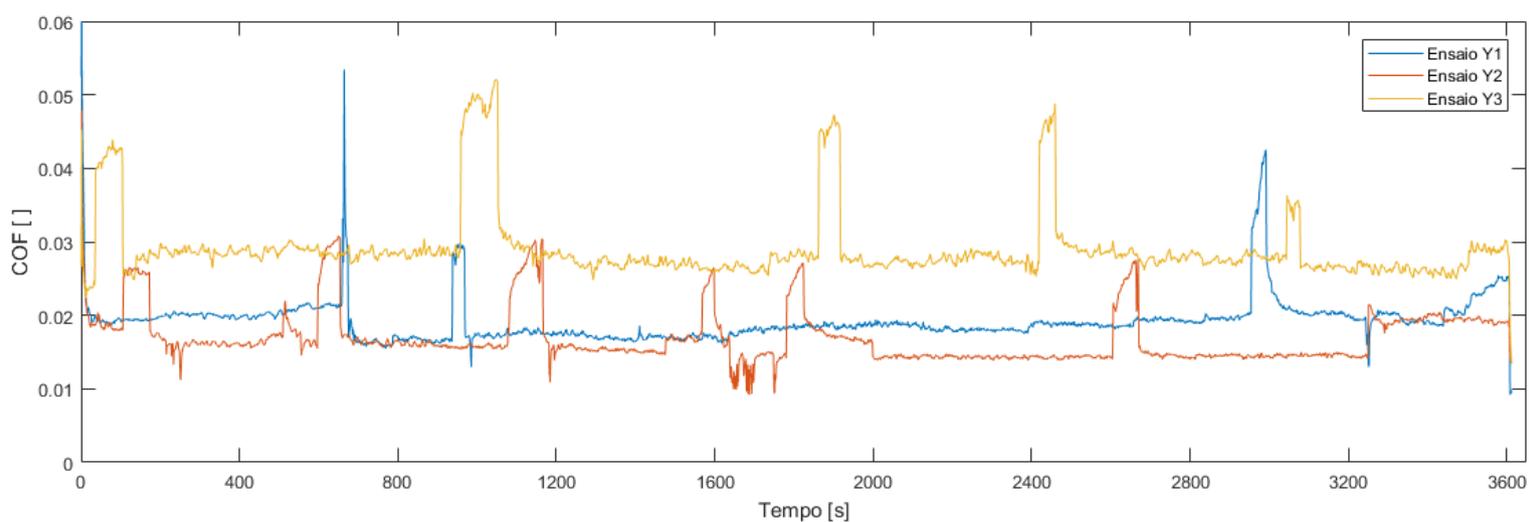
portanto para a comparação do coeficiente de atrito com os parâmetros e com o desgaste estas amostras foram desconsideradas.

Figura 30: Ensaio do grupo X no tribômetro.



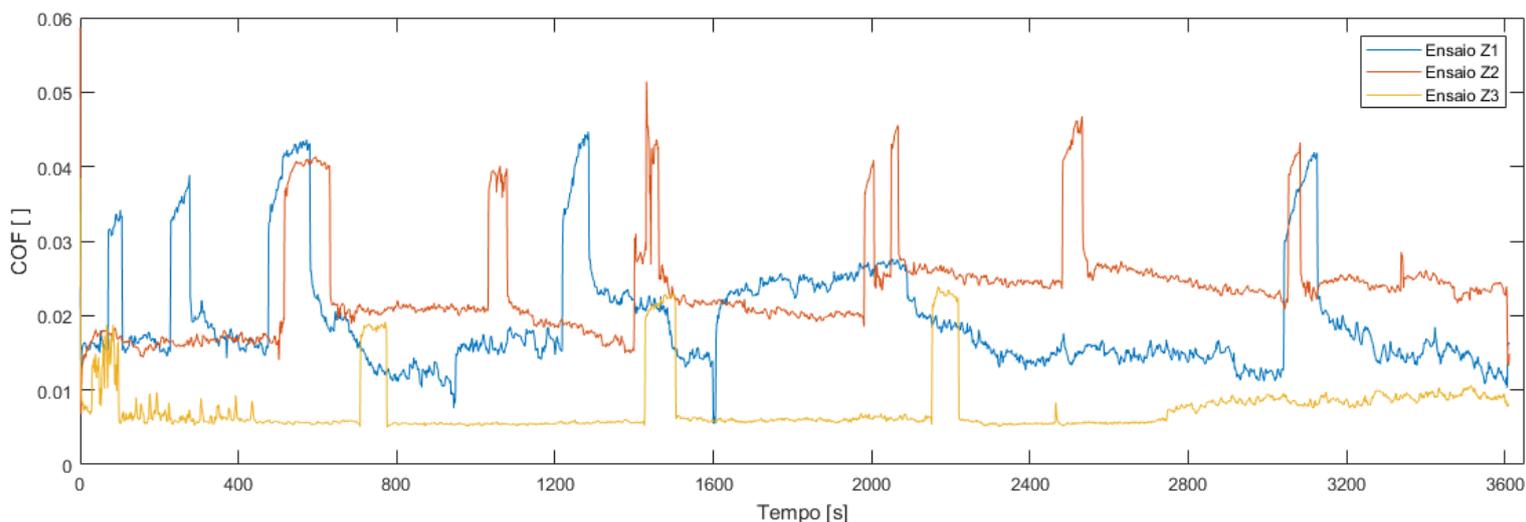
Fonte: autores.

Figura 31: Ensaio do grupo Y no tribômetro.



Fonte: autores.

Figura 32: Ensaio do grupo Z no tribômetro.

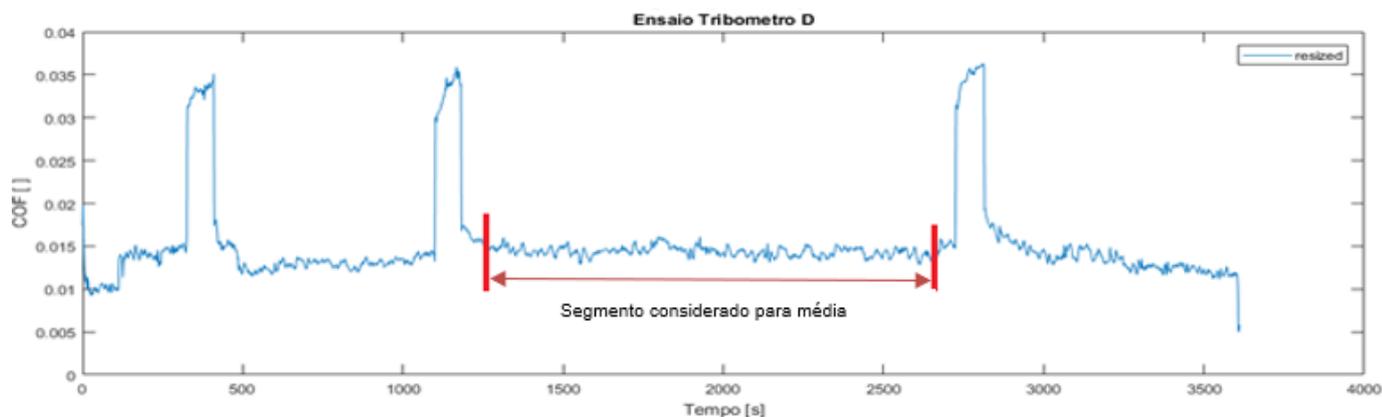


Fonte: autores.

Como pode ser observado, em cada ensaio existem picos no valor do coeficiente de atrito (COF) ao longo do tempo. Cada pico representa o momento no qual a lubrificação se tornou escassa, sendo necessária a adição manual de um pequeno volume de graxa (1 ml) para retornar à condição inicial de lubrificação. A necessidade da reposição foi devido à dispersão da graxa no disco, bem como à retenção do lubrificante atrás do pino e dentro do retentor.

A partir dos gráficos gerados no ensaio, utilizou-se o segmento mais estável de cada ensaio para se obter a média do coeficiente de atrito, utilizado para as relações com os parâmetros. A Figura 33 representa um exemplo de segmento estável.

Figura 33: Exemplo de segmento considerado para obtenção da média do coeficiente de atrito.

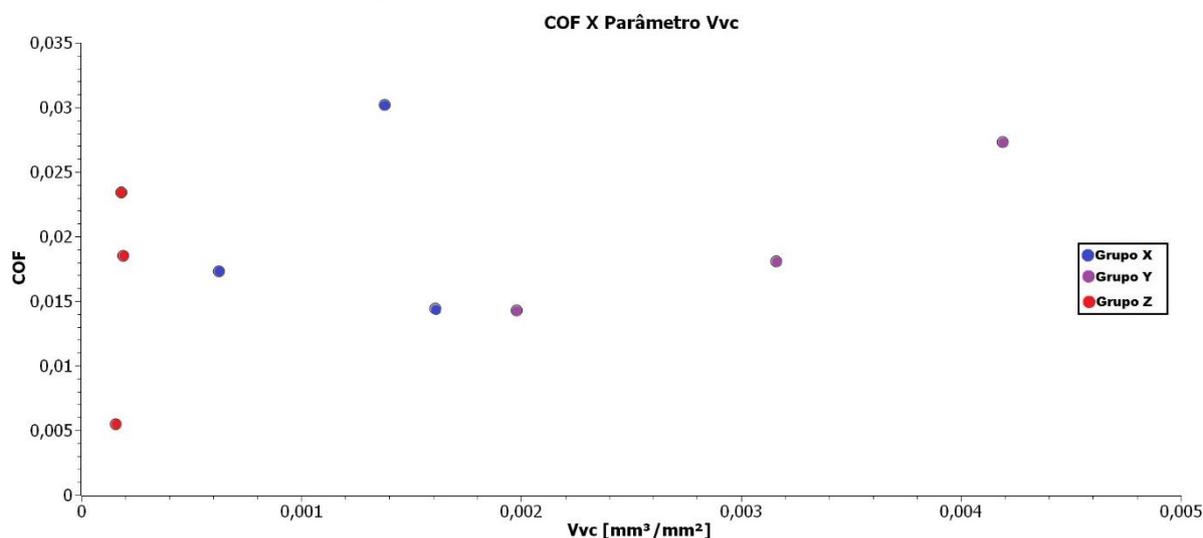


Fonte: autores.

4.6 Comportamento do atrito em função dos parâmetros

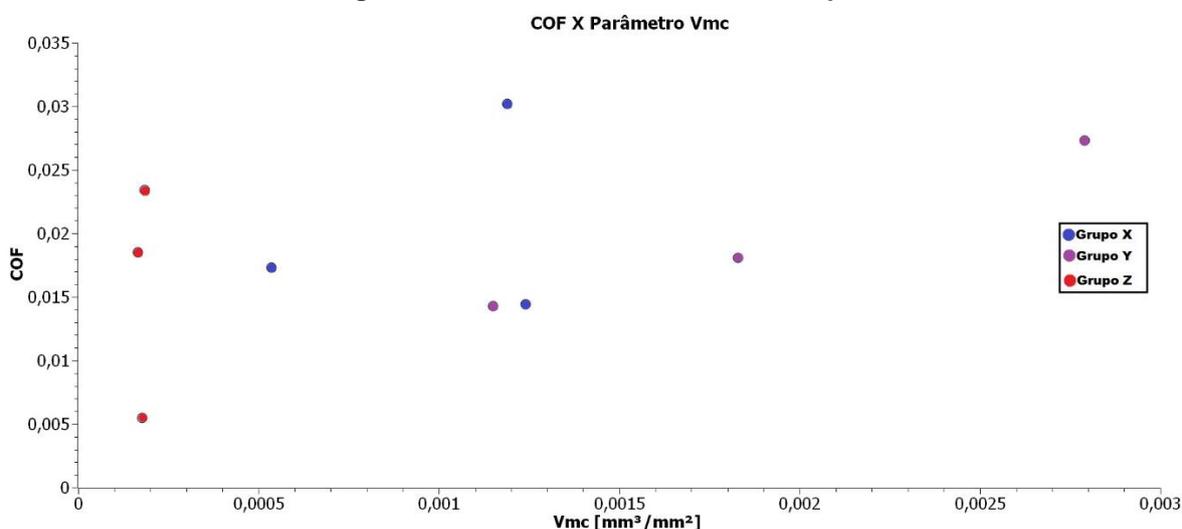
Para analisar o comportamento do atrito foram gerados gráficos de dispersão relacionando os coeficientes de atrito com os parâmetros de rugosidade. Observou-se que alguns parâmetros são calculados em função de outros parâmetros, e portanto, nesses casos foi escolhido apenas um deles para analisar e representar o grupo, como por exemplo os gráficos abaixo (Figuras 34 e 35), em que comparam-se os parâmetros V_{vc} e V_{mc} . Visto a semelhança entre os mesmos seguiu-se a análise apenas com o parâmetro V_{vc} .

Figura 34: Gráfico coeficiente de atrito por V_{vc}



Fonte: autores.

Figura 35: Gráfico coeficiente de atrito por V_{mc}



Fonte: autores.

Tendo os gráficos de dispersão de todos os parâmetros em função do coeficiente de atrito, foi analisado individualmente cada um dos 30 gráficos para encontrar possíveis padrões de comportamentos, para tal comparação foram analisados os valores de R^2 das linhas de tendência, tais valores se encontram na Tabela 14.

Tabela 14: Valores do coeficiente de correlação R^2 .

Parametro	R^2	Parametro	R^2	Parametro	R^2
Spc	0,9835	Smc	0,7878	Vm	0,6697
Sz	0,9533	Vv	0,7866	Vmp	0,6697
Sdq	0,9201	Vvc	0,7861	Sku	0,6642
Sv	0,9117	Spd	0,7695	Smr	0,6304
Sdr	0,9090	Sa	0,7605	Sal	0,6264
S5v	0,8552	Vmc	0,7596	Std	0,5908
Sp	0,8508	Sq	0,7455	Vvv	0,4980
Ssk	0,8326	Sda	0,7439	Sxp	0,4950
Sdv	0,7938	Shv	0,7345	S10z	0,4819
Str	0,7935	Sha	0,6725	S5p	0,1759

Fonte: autores.

Encontrou-se alguns que apresentavam um comportamento similar ao gráfico de Rabinowicz (figura 3), onde ele demonstra o comportamento coeficiente de atrito no contato de cobre com cobre em relação ao parâmetro de rugosidade R_q . Para uma boa representação dos valores usou-se o desvio padrão dos parâmetros para criar barras de erros e a partir dos seus valores foram criadas linhas de tendência, tais linhas foram obtidas por aproximações de polinomiais de segundo grau. Os parâmetros escolhidos foram aqueles que apresentaram um valor de R^2 superior a 0,9 que foram os parâmetros Spc, Sz, Sdq, Sv e Sdr. As Figuras 36 a 40 apresentam os gráficos de tais parâmetros em relação ao coeficiente de atrito assim como também o coeficiente de correlação R^2 da linha de tendência.

Na figura 41 temos a relação do coeficiente de atrito com o desgaste dos discos, no qual é possível ver uma relação direta onde o desgaste dos discos aumentou com o crescimento do coeficiente de atrito.

Figura 36: Coeficiente de atrito (COF) por Sdq, medido em graus.

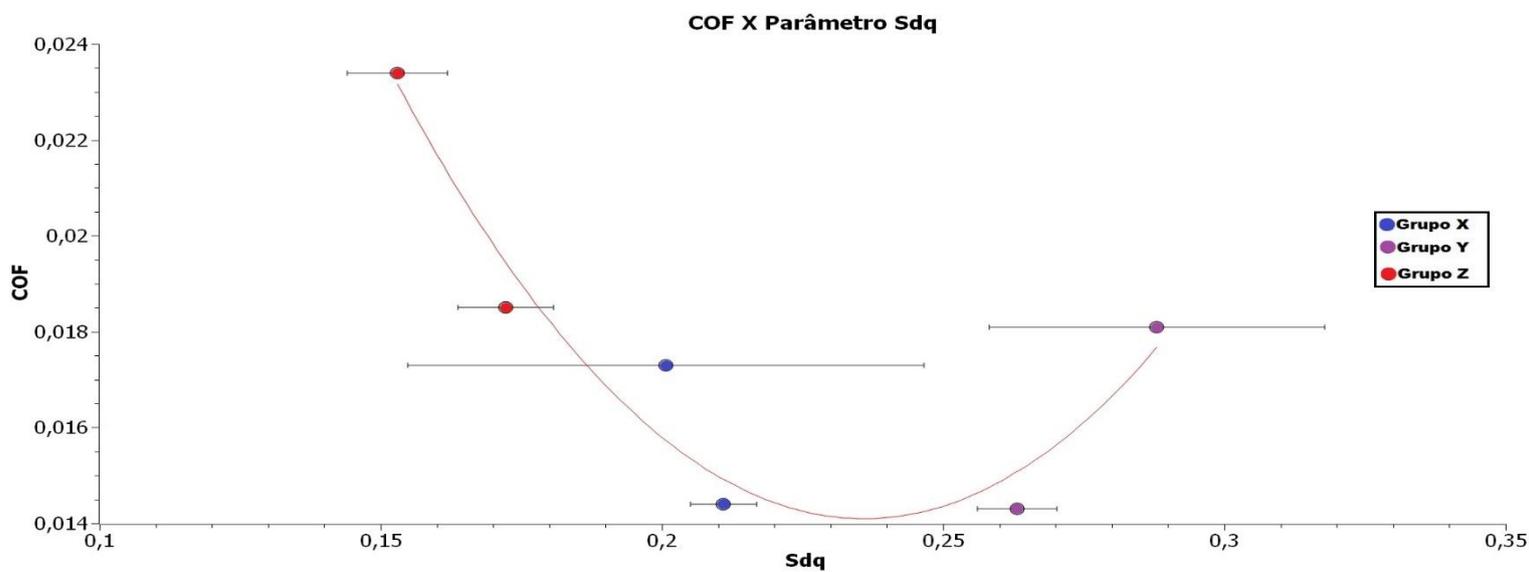


Figura 37: Coeficiente de atrito (COF) por Sdr.

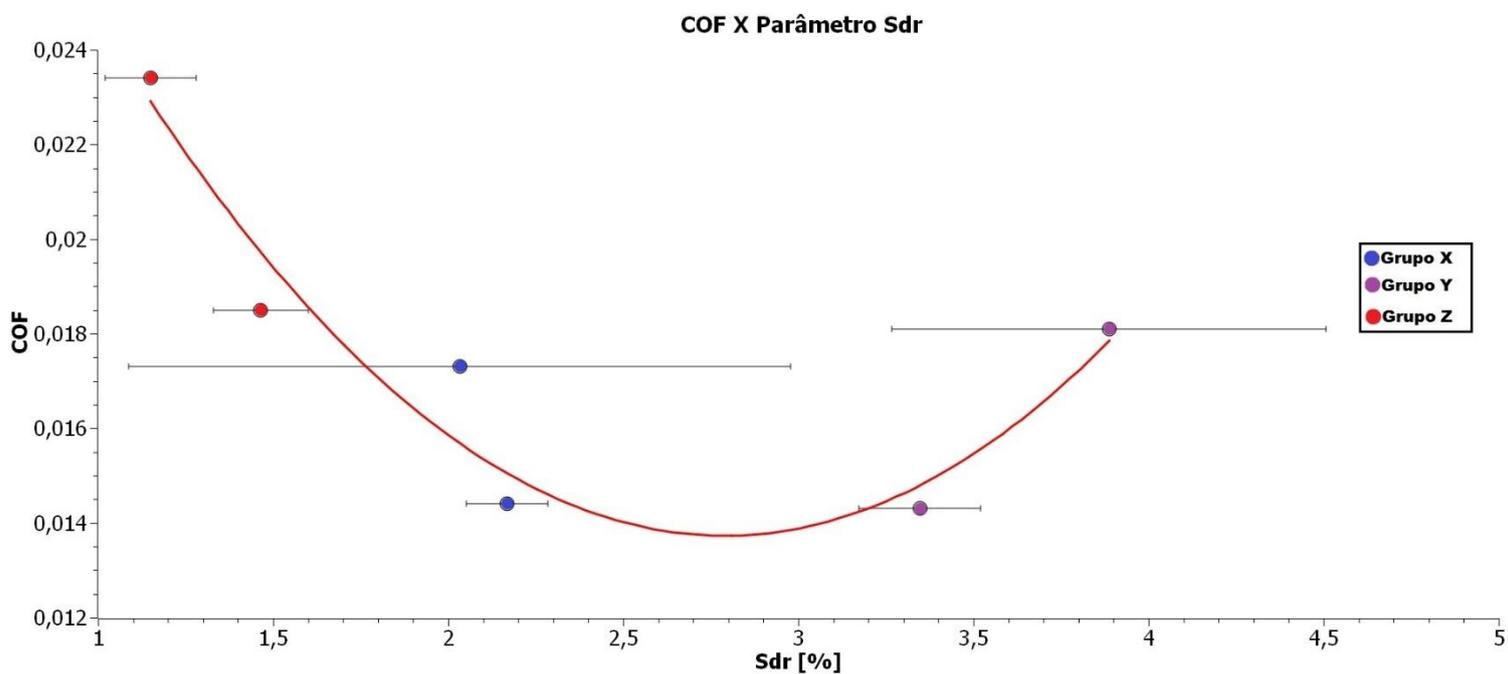


Figura 38: Coeficiente de atrito (COF) por Spc.

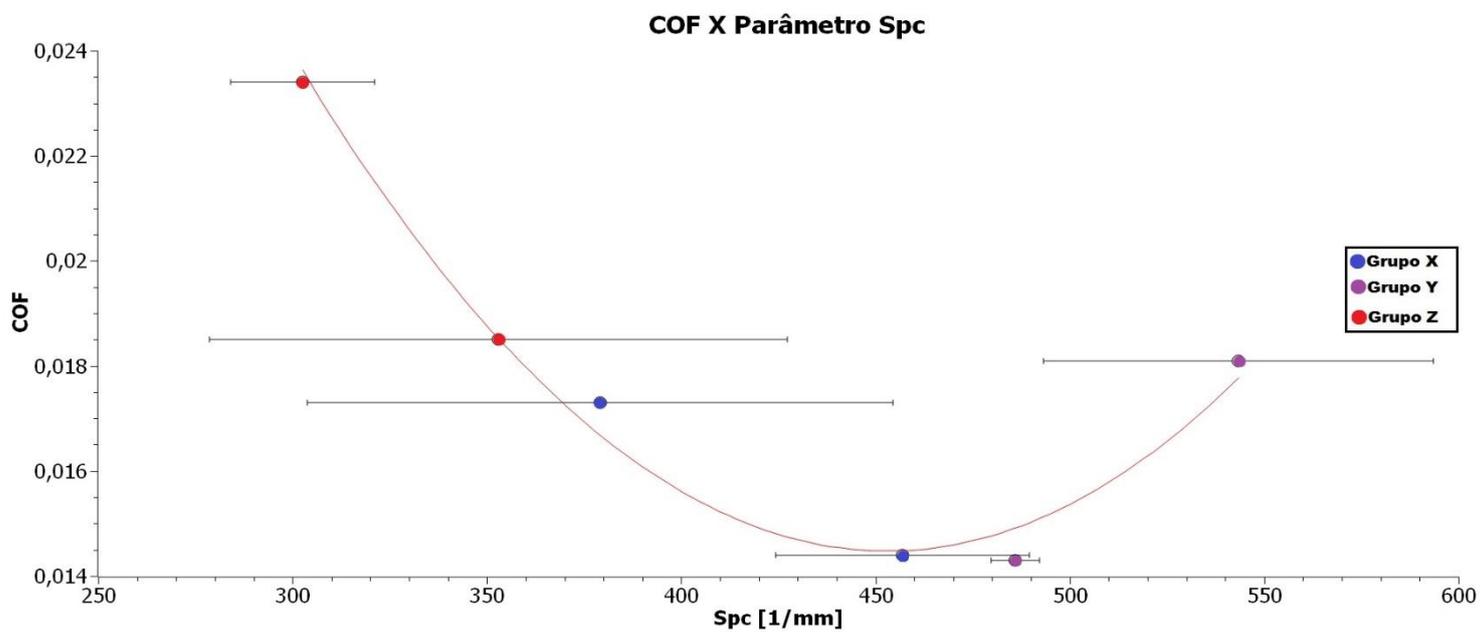


Figura 39: Coeficiente de atrito (COF) por Sv.

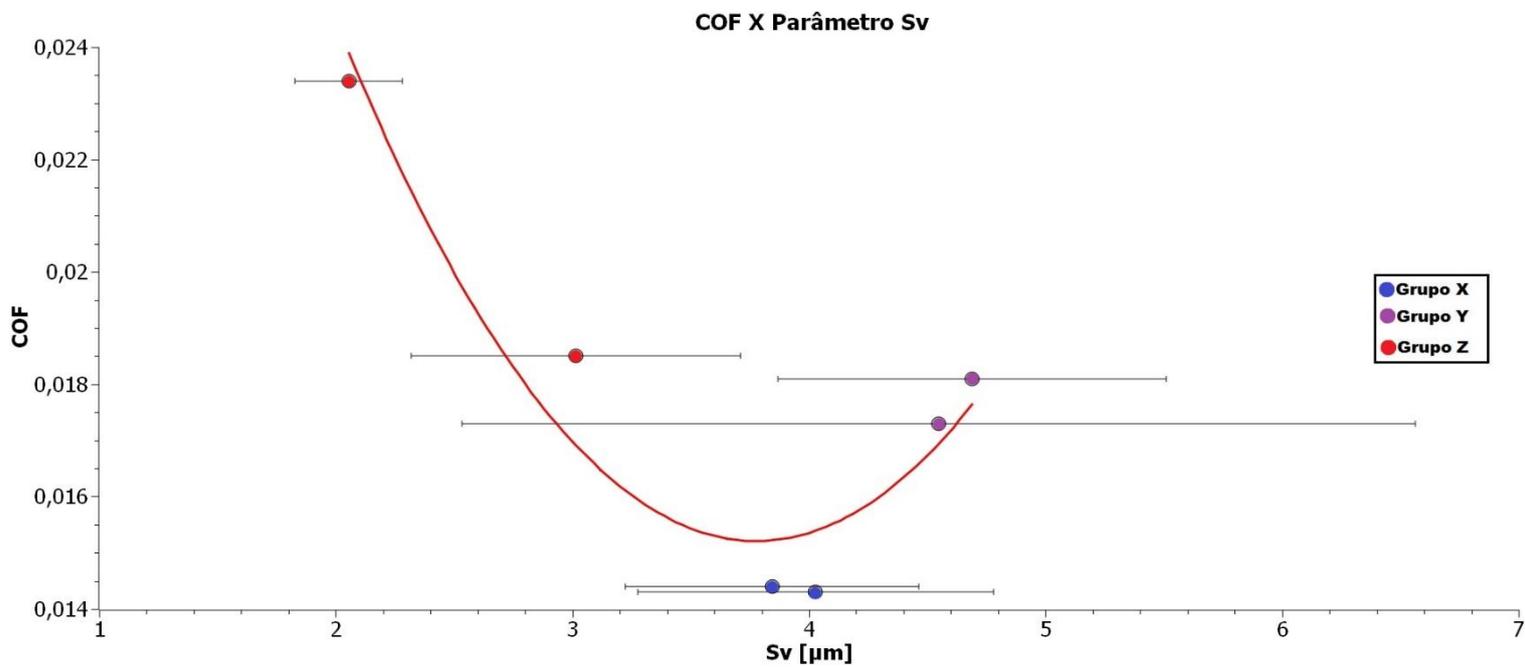


Figura 40: Coeficiente de atrito (COF) por Sz.

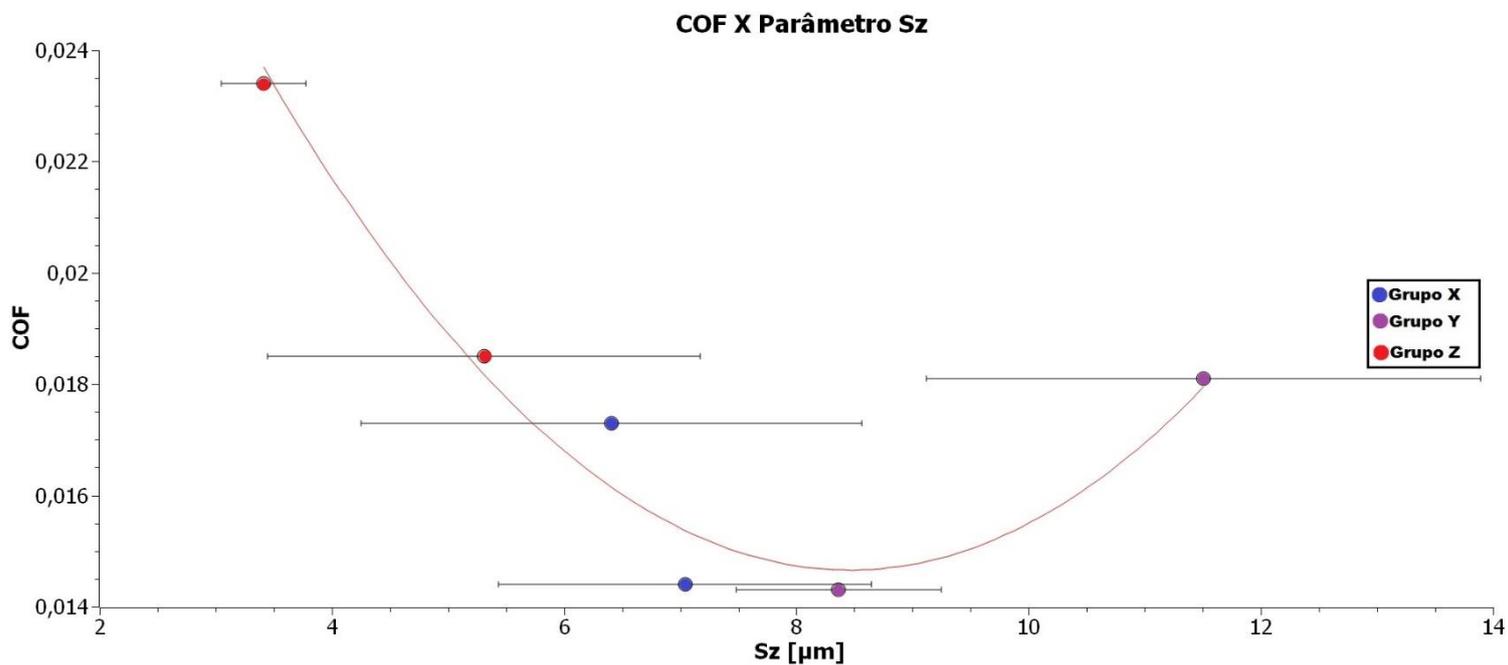
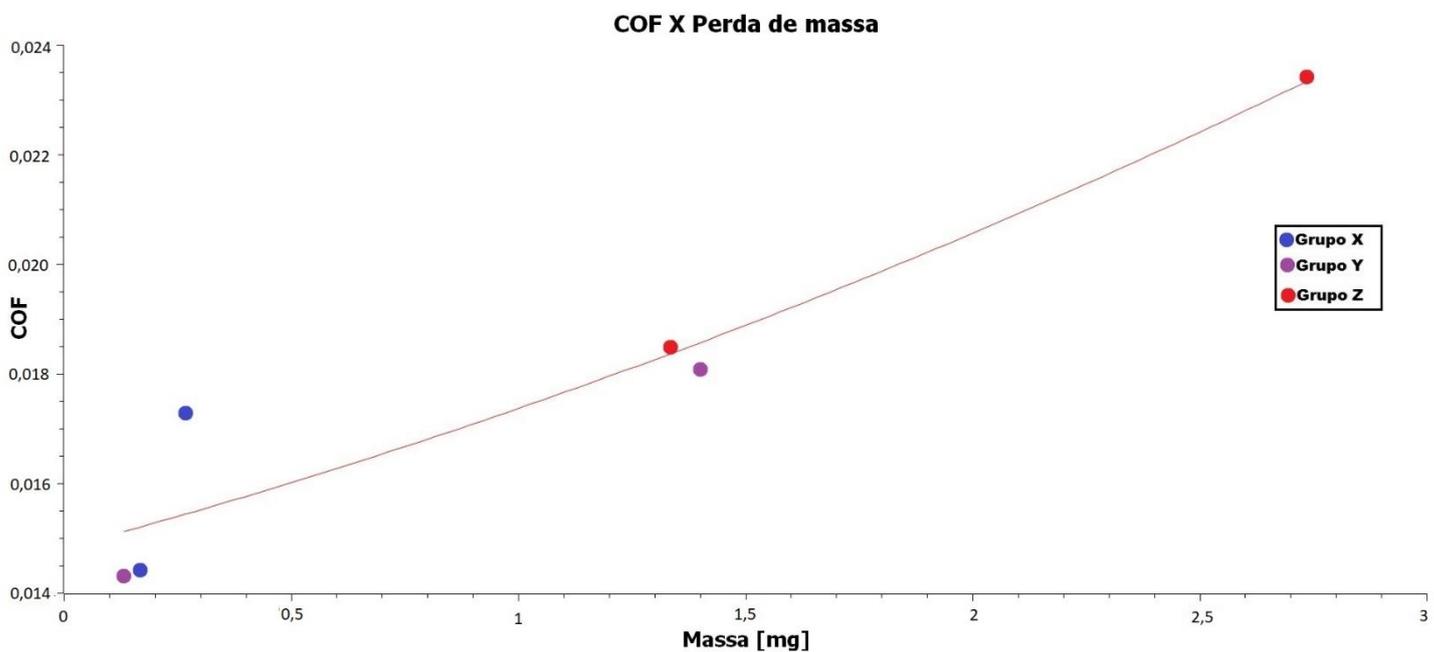


Figura 41: Coeficiente de atrito (COF) pela perda de massa dos discos.



Fonte: autores.

5 CONCLUSÃO

Os estudos realizados no presente trabalho se propuseram a mostrar a influência da variação de parâmetros que caracterizam uma superfície no coeficiente de atrito entre duas superfícies metálicas. A motivação para tal estudo deu-se a partir de que para casos específicos, como o deslizamento lubrificado de superfícies de trilho e roda ferroviária, não há relações bem estabelecidas para prever o reflexo no coeficiente de atrito quando há uma variação nesses parâmetros superficiais.

Sabe-se devido às características do seu sistema de rodagem, em situações de contorno de curvas fechadas, o esforço causado por esse sistema provoca severas tensões em faces da roda e trilho, onde há emprego de lubrificação por graxa. Buscou-se neste trabalho replicar estas condições na realização dos ensaios, no que concerne à geometria, lubrificação, velocidade e materiais empregados.

Com a análise dos dados obtidos concluiu-se primeiramente que, em todas as classes de parâmetros, foi possível observar um comportamento similar para diferentes parâmetros de uma mesma classe, como mostrado pelas figuras 32 e 33. Esta característica deve-se ao fato que muitos parâmetros são derivados uns dos outros, onde uma modificação da superfície causa o mesmo efeito geral em dois ou mais parâmetros, porém em intensidades diferentes. Este fato é bem observado em parâmetros de altura, por exemplo.

Após a análise dos gráficos dos parâmetros S_{pc} , S_z , S_{dq} , S_v e S_{dr} , em relação ao coeficiente de atrito com suas devidas curvas encontrou-se um comportamento muito similar ao comportamento do R_q no gráfico de Rabinowicz (figura 3), onde encontra-se uma redução no coeficiente de atrito quando os valores dos parâmetros se aproximam de valores médios, e uma elevação de seus valores conforme os parâmetros aumentam além dos valores médios.

Esta similaridade de resultados corrobora um padrão de influência dos parâmetros de rugosidade no coeficiente de atrito, pois para os testes realizados nesta pesquisa foram utilizados materiais e condições diferentes das utilizadas por Rabinowicz, sendo essas diferenças o uso de contato lubrificado ao invés de contato seco e o uso de aço perlítico no lugar de cobre, além de utilizar condições de velocidade, distância de deslizamento e carga próximas à aplicação real.

Quanto à aplicação prática desses conhecimentos no uso ferroviário, percebe-se que por mais que ocorra um padrão de alteração no coeficiente de atrito com a variação dos parâmetros de rugosidade, essas alterações não são significativas, o que significa que tentar reduzir o atrito entre materiais ferroviários por meio de acabamentos superficiais na roda e/ou trilho ferroviário seria um gasto desnecessário, visto que a possível redução de atrito gerada por esse tipo de ação seria mínima.

Como sugestão de trabalhos futuros, aconselha-se utilizar diferentes métodos de preparação das amostras de forma a variar outros parâmetros de rugosidade, visto a pequena diferença no coeficiente de atrito causada pelos parâmetros aqui apresentados. Sugere-se também a utilização de mais amostras para a realização dos ensaios, a fim de aumentar a confiabilidade do processo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT), **INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA**. Disponível em: < <http://www.antt.gov.br/ferrovias/index.html>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). **Manual of railway engineering and maintenance of way association**. Lanham: AREMA; 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Friction, Lubrication, and Wear Technology**. In: Metals Handbook, vol. 18, p 1879. 1992

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**. In: Metals Handbook, vol. 1, p 2521. 1990

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Surface engineering**. In: Metals Handbook, vol. 5, p 2535. 1994.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR), **Catalog of Publications**, Transportation Technology Center, USA, 2005.

BOWDEN, F. P., TABOR, D. **The friction and lubrication of solids, part 2**. Oxford University Press. 1964.

BUCKLEY, D.H. **Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication**. Elsevier. 1981.

BHUSHAN, B., **Introduction to Tribology**, 2 Ed, Tribology Series, Wiley, New York, 2013.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo, SP: E. Blücher, 2008. xx, 652 p.

Compilation of ASTM Standard Definitions, 5th ed., ASTM, 1982.

CZICHOS H. **Tribology; A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**, Elsevier, Amsterdam, 1978.

DEPARTAMENTO NACIONAL de INFRAESTRUTURA de TRANSPORTE (DNIT), **Histórico**. Disponível em: < <http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Acesso em: 01 nov. 2018.

FERRER, B. F., CAVALCANTI, L. B., COUSSEAU, T., ZUIN, A. **Performance evaluation of rail curve lubricant greases**. Apresentação equipe projeto cátedra, 2018.

GADELMAWLA, E.S. & Koura, M.M. & Maksoud, Talal & Elewa, Ibrahim & Soliman, Hassan. **Roughness parameters. Journal of Materials Processing Technology.** 123. 133-145, 2002.

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

KALOUSEK, J., MAGEL, E. **Modifying and managing friction, Railway and Track Structures,** 5, p. 5-6, 1999.

KEYENCE, **Texture Parameters.** Disponível em: <
<https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
 >. Acesso em: 01 nov. 2018.

KOURA, M. M., & OMAR, M. A. **The effect of surface parameters on friction.** Wear, 73(2), p. 235–246, 1981.

LEACH, R. **Assessing surfaces in sealing applications.** Springer, 2013.

LEWIS, R., OLOFSSON, U. **Wheel-rail interface handbook.** Woodhead, 2009. p 856.

MENEZES, P. L. et al. **Effect of roughness parameter and grinding angle on coefficient of friction when sliding of Al–Mg alloy over EN8 steel.** Journal of tribology, v. 128, n. 4, p. 697-704, 2006.

MENEZES, P. L. et al. **Influence of surface texture and roughness parameters on friction and transfer layer formation during sliding of aluminium pin on steel plate.** Wear, v. 267, n. 9-10, p. 1534-1549, 2009.

MENEZES, P. L., KISHORE, & KAILAS, S. V. **Influence of roughness parameters on coefficient of friction under lubricated conditions.** Sadhana, 33(3), p. 181–190, 2008.

MICHIGAN, **Texture Parameters.** Disponível em: <
https://www.michmet.com/texture_parameters_index_by_name.html
 >. Acesso em: 01 nov. 2018.

MORTON, R. T. H. **Topography of Surfaces.** Em ASM Metals Handbook, vol. 5. Surface Engineering. ASM International, p 2535. 1994.

OLOFSSON, U. TELLISKIVI, T. **Wear, plastic deformation and friction of two rail steels: a full-scale test and a laboratory study.** Wear. 2003.

PULLEN, J.; WILLIAMSON, J. B. P. **On the plastic contact of rough surfaces.** Proc. Roy. Soc., London. Series A, Vol 327, 1972, p 159-173.

RABINOWICZ, E., **Friction and Wear of Material,** 2 Ed, Wiley, New York, 1995.

RUSNAK. **Friction material testing,** society of Automotive Engineers, 1970.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. **Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces**. *Tribology international*, v. 48, p. 102-112, 2012.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. **Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear**. *Wear*, v. 266, p. 482-487, 2009.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 3rd ed. Amsterdam, HO; Boston, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

STOLARSKI, T. A. **Tribology in machine design**. Oxford: Butterworth Heinemann, 1990. xii, 298 p.

TAYLOR HOBSON BRASIL. **Produtos**. Disponível em: <http://www.taylorhobson.com.br/index.php/c_home/produtos/1/5/147>. Acesso em: 03 nov. 2018.

TAYLOR HOBSON. **The Parameter Tree of Roughness Surface**, apresentação dos parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento, 2000.

TELLISKIVI T., OLOFSSON U., 2001, **Contact mechanics analysis of measured wheel-rail profiles using the finite element method**, *IMEchE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 215, 65-72.

TOURNAY, H. **Supporting technologies vehicle track interaction, in Guidelines to Best Practice for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues**, International Heavy Haul Association, Virginia Beach, VA, USA, 2-1-2.73, 2001.

WHITEHOUSE, D. **Handbook of surface and nanometrology**. CRC Press, 2011.

WHITEHOUSE, D. **Surfaces and Their Measurement**. Kogan Page Science, 2002.

WIELEBA, W. **The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness**. *Wear* 252 (9–10): p. 719–729, 2002.

APÊNDICE

Figura 42: Caracterização dos discos após ensaio.

ISO 25178									
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2	Z3
Parâmetros de altura									
Sq [μm]	1,20E+00	5,51E-01	1,06E+00	1,7910325	1,38825	2,61E+00	2,82E-01	3,03E-01	2,91E-01
Ssk	-1,18E-01	-8,79E-01	-3,54E-01	6,29E-01	7,12E-01	2,26E-01	-1,74E+00	-8,92E-01	-1,05E+00
Sku	2,30E+00	6,64E+00	4,17E+00	2,62E+00	2,60E+00	1,75E+00	1,22E+01	6,10E+00	8,13E+00
Sp [μm]	3,79E+00	2,44E+00	4,54E+00	8,47E+00	4,87E+00	6,52E+00	2,86E+00	1,90E+00	2,57E+00
Sv [μm]	4,69E+00	5,40E+00	4,95E+00	4,70E+00	3,44E+00	6,32E+00	3,11E+00	3,00E+00	3,16E+00
Sz [μm]	8,48E+00	7,84E+00	9,49E+00	1,32E+01	8,31E+00	1,28E+01	5,97E+00	4,90E+00	5,74E+00
Sa [μm]	1,02E+00	4,13E-01	8,75E-01	1,49E+00	1,16E+00	2,31E+00	1,85E-01	2,26E-01	2,07E-01
Parâmetros funcionais									
Smr [%]	5,66E-02	1,82E-01	8,10E-02	1,21E-01	1,62E-01	8,57E-02	1,12E-01	2,52E-01	1,96E-01
Smc [μm]	1,61E+00	6,26E-01	1,28E+00	2,64E+00	2,11E+00	3,65E+00	2,57E-01	3,14E-01	2,83E-01
Sxp [μm]	2,16E+00	1,35E+00	2,20E+00	2,17E+00	1,50E+00	3,49E+00	7,80E-01	7,43E-01	7,63E-01
Parâmetros espaciais									
Sal [mm]	3,93E-02	2,31E-02	3,83E-02	4,15E-02	3,91E-02	4,43E-02	6,49E-03	5,62E-03	4,75E-03
Str	9,86E-02	1,04E-01	1,02E-01	1,04E-01	9,83E-02	1,11E-01	2,31E-02	1,77E-02	1,71E-02
Std [°]	9,26E+01	8,36E+01	8,96E+01	9,04E+01	9,06E+01	8,88E+01	9,34E+01	9,32E+01	8,71E+01
Parâmetros híbridos									
Sdq	3,34E-01	3,34E-01	3,37E-01	3,69E-01	3,25E-01	5,13E-01	2,46E-01	2,72E-01	2,66E-01
Sdr [%]	5,04E+00	5,11E+00	5,11E+00	6,21E+00	4,86E+00	1,11E+01	2,88E+00	3,43E+00	3,28E+00
Parâmetros funcionais volumétricos									
m [mm^3/mm^2]	2,94E-05	2,08E-05	2,93E-05	8,67E-05	6,58E-05	5,42E-05	1,29E-05	1,36E-05	1,34E-05
v [mm^3/mm^2]	1,64E-03	6,47E-04	1,31E-03	2,73E-03	2,18E-03	3,71E-03	2,70E-04	3,28E-04	2,96E-04
mp [mm^3/mm^2]	2,94E-05	2,08E-05	2,93E-05	8,67E-05	6,58E-05	5,42E-05	1,29E-05	1,36E-05	1,34E-05
mc [mm^3/mm^2]	1,20E-03	4,43E-04	1,02E-03	1,63E-03	1,20E-03	2,67E-03	1,74E-04	2,46E-04	2,10E-04
vc [mm^3/mm^2]	1,53E-03	5,61E-04	1,19E-03	2,64E-03	2,10E-03	3,57E-03	2,17E-04	2,79E-04	2,44E-04
vv [mm^3/mm^2]	1,08E-04	8,60E-05	1,19E-04	9,36E-05	7,48E-05	1,40E-04	5,30E-05	4,94E-05	5,19E-05
Parâmetros de recursos									
Spd [1/ mm^2]	4,80E+03	6,10E+03	4,35E+03	3,00E+03	4,66E+03	2,85E+03	6,45E+03	7,97E+03	6,46E+03
Spc [1/mm]	1,56E+03	1,42E+03	1,67E+03	1,88E+03	1,56E+03	2,13E+03	1,19E+03	1,20E+03	1,16E+03
S10z [μm]	3,77E+00	4,14E+00	5,02E+00	4,26E+00	3,02E+00	5,40E+00	3,18E+00	3,13E+00	3,33E+00
S5p [μm]	1,76E+00	1,65E+00	2,57E+00	2,58E+00	1,51E+00	2,82E+00	1,67E+00	1,45E+00	1,64E+00
S5v [μm]	2,01E+00	2,49E+00	2,45E+00	1,68E+00	1,50E+00	2,59E+00	1,52E+00	1,68E+00	1,68E+00
Das [mm^2]	1,81E-04	1,50E-04	2,05E-04	6,21E-04	1,91E-04	3,45E-04	1,67E-04	1,11E-04	1,46E-04
Sha [mm^2]	1,96E-04	1,55E-04	2,19E-04	3,95E-04	1,76E-04	2,84E-04	1,92E-04	1,23E-04	1,57E-04
Sdv [mm^3]	4,44E-09	5,04E-09	5,25E-09	2,01E-08	4,86E-09	1,16E-08	4,77E-09	2,99E-09	4,26E-09
Shv [mm^3]	4,29E-09	4,66E-09	5,37E-09	1,55E-08	4,18E-09	1,03E-08	5,48E-09	3,07E-09	4,48E-09

Figura 43: Caracterização dos pinos após ensaio.

ISO 251278									
	Pino X1	Pino X2	Pino X3	Pino Y1	Pino Y2	Pino Y3	Pino Z1	Pino Z2	Pino Z3
Parâmetros de altura									
Sq [µm]	2,99E+00	1,25E+00	1,65E+00	3,62575	2,28725	2,94E+00	2,74E+00	1,51E+00	1,23E+00
Ssk	-6,88E-01	-9,61E-01	-7,64E-01	-1,04E+00	-8,69E-01	-8,70E-01	-4,61E-01	-9,53E-01	-1,26E+00
Sku	4,78E+00	6,78E+00	4,36E+00	3,71E+00	4,28E+00	4,57E+00	3,81E+00	4,41E+00	5,88E+00
Sp [µm]	8,54E+00	5,50E+00	6,39E+00	6,70E+00	5,50E+00	6,72E+00	8,44E+00	4,22E+00	4,45E+00
Sv [µm]	1,68E+01	7,57E+00	8,41E+00	1,36E+01	1,01E+01	1,31E+01	1,04E+01	7,38E+00	6,88E+00
Sz [µm]	2,54E+01	1,31E+01	1,48E+01	2,03E+01	1,56E+01	1,98E+01	1,88E+01	1,16E+01	1,13E+01
Sa [µm]	2,31E+00	9,67E-01	1,28E+00	2,76E+00	1,77E+00	2,33E+00	2,14E+00	1,17E+00	9,30E-01
Parâmetros funcionais									
Smr [%]	9,00E-01	1,02E-02	4,71E-02	1,26E+00	7,71E-01	1,84E+00	1,22E-01	2,68E+00	3,99E+00
Smc [µm]	3,23E+00	1,54E+00	1,90E+00	3,54E+00	2,55E+00	3,16E+00	3,23E+00	1,65E+00	1,30E+00
Sxp [µm]	6,58E+00	2,78E+00	4,03E+00	1,01E+01	5,97E+00	7,24E+00	6,50E+00	3,89E+00	3,33E+00
Parâmetros espaciais									
Sal [mm]	4,62E-02	4,53E-02	2,71E-02	4,90E-02	3,69E-02	2,97E-02	3,35E-02	2,36E-02	2,21E-02
Str	1,14E-01	1,82E-01	7,45E-02	1,22E-01	7,83E-02	7,28E-02	9,08E-02	5,80E-02	1,06E-01
Std [°]	1,58E+01	1,05E+02	7,01E+01	9,00E+01	4,29E+01	6,48E+01	8,48E+01	1,32E+01	2,93E+01
Parâmetros híbridos									
Sdq	4,53E-01	3,27E-01	3,87E-01	3,79E-01	3,86E-01	4,21E-01	4,04E-01	3,69E-01	3,26E-01
Sdr [%]	8,91E+00	5,02E+00	6,81E+00	6,13E+00	7,27E+00	8,03E+00	7,04E+00	6,17E+00	5,24E+00
Parâmetros funcionais volumétricos									
/m [mm³/mm²]	1,39E-04	4,28E-05	5,77E-05	8,00E-05	6,99E-05	9,24E-05	1,03E-04	4,42E-05	3,70E-05
/v [mm³/mm²]	3,37E-03	1,58E-03	1,96E-03	3,62E-03	2,62E-03	3,25E-03	3,34E-03	1,69E-03	1,34E-03
mp [mm³/mm]	1,39E-04	4,28E-05	5,77E-05	8,00E-05	6,99E-05	9,24E-05	1,03E-04	4,42E-05	3,70E-05
mc [mm³/mm]	2,73E-03	1,06E-03	1,44E-03	2,78E-03	1,99E-03	2,73E-03	2,32E-03	1,33E-03	9,98E-04
vc [mm³/mm]	2,97E-03	1,41E-03	1,71E-03	2,84E-03	2,26E-03	2,83E-03	2,94E-03	1,45E-03	1,11E-03
vv [mm³/mm]	3,96E-04	1,72E-04	2,47E-04	7,86E-04	3,61E-04	4,24E-04	3,91E-04	2,45E-04	2,21E-04
Parâmetros de recursos									
Spd [1/mm²]	1,44E+02	5,46E+02	3,82E+02	1,89E+02	2,45E+02	1,60E+02	1,77E+02	7,76E+02	8,81E+02
Spc [1/mm]	6,29E+02	5,97E+02	5,24E+02	6,91E+02	5,62E+02	5,57E+02	5,61E+02	5,39E+02	4,81E+02
S10z [µm]	8,61E+00	6,93E+00	7,39E+00	8,34E+00	6,71E+00	8,42E+00	6,04E+00	5,62E+00	5,62E+00
S5p [µm]	4,26E+00	3,25E+00	3,95E+00	3,47E+00	2,97E+00	4,36E+00	2,44E+00	2,42E+00	2,60E+00
S5v [µm]	4,35E+00	3,68E+00	3,44E+00	4,87E+00	3,74E+00	4,06E+00	3,60E+00	3,20E+00	3,01E+00
Das [mm²]	3,16E-03	8,75E-04	1,81E-03	3,17E-03	1,98E-03	2,90E-03	2,17E-03	1,04E-03	9,31E-04
Sha [mm²]	3,13E-03	1,46E-03	1,79E-03	1,44E-03	1,35E-03	2,17E-03	2,35E-03	9,98E-04	1,04E-03
Sdv [mm³]	3,10E-07	4,51E-08	1,39E-07	3,24E-07	9,81E-08	2,80E-07	1,81E-07	4,72E-08	4,00E-08
Shv [mm³]	3,58E-07	7,85E-08	1,83E-07	7,81E-08	1,12E-07	2,02E-07	1,64E-07	5,99E-08	8,97E-08

ANEXO A

Parâmetros de rugosidade média e raiz quadrada da rugosidade média

Entre os muitos parâmetros de rugosidade existentes, os mais comumente usados são os parâmetros de rugosidade média e raiz quadrada da rugosidade média, R_a e R_q . Sendo definidos pelo desvio médio aritmético da altura da linha média traçada através do perfil e no caso do R_q o valor é elevado ao quadro e calculado a sua raiz quadrada (HUTCHINGS, 2017). Eles têm sua definição dada por:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (4)$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |z(x)|^2 dx} \quad (5)$$

Onde Z é altura da superfície acima da linha média em uma distância x da origem, e L é o comprimento total do perfil considerado. Estes parâmetros podem também ser avaliados em função de x e y, sendo assim considerados como parâmetros tridimensionais, dessa forma suas equações são representadas como:

$$Sa = \int_a \int_a |z(x, y)| dx dy \quad (6)$$

$$Sq = \sqrt{\int_a \int_a (Z(x, y))^2 dx dy} \quad (7)$$

Apesar destes serem os parâmetros mais comumente utilizados para descrever a rugosidade de uma superfície, utilizando apenas um parâmetro muita informação importante será perdida. No caso destes não se tem informações como as irregularidades da superfície, probabilidade de encontrar certas alturas, o formato de vales e seus espaçamentos (HUTCHINGS, 2017).

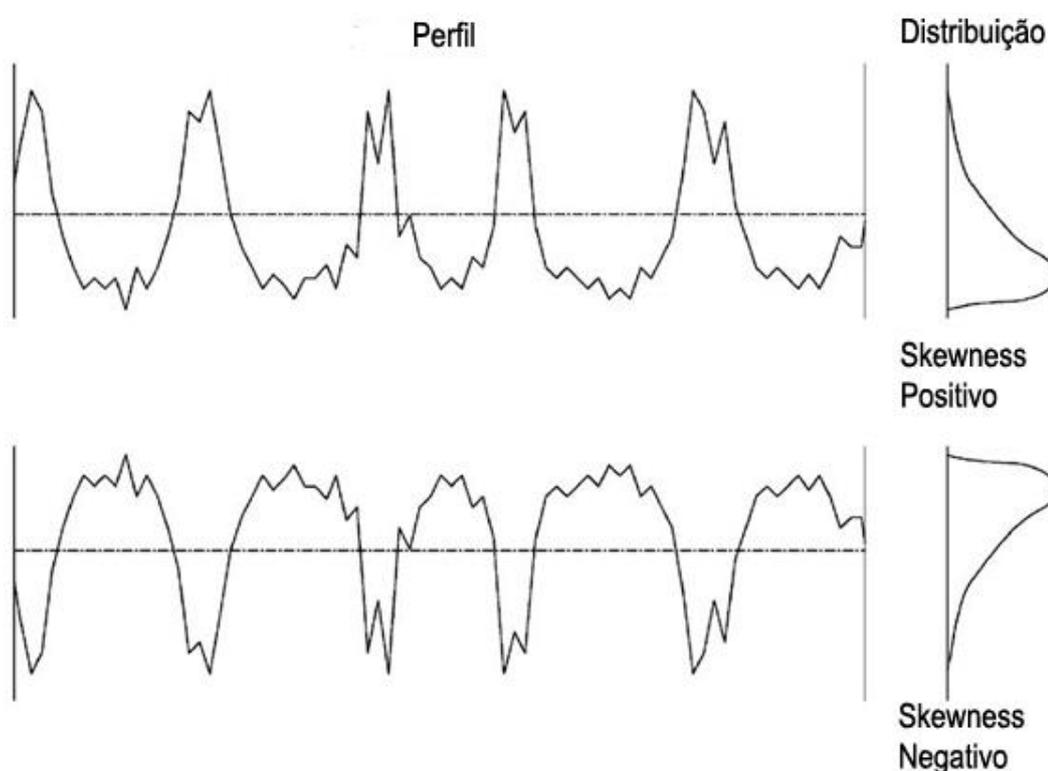
Parâmetros de rugosidade de Skewness e o Kurtosis

Utilizando apenas o R_a comportamentos tribológicos não podem ser previstos, portanto outros dois parâmetros podem ser utilizados por apresentarem uma boa

correlação das propriedades tribológicas de superfícies de contato, sendo esses os de Skewness e o Kurtosis (SEDLAČEK, 2012). O parâmetro Skewness, R_{Sk} , é o terceiro momento central da probabilidade de amplitude do perfil, este pode ser calculado pela equação 8, na qual R_q é a raiz quadrada média de R_a . Na Figura 44 tem-se a representação de R_{Sk} negativos e positivos (GADELMAWLA, 2002).

$$R_{Sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} y^3 p(y) dy \quad (8)$$

Figura 44: Definição do parâmetro R_{Sk} .

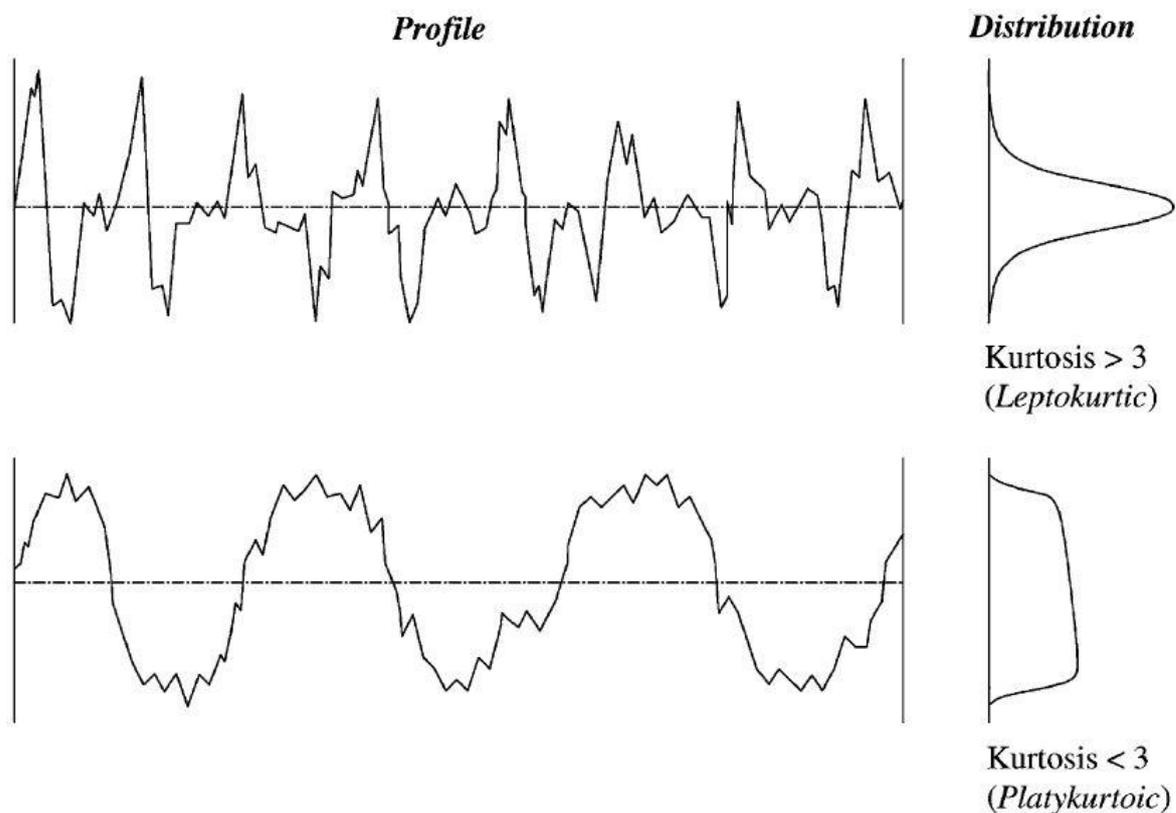


Fonte: adaptado de Gadelmawla, 2002.

O parâmetro chamado de Kurtosis, R_{ku} , define-se pelo valor do quarto momento central de amplitude do perfil, este descreve a agudez da densidade provável do perfil. Podendo ser calculado pela equação 9, e na figura 45 tem-se a representação de R_{ku} onde está representado as situações de para valores menores ou maiores que 3. Para valores menores que 3 tem-se uma distribuição platicúrtica, que possui poucos vales e picos, enquanto para valores maiores que 3 temos uma distribuição leptocúrtica, que possui relativamente muitos vales e picos (GADELMAWLA, 2002).

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy \quad (9)$$

Figura 45: Definição do parâmetro R_{ku} .



Fonte: adaptado de Gadelmawla, 2002.

Assim como a rugosidade média, estes parâmetros podem ser avaliados em três dimensões, integrando em x e y . Suas equações para este cenário se tornam:

$$S_{ku} = \frac{1}{s_q^4} \int_a \int_a (Z(x, y))^4 dx dy \quad (10)$$

$$S_{ku} = \frac{1}{s_q^3} \int_a \int_a (Z(x, y))^3 dx dy \quad (11)$$

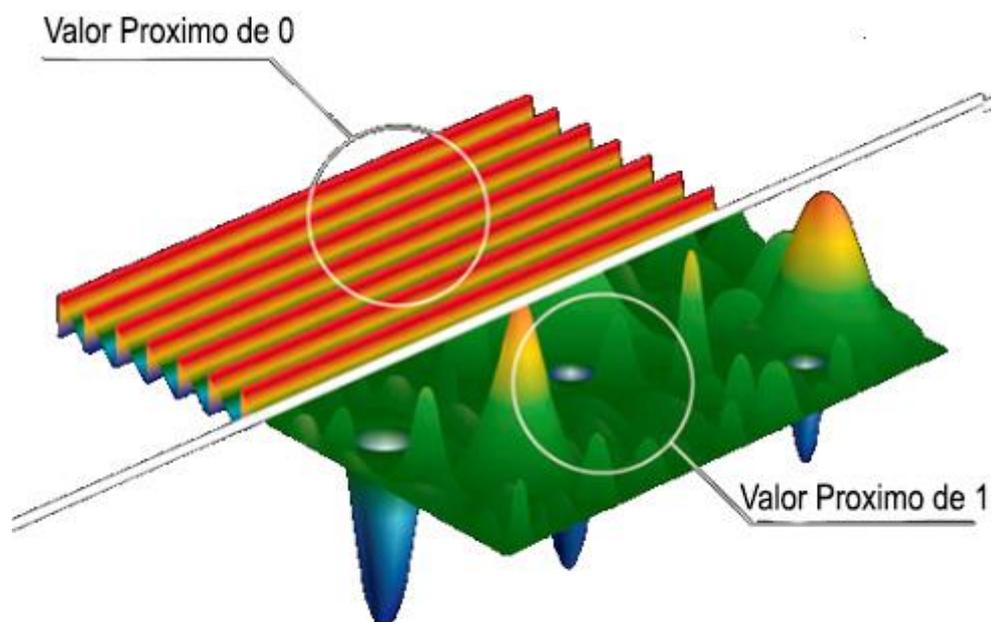
Parâmetros de autocorrelação de comprimento

Autocorreção de comprimento, S_{al} , este parâmetro é a medida mais curta da distância sobre a superfície na qual a função de autocorrelação reduz para uma determinada fração, usualmente de 10%. Tal parâmetro é uma medida quantitativa para medir a distância ao longo da superfície onde encontra-se uma textura diferente da localização original, sendo útil para estabelecer a distância entre as medidas realizadas na superfície (GADELMAWLA, 2002).

Parâmetros de Razão de Aspecto da Textura

A razão de aspecto da textura, S_{tr} , é o parâmetro para medir a uniformidade da textura da superfície. O valor deste parâmetro é obtido pela divisão da distância horizontal na direção na qual a autocorrelação diminui. O S_{tr} é útil para determinar a presença de depósitos. Na Figura 46 vemos uma representação dos valores de S_{tr} (MICHIGAN, 2018).

Figura 46: Exemplificação do parâmetro S_{tr} .

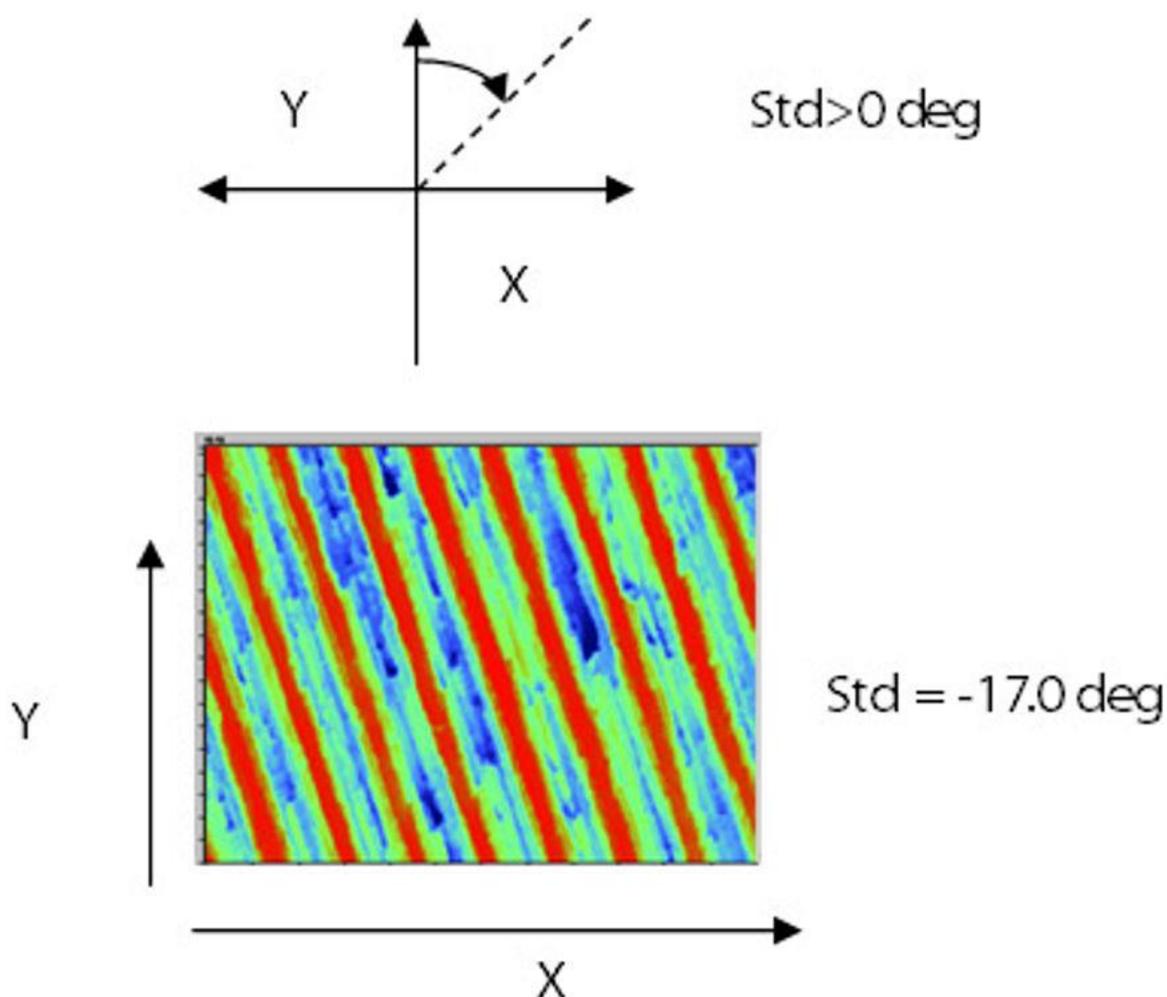


Fonte: adaptado de Keyence, 2018.

Parâmetro direção da textura

A direção da textura, S_{td} , é definida pela direção majoritária onde a função de densidade espectral de potência angular é maior. Este parâmetro possui a utilidade de apresentar a direção dos depósitos na textura da superfície. Na Figura 47 temos uma representação de tal parâmetro (MICHIGAN, 2018):

Figura 47: Exemplificação do parâmetro S_{td} .



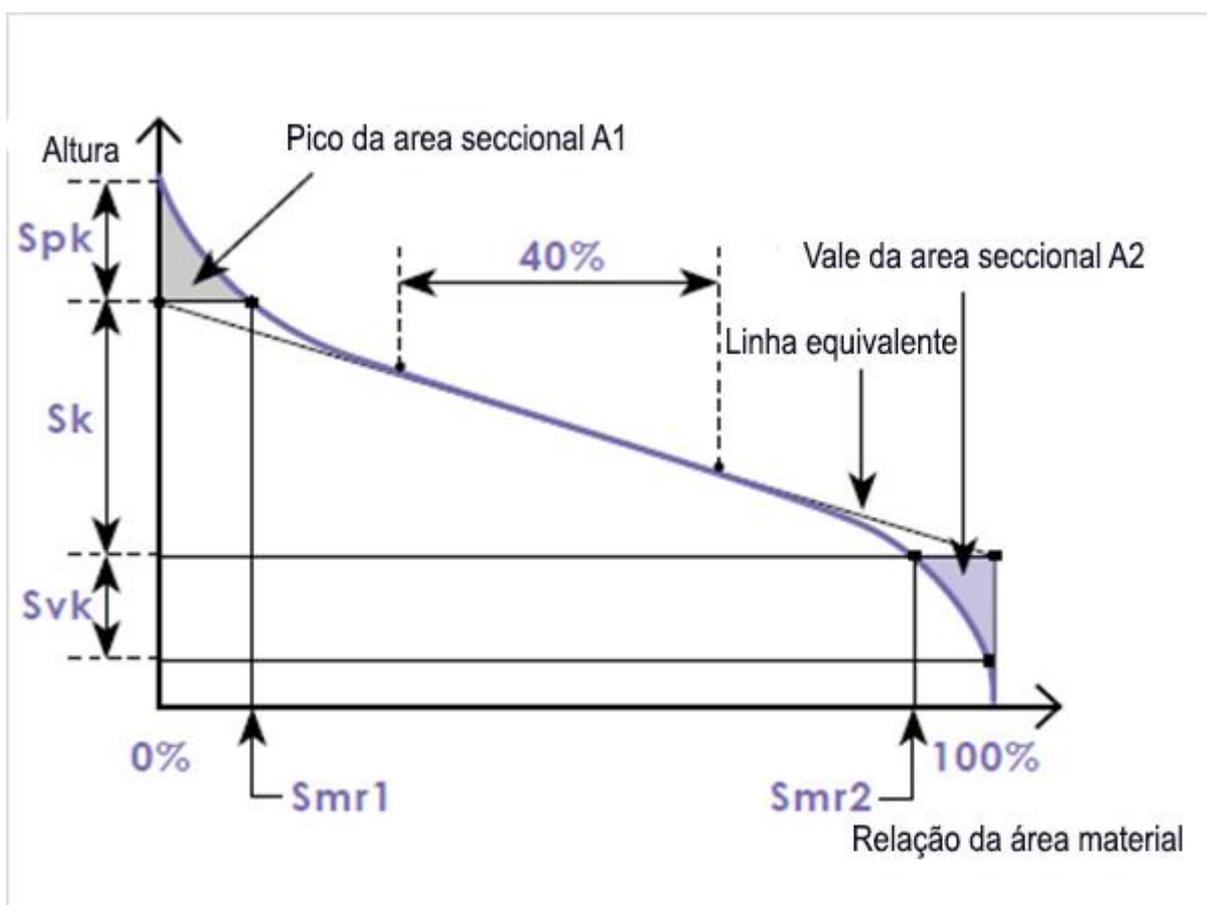
Fonte: adaptado de Michigan, 2018.

Parâmetros da curva de relação material da área

A partir da curva de relação material da área obtida na ISO 13565-2:1996 é possível obter alguns parâmetros, sendo eles o de altura do pico reduzido, S_{pk} , o qual se mede a altura dos picos acima do núcleo da rugosidade, a profundidade dos vales do núcleo da rugosidade, S_k , representando a diferença entre as alturas na linha equivalente de 0% a 100%, o parâmetro de profundidade dos vales reduzidos, S_{vk} ,

similar ao S_{pk} , mas no lugar da altura dos picos têm-se o tamanho dos vales, o parâmetro de porção de material no pico, Sm_{r1} , o qual indica a porcentagem de material que constitui o pico e o parâmetro de porção de material no vale, Sm_{r2} , que indica a porcentagem de material que constitui no vale. Na Figura 48 temos a representação de tais parâmetros (LEACH, 2013).

Figura 48: Exemplificação do parâmetro S_{pk} , S_k , S_{vk} , Sm_{r1} , Sm_{r2} .



Fonte: adaptado de Keyence, 2018.

Um grande valor de S_{pk} implica maior número de áreas de contato, pois um valor alto indica uma superfície com picos altos, sendo assim um parâmetro útil na percepção da quantidade nominal de material que poderá ser removido da superfície durante o uso, o Sm_{r1} terá utilidade similar, representando essa quantidade de material removido em porcentagem. S_k este parâmetro possui a utilidade de representar a superfície na qual uma carga será aplicada durante o uso. O S_{vk} possui

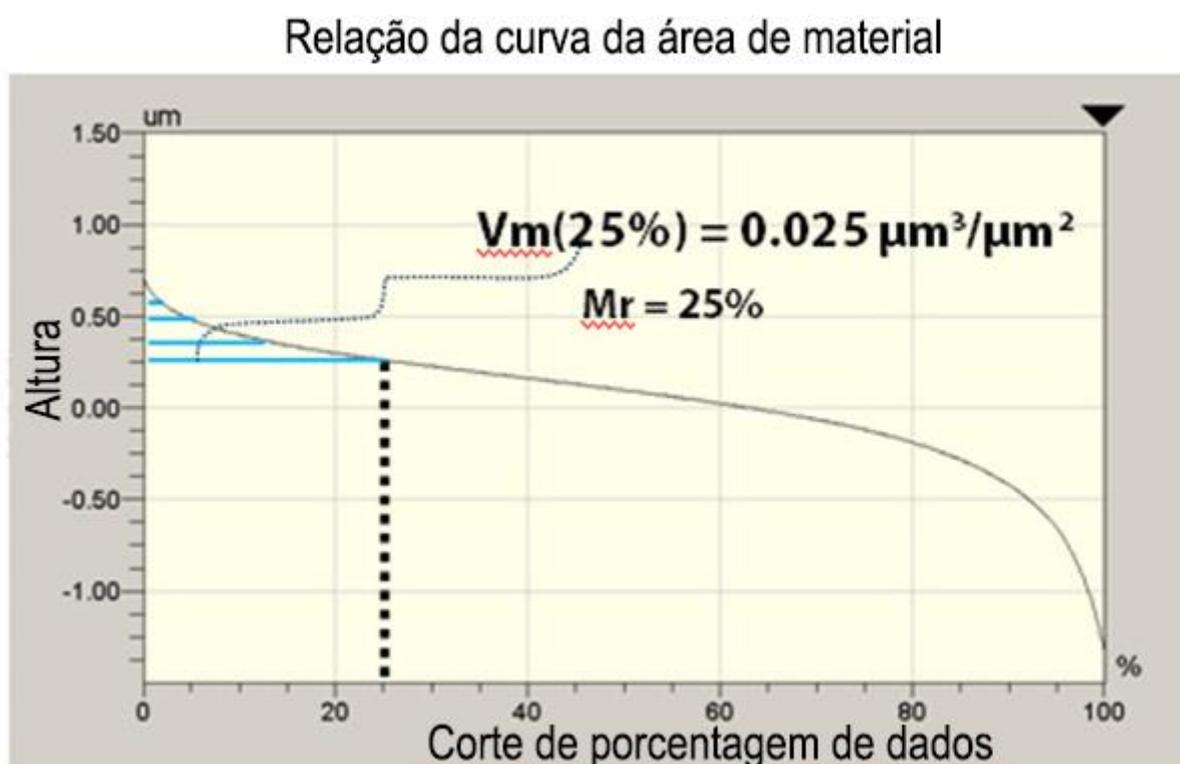
uma grande relevância na área de lubrificação, pois este vai representar a quantidade de lubrificante que poderá ficar retida nos vales (MICHIGAN, 2018).

O parâmetro S_{m_c} por sua vez representa a altura do perfil correspondente a uma razão de material, sendo assim chamado de Razão inversa de área de material.

Parâmetros de volume de material

Os parâmetros de volume de material são V_m , V_{mp} e V_{mc} . O volume de material, V_m , representa o volume de material acima da altura de “ m_r ”, com “ m_r ” variando de 0% a 100% (LEACH, 2013). A Figura 49 exemplifica este parâmetro:

Figura 49: Exemplificação do parâmetro V_m

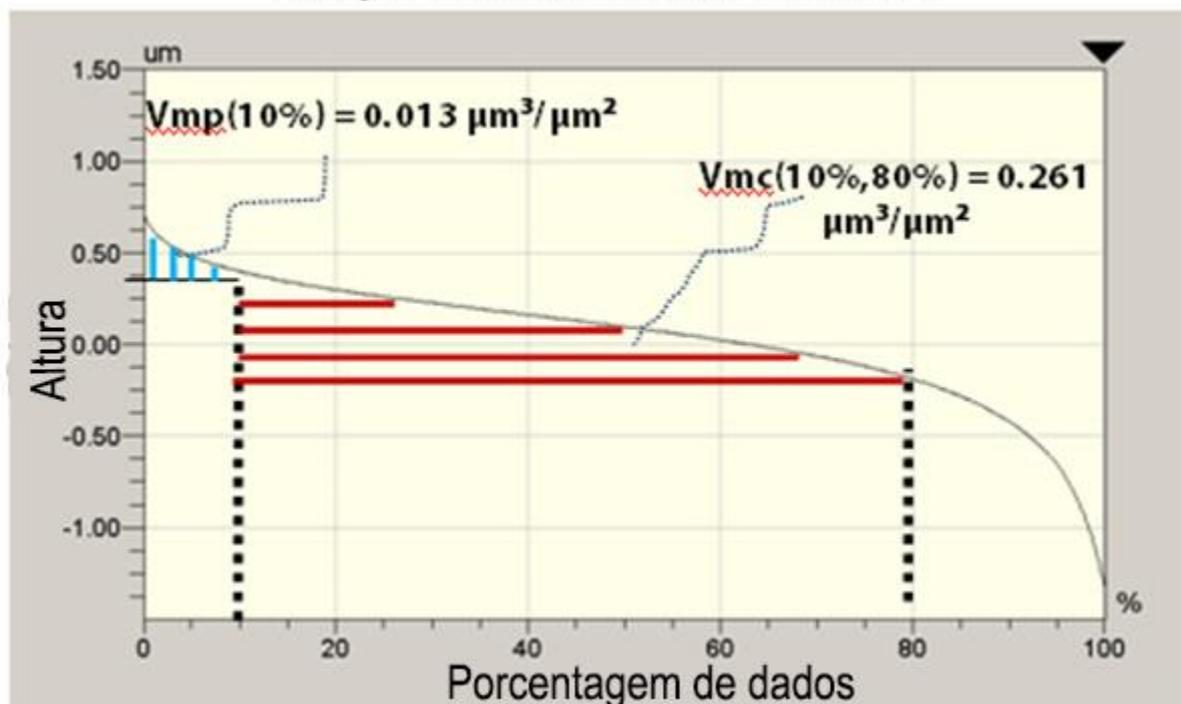


Fonte: adaptado de Michigan, 2018.

O volume de material de pico, V_{mp} , representa o volume de material em uma razão do pico. O volume de material do núcleo, V_{mc} , representa o volume de material entre duas razões, que normalmente são estabelecidas em 10% e 80%. A Figura 50 exemplifica ambos parâmetros (LEACH, 2013):

Figura 50: Exemplificação dos parâmetros V_{mp} e V_{mc} .

Relação da curva da área de material



Fonte: adaptado de Michigan, 2018.

Estes parâmetros são úteis para avaliar o volume de material que pode ser desgastado para uma certa profundidade de uso, assim como a quantidade de material que pode suportar uma carga (LEACH, 2013).

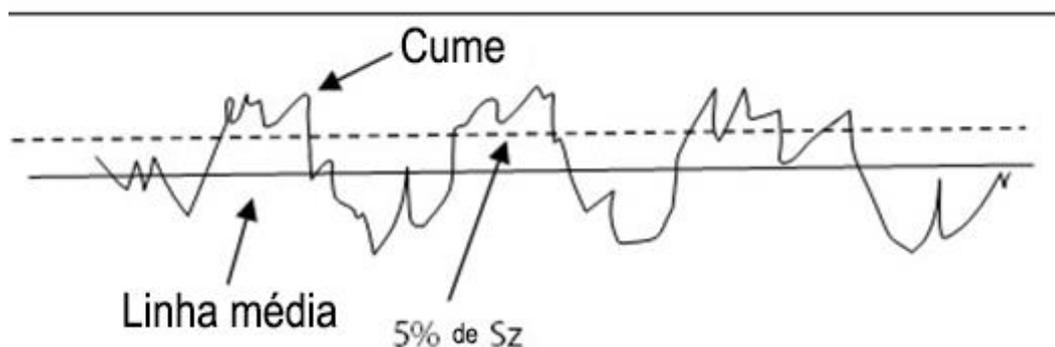
Parâmetro de densidade do cume

Parâmetro de densidade do cume, S_{ds} , é o número de cumes por unidade de área da superfície, onde cumes são derivados de picos, os cumes são encontrados apenas acima de 5% do valor da altura da superfície, S_z como é mostrado na Figura 51 (MICHIGAN, 2018).

Este parâmetro é definido pela equação 12, e possui relação com a forma de deformação que irá ocorrer na superfície, assim como também está relacionado com a aparência final após um trabalho de pintura (MICHIGAN, 2018).

$$S_{ds} = \frac{\text{Número de picos}}{\text{Área}} \quad (12)$$

Figura 51: Exemplificação do parâmetro S_{ds} .

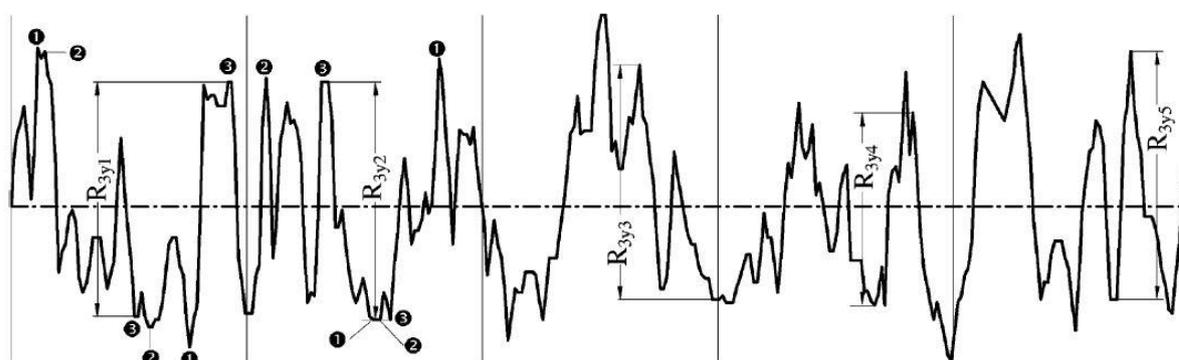


Fonte: adaptado de Michigan, 2018.

Parâmetro da média do terceiro ponto de altura

Analisando o desgaste de material em testes com lubrificação, os parâmetros relacionados à altura, como a média da altura dos picos S_p e a altura de pico reduzida S_{pk} , possuem a maior influência. Para termos mais universais, levando em conta tanto o desgaste quanto o coeficiente de atrito, têm-se o parâmetro R_{3z} , que empregado em funções de regressão, consegue apresentar relações diretas com ambos os casos (WIELEBA, 2002). O parâmetro R_{3z} é denominado como média do terceiro ponto de altura, sendo a média aritmética dos cinco terceiros picos, como mostrado na Figura 52 (GADELMAWLA, 2002):

Figura 52: Definição do parâmetro R_{3z} .



Fonte: Gadelmawla, 2002.

Apesar deste parâmetro ter sido avaliado como importante no passado, este perdeu sua relevância com a disseminação da utilização de parâmetros

tridimensionais, com isso este é um parâmetro que não está mais presente em estudos realizados na última década.

Parâmetro altura do décimo ponto

De forma similar ao parâmetro $R3_z$, os parâmetros $S5_p$, $S5_v$ e $S10_z$ buscam qualificar a altura da textura, fazendo uma média das alturas máximas de pico e vale locais, em pequenos segmentos (usualmente 5 segmentos amostrais), sendo um parâmetro mais robusto em relação ao S_z (LEACH, 2013). Por definição o parâmetro $S10_z$ é dado pela equação 13:

$$S10_z = S5_p + |S5_v| \quad (13)$$

Onde $S5_p$ é a média aritmética dos cinco picos significantes mais altos e $S5_v$ é a média aritmética dos 5 vales significativos mais baixos.

Parâmetro densidade de picos

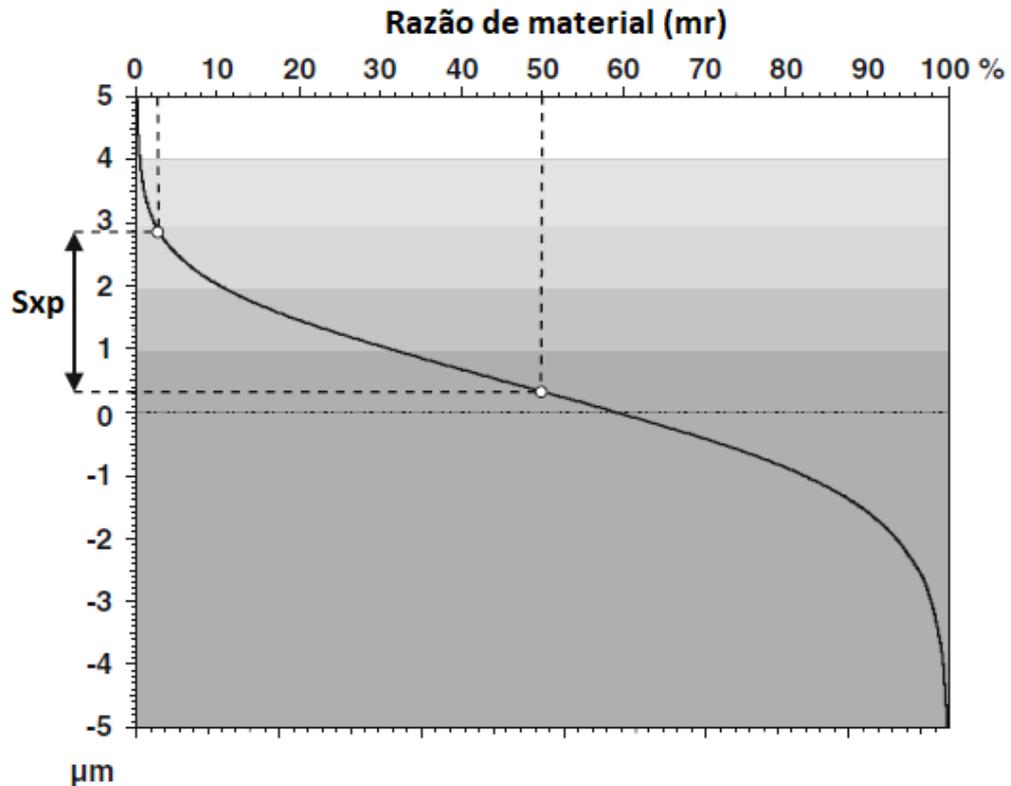
O parâmetro S_{pd} descreve a quantidade picos encontrados por unidade de área, sendo utilizado em conjunto com outros parâmetros de altura para descrever superfícies que têm o contato como uma de suas características funcionais.

Parâmetro Altura Extrema de Pico

O parâmetro S_{xp} caracteriza a altura entre duas razões de material convencionalmente definidas em mr1 2,5% e mr2 50%, resultando na altura entre o plano médio e os picos da superfície, desconsiderando as porções mais altas. É comumente utilizado para medir a altura “pico-a-vale” restante até a superfície média após uma deformação. Pode ser usado também para avaliar o desgaste da superfície entre duas razões de material, quando manipulados os valores de mr1 e mr2.

O parâmetro S_{xp} pode ser visualizado através da curva de razão de material, conforme mostrado na Figura 53.

Figura 53: Parâmetro S_{xp} mostrado na curva de razão de material, para mr_1 2,5% e mr_2 50%.



Fonte: adaptado de Leach, 2013.

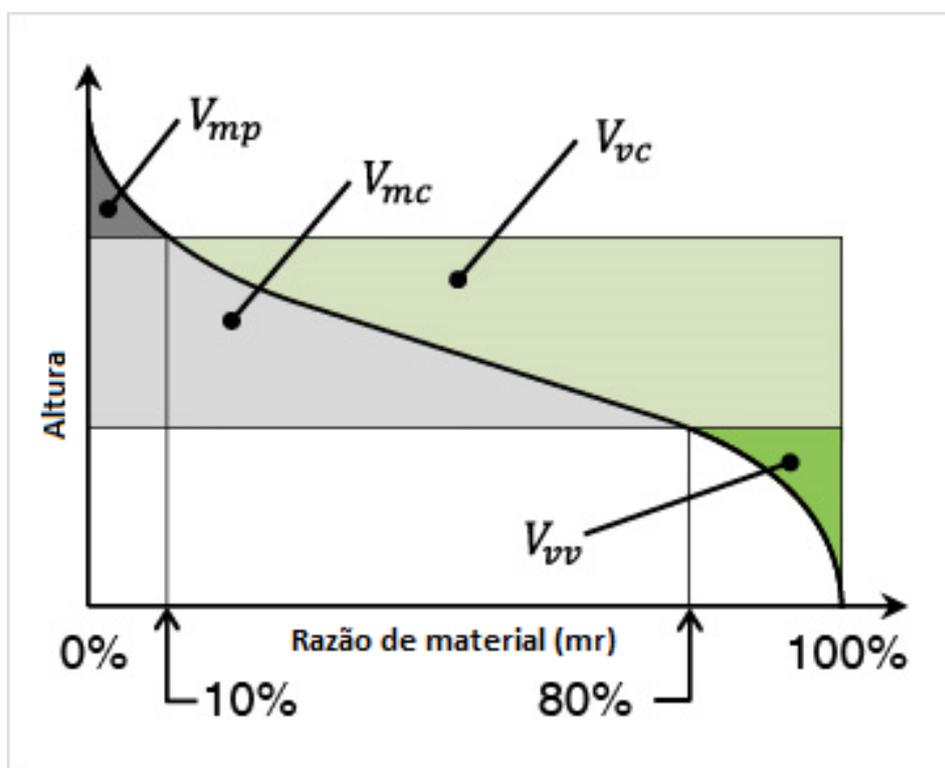
Parâmetros de Volume

O parâmetro V_{vc} (volume de vazio do núcleo) representa o volume de espaço vazio compreendido entre duas razões de material (mr), geralmente de 10% a 80%. O valor de V_{vc} é obtido através da equação 14, a partir dos valores do parâmetro $V_v(mr)$, que é o volume de vazio em uma determinada razão de material (mr):

$$V_{vc} = V_v(mr_1) - V_v(mr_2) \quad (14)$$

Este parâmetro se mostra útil para representar o quanto de volume de lubrificante, por exemplo, pode ser compreendido entre duas alturas de uma superfície, abrangendo desde uma porção dos vales (mr 80%) até quase o topo dos picos (mr 10%). A Figura 54 exemplifica o parâmetro V_{vc} na curva de razão de material, com cortes de 10% a 80% da altura da textura.

Figura 54: Exemplificação dos parâmetros de volume V_{vc} , V_{vv} , V_{mc} e V_{mp} na curva de razão de material.



Fonte: adaptado de Keyence, 2018.

De forma análoga a V_{vc} , o parâmetro V_{mc} (volume de material do núcleo) representa o volume de material compreendido entre duas razões de material (usualmente 10% e 80%).

De forma análoga a V_v , o parâmetro $V_m(mr)$ representa o volume de material em uma determinada razão de material, sendo zero quando $mr = 0\%$ e máximo quando $mr = 100\%$.

Já o parâmetro V_{mp} , volume de material do pico, representa o volume de material existente para um corte de 0% a 10% de razão de material, que representa apenas os picos da textura, caracterizando o volume de material mais provável de ser removido por desgaste. De forma similar, o parâmetro V_{vv} (volume de vazio dos vales) caracteriza o volume das porções mais baixas da superfície, usualmente como corte de razões de material entre 80% e 100%, buscando por exemplo representar o volume provável ocupado na retenção de fluidos (LEACH, 2013).

Outros parâmetros para a análise do coeficiente de atrito

Para a análise do coeficiente de atrito, dois parâmetros têm maior influência na variação, a altura dos picos e o comprimento médio de onda. Contudo ambos os parâmetros são correlacionados dentro de um mesmo parâmetro, a inclinação média do perfil, Δ_a (KOURA, 1981). Segundo Menezes (2008) em seus testes de pino-disco utilizando ligas de alumínio, cobre e chumbo o parâmetro Δ_a foi o que mostrou a maior influência em condições lubrificadas. Este parâmetro é definido pela média absoluta da inclinação do perfil ao longo do comprimento, podendo assim ser calculado a partir do cálculo de todas as inclinações entre dois pontos consecutivos do perfil, e com isso calculando a média destes, representado pela equação 15 (GADELMAWLA, 2002).

$$\Delta a = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dy}{dx} \right| dx \quad (15)$$

Outros parâmetros que também possuem também influência com o coeficiente de atrito, não tão significativas quanto o Δa , mas ainda sim uma influência grande são os parâmetros R_k e o S_m (WIELEBA, 2002). Sendo o R_k o parâmetro de profundidade do núcleo da rugosidade, desprezando os picos vales predominantes (WHITEHOUSE, 2002). O S_m , espaçamento médio entre os picos, é calculado a partir da equação 16. Onde N é o número de picos do perfil na linha média (GADELMAWLA, 2002).

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i \quad (16)$$

Apesar destes parâmetros apresentarem influência sobre o coeficiente de atrito, estes estudos não são conclusivos em relação a qual parâmetro utilizar para avaliar o atrito. Na literatura encontra-se outros autores que avaliam os parâmetros Skewness e Kurtosis como sendo os que influenciam o coeficiente de atrito (SEDLAČEK, 2012).