

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

NÍKOLAS ANDREI FURLAN CANABARRO

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO SAE 1045 x DIN GG20 EM CONTATOS
CÔNCAVO-CONVEXO PRESENTES EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Porto Alegre

2023

NÍKOLAS ANDREI FURLAN CANABARRO

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO SAE 1045 x DIN GG20 EM CONTATOS
CÔNCAVO-CONVEXO PRESENTES EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

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

Orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti
Coorientadora: Profa. Dra. Fabiana Lopes da Silva

Porto Alegre

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitor: Patrícia Helena Lucas Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Coordenador: Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador Substituto: Annelise Kopp Alves

Canabarro, Níkolos Andrei Furlan
COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO SAE 1045 x DIN GG20 EM CONTATOS
CÔNCAVO-CONVEXO PRESENTES EM MÁQUINAS-FERRAMENTA/ Níkolos
Andrei Furlan Canabarro. -- 2023.
103 f.

Orientadora: Célia de Fraga Malfatti.

Coorientadora: Fabiana Lopes da Silva.

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

1. Tribologia. 2. Desgaste. 3. SAE 1045. 4. DIN
GG20. 5. Bucha-pino I. Malfatti, Célia de Fraga,
orient. II. da Silva, Fabiana Lopes, coorient. III.
Título.

NÍKOLAS ANDREI FURLAN CANABARRO

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO SAE 1045 x DIN GG20 EM CONTATOS
CÔNCAVO-CONVEXO PRESENTES EM MÁQUINAS-FERRAMENTA

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pela orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Anderson Daleffe
Centro Universitário SATC – UNISATC

Prof. Dr. Joel da Silva Rodrigues
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – IFSUL

Prof. Dr. Paulo Mariot
Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI

Prof. Dr. Victor Velho de Castro
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo incondicional apoio no que jamais mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa. Meus agradecimentos e minha admiração.

À Professora Dra. Célia de Fraga Malfatti pela orientação durante a elaboração deste trabalho e, principalmente, pela confiança e acolhimento.

À Professora Dra. Fabiana Lopes da Silva pela coorientação e pelo convite a realização dos ensaios nos laboratórios do IFRS - Caxias

Ao Me. Evandro Benincá pelo desenvolvimento do equipamento utilizado nesta pesquisa e suporte na execução dos experimentos.

Ao Me. Bruno Bueno pela ajuda na execução dos experimentos.

À equipe técnica dos laboratórios do IFRS pelo suporte e compreensão durante a realização dos ensaios.

A empresa Stronghold Engenharia que investiu no conhecimento adquirido, cedeu sua estrutura e tempo para que este objetivo fosse concluído

A todos meus amigos que compartilharam comigo as alegrias e dificuldades durante esta caminhada que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar até aqui.

*“The most elementary and valuable statement in
science, the beginning of wisdom, is,*

“I do not know.”

Lt. Comdr. Data

RESUMO

A resposta ao desgaste dos materiais é amplamente influenciada pela natureza específica de seus microconstituintes e pela predominância de um conjunto de parâmetros interconectados ao sistema em que esses materiais são empregados. Com o objetivo de realizar a caracterização tribológica do par de materiais SAE 1045 e DIN GG20, foram conduzidos testes de desgaste sob condições de deslizamento a seco em sistema gerador de desgaste com contato côncavo-convexo, análogo ao encontrado em máquinas ferramenta. As características de desgaste foram então determinadas com base em múltiplos fatores, como dureza, microestrutura, rugosidade, aparência das superfícies desgastadas, perda de massa decorrente do processo de desgaste, coeficiente de desgaste e coeficiente de desgaste específico. Para a realização desses testes de desgaste, utilizou-se um tribômetro do tipo bucha-pino. 210 mil ciclos de desgaste foram executados ao longo de 7 paradas regulares para medições de perda de massa e de rugosidade. O carregamento aplicado foi 50N e a velocidade de rotação foi de 45 rpm. Os ensaios foram realizados em triplicata. Em geral, observou-se maior desgaste nas buchas de DIN GG20 em relação aos pinos SAE 1045. Inicialmente, o coeficiente de atrito registrado foi de 0,25, porém foi observado aumento neste valor em função da distância percorrida e uma posterior retirada de camada sólida lubrificante formada durante o desgaste da bucha. As medições de rugosidade revelaram uma diminuição, em média, de 54% nos pinos e 24% nas buchas. Após a realização dos ensaios foram encontrados indicativos da ocorrência dos mecanismos de desgaste de adesão, corrosão, fadiga superficial e em especial de abrasão por polimento que se apresentou como mecanismo de desgaste dominante para o sistema adotado em ambas as contrapartes o que pode ser também observado pela queda nos valores de rugosidade medidos durante o ensaio.

Palavras-chave: Tribologia; Desgaste; SAE 1045; DIN GG 20; Bucha-pino.

ABSTRACT

The response to wear of materials is influenced by the specific nature of their microconstituents and the predominance of a set of parameters interconnected to the system in which these materials are used. In order to conduct the tribological characterization of the pair of materials SAE 1045 and DIN GG20, wear tests were conducted under dry sliding conditions in a wear generating system with concave-convex contact, analogous to that found in machine tools. Wear characteristics were then determined based on multiple factors, such as hardness, microstructure, roughness, appearance of worn surfaces, mass loss resulting from the wear process, wear coefficient and specific wear coefficient. To carry out these wear tests, a bushing-pin type tribometer was used. 210 thousand wear cycles were carried out over 7 regular stops to measure mass loss and roughness. The applied load was 50N and the rotation speed was 45rpm. The tests were performed in triplicate. In general, greater wear was observed on DIN GG20 bushings in relation to SAE 1045 pins. Initially, the friction coefficient recorded was 0.25, however an increase in this value was observed depending on the distance traveled and subsequent layer removal. solid lubricant formed during bushing wear. Roughness measurements revealed a decrease, on average, of 54% in pins and 24% in bushings. After carrying out the tests, indications of the occurrence of wear mechanisms adhesion, corrosion, surface fatigue and in particular abrasion due to polishing were found, which was the dominant wear mechanism for the system adopted in both counterparts, which can also be observed by the drop on the roughness values measured during the test.

Keywords: Tribology; Wear; SAE 1045; DIN GG 20; Bushing-pin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – superfícies em contato (a) aparente; (b) real.....	19
Figura 2 – Contato entre uma superfície côncava e uma superfície convexa	21
Figura 3 – Contato entre duas superfícies cilíndricas.....	22
Figura 4 - Atrito: a) rolamento b) deslizamento.....	24
Figura 5 - Medição das forças de atrito ao longo do tempo.....	25
Figura 6 - Tipos de desgaste: desgaste por abrasão (a), desgaste por adesão (b), erosão (c), fadiga superficial (d), desgaste por corrosão (e)(f)(g)(h)	26
Figura 7 – Asperezas em contato.....	27
Figura 8 – Partícula abrasiva: (a) uma superfície áspera e dura ou uma superfície com grãos abrasivos montados deslizando sobre uma superfície de menor dureza; (b) grãos abrasivos livres presos entre as superfícies, com pelo menos uma das superfícies com menor dureza do que os grãos abrasivos.	28
Figura 9 – Diagrama de compatibilidade dos pares de materiais.....	29
Figura 10 – Coeficiente de desgaste vs. compatibilidade e lubrificação.....	31
Figura 11 – Representação esquemática da faixa de coeficiente de desgaste K exibida em diferentes condições de desgaste. HD = lubrificação hidrodinâmica; EHD = lubrificação elastohidrodinâmica.....	33
Figura 12 – Esquemático de geometrias de interface típicas usadas para fricção deslizante e testes de desgaste: (a) pino no disco, (b) pino no plano, (c) pino no cilindro, (d) arruelas de encosto, (e) pino na bucha, (f) planos retangulares em cilindro giratório, (g) cilindros cruzados e (h) quatro esferas	38
Figura 13 – Elementos de fixação: a) localizador; b) sistema de aperto; c) suportes; d) corpo do sistema de fixação.....	41
Figura 14 – a) placa de castanhas para fixar peças cilíndricas; b) morsa para fixar peças prismáticas.....	43
Figura 15 – Dispositivos especiais para rebarbação e peças a serem fixados.	43
Figura 16 – dispositivo para usinagem para do pedal de freio.....	44
Figura 17 – Prisma para garra robótica.....	44

Figura 18 – Garra robótica.....	45
Figura 19 – a) castanhas escalonadas de aplicação geral b) castanhas especiais para aplicação dedicada.....	45
Figura 20 – Placa de castanhas especiais.	46
Figura 21 – Contra ponto.....	46
Figura 22 – Sequência de fixação no torno; (a) abertura da placa. (b) posicionamento da peça a ser usinada. (c) encosto do contra ponto.....	47
Figura 23 – Movimento relativo entre as superfícies em contato.....	48
Figura 24 – Corte transversal das regiões em contato.	48
Figura 25 – Contra-pontos nas condições (a) novo (b) usado.....	49
Figura 26 – marcas de desgaste em diferentes contra-pontos.....	49
Figura 27 – Fluxograma do procedimento experimental.....	50
Figura 28 – Tribômetro desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais PPG-TEM	52
Figura 29 – sistemas do tribômetro: I) sistema porta amostra; II) sistema de controle; III) Sistema de aquisição de dados.	53
Figura 30 – Representação esquemática do funcionamento do tribômetro..	53
Figura 31 – dimensional bucha de ferro fundido GG20.	55
Figura 32 – dimensional do pino de aço SAE 1045.....	56
Figura 33 – Equipamento de banho ultrassônica SOLID STEEL.	57
Figura 34 – Balança Analítica EDUTECH STR 224.	58
Figura 35 – Rugosímetro DIGIMESS TR200.....	58
Figura 36 – (a) representação de mancal de deslizamento; (b) decomposição das forças; (c) força de reação no deslizamento.	60
Figura 37 – suporte de medição.	65
Figura 38 – variação da massa do pino antes do travamento com 10kg.....	67
Figura 39 – variação da massa da bucha antes do travamento com 10kg...	67
Figura 40 – variação da massa do pino com 5kg.	68
Figura 41 – variação da massa da bucha com 5kg.	69
Figura 42 – Variação de sinal de torque em teste a seco e úmido.	70
Figura 43 – Comparação da perda de massa nas diferentes contrapartes. .	71
Figura 44 – Coeficiente de desgaste K para o Pino SAE 1045 e Bucha DIN GG20 nos diferentes ensaios.	72

Figura 45 – Relação entre coeficiente de desgaste específico k para o par SAE 1045-DIN GG20 e dureza dos pinos.....	72
Figura 46 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado 100x. em diferentes amostras: (a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.....	73
Figura 47 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado 500x. em diferentes amostras: (a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.....	73
Figura 48 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado 1000x. em diferentes amostras: (a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.....	73
Figura 49 – Regiões com espectro claro do aço SAE 1045: (a)pino 1 com 6,22%, (b) pino 2 com 15,11%, (c) 13,89%	76
Figura 50 – Micrografia da bucha DIN GG20 em diferentes aumentos: (a) 100x (b) 500x (c) 1000x.....	76
Figura 51 – Região com espectro claro da grafita na bucha DIN GG 20, com aumento em 100x, área de 17,51%.....	77
Figura 52 – Rugosidade Ra para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.....	80
Figura 53 – Rugosidade Rq para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.....	80
Figura 54 – Rugosidade Rz para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.	80
Figura 55 – Espectro da variação do sinal na determinação do coeficiente de atrito entre SAE 1045 e DIN GG20 com carga de 5kg.	81
Figura 56 – Variação do comportamento do coeficiente de atrito entre SAE 1045 e DIN GG 20 com carga de 5kg.....	82
Figura 57 – Buchas DIN GG 20 após ensaios de desgaste	84
Figura 58 – Trilhas de desgaste nos pinos SAE 1045: a) pino 1, b) pino 2, c) pino 3.....	84
Figura 59 – Condições topográficas do SAE 1045 e DIN GG20 anteriores ao ensaio de desgaste em diferentes magnificações.	86
Figura 60 – Zona de transição de rugosidade do Pino SAE 1045.	88
Figura 61 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do pino SAE 1045 após ensaio.	89
Figura 62 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de microtrincas no pino SAE 1045.....	90
Figura 63 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da bucha DIN GG20 após ensaio.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de contato entre dois cilindros paralelos.	23
Tabela 2 – Características de desgaste leve e severo.	32
Tabela 3 – Níveis de simulação em testes de desgaste.	36
Tabela 4 – parâmetros do inversor de frequência e acionamento do motor.	54
Tabela 5 – Parâmetros de contato entre dois cilindros.	63
Tabela 6 – massa inicial das amostras para ensaio utilizando 17 kg.	64
Tabela 7 – massa das amostras após 100 ciclos utilizando 17 kg.	65
Tabela 8 – massa inicial das amostras para ensaio utilizando 10 kg.	66
Tabela 9 – massa das amostras após 500 ciclos utilizando 10 kg.	66
Tabela 10 – massa das amostras após 1000 ciclos utilizando 10 kg.	66
Tabela 11 – Perda de massa nas amostras.	70
Tabela 12 – Dureza nos pinos SAE 1045 após têmpera e revenimento.	78
Tabela 13 – Dureza da bucha DIN GG20.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA	<i>Associação Brasileira de Fundição</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
APEX	<i>Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos</i>
ASM	<i>American Society of Materials</i>
CLP	<i>Controle lógico programável</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
IFRS	<i>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul</i>
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
NBR	<i>Norma brasileira</i>
PPGE3M	<i>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais</i>
PPG-TEM	<i>Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	raio da área de contato
B	metade da largura do retângulo de contato
b	área de contato
E	módulo de Young
E'	módulo de Young reduzido
Fa_{est}	força de atrito estático
Fa_{din}	força de atrito dinâmico
F_n	força normal
H	dureza
K	coeficiente de desgaste
k	coeficiente de desgaste específico
L	metade do comprimento retângulo de contato
l	distância percorrida
M	momento
p	pressão de contato (Hertz)
$P_{máx}$	máxima pressão de contato
$P_{média}$	pressão de contato média
R'	raio de curvatura reduzido para os dois cilindros paralelos em contato
RA	raio do cilindro 'A'
RB	raio do cilindro 'B'
R_{ax}	raio de curvatura reduzido do corpo "A" na direção "x"
R_{ay}	raio de curvatura reduzido do corpo "A" na direção "y"
R_{bx}	raio de curvatura reduzido do corpo "B" na direção "x"
R_{by}	raio de curvatura reduzido do corpo "B" na direção "y"
V_d	volume desgastado
W	carregamento
Z	profundidade abaixo da superfície onde ocorre máxima tensão cisalhante
δ	máxima deflexão
τ_{max}	máxima tensão cisalhante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.1	OBJETIVO GERAL.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	TRIBOLOGIA	19
3.1.1	Contato	19
3.1.1.1	Contato entre superfícies sólidas	20
3.1.2	Atrito	24
3.1.3	Desgaste	25
3.1.3.1	Adesivo	27
3.1.3.2	Abrasivo	27
3.1.3.3	Tribo-corrosão	29
3.1.3.4	Fadiga superficial	30
3.1.4	Coeficiente de desgaste	30
3.1.5	Severidade do desgaste	31
3.2	MÉTODOS DE ANÁLISE DE DESGASTE EM METAIS	33
3.2.1	Metodologia de Planejamento	35
3.2.1.1	Simulação	36
3.2.1.2	Aceleração	36
3.2.1.3	Preparação de amostras	37
3.2.1.4	Atrito e desgaste	37
3.2.2	Testes de desgaste	38
3.3	SISTEMAS DE FIXAÇÃO.....	39
3.3.1	Elementos de fixação	40
3.3.2	Tipos de fixação	42
3.3.3	Castanhas	45
3.3.4	Contra-pontos	46
3.4	DESGASTE EM ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	50

4.1	CONFIGURAÇÃO DO TRIBÔMETRO BUCHA-PINO	51
4.1.1	Ciclos de operação	54
4.1.2	Aferição do tribômetro.....	54
4.2	AMOSTRA	55
4.2.1	Composição química	56
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	57
4.3.1	Massa	57
4.3.2	Rugosidade.....	58
4.3.3	Dureza	59
4.3.4	Microestrutura	59
4.4	MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	59
4.5	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTATO	61
4.6	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESGASTE	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1	PARÂMETROS DE CONTATO	63
5.2	ENSAIOS PRELIMINARES	63
5.3	PERDA DE MASSA.....	70
5.4	COEFICIENTE DE DESGASTE E COEFICIENTE DE DESGASTE ESPECÍFICO.....	71
5.5	MICROESTRUTURA	73
5.5.1	Aço SAE 1045	73
5.5.2	Ferro Fundido GG20	76
5.6	DUREZA	77
5.7	RUGOSIDADE	79
5.8	COEFICIENTE DE ATRITO	81
5.9	ANÁLISE VISUAL.....	83
5.10	IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	86
6	CONCLUSÕES.....	92
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
8	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados da ABIFA – Associação Brasileira de Fundição, efeitos da crise mundial de 2008, no Brasil, foram superados quando registrados aumentos da produção de fundidos por três anos consecutivos; 2017-2019. [1] [2] A série de evolução foi interrompida em 2020 [3] devido à crise sanitária global, originada pela pandemia do COVID-19. Mesmo apresentando sinais de um restabelecimento de produção para o ano de 2021 [4] e expectativa de crescimento para 2022 [5], se comparados aos índices pré-crise, a indústria brasileira está abaixo dos patamares dos anos anteriores. [6] Um outro fator apontado como adverso a indústria nacional é o preço final dos produtos fundidos no Brasil. [7] [8] O setor automotivo, que compreende 56% dos produtos fundidos no Brasil [9] é um grande exemplo disto. A fim de atender estas necessidades e ganhar competitividade no mercado, algumas empresas optam por oferecer produtos já usinados.

Para Diniz, et al. [10] são vários os aspectos que influenciam os custos de produção por peça usinadas. Entende-se que, também, estão diretamente associados aos custos de produção, os erros de usinagem. Para Zhao [11]; Bagshaw e Newman [12], as falhas de usinagem são classificadas em dois tipos de incorreções, relacionados a precisão de maquinário e os relacionados a precisão do ferramental. Incorporado a precisão do ferramental estão os erros atribuídos a falha de fixação das peças. Uma sólida e consistente fixação de peças é um dos principais pontos no processo de manufatura, fundamental para assegurar produtividade e qualidade. Estima-se que os custos relacionados a dispositivos de fixação estejam entre 10-20% do custo de todo processo de fabricação [13], enquanto 40% das peças rejeitadas em virtude a erros dimensionais ligados a uma pobre fixação. [14] Em vista disso, para a garantia de uma usinagem precisa e de qualidade é imprescindível que um sistema de fixação apropriado esteja apresentado de forma operacionalmente funcional. Devido à natureza do processo, a fixação das peças a serem usinadas ocorre pela aplicação de uma força que age sobre os corpos, peça e elemento de fixação, deslocando as peças até uma posição predeterminada, resultando em uma área de contato definida e condições de atrito particulares a aplicação.

Segundo Norton, somente três são os meios pelos quais uma peça pode falhar: obsolescência, quebra ou desgaste. [15] De natureza superficial, o desgaste ocorre invariavelmente em todos os mecanismos, podendo ele ser retardado, mas

jamais evitado. Estabelecido como dano a uma superfície sólida, podendo haver perda de material de modo progressivo, inerente ao movimento relativo entre as superfícies e em contato. [16] Pode-se argumentar que dentre esses apontamentos o que ocorre com maior frequência, em elementos de fixação ainda em operação, seja o desgaste, o atrito, por sua vez, é o principal causador do desgaste. Atribui-se que cerca de 23% do gasto energético total seja proveniente de contatos tribológicos. Com 20% desta despesa referente ao atrito e 3% devido a manutenção e substituição de peças desgastadas. [17]

Sendo o atrito um mecanismo operante e desejado na fixação de peças, a diminuição de seu papel não é pretendida, tão pouco simplesmente sua maximização. Seu comportamento deve ser explorado e trabalhado juntamente com outros fatores que englobam a funcionalidade dos sistemas de fixação, tal como tipo de contato. De qualquer modo, o desgaste tem influência direta na continuidade das condições operacionais, e tem participação elementar nos custos de produção. De acordo com Oliveira e Silva [18], no Brasil, no ano de 2004 foram gastos, somente em função de desgaste, valores entre 17 bilhões e 104 bilhões de reais, o que representa cerca de 1% a 6% do PIB brasileiro. Inúmeras condições se correlacionam para condicionar o desgaste apresentado em um determinado corpo, tal como o atrito, não condizem uma propriedade do material, mas sim uma especificidade do sistema tribológico. [19] Outros fatores que contribuem para a distinção de um sistema tribológico são: geometria da superfície em contato; velocidade de deslizamento; carga aplicada; combinação do par de material em contato; presença de lubrificação e tipo de movimento. [20]

Evidencia-se a importância das combinações destes fatores para uma análise mais concreta e próxima as condições reais em que o desgaste ocorre. Neste trabalho, optou-se pela seleção de um dos materiais mais presentes na fabricação de elementos de fixação, aço SAE 1045, e para a representação das peças o serem usinadas provenientes das fundições, DIN GG20. Ademais, também se optou pela representatividade de um dos tipos de contatos mais comum neste contexto, o côncavo-convexo. Para tal, o estudo teve seu desenvolvimento em equipamento de testes especialmente desenvolvido para este tipo de contato. Único no Brasil, o tribômetro tipo bucha-pino foi desenvolvido por pesquisador do Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação do Rio Grande do Sul – IFRS, campus Caxias. O equipamento foi patenteado em parceria entre pesquisador e instituição.

2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem por objetivo analisar o comportamento tribológico do par SAE 1045 – DIN GG 20 quando em contato deslizante côncavo-convexo à seco.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar perda de massa no do pino e na bucha.
- b) Determinar o coeficiente de desgaste e coeficiente de desgaste específico.
- c) Avaliar o coeficiente de atrito no contato côncavo-convexo.
- d) Correlacionar a dureza e rugosidade a resistência ao degaste dos materiais empregados.
- e) Caracterizar a morfologia e identificar mecanismos de desgaste.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

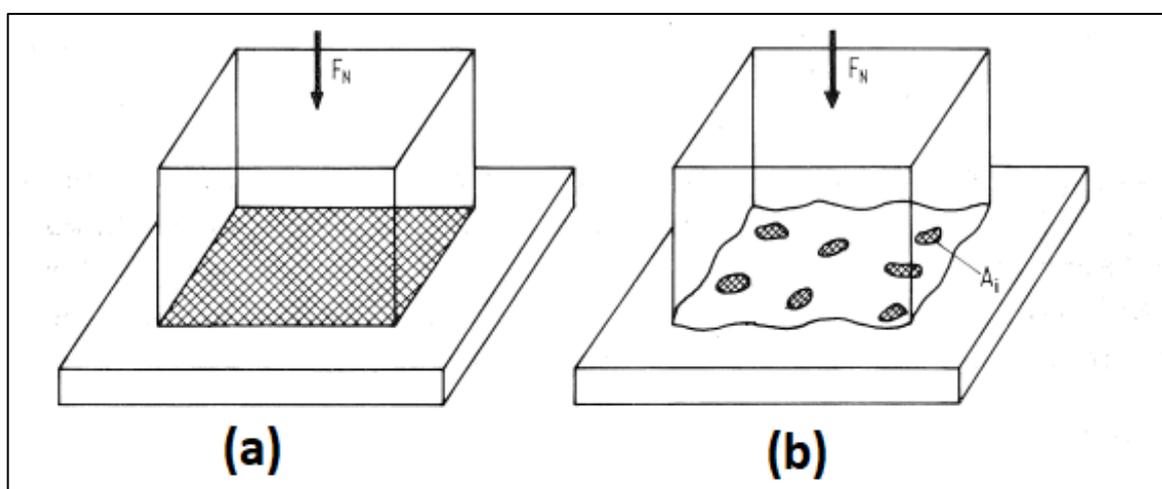
3.1 TRIBOLOGIA

A formação etimologia da palavra tribologia consiste na junção dos termos em grego “tribos” que significa deslizar, esfregar e de “logos” que tem por significado estudo. Assim, pode-se categoricamente dizer que tribologia é a ciência que estuda os fenômenos de desgaste, atrito e lubrificação. Ademais, os associa com os aspectos físicos, químicos, mecânicos e metalúrgicos do movimento relativo entre as superfícies. [21]

3.1.1 Contato

Quando superfícies planas são postas em contato, as rugosidades das superfícies resultam na formação de pontos de contato discretos. A soma das áreas destes pontos de contato forma a área de contato real, que geralmente representam uma parcela da área de contato aparente. Esta diferenciação é apresentada na figura 1, a qual ilustra (a) superfícies em contato aparente e (b) superfícies em contato real, devido a força normal. O tamanho desta área depende das propriedades do material textura da superfície, e condições de carga interfacial, pois as asperezas podem causar contatos adesivos, provocados por interações interatômicas. [22]

Figura 1 – superfícies em contato (a) aparente; (b) real.



Fonte: adaptado de [23].

Quando duas superfícies se deslocam em relação uma à outra, a força de atrito origina-se da adesão de suas asperezas e de outras interações de superfície. Estas interações repetidas e as tensões desenvolvidas na interface provocam a formação de partículas de desgaste e, eventualmente, a falha. Uma área real de contato menor leva a uma menor interação, o que geralmente resulta em menor desgaste. A determinação da área real de contato é necessária para que se possa estabelecer a relação entre atrito e desgaste, com a textura da superfície e as propriedades do material. [22]

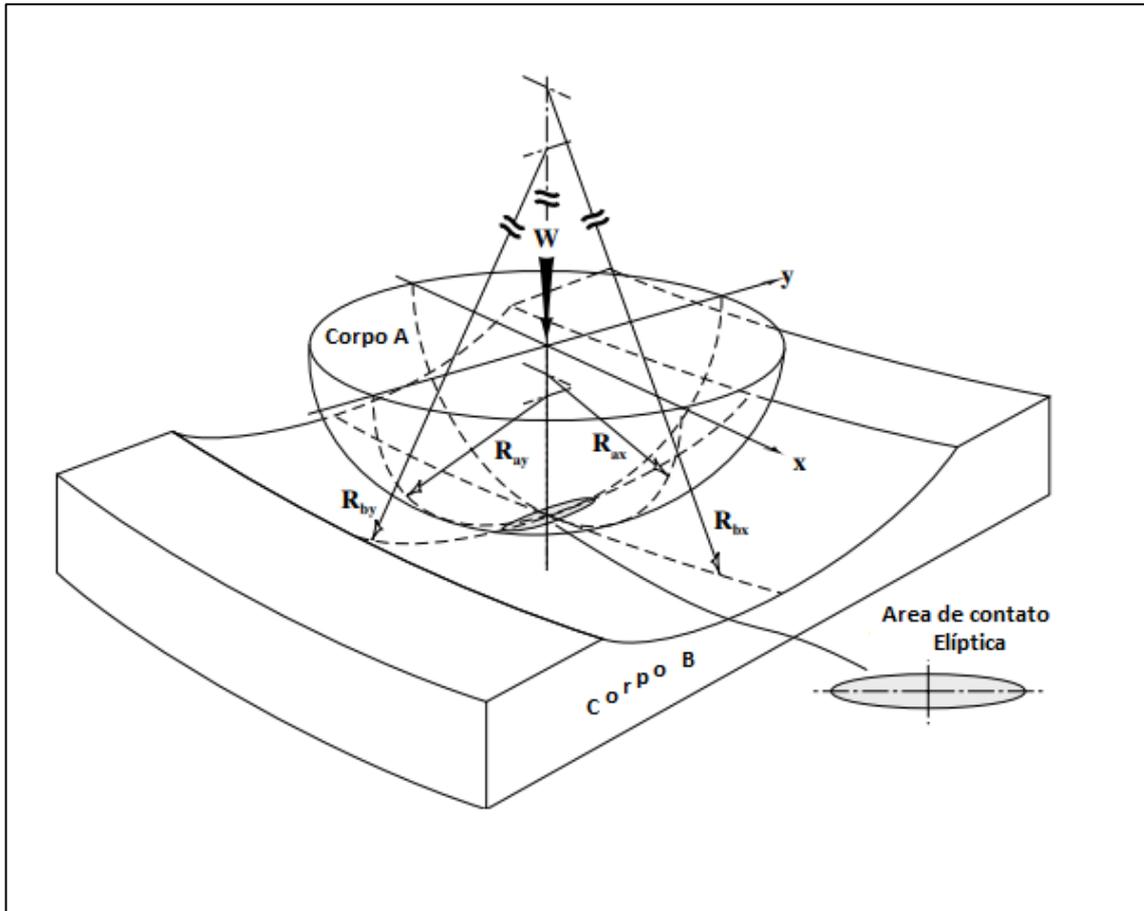
Ao estabelecer contato entre duas superfícies, inicialmente apenas alguns pontos suportam a força da carga normal. À medida que essa força aumenta, as superfícies se aproximam, permitindo que as asperezas mais altas de ambas entrem em contato e que os pontos de contato existentes se expandam para suportar a carga crescente. Isso resulta na deformação do local de contato, estabelecendo tensões que se opõem à carga aplicada. Deformações da superfície podem seguir vários comportamentos, como elástico, plástico, viscoelástico ou viscoplástico. Essa variação depende da carga aplicada, área de contato, rugosidade da superfície e das propriedades do material. As tensões locais nos pontos de contatos são muito maiores que as tensões nominais, o que pode acarretar deformações plásticas mesmo que as tensões nominais estejam abaixo da faixa elástica do material. Quando em contato, certas asperezas se deformam elasticamente, enquanto outras se deformam plasticamente, dependendo da carga aplicada. [22]

3.1.1.1 Contato entre superfícies sólidas

O contato entre superfícies ocorre em inúmeras situações práticas, e usualmente são avaliados os seguintes parâmetros: área de contato, máxima pressão de contato, máxima deflexão da superfície central de contato e a posição máxima das tensões cisalhantes abaixo da superfície. [24]

A área de contato é dependente da curvatura do objeto em contato, podendo ser plana, côncava ou convexa. A figura 2 exemplifica o contato entre duas superfícies, uma concava outra convexa. Quando dois corpos em contato e sob a ação de uma força perpendicular que age sobre as superfícies destes corpos, o contorno da superfície em contato formado é uma elipse. [25]

Figura 2 – Contato entre uma superfície côncava e uma superfície convexa



Fonte: adaptado de [21].

A relação entre os raios dos corpos de natureza côncavo-convexo é denominada raio de curvatura reduzido (R') estabelecida pela equação:

$$\frac{1}{R'} = \left(\frac{1}{R_{ax}} - \frac{1}{R_{ay}} \right) - \left(\frac{1}{R_{bx}} + \frac{1}{R_{by}} \right)$$

Onde:

R_{ax} é o raio de curvatura reduzido do corpo "A" na direção "x" [m];

R_{ay} é o raio de curvatura reduzido do corpo "A" na direção "y" [m];

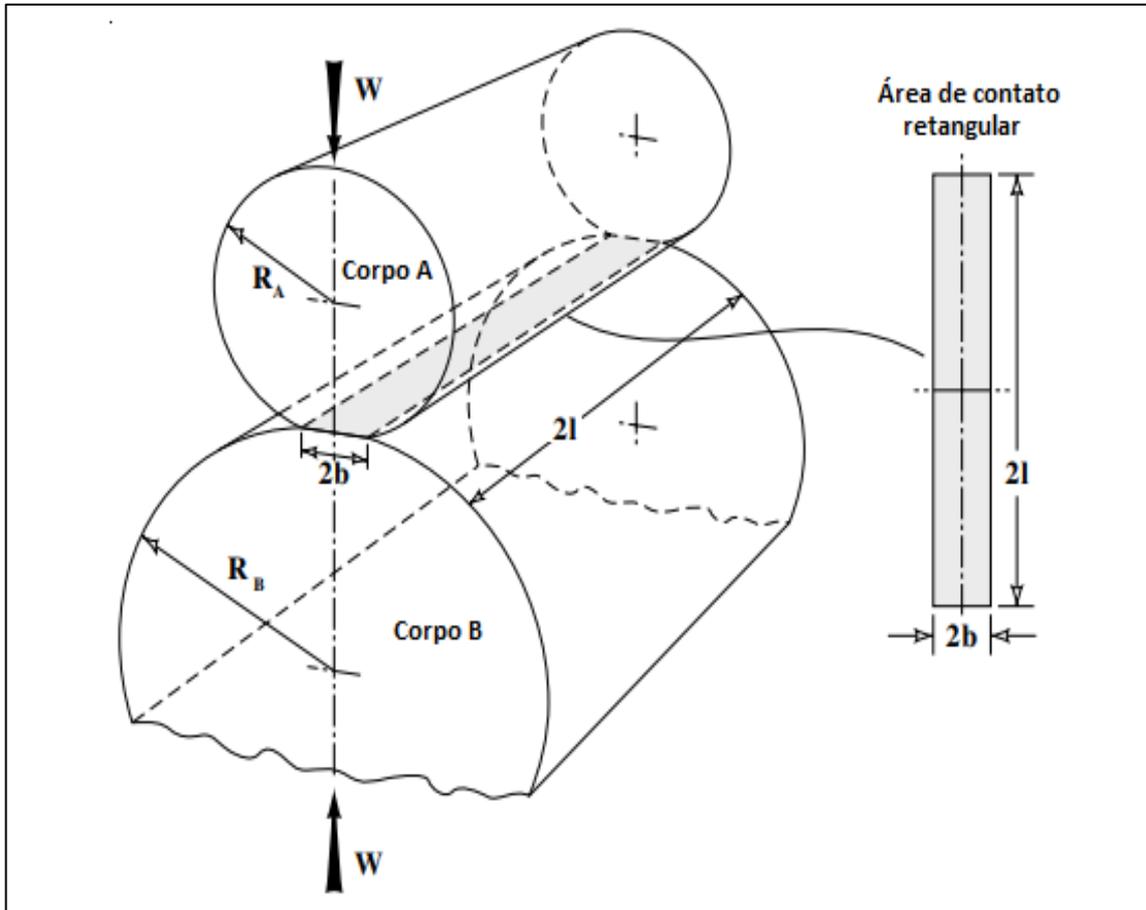
R_{bx} é o raio de curvatura reduzido do corpo "B" na direção "x" [m];

R_{by} é o raio de curvatura reduzido do corpo "B" na direção "y" [m];

O corpo B apresenta superfície côncava e de acordo com a convenção sua curvatura é negativa, portanto, R_{bx} R_{by} são negativos.

Já o contato entre duas superfícies cilíndricas, como apresentado na figura 3, é caracterizado pela formação de um retângulo estreito.

Figura 3 – Contato entre duas superfícies cilíndricas.



Fonte: adaptado de [21].

Onde:

b é metade da largura do retângulo de contato [m];

l é metade do comprimento retângulo de contato [m];

R' é o raio de curvatura reduzido para os dois cilindros paralelos em contato [m]

Para os cilindros: $R_{ax} = R_A$, $R_{ay} = \infty$, $R_{bx} = R_B$, $R_{by} = \infty$

' R_A ' e ' R_B ' são os raios dos cilindros 'A' e 'B', respectivamente

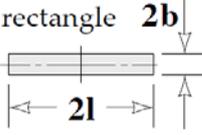
As relações matemáticas entre a pressão superficial distribuída e a carga aplicada para contato elástico sem atrito de corpos com superfícies quadráticas e para

pequenas áreas de contato. Corpos cujas superfícies satisfazem essas condições tocam primeiro ao longo de uma linha para contato cilíndrico e, mesmo sob carga, as dimensões da área de contato permanecem pequenas em comparação com as dimensões dos próprios corpos. [26]

O tratamento matemático para o cálculo da pressão de contato, máxima deflexão de contato central e da máxima posição das tensões cisalhantes abaixo da superfície é primeiramente desenvolvido por Hertz (1882), posteriormente por meio iterativos por Hamrock e Anderson (1973) e com uso de simplificações por Brewe e Hamrock (1977). [21]

Além da área, pressão de contato, deflexão e tensão cisalhante também dependem da geometria de contato dos corpos e são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de contato entre dois cilindros paralelos.

Dimensões da área de contato	Máxima pressão de contato	Pressão de contato média	Máxima deflexão	Máxima tensão cisalhante
$b = \left(\frac{4WR'}{\pi l E'} \right)^{\frac{1}{2}}$  <p>rectangle $2b$ $2l$</p>	$p_{max} = \frac{W}{\pi b l}$ <p>Distribuição de pressão elíptica</p>	$p_{média} = \frac{W}{4bl}$	$\delta = 0,319 \left(\frac{W}{E' l} \right) \cdot \left[\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{4R_A R_B}{b^2} \right) \right]$	$\tau_{max} = 0,304 p_{max}$ <p>Em uma profundidade de $z = 0,786b$</p>

Fonte: adaptado de [21].

Onde:

a é o raio da área de contato [m];

W é a carga normal [N];

p é a pressão de contato (Hertzian stress) [Pa];

δ é a deflexão total no centro de contato [m];

τ é a tensão cisalhante [Pa];

z é a profundidade abaixo da superfície onde ocorre a máxima tensão cisalhante [m];

E' é o módulo de Young reduzidos [Pa];

R' é o raio de curvatura reduzido [m]

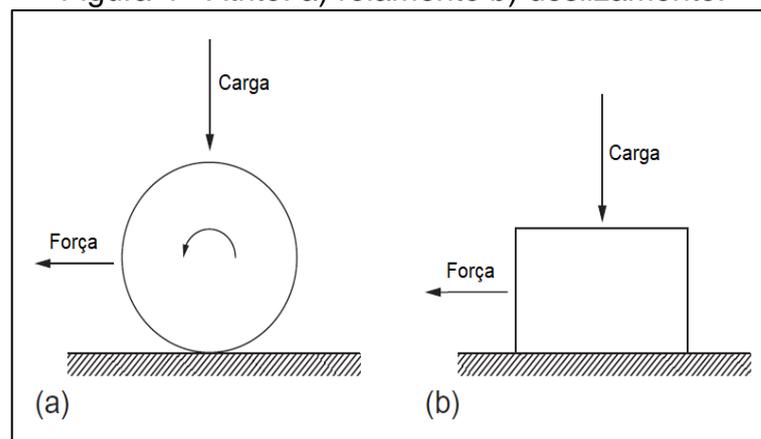
3.1.2 Atrito

De acordo com Stachowiak e Batchelor, atrito é a dissipação de energia entre corpos deslizantes é governado por quatro leis. Embora haja várias exceções para condições particulares, estas leis se mantêm verdadeiras para contatos deslizante a velocidade e carga moderada. [21]

- I. Existe uma proporcionalidade entre a máxima força tangencial antes do deslizamento e a força normal quando um corpo estático é submetido a uma carga tangencial crescente.
- II. A força tangencial de atrito é proporcional à força normal no deslizamento.
- III. A força de atrito é independente à área de contato aparente.
- IV. A força de atrito é independente a velocidade do deslizamento.

Já como indicado no ASM Internacional [27], atrito é a resistência ao movimento que um corpo exerce sobre o outro. Mais especificamente, a força tangencial que age sobre o corpo, com direção inversa a do movimento, é a conhecida como força de atrito. Ainda que em situações de contato distintas, como ilustrado na figura 4, uma força sempre é necessária para superar a condição inercial.

Figura 4 - Atrito: a) rolamento b) deslizamento.



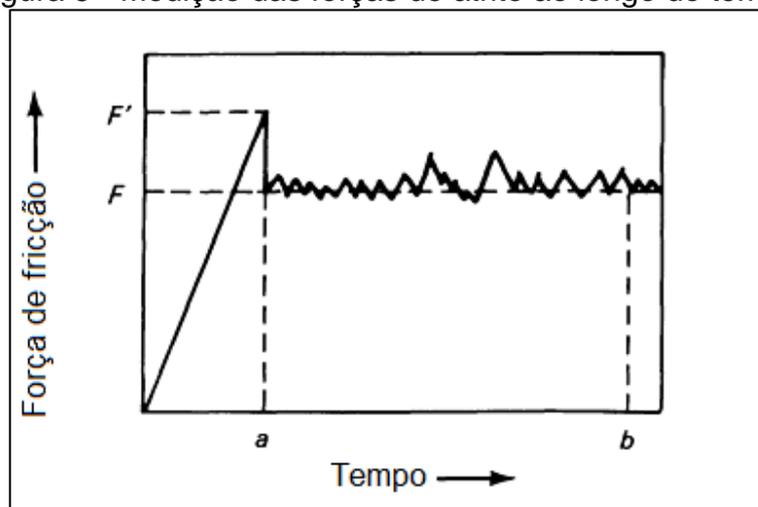
Fonte: adaptado de [28].

Podendo ser descrito como atrito seco, quando não há presença de fluidos lubrificantes entre os movimentos relativos dos objetos, ou atrito viscoso nos casos que existem camadas adjacentes de fluido entre as superfícies. Para o caso em que

corpos são carregados juntos e uma força tangencial é aplicada entre eles, o valor de da força requerida para iniciar o movimento é conhecida como força de atrito estático ($F_{a_{est}}$) e a força necessária para a manutenção do movimento entre tais objetos é a força de atrito dinâmico ($F_{a_{din}}$). Na figura 5 está ilustrado a variação das forças medidas através do tempo, onde o valor de pico F' é utilizado para o cálculo do coeficiente de atrito estático, enquanto F resulta no coeficiente de atrito dinâmico.

O atrito não é uma propriedade intrínseca ao material, mas sim ao sistema em que está aplicado. Isto significa que está relacionada a forma de aplicação e são vários os fatores condicionantes, tais como: material, superfície, força de aplicação, vibração e fixação. [22]

Figura 5 - Medição das forças de atrito ao longo do tempo.



Fonte: adaptado [27].

3.1.3 Desgaste

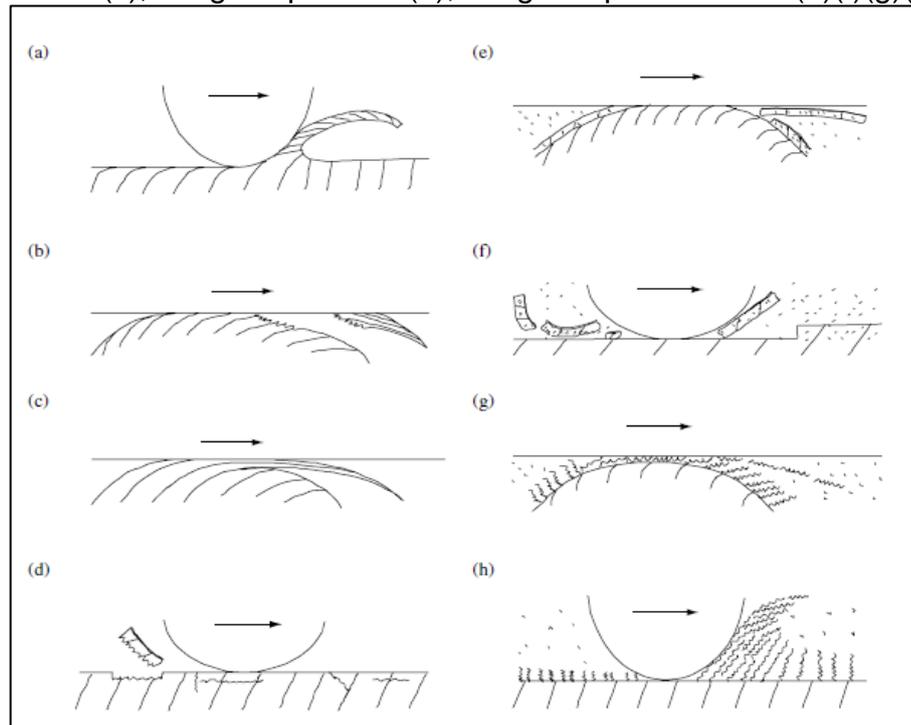
O desgaste é apontado como o dano superficial ou remoção de material de uma ou ambas as superfícies sólidas em movimento deslizante, rolamento ou impacto em relação ao outro. [22] Além disso, não é caracterizada como propriedade do material, mas sim como condição do sistema em que os materiais estão empregados. [29] [30]

No decorrer de um movimento relativo entre as superfícies, as propriedades do material podem ser alteradas, na superfície ou nas regiões próximas, devido ao deslocamento de material, embora não necessariamente algum material seja perdido. Posteriormente podendo se desprender e juntar-se a superfície de contato do outro

corpo material, ou até mesmo ser solta como partícula. Na hipótese de transferência de uma superfície a outra, a perda de massa do sistema é nula, mesmo que tenha ocorrido desgaste e perda de massa em um dos corpos. Falhas por desgaste precedem a perda de material, e podem ocorrer independentemente. Embora seja comumente atribuída a perda material como desgaste, o deslocamento de material, sem que haja mudança real de peso ou volume, também equivale a desgaste. [22]

Mesmo havendo certa divergência segundo a nomenclatura dos mecanismos de desgaste adotada por certos autores, e uma complexidade de separação da natureza dos mecanismos, cinco são os mais usualmente apresentados; figura 6 - tipos de desgaste: desgaste por abrasão (a), desgaste por adesão (b), erosão (c), fadiga superficial (d), desgaste por corrosão (e)(f)(g)(h). Segundo autores como Bhushan, Norton, tal como Stachowiak, o obstáculo da caracterização e descrição dos mecanismos de desgaste presentes não apenas reside na condição extremas da particular região de estudo, mas também pelas possíveis mudanças na composição e propriedades da superfície e suas regiões circunjacentes. Reiteradamente a topografia do sistema em desgaste e os mecanismos envolvidos são complexos e podem abranger uma combinação de processos químicos e mecânicos. [15] [21] [22]

Figura 6 - Tipos de desgaste: desgaste por abrasão (a), desgaste por adesão (b), erosão (c), fadiga superficial (d), desgaste por corrosão (e)(f)(g)(h)



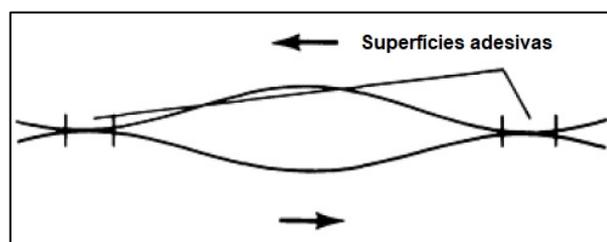
Fonte: adaptado de [16].

Para Blau (2009), as condições que permeiam a dissipação de energia entre corpos sólidos na forma de atrito, e assim gerando o desgaste são: aquecimento devido o atrito, transformação de fases, formação e a ruptura de junções adesivas, criação de defeitos, geração de vibrações, deformação plástica, deformação elástica, dentre outras. [31]

3.1.3.1 Adesivo

O processo de desgaste por adesão é oriundo da atração entre os átomos das superfícies que se encontram em contato. São nas asperezas que essa força de atração primeiro exercem efeito, figura 7. Assim que um escorregamento entre as duas superfícies ocorre, tais adesões são quebradas, originando um fragmento causando rompimento superficial e danos a peça. [32] Partículas que inicialmente estavam ligadas a uma das superfícies são removidas e aderem, de modo permanente ou temporário, a outra superfície. [27]

Figura 7 – Asperezas em contato.



Fonte: adaptado de [27].

3.1.3.2 Abrasivo

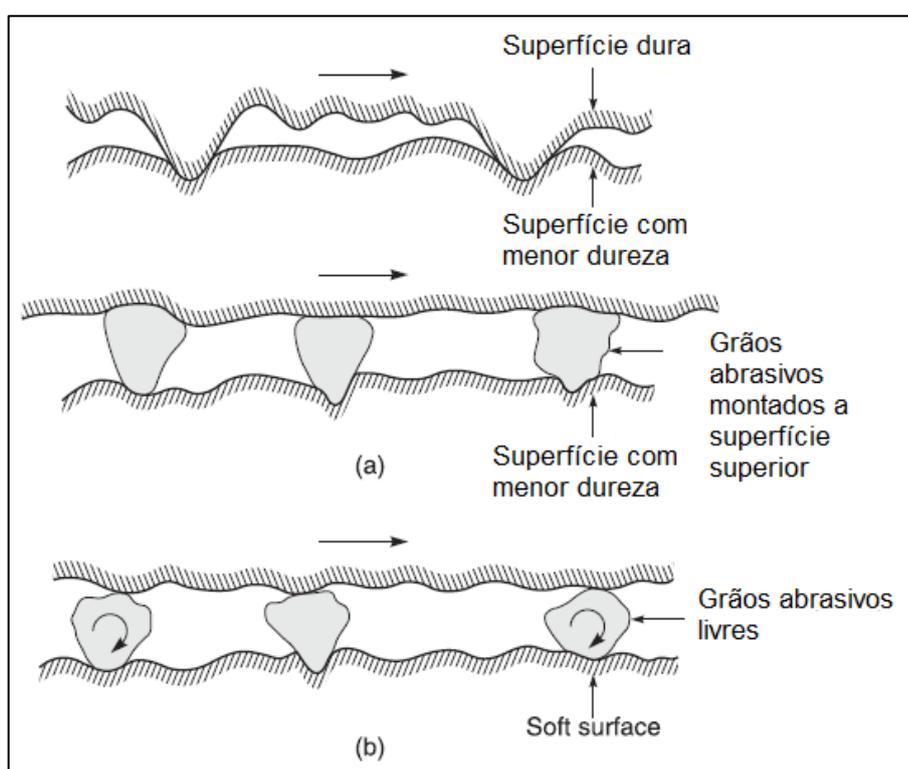
Inerente a ação de partículas que se acometem entre as superfícies de contato. Constituindo de uma perda gradativa de material e proporcionando marcas alinhadas à direção do movimento relativo. Tendo origem na rugosidade e irregularidade ou nas partículas incrustadas. [32]

O desgaste por abrasão pode ocorrer por dois modelos diferentes. Abrasão a dois corpos: onde um material cuja dureza e rugosidade elevados desliza sobre a superfície de um material de menor dureza retirando material de forma significativa. Abrasão a três corpos: quando uma partícula dura se encontra entre as duas

superfícies de deslizamento, causando desgaste possivelmente em ambas superfícies, mostrada na figura 8. [15] [22]

Para Bayer, casos os quais o abrasivo tem maior dureza que superfície em desgaste usa-se o termo: deformação de ciclo único. Já o mecanismo onde o elemento abrasivo é de menor dureza em relação a superfície em desgaste se denomina deformação de ciclo repetido. [30]

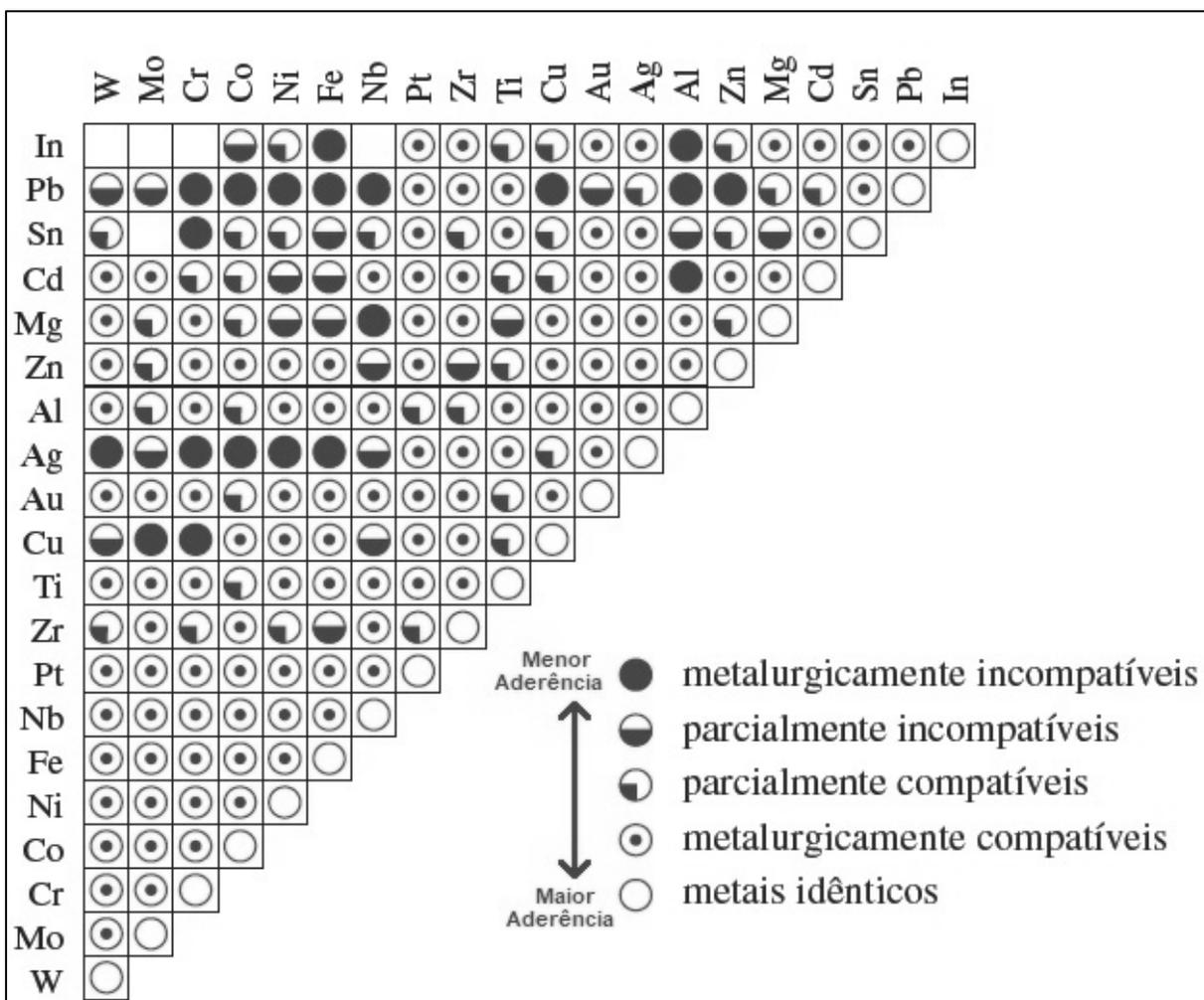
Figura 8 – Partícula abrasiva: (a) uma superfície áspera e dura ou uma superfície com grãos abrasivos montados deslizando sobre uma superfície de menor dureza; (b) grãos abrasivos livres presos entre as superfícies, com pelo menos uma das superfícies com menor dureza do que os grãos abrasivos.



Fonte: adaptado de [22].

A tendência a formação de contato adesivo depende de propriedades físicas e químicas dos materiais em contato. [23] A combinação entre os materiais exerce grande influência no atrito, por conseguinte, no desgaste por adesão. Segundo Rabinowicz, os materiais se dividem em: idênticos, compatíveis, parcialmente compatíveis e incompatíveis, figura 9. Compatibilidade está relacionada a solubilidade dos materiais, assim podendo oferecer maior resistência à adesão quando não existe possibilidade de formação de ligas. [33]

Figura 9 – Diagrama de compatibilidade dos pares de materiais.



Fonte: adaptado de [15].

3.1.3.3 Tribo-corrosão

Ocorre quando há presença de uma atmosfera corrosiva, tal como oxigênio, trabalhando em conjunto com o deslizamento. As camadas de óxidos, presentes superficialmente, são rompidas assim revelando novas superfícies a serem desgastadas. Dependendo do caráter das partículas rompidas, dureza e fragilidade, pode-se apresentar outros mecanismos de desgaste tal como a abrasão. Verifica-se o processo de oxidação em quase todos os metais, com exceção dos metais nobres. [15]

Quando aliado a outros fatores ocorre diferentes tipos de desgaste por corrosão, como por exemplo, fadiga por corrosão, onde em a combinação de tensões cíclicas e meio corrosivo gera o desgaste. Os motivos pelos quais carregamento estático acelera tais reações ainda é desconhecido. [32]

Corrosão por micro abrasão é uma junção de desgaste por abrasão, adesão e corrosão. Ocorrendo na junção das interfaces de contato dos materiais onde não há grande deslizamento. Entre tanto, na existência de vibrações e pequenas deflexões que removem o filme oxidante dando início a um novo processo de oxidação. [15] [31]

3.1.3.4 Fadiga superficial

Decorrida do rolamento puro ou combinação entre rolamento e deslizamento entre as superfícies. Deformação causada por cargas alternadas entre superfícies irregulares. Tensões muito elevadas causam a fadiga do material após muitos ciclos. Devido a nenhum material apresentar um limite a fadiga, é apenas questão de tempo para este mecanismo se apresentar. Pode ser dividido em baixo ciclo e alto ciclo. [15]

3.1.4 Coeficiente de desgaste

Em muitos sistemas, a perda de material devido ao desgaste é de fato proporcional à distância de deslizamento. No início do deslizamento, às vezes ocorre um comportamento transitório até que as condições de equilíbrio da superfície sejam estabelecidas. Durante esse período inicial de “amaciamento” (também chamado de running-in), a taxa de desgaste pode ser maior ou menor do que a taxa de desgaste em estado estacionário, dependendo da natureza desse primeiro estágio. [28]

Comumente, o desgaste é tratado como inversamente proporcional à dureza (H) acompanhada por um fator conhecido como coeficiente de desgaste (K). O volume desgastado (V_d) é expresso a partir de um carregamento normal à superfície (F_n) e uma distância de deslizamento (l). Essa definição leva o nome de equação de Archard [15]

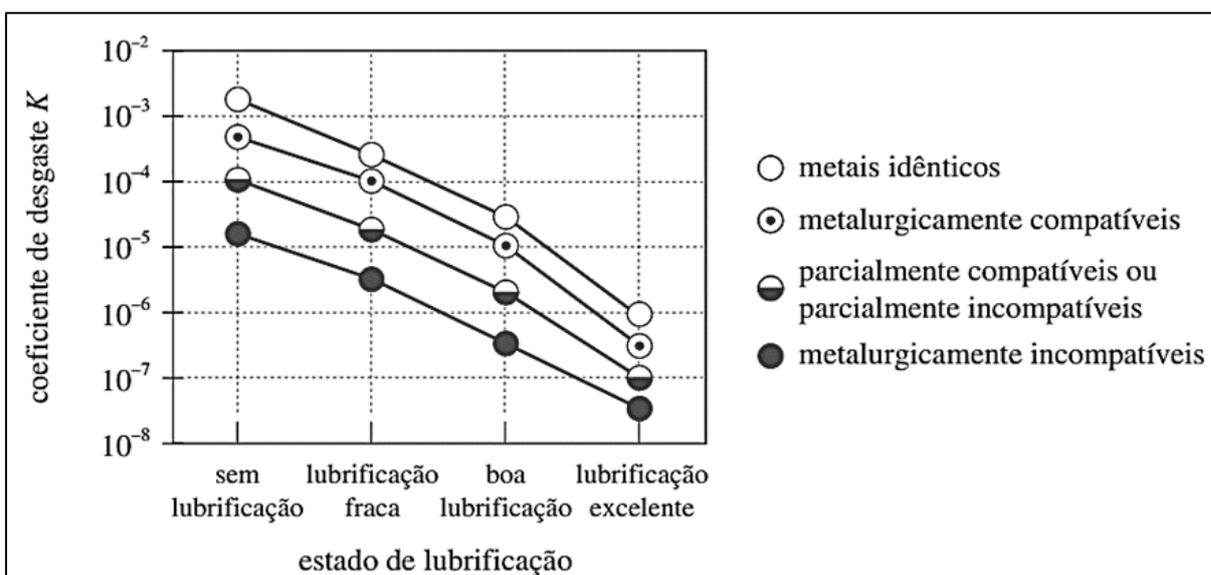
$$V_d = K \cdot \frac{F_n \cdot l}{H} \quad (1)$$

Já a profundidade de desgaste (d) pode ser obtida em função da área aparente:

$$d = K \cdot \frac{F_n \cdot l}{H \cdot A_a} \quad (2)$$

O coeficiente de desgaste K desempenha um papel fundamental e oferece uma forma valiosa de comparar a gravidade dos processos de desgaste em diversos sistemas. No entanto, para aplicações em engenharia, a razão K/H é frequentemente mais útil. Essa quantidade é simbolizada por k e é comumente chamada de taxa de desgaste específico. Ela representa o volume de material removido pelo desgaste por unidade de distância deslizada por unidade de carga normal no contato e geralmente é expressa em unidades de $\text{mm}^3 \text{m}^{-1} \text{N}^{-1}$. A medição de desgaste fornecida por k é particularmente valiosa para comparar taxas de desgaste em diferentes classes de materiais.

Figura 10 – Coeficiente de desgaste vs. compatibilidade e lubrificação.



Fonte: [15].

3.1.5 Severidade do desgaste

O desgaste pode apresentar-se em formas diferentes geralmente, dois regimes de desgaste distintos são identificados como "severo" e "leve". Esses regimes não apenas apresentam taxas de desgaste diferentes, mas também envolvem mecanismos diferentes de perda de material. No desgaste por deslizamento "severo" em metais, partículas relativamente grandes de detritos metálicos são formadas, enquanto no desgaste "leve" os detritos consistem em partículas de óxido. Na figura 11 é mostrada uma faixa aproximada de valores para o coeficiente de desgaste K . Sob condições de deslizamento a seco, o K pode variar de 10^{-2} a 10^{-6} . [34]

Quando partículas duras estão presentes e o desgaste envolve abrasão (devido ao deslizamento ou rolamento das partículas) ou erosão (devido ao impacto das partículas), ocorrem os maiores valores de K. A eficiência relativamente alta com a qual o material é removido por desgaste abrasivo ou erosivo explica por que esses processos podem ser úteis na fabricação. No entanto, os valores de K obtidos para deslizamento não lubrificado ou desgaste por partículas duras geralmente são muito altos para aplicações práticas na engenharia. Na maioria dos projetos tribológicos, a lubrificação é utilizada para reduzir a taxa de desgaste. O efeito da lubrificação na redução do desgaste é mais significativo do que seu efeito no atrito, e o aumento da vida útil resultante da redução do desgaste é geralmente mais importante do que a redução das perdas por atrito. Mesmo uma lubrificação menos eficaz pode reduzir a taxa de desgaste em várias ordens de grandeza. À medida que a espessura do filme lubrificante aumenta, indo desde o limite até a lubrificação hidrodinâmica, o valor de K diminui rapidamente. Nos componentes lubrificados hidrodinamicamente de motores automotivos modernos, valores de K tão baixos quanto 10^{-19} são alcançados. [35]

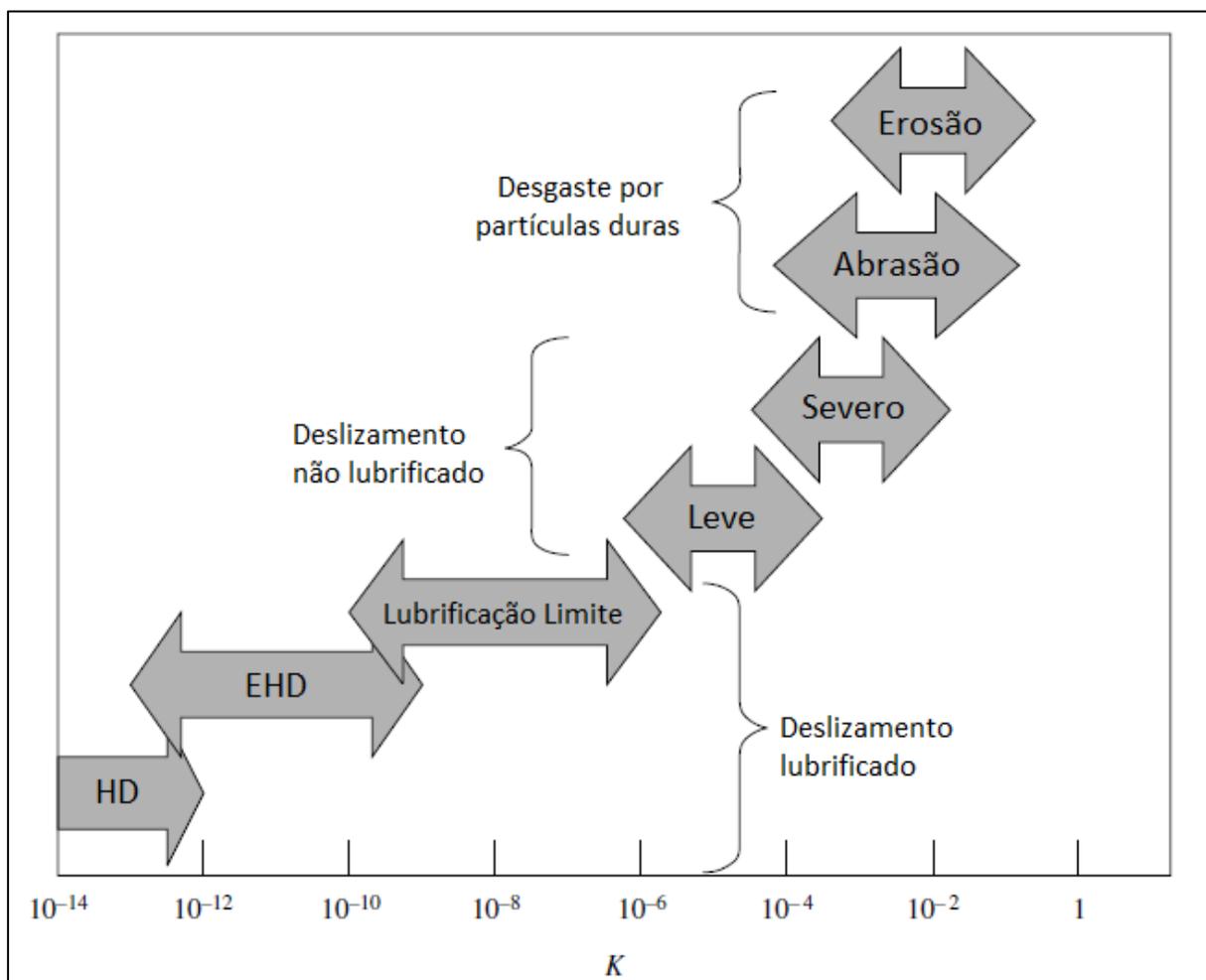
Podendo se apresentar como leve ou severo, dependendo diretamente das condições de aplicação: tipo de contato, temperatura, pressão, velocidade, carregamento, entre outras. Na tabela 2 são mostradas as distinções entre as características do desgaste que levam a classificação entre leve e severo.

Tabela 2 – Características de desgaste leve e severo.

	Desgaste Leve	Desgaste Severo
Taxa de Desgaste	Baixo	Alto (tipicamente 100-1000x maior que aquelas observadas em desgaste leve).
Morfologia da Superfície	Superfícies suaves (Podendo ser mais suave que a original)	Superfícies Ásperas (rugosidade mais elevada que a original)
Debris	Pequenas partículas de óxido com diâmetro médio de 0,01mm	Partículas metálicas grandes e grosseiras com diâmetro médio acima de 0,1mm

Fonte: adaptado de [28].

Figura 11 – Representação esquemática da faixa de coeficiente de desgaste K exibida em diferentes condições de desgaste. HD = lubrificação hidrodinâmica; EHD = lubrificação elastohidrodinâmica



Fonte: adaptado de [16].

3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE DE DESGASTE EM METAIS

Para Hutchings e Shipway, durante o desgaste, devido ao contato deslizante, as falhas se tornam aparente das seguintes maneiras: mudanças microestruturais no material logo abaixo da superfície desgastada, associada a deformações mecânicas e ao histórico térmico devido a dissipação de energia de atrito; variação química entre a camada desgastada e o resto do material; detritos que são excretados da área de contato [28]. Podendo o desgaste ocorrer tanto com a excreção de material, detritos, quanto pelo deslocamento de material, Stachowiak e Batchelor evidenciaram a necessidade de um estudo fundamentado, no mínimo, em dois distintos métodos de análise. [21]

Ao analisar o desgaste, frequentemente se faz uma comparação entre a medida de desgaste tomado e a exposição às condições que levam a este desgaste. Usualmente, a medida de desgaste é dada pelo volume removido do material, ou pela massa removida. [22] A comparação entre materiais desgastados pelo meio de mudança de massa pode ser inconclusiva se não levada em consideração a possível mudança de geometria do material, uma vez que desgaste também se dá por descolamento. [21] A exposição ao desgaste pode ser definida de diversas formas como: tomada de tempo de exposição às condições em que o desgaste ocorre, distância de deslizamento e energia dissipada. [16]

Ludema [36] destaca que a complexidade dos fenômenos de atrito e desgaste exerce grande influência na metodologia da pesquisa. Para o autor, um modelo de que leve em consideração muitos parâmetros dificulta a análise dos resultados obtidos. Estudos mais enxutos e focados podem inferir em resultados mais claros e comparáveis aos já apresentados na literatura. O modo em que ocorre a interpretação das relações entre distintos parâmetros leva a criação de uma metodologia. Mesmo que em primeiro momento tal metodologia não forneça um modelo tribológico preditivo, é de grande valia prática. Assim, se justifica uma abordagem com um número reduzido de parâmetros, baseada no sistema onde ocorre o desgaste. Inicialmente, uma observação a respeito da mecânica do contato é dada como ponto de partida para esta análise e posteriormente estuda-se a natureza dos materiais. São quatro as dificuldades físicas relacionadas ao estudo do contato descritas por Stachowiak [16]: Geometria do contato, efeitos do sistema tribológico, resposta dos materiais a estresses tribológicos e tribometria.

1. Geometria do contato: as medições de amostras, em grande parte, são dificultadas por seu tamanho ou pelo local onde estão localizadas o que impõe uma condição de análise indireta, através de recriação das interações mecânicas e físico-químicas. [16] [37]

2. Efeitos do sistema tribológico: Uma vez que os elementos que compõem o sistema tribológico agem de maneira simultânea nem sempre é claro qual dos elementos tem o controle da ação. Os elementos que compõem o sistema tribológico são: (a) maquinário ou dispositivo mecânico que através de suas particularidades tem tanta influência quando os materiais em contato; (b) primeiros corpos, materiais em

contato; (c) terceiro corpo, detritos entre os corpos que introduz um novo atrito através do movimento relativo e acarreta deformações locais [16]

3. Resposta dos materiais a solicitações tribológicas: os materiais respondem às solicitações locais e às tensões transmitidas principalmente por deformações plásticas, mas também por fraturas e ao mecanismo correspondente. Tais deformações são respostas às solicitações tribológicas, como temperatura, pressão hidrostática e gradientes de cisalhamento. [38] [39]

Tribometria: quando obtidos através de tribometria, os dados são de difícil extrapolação pois não representam verdadeiramente as condições particulares de ocorrência do desgaste [40] [41] Tribômetro é o aparato mecânico o qual tem por finalidade simular as condições de contato em diversos ambientes. Durante o ensaio, o dispositivo auxilia na tomada de medições dos efeitos do contato exercido a partir da aplicação de forças tangenciais. Valores de aplicação da força tangencial distintos geram, possivelmente, a introdução de efeitos de natureza do contato diferentes. Também, levam a uma área de contato particular. Relações de contato observadas podem variar em 60% com a introdução de terceiro corpo para mesmas forças de aplicação. [42] [43]

3.2.1 Metodologia de Planejamento

Testes acelerados de desgaste devem simular as condições operacionais em que o desgaste ocorre. Asseguradas essas condições, pode-se chegar empiricamente a um fator de aceleração entre testes simulados e os testes funcionais, assim testes adicionais possam ser minimizados. Padronização, repetibilidade, tempo curto e técnicas simples para medição e classificação são características desejáveis. [22] Bayer destaca que os testes de simulação de desgaste são divididos em três níveis, e são distinguidos por nível de simulação, maneira pela qual é utilizado e pela correlação com aplicação, os níveis são apresentados na tabela 3. [30]

Tabela 3 – Níveis de simulação em testes de desgaste.

Nível de simulação	Uso	Correlação com a aplicação
Primeira-ordem (replicação da natureza geral da situação de desgaste)	Obtenção das informações gerais	Geralmente pobre, exceto em termos gerais, frequentemente não é adequado a engenharia
Segunda-ordem (replicação dos principais parâmetros)	Obtenção de informações de engenharia quando os parâmetros de influência são entendidos	Geralmente bom, correlação tende a melhorar com o nível de compreensão sobre efeitos dos parâmetros chave, frequentemente é adequado a engenharia
Terceira-ordem (replicação da maioria dos parâmetros)	Obtenção de informações de engenharia quando os parâmetros de influência não foram totalmente entendidos	Bom, correlação tende a diminuir com a falta de replicação

Fonte: [44]

3.2.1.1 Simulação

Uma simulação efetiva é aquela que garante que o mecanismo de desgaste observado em laboratório seja o mesmo apresentado pelo sistema de estudo. Uma vez que a natureza do desgaste é complexa, o desenvolvimento de testes simulado é dependente de uma sucessão de tentativas e erros e está associada diretamente à experiência e capacidade do desenvolvedor. A funcionalidade do teste passa pela garantia de similaridade entre o sistema real e o sistema reproduzido em laboratório. A geometria em si é um fator crítico para o ensaio e depende da função a ser simulada. Comumente, em testes para contato deslizantes realizados em laboratório adota-se: (1) contato de ponto, como bola-no-disco; (2) contato de linha, cilindro-no-disco; e (3) contato em conformidade, plano-sobre-plano. Existem vantagens e desvantagens para cada uma destas geometrias de contato, e deve-se levar em consideração movimento, carga, velocidade, lubrificação, ambiente operacional. [22]

3.2.1.2 Aceleração

A aceleração dos testes pode ser controlada pela variação de fatores como carga, velocidade, temperatura e diminuição da quantidade de agentes lubrificantes. O que em primeiro momento pode resultar em agilidade e economia de gastos, se não

bem abordados pode levar a mudança dos mecanismos de desgaste presentes e invalidar os testes. [45]

3.2.1.3 Preparação de amostras

A preparação das amostras desempenha um papel crucial, tanto na reprodução quanto na repetibilidade dos resultados. Os cuidados e preparos das amostras dependem do material em teste. Para materiais metálicos, aspectos como rugosidade, geometria da amostra, microestrutura, presença de camadas superficiais e dureza devem ser controlados em ambos os materiais de contato.

3.2.1.4 Atrito e desgaste

Outro fator a ser controlado é o coeficiente de atrito que é obtido pela razão entre a força de atrito pela força normal aplicada. O corpo estacionário do sistema é sobreposto ao corpo móvel e a força necessária para iniciar o movimento é medida com auxílio de strain-gages.

Algumas das técnicas de medição de desgaste são: perda de massa, perda de volume, medição das geometrias desgastadas. Medições indiretas também se fazem comuns, como tempo até ocorrência do desgaste, carga necessária para causar desgaste severo ou mudança de acabamento superficial. Medições por perda de massa mostram melhores resultados para grandes quantidades de desgaste e apresentam duas limitações básicas. A primeira limitação é atribuída à relação entre o desgaste e volume de material deslocado ou removido, caso haja variação na densidade dos materiais a serem comparados, pode ocorrer resultados diferentes que impossibilitem a comparação. A segunda, medição por massa não considera o deslocamento do material, uma vez que a amostra pode ganhar massa por transferência as medições são validas apenas para densidades constantes e quando transferência não ocorre durante o processo. [22] [46] [47]

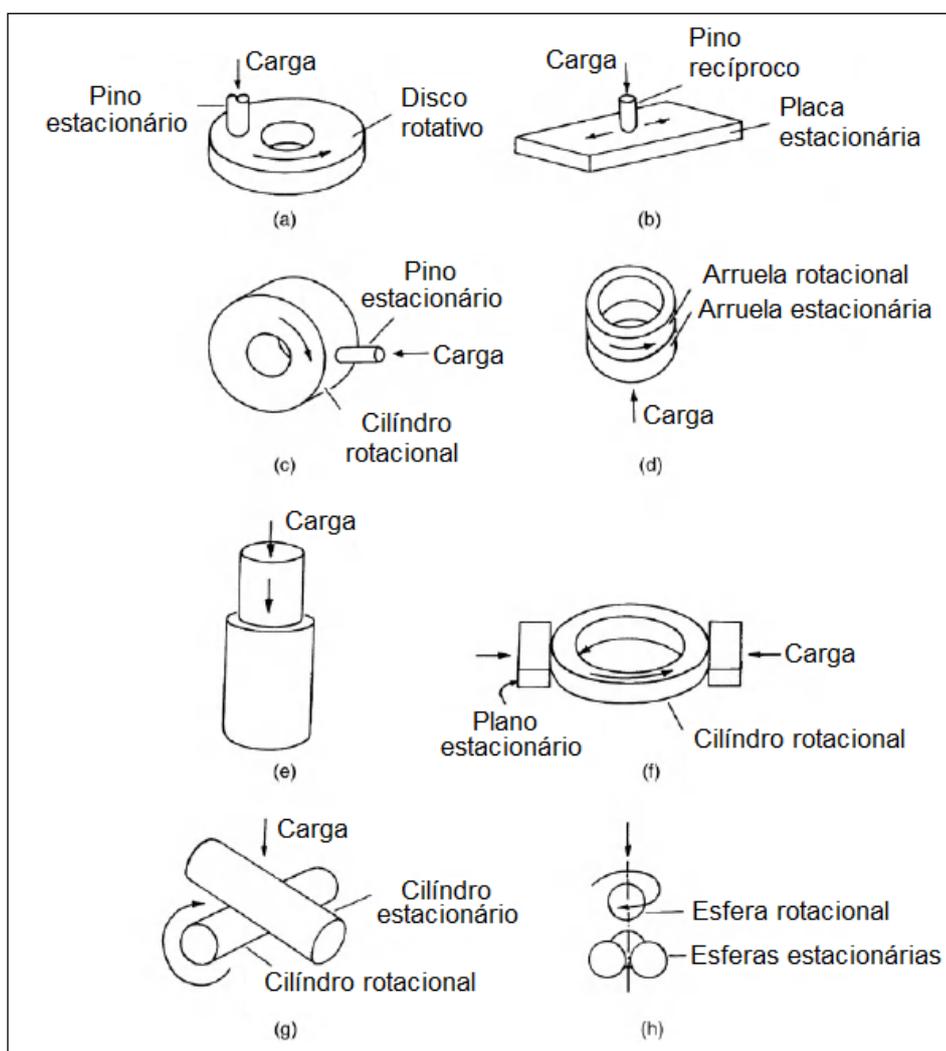
A solução destes problemas foi abordada por Stachowiak e Batchelor [21], os autores sugerem que sempre que forem realizadas medições de massa sejam também realizadas medições de geometria das amostras, com objetivo de determinar se houve desgaste por deslocamento de material. Alguns outros métodos de análise de desgaste são apontados por Bhushan [22], Microscopia Eletrônica de Varredura

(MEV), Microscopia de Varredura por Tunelamento (STM) e Microscopia por Força Atômica (MFA)

3.2.2 Testes de desgaste

Neale e Gee [48] apontam para a existência de mais de 400 padrões de testes adotados mundialmente. Embora, acreditam que o número real de variações seja menor que 100, devido a alguns testes configurarem apenas leves distinções entre eles.

Figura 12 – Esquemático de geometrias de interface típicas usadas para fricção deslizante e testes de desgaste: (a) pino no disco, (b) pino no plano, (c) pino no cilindro, (d) arruelas de encosto, (e) pino na bucha, (f) planos retangulares em cilindro giratório, (g) cilindros cruzados e (h) quatro esferas



Fonte: adaptado de [22].

As variações de interfaces mais comumente utilizadas em testes de desgaste são apontadas por Bhushan [22], figura 12, como: (a) pino no disco, onde o pino é mantido estático enquanto o disco gira. Algumas variações adotam esfera, cilindro de ponta hemisférica, cilindro de extremidade plana ou paralelepípedo no lugar do pino; (b) pino sobre o plano, onde um pino se move sobre um plano estacionário (c) pino no cilindro, semelhante ao pino no disco, diferenciado pelo carregamento perpendicular ao eixo de rotação; (d) arruelas de encosto, onde a superfície plana de uma arruela gira sobre a superfície plana de uma arruela estática; (e) pino na bucha, onde há um carregamento axial agindo sobre direção radial. Neste dispositivo pode-se obter o coeficiente de atrito calculando razão entre a força axial e a força resultante da expansão radial do material; (f) planos retangulares em cilindro giratório, onde dois planos retangulares são carregados perpendicularmente ao eixo de rotação (g) cilindros cruzados, onde um cilindro sólido ou oco serve com objeto de desgaste estacionário enquanto um cilindro rotativo age como membro de desgaste; e, (h) quatro esferas, em formando um tetraedro com a esfera superior rotacionando enquanto três esferas inferiores permanecem estáticas.

3.3 SISTEMAS DE FIXAÇÃO

Sistemas e dispositivos de fixação representam uma parte fundamental da indústria metalmeccânica, em especial nos processos de usinagem. [49] Não raramente, sua importância é negligenciada, ou até mesmo menosprezada, durante o processo produtivo. Áreas de planejamento produtivo, e de seus custos relacionados [50], geralmente não consideram de forma adequada a importância de dispositivos de fixação para produtividade, qualidade e eficiência. Sistemas de fixação tem por principais funções [51]:

- a. Definir localização, posição e orientação, da peça fixada na área de trabalho da máquina-ferramenta.
- b. Assegurar fixação no local definido, mesmo que sob influência de esforços mecânicos estáticos ou dinâmicos e variações térmicas.
- c. Orientar tais esforços e tê-los como parte integrante da estrutura da máquina.

Embora haja dispositivos cujo design permita a mudança dos pontos de fixação durante o processo de usinagem é mais usual a existência de pontos fixos, e sua funcionalidade está vinculada a retidão desta determinação. [52] A precisão, desempenho e repetibilidade estão intimamente ligados ao modo de fixação, a quantidade de grampos, pontos de contato como pinos de apoio e elementos guia. [53] Tais elementos de fixação são parte significativa do processo sendo sua fabricação e manutenção essenciais a qualidade dos produtos. [54] Falha de geometria dos elementos que compõem um dispositivo, e que levem a uma pobre fixação ou alinhamento dos datum¹; desalinhamento entre a peça e a referência são chamados de erros de localização. Sobretudo causados pelo desvio da posição de contato entre o elemento localizador e a superfície da peça de sua especificação nominal. [55]

A utilização de sistemas de fixação manifesta duas notáveis vantagens. A primeira sendo a eliminação de controles posicionais para a localização individual de cada uma das peças, resultando em significativa economia de tempo total de fabricação. A segunda, partindo de uma simplificação na configuração do trabalho do operador, através do uso de sistemas de fixação, o processo tem sua taxa de produção aumentada, e tornando-o menos custoso. [56]

Outras vantagens ligadas diretamente ao aumento da taxa de produção podem ser descritas como: aumento na precisão de usinagem; diminuição de despesas em controle dimensional devido à uniformidade de fabricação; expande a capacidade e versatilidade das operações; e possibilita a automatização parcial ou total da máquina usada na operação. [56]

3.3.1 Elementos de fixação

Para atingirem a finalidade de fixar e orientar um componente, os sistemas de fixação usualmente apresentam alguns elementos: [57] A visualização conceitual pode ser facilitada pela apreciação da figura 13.

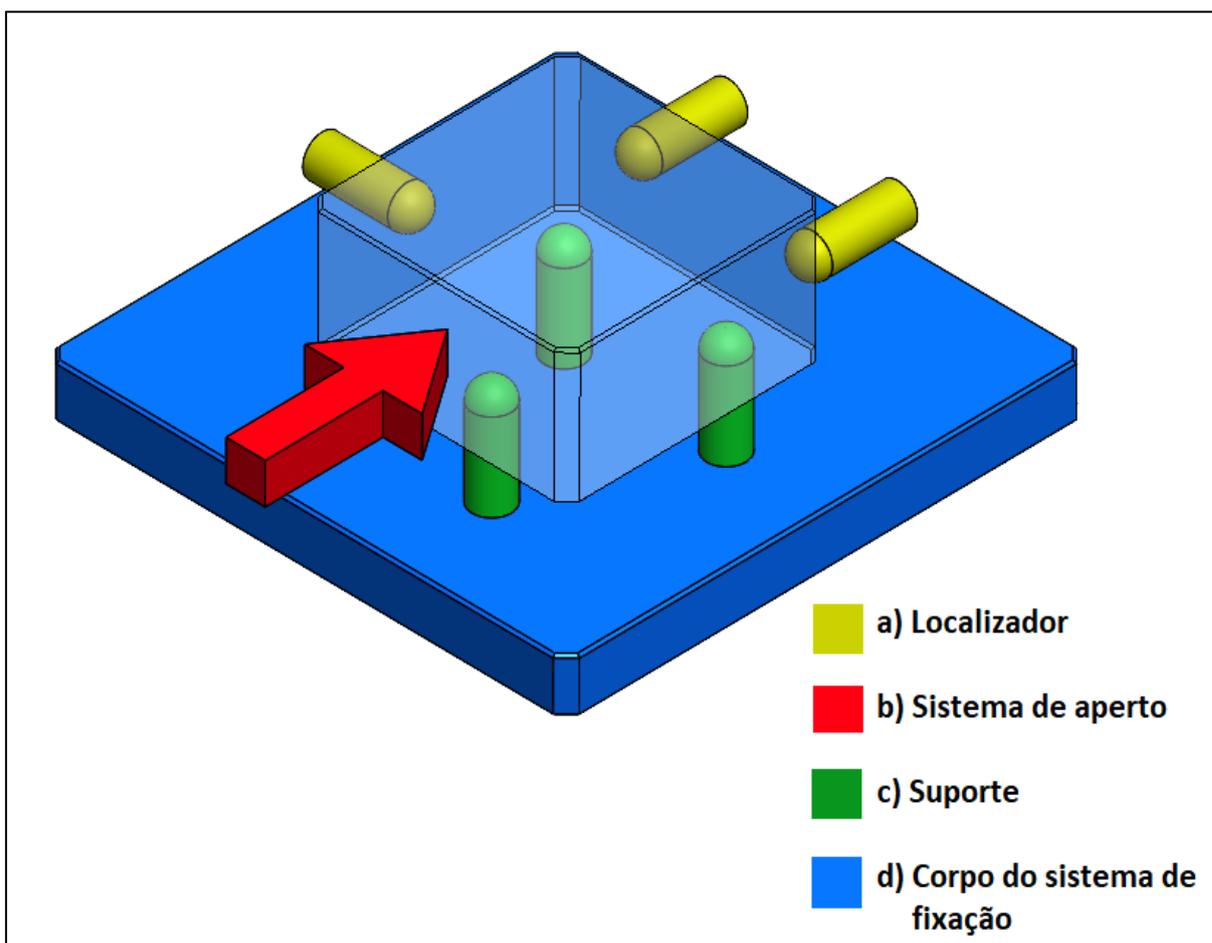
- Localizadores: estabelece posição e restringe o movimento do componente em determinada direção. Embora usualmente fixo, os localizadores também

¹ Datum - plano teórico exato, eixo ou localização do ponto ao qual tolerâncias dimensionais são referenciadas dentro do sistema GD&T.

podem apresentar alguma mobilidade para que se adaptem quando exista grande variação no dimensional da peça a ser fixada.

- Sistema de aperto: instrumento pelo qual a peça é deslocada até os localizadores. A força de fixação oriunda deste mecanismo, quando aplicada sobre a peça, garante que a peça não se desloque quando afetada por forças externas ao sistema.
- Suportes: componentes pelos quais pode-se restringir ou prevenir deformações oriundas das forças aplicadas no processo. Podem ser fixos ou apresentarem regulagem.
- Corpo do sistema de fixação: estruturalmente corresponde ao principal elemento do sistema de fixação. Garante a vinculação espacial entre todos os outros elementos.

Figura 13 – Elementos de fixação: a) localizador; b) sistema de aperto; c) suportes; d) corpo do sistema de fixação.



Fonte: o autor.

A fim de manter a estabilidade da peça de trabalho durante um processo de usinagem, um dispositivo de fixação deve atender a vários requisitos para desempenhar plenamente suas funções. [57]

Considera-se que uma peça de trabalho está restrita cinematicamente quando não pode se mover sem perder contato com pelo menos um localizador. A peça é limitada por um conjunto de localizadores devidamente posicionados para que a usinagem seja viável. Erros de localização devido a localizadores e superfícies de localização da peça de trabalho devem ser minimizados a fim de posicioná-la de maneira precisa e única.

A peça deve estar totalmente restrita em todos os momentos para evitar qualquer movimento. Uma vez localizada, os elementos de fixação devem fornecer forças de travamento suficiente para manter a peça de trabalho no lugar. Uma peça fixada deve ser capaz de permanecer em equilíbrio estático para suportar todas as possíveis forças ou distúrbios inerentes ao processo.

A deformação da peça de trabalho é inevitável devido à sua natureza elástica ou plástica e às forças externas impactadas pela atuação da fixação e operações de usinagem. A deformação deve ser limitada a uma magnitude aceitável para atingir as especificações de tolerância.

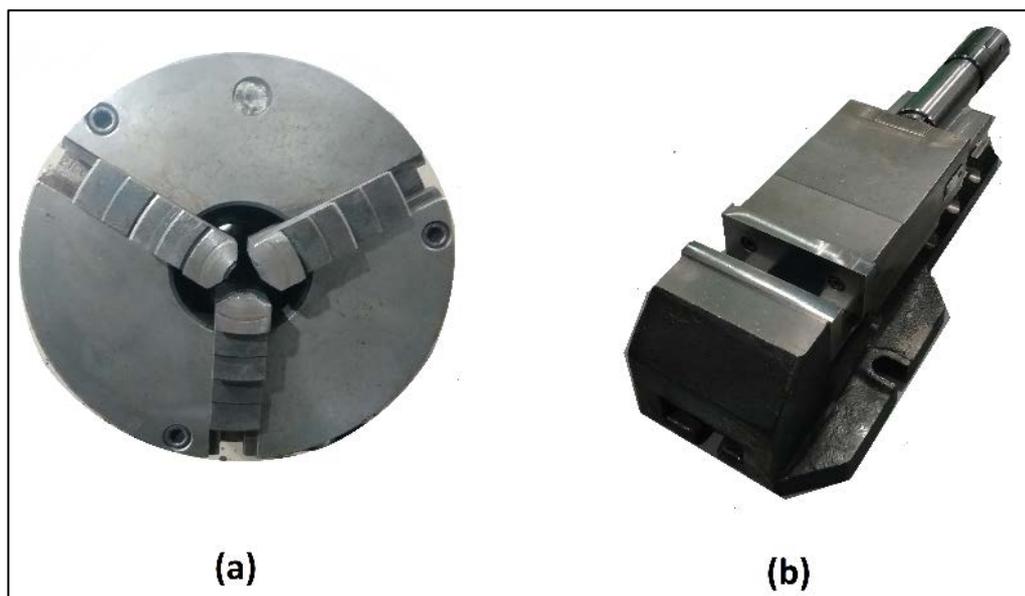
A restrição geométrica garante que todos os elementos de fixação tenham acesso à superfície de referência. Eles também garantem que os componentes de fixação não interfiram nas ferramentas de corte durante uma operação de usinagem.

3.3.2 Tipos de fixação

Conceitualmente pode-se dividir em 3 os tipos de fixação: de aplicação geral, dedicado ou flexível. [56]

Os dispositivos de aplicação geral, são genericamente usados na indústria quando o número de peças é pequeno, ou a geometria básica do componente corresponde ao do próprio dispositivo. Morsas são usadas nas fresas quando o item a ser usinado é prismático ou, quando a peça é cilíndrica, uma placa de castanhas é utilizada no torno mecânico, na figura 14 é mostrado: (a) placa de castanhas; (b) morsa.

Figura 14 – a) placa de castanhas para fixar peças cilíndricas; b) morsa para fixar peças prismáticas.



Fonte: o autor.

Quando se faz necessário, seja por produtividade, dificuldade de fixação, ou outro motivo, pode-se aplicar um sistema de fixação dedicado. Projetado unicamente para garantir, ou auxiliar, a fixação de um item específico a ser usinado. Pouca ou nenhuma flexibilidade é possível neste tipo de fixação. figura 15 e figura 16 ilustram os dispositivos fixação de componentes agrícolas, proveniente da fundição.

Figura 15 – Dispositivos especiais para rebarbação e peças a serem fixados.



Fonte: o autor.

Figura 16 – dispositivo para usinagem do pedal de freio.



Fonte: o autor

Algumas peças a serem fixadas apresentam características comuns umas às outras que podem ser aproveitadas e condicionadas em um projeto que garanta, com apenas pequenas modificações, a fixação de múltiplos itens. Na figura 17, está exemplificado um sistema de fixação flexível para garras robóticas que fixa e movimenta barras cilíndricas em 64 configurações diferentes apenas trocando o localizador-fixador prismático. Na figura 18, está a garra robótica, onde os prismas são inseridos.

Figura 17 – Prisma para garra robótica.



Fonte: o autor.

Figura 18 – Garra robótica

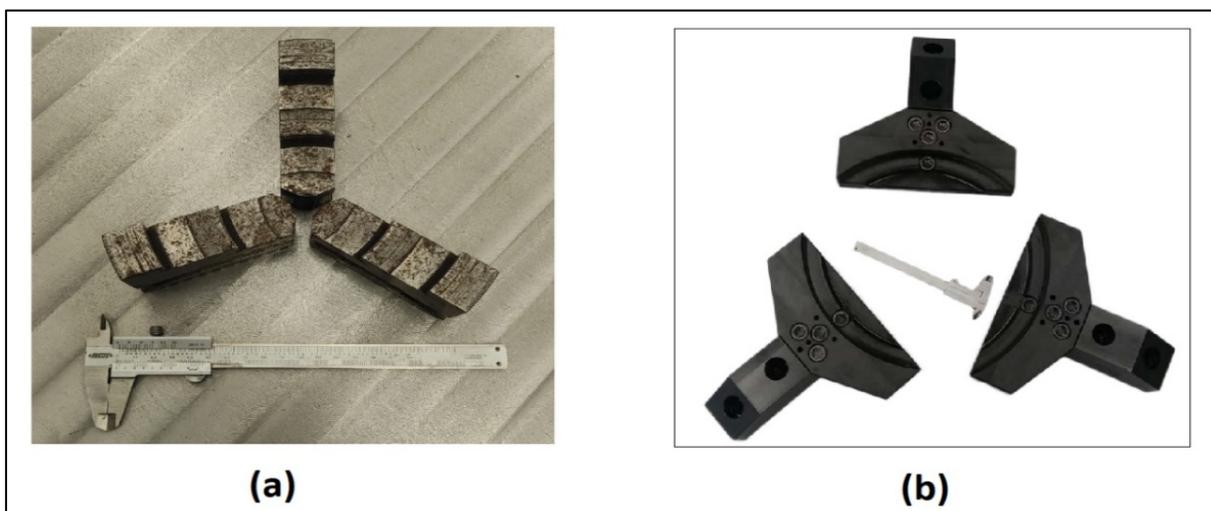


Fonte: o autor.

3.3.3 Castanhas

Castanhas é o termo como é conhecido os mordentes móveis das placas de tornos mecânicos. Na figura 19, estão exemplificados dois conceitos dos tipos de fixação em castanhas, como apresentados anteriormente: a) geral; b) dedicado. Tem como intuito tanto a função de localizar como de fixar a peça a ser usinada no torno, copiando a forma superficial (externa ou interna) da peça. Na figura 20 está o conjunto de castanhas especiais alocadas na placa, pronta para fixar a peça.

Figura 19 – a) castanhas escalonadas de aplicação geral b) castanhas especiais para aplicação dedicada.



Fonte: o autor.

Figura 20 – Placa de castanhas especiais.



Fonte: o autor.

3.3.4 Contra-pontos

Outro aparato que auxilia na fixação, restringindo movimento da peça a ser usinada no torno são os chamados contra-pontos. Eles têm função de dar suporte a peça quando sofre com forças oriundas da usinagem. Também, quando a peça é posicionada entre dois contra-pontos tem função de arraste da peça, uma vez que ela não está fixada pelas castanhas da placa. Contraponto de aplicação geral está ilustrado na figura 21.

Figura 21 – Contra ponto.



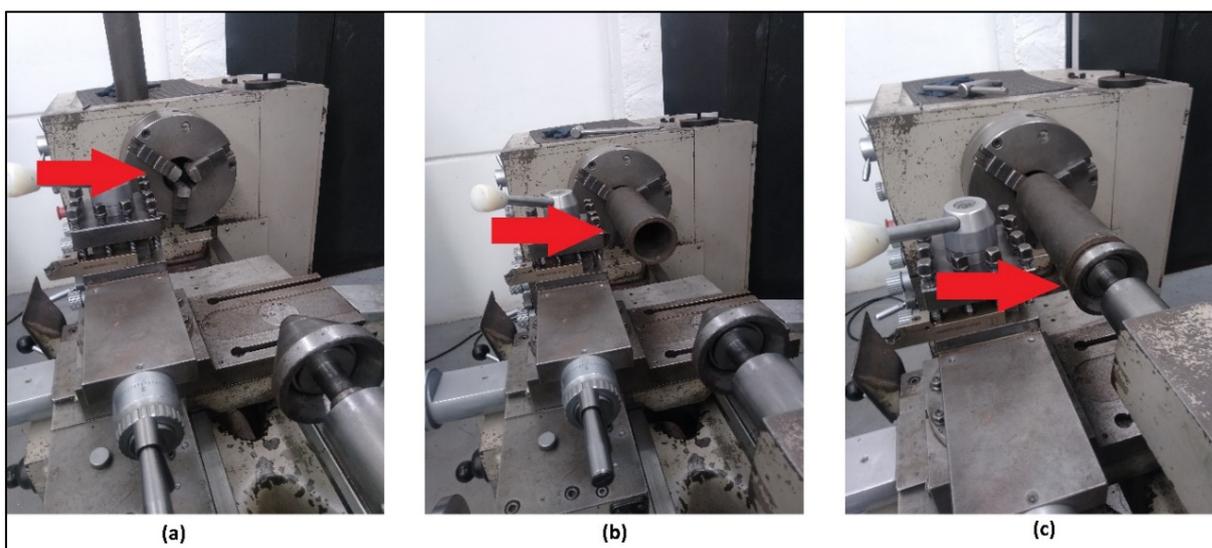
Fonte: o autor.

3.4 DESGASTE EM ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

A manufatura de componentes de ferro fundido para as indústrias agrícola, automobilística e de mineração passa por várias etapas até chegar ao seu destino. Podem ser consideradas as mais importantes como fundição, usinagem e montagem. Enquanto a fundição concede a forma inicial que uma componente vai ter, e a montagem finaliza o produto, é no processo de usinagem que as dimensões e especificações necessárias para a montagem são efetivadas. É durante a etapa da usinagem que o fenômeno estudado nesse trabalho é observado. Mais especificamente, o desgaste que ocorre devido ao contato entre a peça a ser usinada e os elementos que a fixam na máquina operatriz. Este tipo de contato ocorre em diferentes elementos, porém serão apontados aqui como exemplo o contato entre um componente de ferro fundido cinzento – DIN GG20 e um contra ponto de aço – SAE 1045.

Antes de se iniciar a usinagem, as peças são posicionadas e fixadas na máquina operatriz. A sequência deste trabalho inicia pela abertura da placa de castanhas, passa pelo posicionamento da peça a ser usinada entre as castanhas, e segue com o encosto do contra ponto, tal sequência é ilustrada na a figura 22, por fim a peça é usinada e um novo ciclo se inicia.

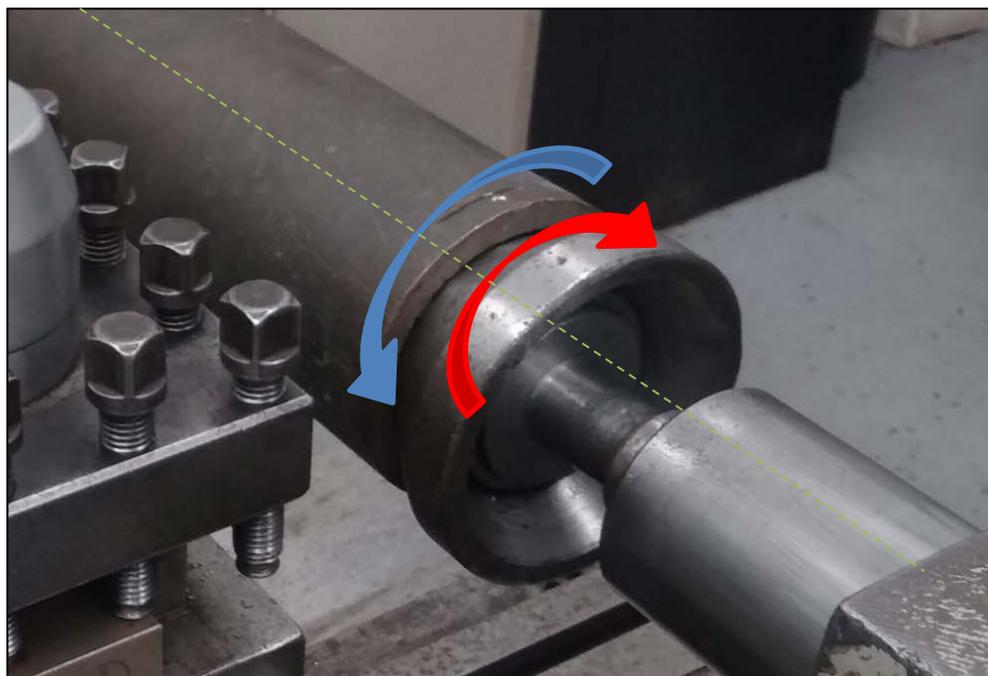
Figura 22 – Sequência de fixação no torno; (a) abertura da placa. (b) posicionamento da peça a ser usinada. (c) encosto do contra ponto.



Fonte: o autor.

Durante todas as fases da sequência mencionada, um movimento relativo entra as superfícies em contato ocorre. Está ilustrada na figura 23 uma das zonas que ocorrerem esse movimento, que acontece quando qualquer um dos elementos se mantem estático e o outro rotaciona.

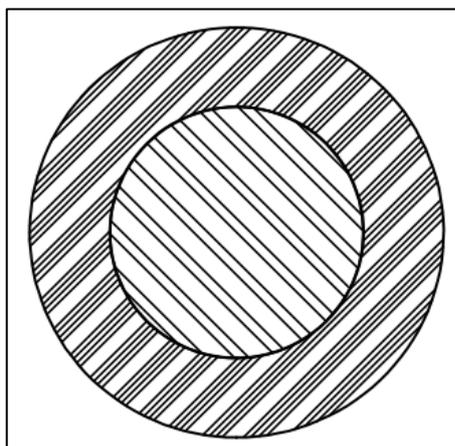
Figura 23 – Movimento relativo entre as superfícies em contato.



Fonte: o autor.

A Zona formada entre esses contatos pode ser melhor observada na Figura 24, que representa o desenho em corte transversal dessas regiões, pode-se perceber a formação de contatos superficiais do tipo côncavo-convexo.

Figura 24 – Corte transversal das regiões em contato.



Fonte: o autor.

Devido a repetidos ciclos os elementos de fixação começam a apresentar desgaste. Essa perda de material pode ser percebida visualmente, está ilustrada na figura 25 contra-pontos na condição: (a) novo e (b) usado.

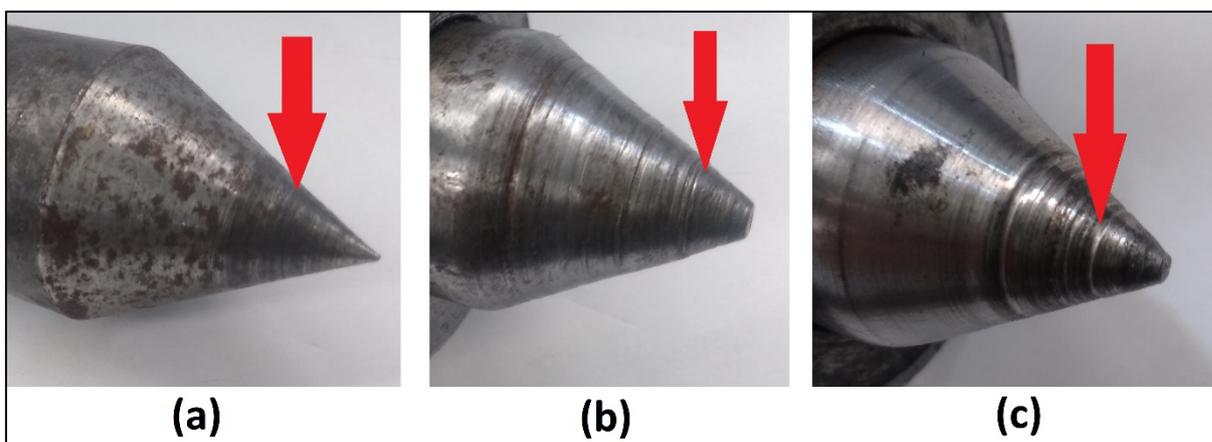
Figura 25 – Contra-pontos nas condições (a) novo (b) usado.



Fonte: o autor.

Devido a continuidade deste movimento relativo e ao desgaste associado, os elementos de fixação começam a deixar de cumprir suas funções de posicionamento e fixação corretamente. Sendo assim, conforme a severidade do desgaste o elemento de fixação antigo é substituído por um novo. São mostradas na figura 26 as marcas da ocorrência desse desgaste quando em contato com peças a serem usinadas.

Figura 26 – marcas de desgaste em diferentes contra-pontos.

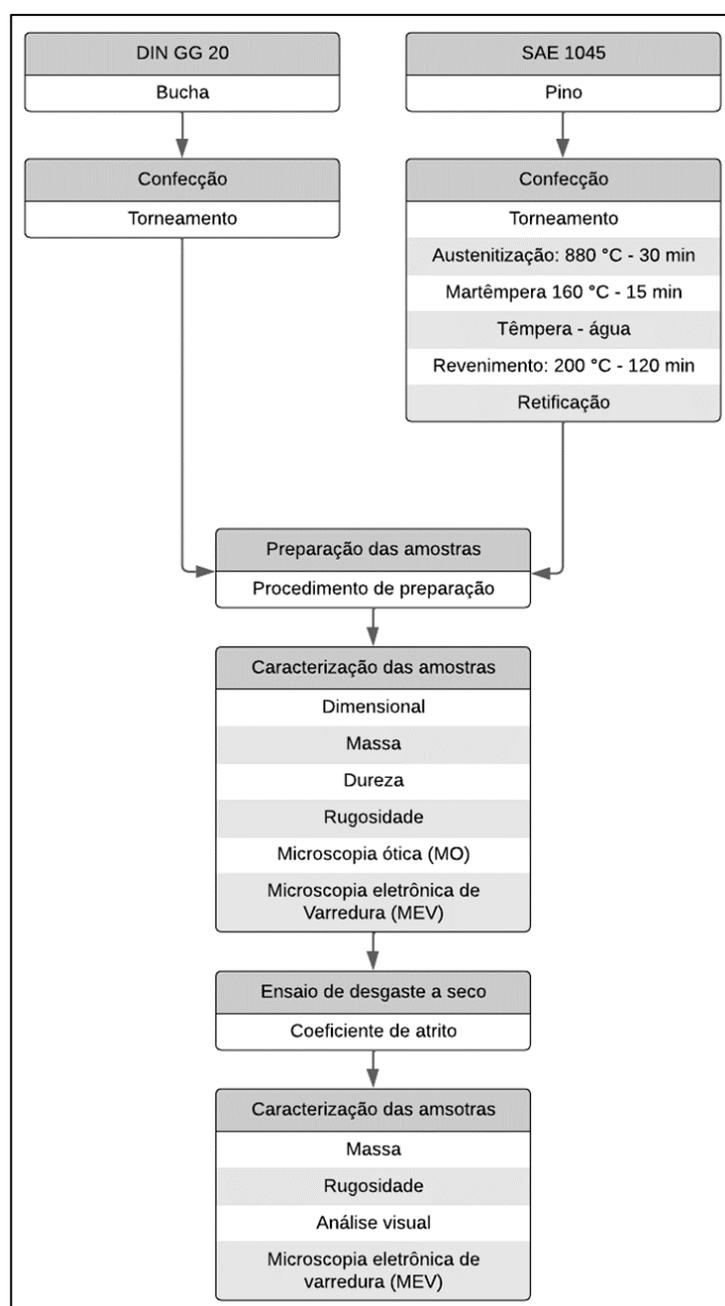


Fonte: o autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão relatados os procedimentos metodológicos para a execução do ensaio de desgaste e medições. Também serão abordados os equipamentos utilizados, em especial o tribômetro utilizado no estudo, bem como os passos antecedentes aos ensaios tomados de modo a aferir o equipamento. O roteiro seguido para a execução dos ensaios é apresentado na figura 27.

Figura 27 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: o autor.

Dos materiais ensaiados neste estudo SAE 1045 e DIN GG20 são confeccionados dois modelos de corpo de prova pino e bucha, respectivamente. A parte em SAE 1045 passa pelos processos de torneamento, tratamento térmico e posterior retificação da superfície. Enquanto sua contraparte é apenas torneada. Isto se dá pela simulação dos processos reais em que o par passa na situação problema. Após manufatura, o par passa por um procedimento de lavagem mecânica e posterior etapa de limpeza via banho ultrassônico

Para a carga de operação de 5 kg, o levantamento dos dados foi realizado em 8 intervalos planejados para a tomada da massa e rugosidade até que chegasse em 200 mil ciclos de operação. O ensaio de desgaste se repetiu em triplicata e seus dados são mostrados separadamente ao longo do próximo capítulo, juntamente com as considerações quanto aos ensaios preliminares.

Já a tomada do coeficiente de atrito no equipamento conta com procedimento próprio em ciclo de operação distinto. Enquanto no ensaio de desgaste o pino é rotacionado em seu próprio eixo em 360° sempre no mesmo sentido de giro, para a determinação do coeficiente de giro a amostra é rotacionada um total 180° , isto é um deslocamento em 90° para esquerda em relação ao ponto central e um retorno até 90° para em relação ao mesmo ponto central.

4.1 CONFIGURAÇÃO DO TRIBÔMETRO BUCHA-PINO

O tribômetro utilizado nesta pesquisa, figura 28, foi desenvolvido no Campus Caxias do Sul do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS através da dissertação de mestrado intitulada “Tribômetro para avaliação de desgaste de sistemas bucha-pino” de autoria de Evandro Benincá, sob a orientação de Alexandre Luis Gasparin e coorientação de André Zimmer pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais – PPG-TEM. O equipamento foi idealizado para estudar desgaste entre superfícies em contato do tipo côncavo-convexa, mais especificamente entre dois cilindros conscritos, relação esta encontrada entre pinos e buchas. O intuito do projeto mencionado foi desenvolver um equipamento capaz de reproduzir o desgaste seguindo essas relações de contato, uma vez que não há equipamento no Brasil similar e que por fim assegurou registro de patente para autor e instituição, BR102019006518-4. Por se tratar de um equipamento único, ele não é regido por nenhuma norma vigente.

Figura 28 – Tribômetro desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Engenharia de Materiais PPG-TEM



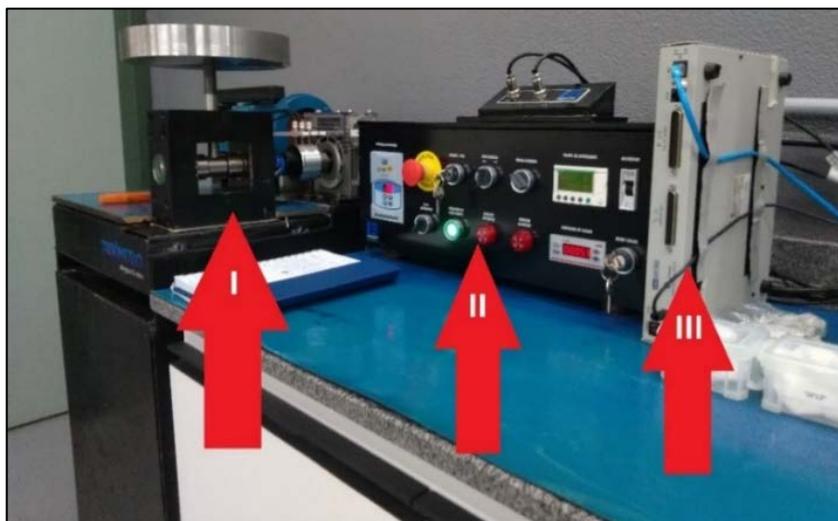
Fonte: o autor.

O equipamento é integrado por três sistemas distintos: porta amostra, controle, aquisição de sinais, identificados na figura 29.

- I. **Sistema porta amostra:** tem função posicionar e fixar as amostras durante o ensaio, também, garante posicionamento correto das amostras em posição única a fim de possibilitar a retirada para avaliação e posterior recolocação na mesma posição. É neste sistema que se aplica a força normal de contato por peso fixo ou ajustável mecanicamente.
- II. **Sistema de controle:** composto por controlador lógico programável – CLP modelo Zelio ligado ao um inversor de frequência modelo CFW10; motor indutivo trifásico de $\frac{1}{2}$ cv acoplado a redutor modelo GSA 51 com redução 20:1; três sensores indutivos; contador de ciclos Inova INV-9402, chave de seleção manual, alarme visuais e sonoros. Este sistema tem a função de orientar pensionamento e gerenciar o controle.
- III. **Sistema de aquisição de sinais:** é através deste sistema que se torna possível o processamento de dados e posterior leitura do coeficiente

de atrito. É composto por aquisitor de sinais Lynks ADS0500 conectado a um computador que processa os sinais das células de carga da força normal e de torque da Excel Sensores.

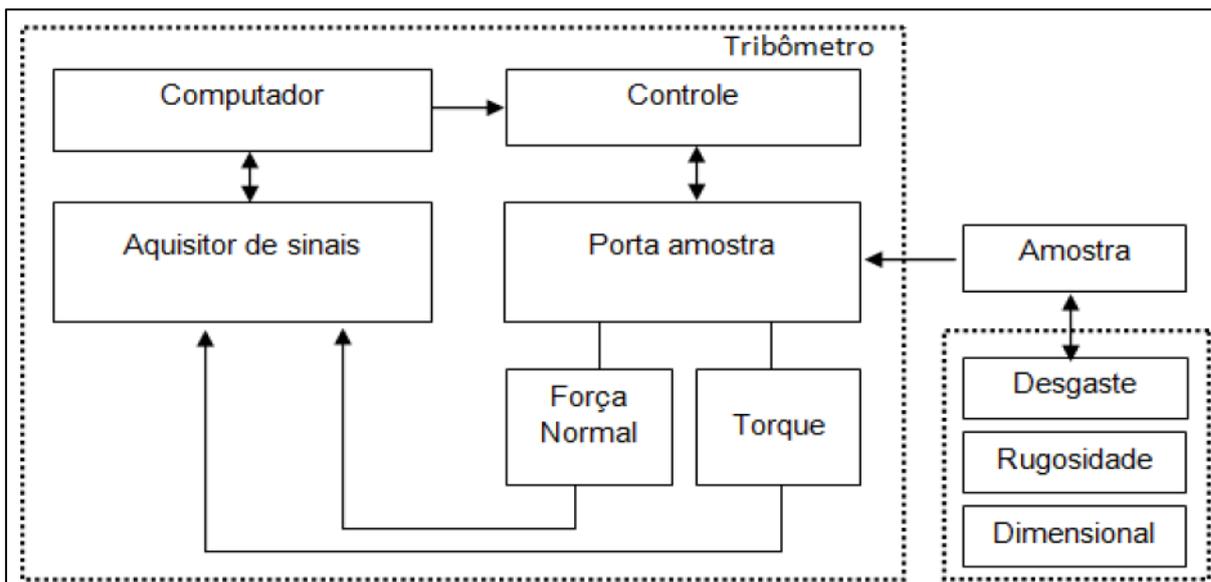
Figura 29 – sistemas do tribômetro: I) sistema porta amostra; II) sistema de controle; III) Sistema de aquisição de dados.



Fonte: o autor.

A representação esquemática do funcionamento do tribômetro é mostrada na figura 30. Devido a configuração do tribômetro, as tomadas de medida de desgaste, rugosidade e dimensional são feitas externas ao equipamento

Figura 30 – Representação esquemática do funcionamento do tribômetro.



Fonte: adaptado de [24].

Os parâmetros do inversor de frequência e acionamento do motor do equipamento utilizados durante os ensaios de desgaste estão dispostos na tabela 4.

Tabela 4 – parâmetros do inversor de frequência e acionamento do motor.

Parâmetro	Frequência do inversor	Boost de Torque	Tempo de aceleração	Tempo de desaceleração
Valores	9,0 Hz	30%	0,5 s	0,3 s

Fonte: o autor.

4.1.1 Ciclos de operação

Existem duas configurações de trabalho, quanto ao modo de giro do pino, possíveis programadas no equipamento. Pode-se ensaiar as amostras em modo contínuo, isto é, o pino gira 360° em relação a bucha que se mantém estática e sob uma força normal. Devido as limitações físicas do transdutor de torque, não é possível executar a medição do coeficiente de atrito enquanto nesse modo.

A segunda configuração estabelece um meio giro, um movimento parcial de vai e vem em total de 180°. É nesse modo que as medições do coeficiente de atrito do sistema bucha-pino são realizadas pois a limitação programada permite o acoplamento do transdutor de torque, que não seria possível no outro modo de operação.

4.1.2 Aferição do tribômetro

Os sensores de força e torque foram calibrados usando método de comparação entre sistemas já aferidos. A calibração do sensor de força normal segue a norma ABNT NBR ISO 376:2013, enquanto para o sensor de torque segue-se a norma ABNT NBR 12240:2013

Para o sensor de força utilizou-se de célula de carga de 500N com precisão de +/-1% de uma máquina universal de ensaios EMIC. O sistema utilizado no tribômetro Lynx conta com aquisitor de dados com possibilidade de aferição linear, que permite atrelar a variação de tensão na entrada do sensor a carga aplicada. Mediu-se a tensão nos sensores do aquisitor em intervalos iguais a cada 10N

registados na célula de carga. Obteve-se uma relação linear de 99,61% entre os valores.

Utilizou o mesmo método de comparação para o transdutor de torque, porém com um torquímetro de estalo com precisão de +/-2 N.m. Obteve-se uma relação linear de 99,86%.

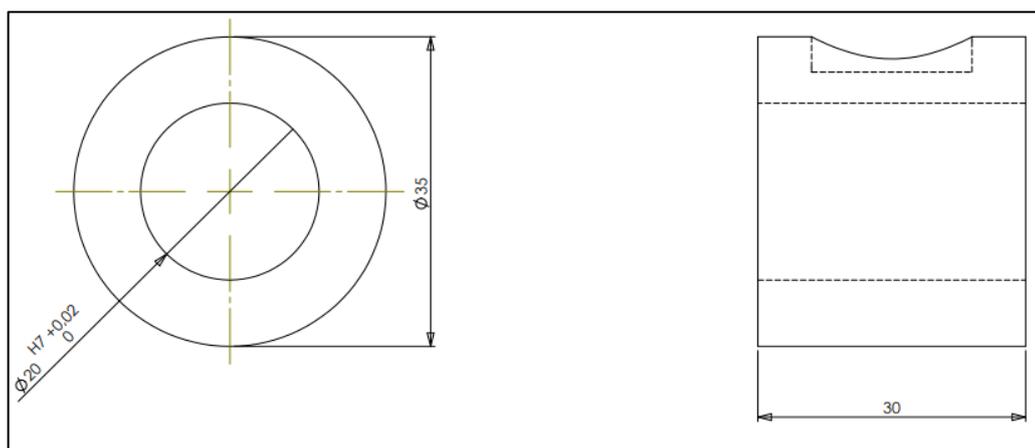
4.2 AMOSTRA

As amostras estão divididas em dois tipos: bucha e pino. As dimensões da bucha fabricada em ferro fundido cinzento DIN GG20 e pino fabricado em aço SAE 1045 estão apresentadas nas figura 31 e figura 32 respectivamente.

Embora existam tolerâncias dimensionais para a confecção das amostras, aqui é válido esclarecer que tais determinações seguem uma característica do projeto de aplicação de bucha-pino em que o idealizador do equipamento se propôs a estudar em um primeiro ensaio. Com exceção de rebaxos laterais que tem função de posicionar o pino no porta amostra e são parte essencial de localização, tais tolerâncias não são um requisito do equipamento, mas uma proposta que parte do pesquisador. Assim, para estes ensaios foram adotadas tolerâncias de folga máxima e folga mínima para relação entre os diâmetros do pino e da bucha. Folga mínima de 0,03 mm e folga máxima de 0,06 mm.

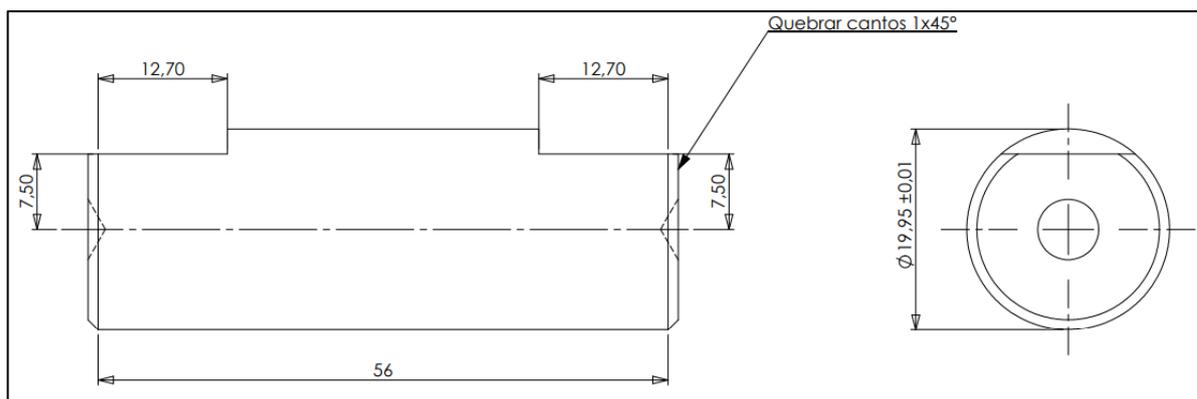
Para conferência das dimensões, foram usados micrômetro de tambor Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e súbido de comparação interno Digimess com resolução 0,01 mm. Todos as amostras apresentaram folga de 0,05 mm.

Figura 31 – dimensional bucha de ferro fundido GG20.



Fonte: [24]

Figura 32 – dimensional do pino de aço SAE 1045.



Fonte: [24]

4.2.1 Composição química

Os materiais utilizados para a confecção do pino e da bucha seguem composição química estabelecidas pelas normas NBR NM 87:2000 para aços e DIN EN 1561 para ferro fundido. As composições químicas admissíveis para ambos os materiais estão apresentadas nos quadros 1 e 2.

Quadro 1 – Composição química SAE 1045

SAE 1045	Composição química (%)				
	Carbono (C)	Silício (s)	Manganês (Mn)	Fósforo (P) máx.	Enxofre (S) máx.
1045	0,43-0,50	0,30-0,60	0,60-0,90	0,03	0,050

Quadro 2 – Composição química DIN GG20

DIN EN 1591	Composição química (%)				
	Carbono (C)	Silício (s)	Manganês (Mn)	Fósforo (P) máx.	Enxofre (S) máx.
GG20	3,20-3,80	2,00-2,60	0,50-0,80	0,15	0,12

Os materiais utilizados nas amostras representam as condições reais de aplicação. Comumente utilizado na fabricação de elementos de fixação, quando em contato com peças de ferro fundido, componentes de aço SAE 1045 são tratados termicamente. Assim, para reproduzir essa condição o pino também foi submetido a

têmpera em água, com temperatura de austenitização acima de 880 °C e permanência de trinta minutos para encharque de temperatura e martêmpera por 15 minutos a uma temperatura de 160 °C. O tratamento foi realizado por empresa especializada.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

De modo a identificar a ocorrência de desgaste proveniente dos ensaios realizados foram tomadas as medições de massa, rugosidade e dimensão. Tais medições foram realizadas em todas as paradas de equipamento. As paradas foram realizadas a cada 30 mil ciclos e então posicionadas de volta ao porta amostra e continuado o desgaste até atingirem 210 mil ciclos.

Antes do início dos ensaios de desgaste, com finalidade de remover qualquer presença de óleo ou graxas as amostras foram levadas a banho ultrassônico por 15 minutos em temperatura controlada em 30 °C em água deionizada, posteriormente banhadas em álcool isopropílico e secas por ar forçado. O equipamento utilizado no banho é mostrado na figura 33. Esse processo foi apenas utilizado antes do ensaio, durante as paradas programadas as amostras foram apenas lavadas mecanicamente e posteriormente secas antes das medições de massa e rugosidade.

Figura 33 – Equipamento de banho ultrassônico SOLID STEEL.



Fonte: o autor.

4.3.1 Massa

Para a medição da massa foi usada balança analítica, figura 34, com resolução de 0,0001g e repetibilidade inferior a 0,1mg. Foram tomadas as massas em todos os intervalos de ciclos. Em cada intervalo foram tomadas 5 medições, os valores apresentados condizem com a média entre esses valores.

Figura 34 – Balança Analítica EDUTECH STR 224.



Fonte: o autor.

4.3.2 Rugosidade

Para rugosidade foi utilizado rugosímetro DIGIMESS TR200 e suporte v magnético, Figura 35. Foram observados R_a , R_z , R_q em diferentes posições. Para o pino foram tomadas as posições 0° , 135° , 270° em relação a força normal aplicada, e para a bucha 0° , 90° , 180° , 360° .

Figura 35 – Rugosímetro DIGIMESS TR200.



Fonte: o autor (2023).

4.3.3 Dureza

A medição das durezas foi feita através de durômetro INSIZE ISH-DR150 com carga de 100kgf seguindo norma ABNT NBR 6508:1. Foram tomadas 5 medidas de dureza, tanto para o pino quanto bucha e calculando o valor médio. As medidas de dureza foram feitas utilizando penetrador de diamante piramidal com carga utilizada para dureza na escala C de 100 kgf e penetrador esférico de 1/16" para Rockwell B com 100 kgf.

Foram tomadas as durezas em escala Rockwell B para a bucha de ferro fundido pois a dureza encontra-se menor do que a escala Rockwell C recomenda (<20 HRC). Nos pinos, as medidas foram tomadas utilizando Rockwell C, pois se utilizada outra escala, a indentação formada seria superior a recomendada pela norma.

4.3.4 Microestrutura

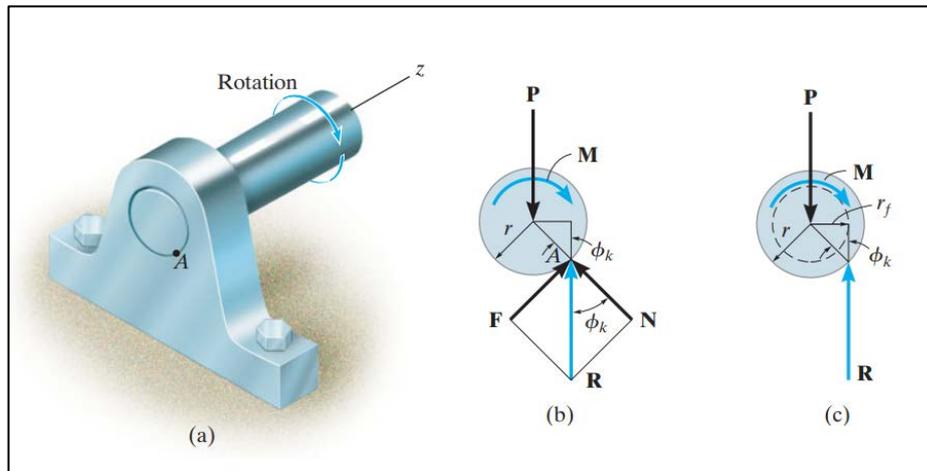
Para a verificação da microestrutura dos materiais utilizados foram conduzidos ensaios metalográficos. O Corte, embutimento e ataque químico foram executados seguindo as especificações das normas NBR 13284 – Preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica e NBR 8108 – Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas – Procedimento.

Seções transversais do pino e bucha foram embutidos em resina fenólica, lixados com variações de granulometria entre 80 e 2000 micras, posteriormente polidos com pasta de diamante de 3µm. Seguidos de ataque em Nital a 2% para que a microestrutura pudesse ser observável em microscópio.

4.4 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

A determinação do coeficiente de atrito passa primeiramente por uma análise estática da configuração do sistema, pois o equipamento não faz uma leitura direta do coeficiente de atrito, mas do valor do torque necessário para iniciar e/ou manter a condição de movimento. O pino é rotacionado internamente a bucha que oferece uma determinada resistência ao giro devido ao contato entre as superfícies. Análogo a essa configuração estão os apoios de mancais deslizantes, como apresentados na figura 36.

Figura 36 – (a) representação de mancal de deslizamento; (b) decomposição das forças; (c) força de reação no deslizamento.



Fonte: [58].

Ao passo que o eixo gira, o ponto de contato se move para cima até “A” onde decorre o deslizamento. Se a carga vertical atuando na extremidade do eixo for “P”, então a força de reação do rolamento “R” atuando em “A” será de módulo e direção iguais, porém de sentido oposto a “P”. O momento necessário para a manutenção o giro constante do eixo pode ser calculado somando os momentos em torno do eixo “z” do eixo. [58]

Assim expresso por:

$$\sum M_z = 0$$

$$M - (R \sin \varphi_c) r = 0$$

$$M - R r \sin \varphi_c = 0$$

Onde:

φ_k é o ângulo de atrito e é definido por:

$$\tan \varphi_k = \frac{F}{N} = \frac{\mu_c N}{N} = \mu_c$$

r_f é o círculo de atrito, enquanto o eixo rotaciona a reação R será sempre tangente a ele. Pode-se ver na figura 36 que:

$$r \sin \varphi_c = r_f$$

Como $\varphi_c < 1$ e utilizando de aproximações $\sin \varphi_c \approx \tan \varphi_c \approx \varphi_c$ obtemos:

$$M \approx Rr\varphi_c \quad (3)$$

Assim sendo, a leitura do coeficiente de atrito em um sistema tribológico do tipo bucha-pino é dada pela leitura do valor do torque (M), resultado da resistência ao giro pelo contato em as superfícies, a reação a força normal (R) e o valor do raio de contato, medido do centro do giro até a superfície de contato. A mesma abordagem matemática foi usada por Benincá quando calculado o coeficiente de atrito em contato bucha pino. [24]

4.5 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTATO

Os parâmetros de contato são calculados como proposto pela teoria de contato de Hertz e são baseados nos contatos entre duas superfícies cilíndricas que geram uma nova área de contato retangular

Área de contato

$$b = \left(\frac{4WR'}{\pi l E'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Máxima pressão de contato

$$bp_{max} = \frac{W}{\pi bl} \quad (5)$$

Pressão de contato média

$$p_{media} = \frac{W}{4bl} \quad (6)$$

Máxima deflexão

$$\delta = 0,319 \left(\frac{W}{E'l} \right) \cdot \left[\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{4R_A R_B}{b^2} \right) \right] \quad (7)$$

Máxima tensão cisalhante

$$\tau_{max} = 0,304 p_{max} \quad (8)$$

Onde:

a é o raio da área de contato [m];

W é a carga normal [N];

p é a pressão de contato [Pa];

δ é a deflexão total no centro de contato [m];

τ é a tensão cisalhante [Pa];

E' é a o modulo de Young reduzidos [Pa];

R' é o raio de curvatura reduzido [m]

4.6 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DESGASTE

A determinação do coeficiente de desgaste segue o modelo proposto por Archard que determina que o volume desgastado total é proporcional área de contato real multiplicada pela distância de deslizamento

$$V = K A_r l = Kl \frac{W}{H} \quad (9)$$

Onde:

V é o volume desgastado [m³];

K é o coeficiente de desgaste [-]

A_r é a área real de contato [m²]

W é carregamento [N]

H é a dureza [Pa]

l é distância de deslizamento [m]

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão expostos e discutidos os resultados alcançados propostos no capítulo anterior.

5.1 PARÂMETROS DE CONTATO

Os parâmetros calculados de contato para dois cilindros como proposto por Stachowiak, e Batchelor [21] estão apresentados na tabela 5. Tais valores são apresentados como referência e usados para a comparação entre estudos. Sendo este apenas o segundo levantamento realizado neste tribômetro de natureza de contato côncavo-convexo, e os materiais empregados não serem os mesmos, não se pode fazer comparações diretas entre os casos. Entretanto, pode-se fazer algumas considerações.

Na pesquisa realizada por Benincá [24], os materiais utilizados foram latão 360 e Teflon, os ensaios foram realizados sob uma força normal variável de 6874 N e 2862 N o que resultou em áreas de contato $1,40E-4 \text{ m}^2$ e $8,56E-4 \text{ m}^2$ respectivamente.

Sendo a área de contato função do módulo de Young e da carga aplicada é razoável reconhecer que os valores apresentados aqui sejam inferiores devido a maior resistência a deformação do ferro fundido cinzento mesmo sendo a carga utilizada maior (50 N). É amplamente reconhecido que os parâmetros utilizados nos ensaios são categoricamente responsáveis pelos resultados de desgaste encontrados.

Tabela 5 – Parâmetros de contato entre dois cilindros

Área de Contato [m ²]	Máxima pressão de contato [Mpa]	Pressão de contato média [Mpa]	Máxima deflexão [m]	Máxima tensão cisalhante [MPa]	Profundidade onde ocorre máximo cisalhamento [m]
8,57956E-06	61,83491738	48,56503054	5,97253E-08	18,79781488	6,74354E-06

Fonte: o autor.

5.2 ENSAIOS PRELIMINARES

Para este estudo, foram fabricadas amostra cilíndricas do tipo pino e bucha. O pino confeccionado em aço SAE 1045, sendo usinado e posteriormente retificado, já a bucha confeccionada em ferro fundido cinzento DIN GG20 foi apenas usinada.

Tais acabamentos superficiais foram adotados para reproduzir as condições de contato encontradas nas configurações de fixação de entre peças de ferro fundido e elementos de fixação. O pino foi tratado termicamente, inicialmente pelo método de martêmpera para incremento de dureza. Posteriormente, foi-se revenido para aumentar tenacidade, embora tal processo resulte em certa diminuição de dureza.

Os ensaios preliminares foram executados como forma de avaliar o equipamento, bem como testar a metodologia aplicada. Assegurar que o equipamento pudesse entregar resultados configura parte importante deste estudo, uma vez que é escassa a bibliografia disponível para teste desta configuração. Faz-se necessário aqui apontar que estudo anterior realizado pelo idealizador do equipamento é tido como base inicial, porém, neste trabalho o foco está no desgaste do componente de maior dureza e para tal duas hipóteses foram levantadas. A primeira é referente a carga aplicada sob o sistema, dentre os fatores que contribuem para o desgaste, a força aplicada sobre uma área pode contribuir consideravelmente para a aceleração do ensaio. A segunda hipótese é referente ao número de ciclos necessário para uma constatação de desgaste que seja mensurável. O primeiro ciclo de ensaios realizado no equipamento testou diferentes cargas no porta amostra: 17 kg; 10 kg; e 5 kg. Para as duas maiores cargas, houve travamento das amostras e os ensaios foram interrompidos com relativamente poucos ciclos; 105 ciclos para massa de 17 kg e 1000 ciclos para de 10 kg. Em nenhum dos dois casos pode se medir o desgaste por perda de massa ou por dimensional pois ao se encontrarem travadas, as amostras tornam-se impossíveis de serem separadas sem que haja considerável dano as superfícies do pino e da bucha. O intervalo de medição, isto é, as paradas programadas no teste para que haja a mensuração do desgaste ocorreram a cada 100 ciclos. Foram tomadas 5 medidas para cada intervalo. Na tabela 6 é apresentada as cinco medições do pino e bucha na condição inicial, isto é, sem que tenha sido realizado o ensaio de desgaste

Tabela 6 – massa inicial das amostras para ensaio utilizando 17 kg.

Item	Medição [g]					Média [g]	Desvio padrão
	#1	#2	#3	#4	#5		
Pino	135,9531	135,9536	135,9532	135,9531	135,9527	135,953	0,0003
Bucha	130,4330	130,4331	130,4333	130,4333	130,4330	130,433	0,0001

Fonte: o autor.

Já Tabela 7 é apresentado os valores medidos após 100 ciclos realizados, em ambos os casos a carga utilizada foi de 17 kg.

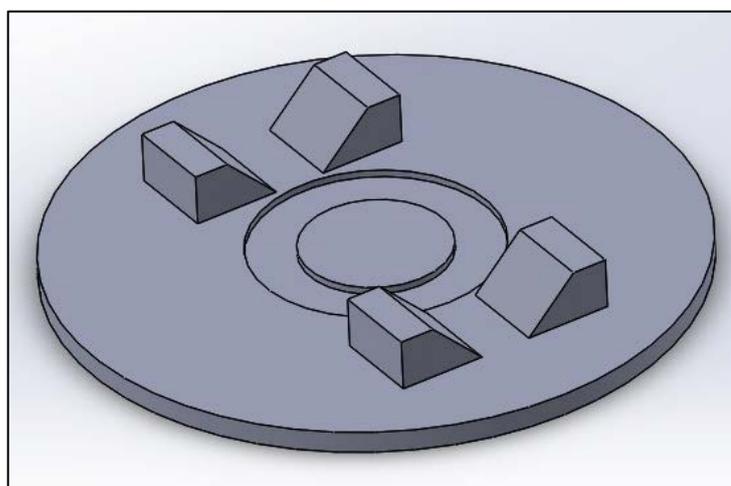
Tabela 7 – massa das amostras após 100 ciclos utilizando 17 kg.

Item	Medição [g]					Média [g]	Desvio padrão
	#1	#2	#3	#4	#5		
Pino	135,9521	135,9523	135,9525	135,9525	135,9529	135,9520	0,0003
Bucha	130,4318	130,4319	130,4315	130,4318	130,4319	130,4320	0,0001

Fonte: o autor.

Ao observar-se valores das medias entre a medição antes e depois de rodar os 100 ciclos, dois aspectos se destacam. Primeiro, a variação entre as médias é virtualmente inexistente, segundo os desvios padrão apresentaram distinção maior se comparados pino contra bucha do que se comparada desvio padrão do pino sem qualquer ciclo com pino com 100 ciclos. Neste ponto percebeu-se que o fator geometria estaria contribuindo para essa diferença entre as medições. Foram feitas várias medições a fim de visualizar essa diferença, e tal comportamento se manteve. Especulou-se que a construção da balança analítica carrega este erro nas medições, quando o pino é posicionado ao centro do prato da balança e na posição vertical a massa medida não é a mesma para quando o pino e colocado horizontalmente. Para contornar esse problema, foi desenvolvido um suporte que mantivesse o pino sempre na mesma posição e sua massa fosse distribuída por todo o prato da balança. Na Figura 37 está ilustrado tal suporte, que foi confeccionado por manufatura aditiva.

Figura 37 – suporte de medição.



Fonte: o autor.

Testado a maior massa, foi-se passado para a carga intermediária, 10 kg. Porém, também houve travamento prematuro sem que houvesse uma medição do desgaste insuspeita. Nestes ciclos, os intervalos entre as medições foram alargados, passando de 100 para 500 ciclos até o travamento em 2000 ciclos. Nas tabelas 8, 9 e 10 são apresentados os valores medidos.

Tabela 8 – massa inicial das amostras para ensaio utilizando 10 kg.

Item	Medição [g]					Média [g]	Desvio padrão
	#1	#2	#3	#4	#5		
Pino	135,3905	135,3907	135,3912	135,3913	135,3912	135,3910	0,0003
Bucha	134,0760	134,0770	134,0770	134,0766	134,0766	134,0766	0,0004

Fonte: o autor.

Tabela 9 – massa das amostras após 500 ciclos utilizando 10 kg.

Item	Medição [g]					Média [g]	Desvio padrão
	#1	#2	#3	#4	#5		
Pino	135,3918	135,3907	135,3894	135,3894	135,3906	135,3904	0,0010
Bucha	134,0726	134,0726	134,0737	134,0719	134,0713	134,0724	0,0009

Fonte: o autor.

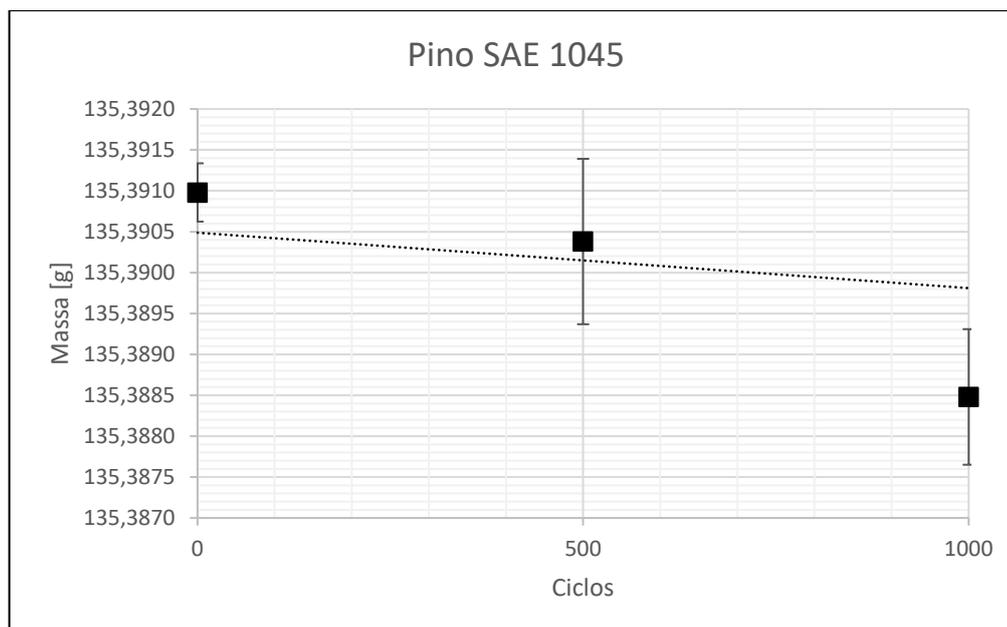
Tabela 10 – massa das amostras após 1000 ciclos utilizando 10 kg.

Item	Medição [g]					Média [g]	Desvio padrão
	#1	#2	#3	#4	#5		
Pino	135,3888	135,3888	135,3874	135,3895	135,3879	135,3885	0,0008
Bucha	134,0730	134,0715	134,0720	134,0717	134,0734	134,0723	0,0008

Fonte: o autor.

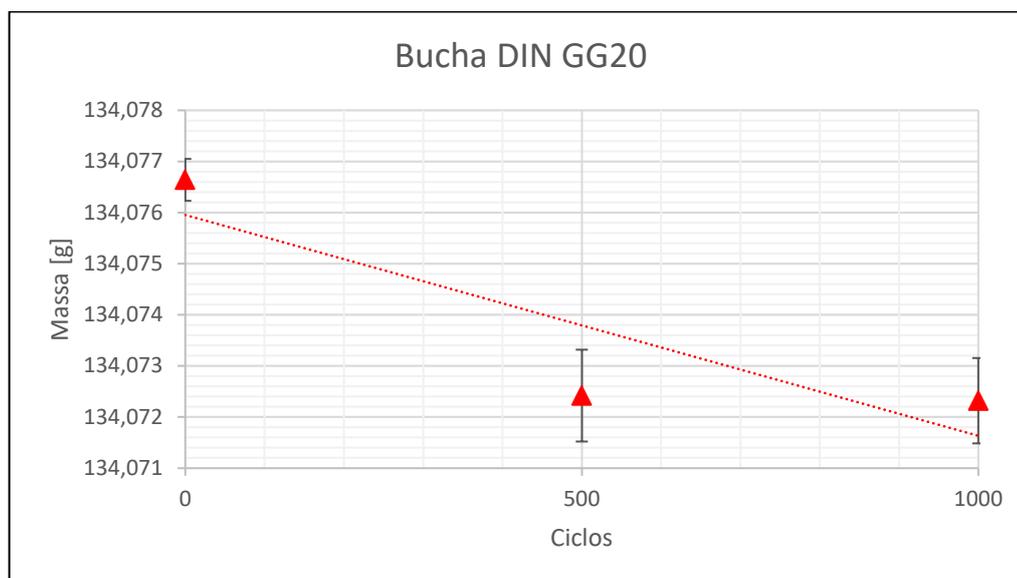
Superados os distanciamentos entre os desvios padrões devido à distribuição de massa sobre o prato da balança então pôde-se olhar para o significado destes desvios e seu papel nos intervalos de erros. Tal intervalo de erro é mais bem visualizado nos gráficos da variação de massa do pino e da bucha apresentados nas figuras 38 e 39 respectivamente. Estão representados no gráfico os possíveis valores dentro um intervalo de confiança de 95% para as medições de uma amostra. Pela apreciação dos gráficos nota-se que tais desvios da média de um intervalo de ciclos interceptam a região dos desvios padrão do próximo intervalo.

Figura 38 – variação da massa do pino antes do travamento com 10kg.



Fonte: o autor.

Figura 39 – variação da massa da bucha antes do travamento com 10kg.



Fonte: o autor.

Embora observada e documentada perda de massa no par, em um intervalo de medição tão curto como 500 ciclos, o erro conforme apresentado pode gerar problema na interpretação do comportamento tribológico, assim sendo, foi-se optado por expandir o número de ciclos até a parada para medição. Levando em consideração trabalhos sobre desgaste como Benincá [24], Mayrhofer [59], onde massa perdida ou volume perdido é tão pequena, que o erro aqui poderia representar grandeza semelhante ao desgaste documentado. De modo aos erros não

representarem grande significância na apresentação do desgaste, foi-se expandido o intervalo para aproximadamente 30 mil ciclos e aumentando o número total ciclos para 210 mil.

O aumento no número de ciclos entre os intervalos de medição foi apenas possível quando a carga foi reduzida para 5 kg, já que para outras cargas houve travamento das amostras. Também, neste momento uma mudança nas configurações do equipamento foi estabelecida. Para que se pudesse alcançar o número pretendido de 210 mil ciclos a velocidade de rotação do equipamento foi aumentada para 45 rpm. Porém, ao se aumentar a velocidade de rotação perde-se torque no motor. A perda de torque ocasionaria uma possível parada por travamento antecipada pois a continuidade do ensaio só é alcançada quando o torque é maior que a força de reação resistente ao movimento. Para contornar tal problema, foi-se reconfigurado o inversor para um *boost* de torque de 20% para 35%.

São apresentados nas figuras 40 e 41 a variação da massa do pino e da bucha, respectivamente, quando aplicada massa de 5kg e agora com ajuste nos intervalos onde um desvio acima e um desvio abaixo não interceptam os valores do intervalo anterior. Mesmo não havendo procedimento de redução dos desvios padrão em si, o comportamento de desgaste de uma forma mais linear começa a ser percebida mais facilmente.

Figura 40 – variação da massa do pino com 5kg.

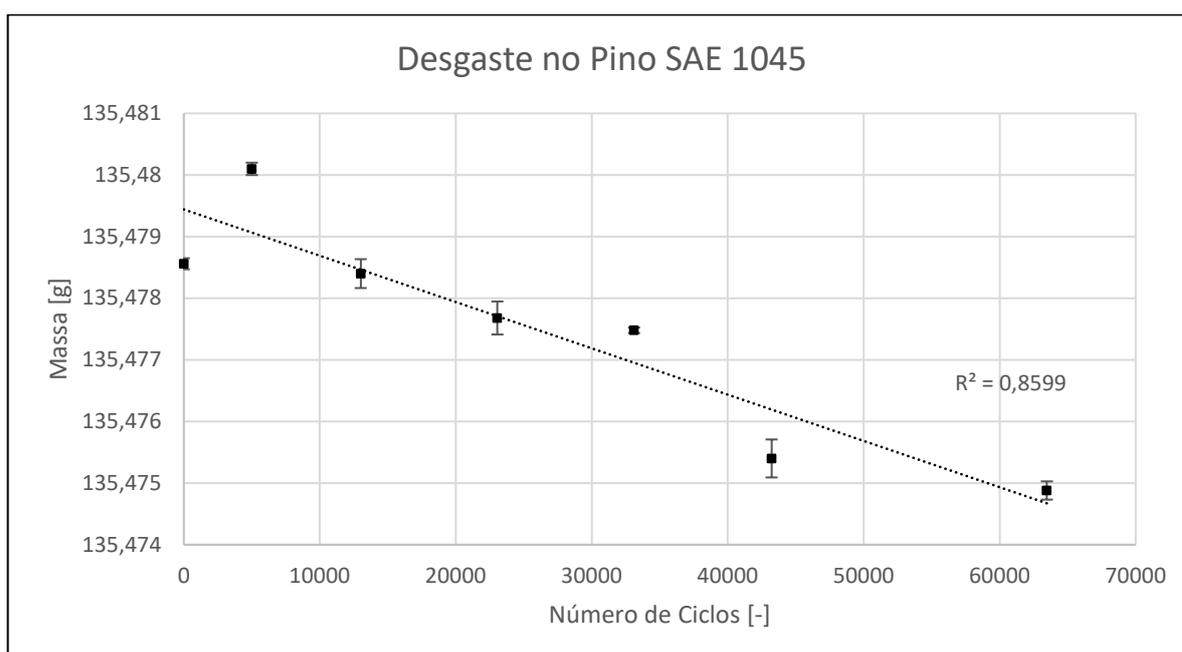
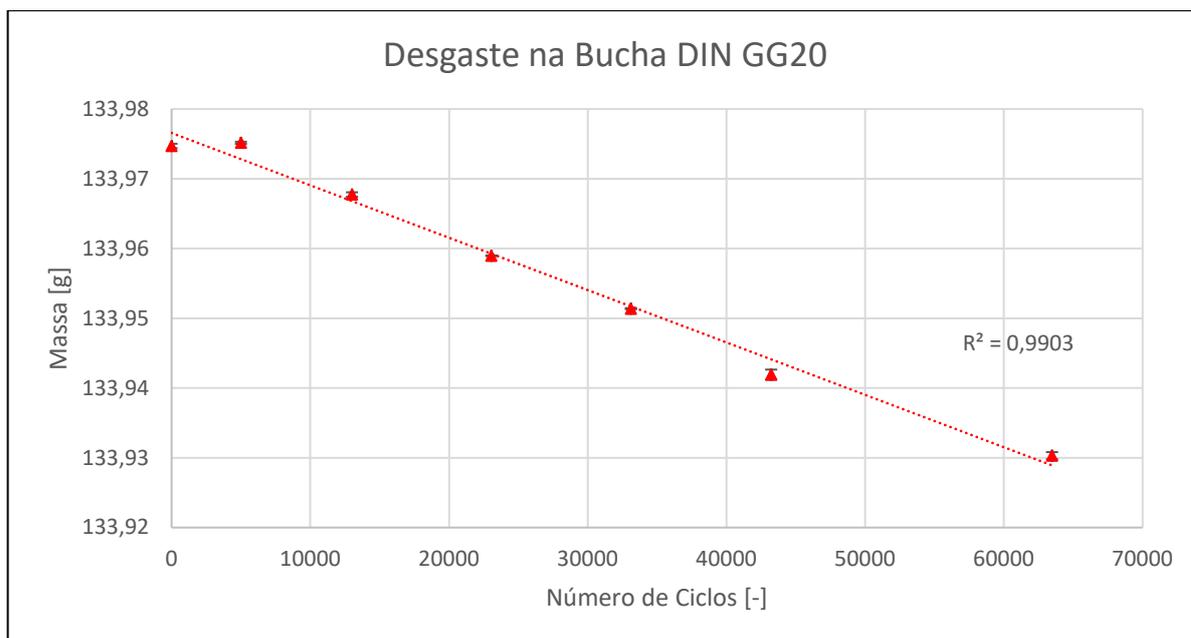


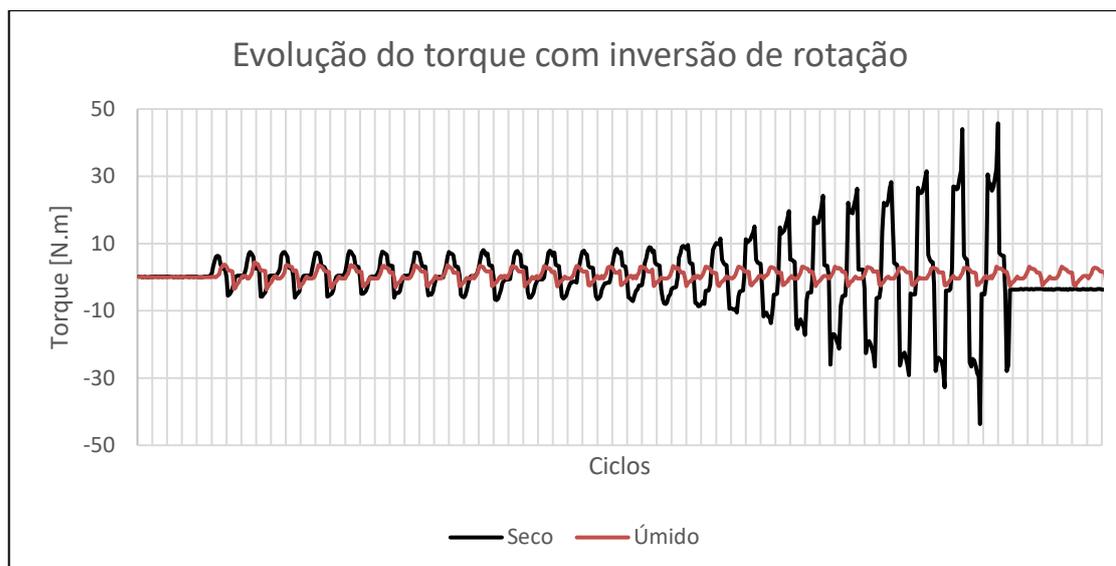
Figura 41 – variação da massa da bucha com 5kg.



Fonte: o autor.

Tal como proposto por Benincá, uma forma de avaliar a captura de sinal no sistema de dados, obtida através do sensor de torque é dada pela comparação entre o ensaio a seco e um ensaio lubrificado [24]. Todas as condições do ensaio permanecendo as mesmas, com exceção da presença de lubrificante na área de contato, pode-se observar duas respostas diferentes, e que eram esperadas. Na figura 42 estão apresentadas as evoluções dos sinais de torque para essas duas condições. Primeiramente observa-se que a uma leve e gradativa elevação do sinal capturado para a amostra a seco, seguido de um aumento abrupto no torque necessário para a manutenção do movimento e um limite próximo a 50N.m para o travamento e finalização do ensaio. Uma outra amostra foi preparada e lubrificada entre as superfícies em contato com óleo de viscosidade VG ISO-32. Ao passo da execução do ensaio, era esperado que não houvesse travamento das amostras e a continuidade do teste fosse alcançada pela diminuição do atrito entre as partes em contato, assim como observado, na diminuição do torque necessário para a conservação da condição de movimento. Também se observa uma maior homogeneidade do sinal ao longo da evolução ensaio. O torque aqui apresentado é função do raio da amostra com a força de atrito, a qual é estudada e sua dependência das condições de lubrificação são conhecidas, como apontados em estudos como de Pottirayil et al. [60] e Castro et al. [61]

Figura 42 – Variação de sinal de torque em teste a seco e úmido.



Fonte: o autor.

5.3 PERDA DE MASSA

Em todos os ensaios, o pino de SAE 1045 apresentou menor perda de massa em comparação a bucha em DIN GG20, a massa perdida em cada amostra está apresentada na tabela 11. Esse comportamento pode ser fundamentado na expressiva diferença de durezas entre as contrapartes, condicionado por uma matriz microestrutural martensítica mais dura nos pinos de aço carbono do que a matriz perlítica encontrada nas buchas de ferro fundido cinzento.

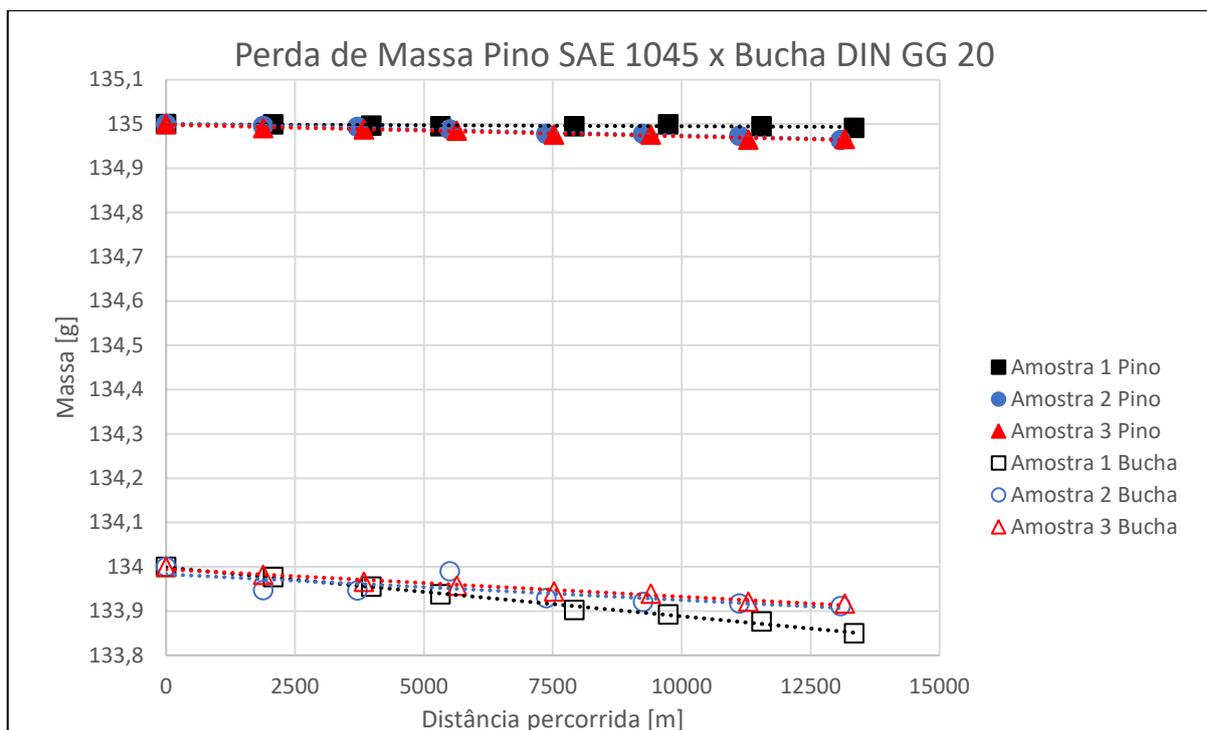
Tabela 11 – Perda de massa nas amostras.

		Perda de massa [mg]				
Amostra		1	2	3	Média	Desvio Padrão
Pino	SAE 1045	8,86	35,48	33,82	26,05	1,17
Bucha	DIN GG20	149,68	88,54	82,66	106,96	4,16

Fonte: o autor.

Destaca-se o comportamento semelhante das amostras 2 e 3, tanto para o pino como para bucha. É clara a existência de uma tendência entre todos os ensaios, porém a inclinação mais suavizada no primeiro teste (pino 1 e bucha 1) indicam uma condição subjacente e que teve impacto nos ensaios, o que levaram a um distanciamento na perda de massa percebida, tal comportamento pode ser observado na figura 43.

Figura 43 – Comparação da perda de massa nas diferentes contrapartes.



Fonte: o autor.

5.4 COEFICIENTE DE DESGASTE E COEFICIENTE DE DESGASTE ESPECÍFICO

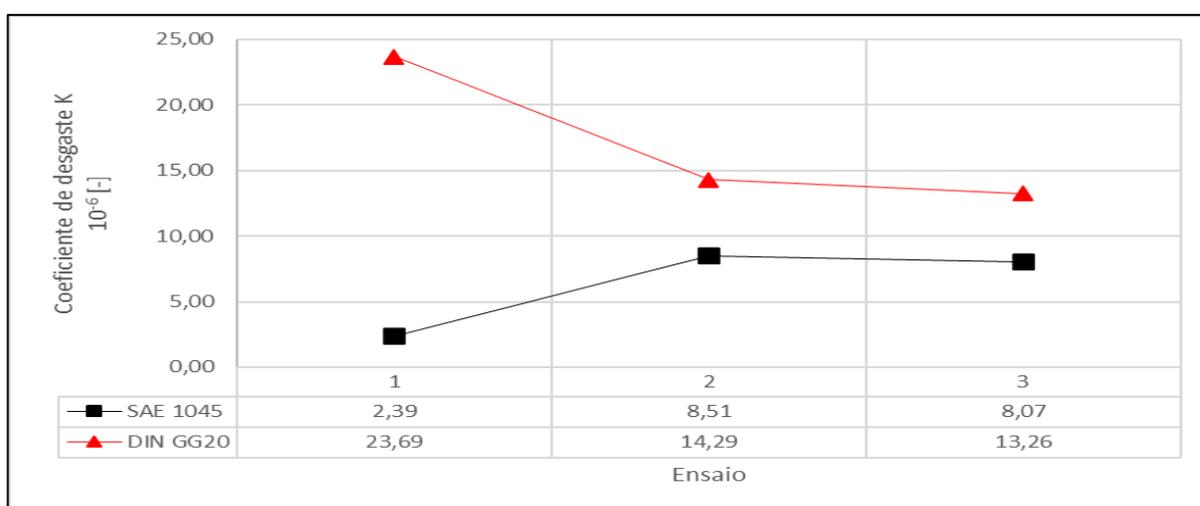
São apresentados nas figuras 44 e 45 coeficiente de desgaste K e coeficiente de desgaste específico k, respectivamente.

Uma vez que o coeficiente de desgaste K conforme descrito por Archard é função do volume desgastado, dureza do material observado são apresentados coeficientes para cada material ensaio, conforme Figura 44. O menor coeficiente foi encontrado no pino 1 ($2,39E-6$) seguido pelo pino 3 ($8,51E-6$) e pino 2 ($8,07E-6$). Quanto as buchas de DIN GG20, o menor valor foi o da bucha 3, seguido pela bucha 2 e por último a bucha 1. Esse comportamento segue a mesma tendência da perda de massa observada e pode ser atribuído a grande diferença em dureza quando comparados pino 1 contra pino 2 e 3. Ainda mais, pode-se correlacionar a essa variação na severidade do desgaste às microestruturas. Castro et al. apontam as variadas composições das microestruturas do SAE 1045 devido a diferentes temperaturas de revenimento como razão pelo qual o coeficiente apresenta-se mais elevado. [61]

O mesmo padrão ocorre com o desgaste específico, maior desgaste na bucha com o incremento da dureza da contraparte. Como anteriormente comentado o

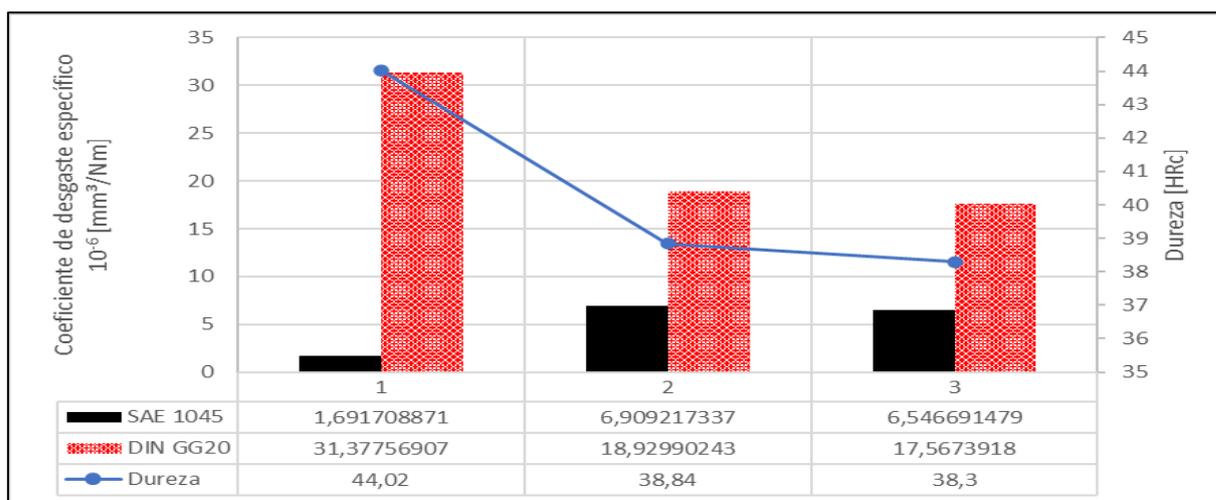
degaste no pino diminui diretamente proporcional com a queda da dureza, embora essa diferença pequena ente ensaio 2 e 3 pode ser resultado aleatoriedade do próprio processo de medição. É necessário evidenciar que na próxima sessão será comentado sobre a presença de fases microestruturais, nos pinos, menos resistentes ao desgaste que poderiam justificar esse maior coeficiente de desgaste específico no pino 2, ainda que apresente maior dureza em relação ao pino 3.

Figura 44 – Coeficiente de desgaste K para o Pino SAE 1045 e Bucha DIN GG20 nos diferentes ensaios.



Fonte: o autor.

Figura 45 – Relação entre coeficiente de desgaste específico k para o par SAE 1045-DIN GG20 e dureza dos pinos.



Fonte: o autor.

5.5 MICROESTRUTURA

5.5.1 Aço SAE 1045

Estão dispostas a nas figuras 46, 47 e 48 as micrografias observadas nos pinos através de técnica metalográfica em ampliação de 100x, 500x e 1000x respectivamente. As legendas (a), (b) e (c) impostas refletem a micrografia para o pino 1, pino 2 e pino 3 respectivamente.

Figura 46 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado de 100x. em diferentes amostras:
(a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.

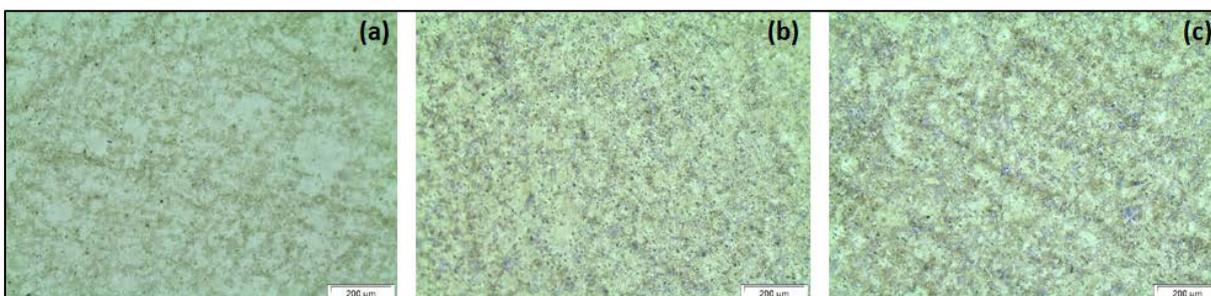


Figura 47 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado de 500x. em diferentes amostras:
(a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.

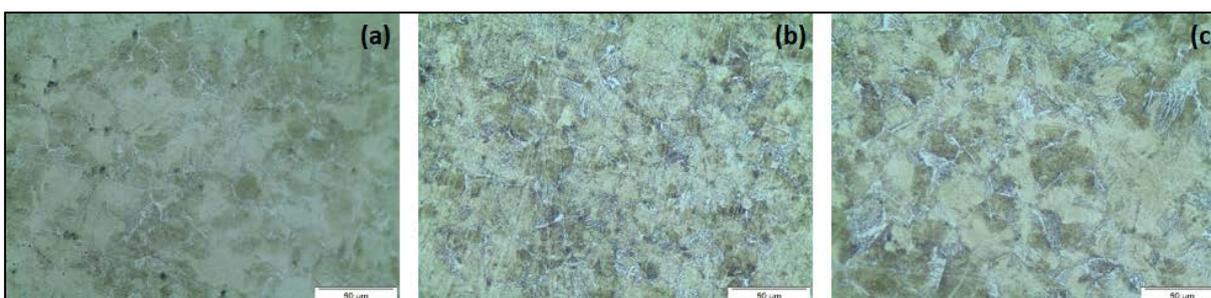


Figura 48 – Micrografia Aço SAE 1045 aumentado de 1000x. em diferentes amostras:
(a) pino 1, (b) pino 2, (c) pino 3.



Fonte: o autor.

Giban e Bran [62] apontam que para diversas condições de aquecimento e resfriamento, a composição encontrada após a têmpera seguida de revenimento do SAE 1045 é uma mistura de martensita revenida com a presença de bainita, ou apenas martensita revenida. Esclarece também que a presença de bainita é presente devido ao a taxa de resfriamento não ser rápida o suficiente para evitar transformações por difusão. Devido a superfície e o centro da peça resfriarem em taxas diferentes uma equalização das temperaturas ao longo do material é realizada logo acima da temperatura de início da formação martensítica. Isto tem por objetivo assegurar a formação da martensita, porém para que haja exclusivamente essa transformação o aço deve ter adequada temperabilidade, caso contrário que ocorrerá formação de perlita e ferrita em altas temperaturas [63]. Pode-se observar na Figura 46, com ampliação de 100x, o que aparenta ser uma mesma matriz martensítica em todos os pinos, porém há notável distinção na distribuição de outras fases presentes entre pino 1 em relação ao pino 2 e 3.

Em maiores ampliações, figuras 47 e 48 essas distinções são mais aparentes. Uma clara presença de ferrita proeutetóide, com diferentes morfologias, nucleados no contorno do grão. Evidencia-se a não formação completa de uma microestrutura martensítica e posterior martensita revenida como objetivada pelo tratamento térmico de martêmpera seguido pelo revenimento. Embora a martêmpera seja apontada como um tratamento possível ao SAE 1045, mesmo que uma completa transformação da austenita em martensita não ocorra em temperatura ambiente, é possível que a temperabilidade do material tenha participação na presença de outras microestruturas, uma vez que uma temperatura não homogênea e diferentes gradientes de temperatura existam, a formação de microestrutura irá variar de acordo com a distância do local em resfriamento até o meio. O meio de resfriamento também é operante na formação microconstituente, uma vez que a retardação do resfriamento pode ocasionar com que o material passe o 'nariz' da curva TTT e gere estruturas mais estáveis que a martensita. Nunura et al esclarecem o papel da temperabilidade do SAE 1045 para formação da microestrutura e apontam como encontradas as fases martensita, bainita, ferrita e perlita. [64]

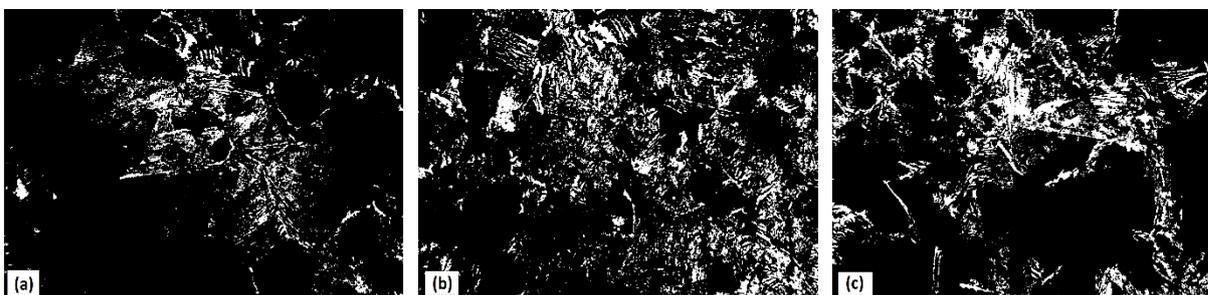
Além da temperabilidade do material e o meio de resfriamento, outro fator que também podem exercer influência na microestrutura final, é a morfologia inicial das amostras. Amostras do mesmo material podem apresentar variações microestruturais ao longo do corpo, e mesmo que passado por mesmo processamento e mesmo

tratamento térmico, pode haver variações nas microestruturas quando não há uma total transformação austenítica anterior ao resfriamento. Esse fato pode ser observado em um aço médio carbono pela presença de uma formação ferrítica irregular no contorno de grão, geralmente maior e destoando da matriz martensítica ao seu redor. [65] Embora não haja tamanha irregularidade da ferrita no contorno, o tempo de 30 min de aquecimento dos pinos pode ser outra influência pela qual há diferentes microestruturas nas amostras, sem ter passado um tratamento para homogeneização do tamanho dos grãos não se descarta a hipótese que a diferença microestrutural seja oriunda da microestrutura pré-austenitização causada pela usinagem dos pinos.

A transformação de fase da austenita em martensita não ocorra por difusão, mas pelo cisalhamento do retículo cristalino. Sendo uma fase metaestável, o posterior aquecimento dado no revenimento leva à difusão do carbono supersaturado da martensita em perlita e ferrita [63]. Assim sendo, a presença dessas fases não se distancia da literatura disponível, como encontrado por Mulyadi et al. [66], Nishimoto et al. [67] e Ishtiaq et al. [68]

Embora a transformação de fase seja um dos fatores para o aumento de dureza, e o incremento deste fator está associado a uma maior resistência ao desgaste, nem sempre a dureza é o fator preponderante. Caso como o de Zambrano et al. [69] onde aços com diferentes composições químicas, dentre elas o SAE 1045, são preparados com diferentes tratamentos térmicos a fim de se obter mesma dureza são comparados. A microestrutura resultante é posta em comparação ao desgaste observado em cada amostra. Os resultados apontaram uma maior resistência ao desgaste para microestrutura perlítica, seguida por uma formação ferrítica-perlítica e menor resistência para microestrutura de cementita globular em matriz ferrítica. Desta maneira é justificado correlacionar a presença ferrítica a resistência ao desgaste. Onde um menor aparecimento de ferrita pode ser potencialmente representativo em uma maior resistência ao desgaste. Através da análise das zonas mais claras das micrografias, apresentado na figura 49, pode-se identificar as áreas claras e compará-las umas às outras, (a) pino 1 com área de 6,22%; (b) pino 2 com área de 15,11% e (c) pino 3 com área de 13,89%. Este método de comparação das áreas é comum na diferenciação de fases presentes em uma amostra, tal como em estudos em aços realizados por Dodo et al. [70] e Yu e Song [71].

Figura 49 – Regiões com espectro claro do aço SAE 1045: (a) pino 1 com 6,22%, (b) pino 2 com 15,11%, (c) 13,89%

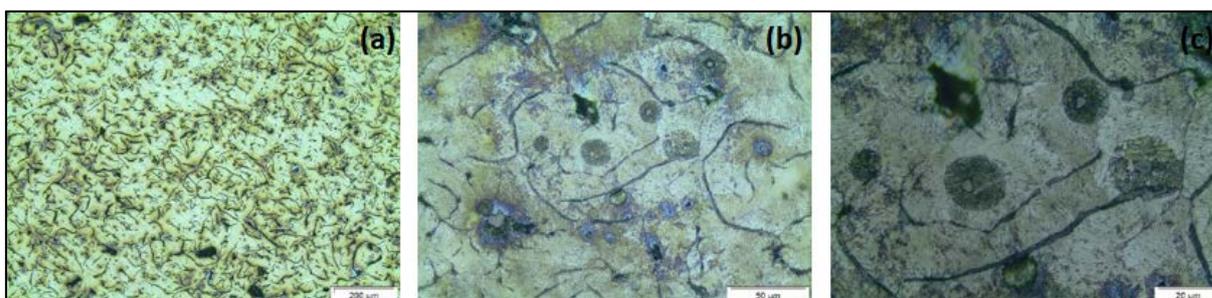


Fonte: o autor.

5.5.2 Ferro Fundido GG20

Foi-se observado a mesma microestrutura para as diferentes buchas confeccionadas em DIN GG20, não houve perceptível variação na interpretação das imagens, tão pouco houve variação considerável na dureza, portanto aqui estão apresentadas apenas a metalografia de uma das amostras da bucha. Está apresentada as microestruturas em diferentes ampliações, figura 50.

Figura 50 – Micrografia da bucha DIN GG20 em diferentes aumentos: (a) 100x (b) 500x (c) 1000x.



Fonte: o autor.

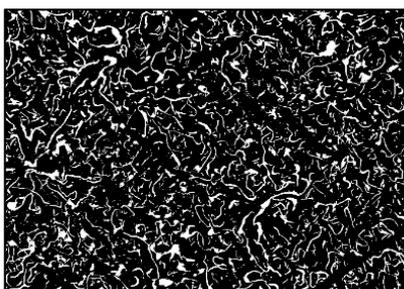
Identifica-se nas amostras a característica formação em veios da grafita em uma matriz perlítica. Utilizando da norma AFS-ASTM pode-se descrever que a grafita observada tem a classificação tipo A, veios curvos de orientação aleatória e bifurcados. A microestrutura se mostra similar as identificadas em outros estudos, como Avci et al. [72]

Como em outros materiais, é reportado que no GG20 que a microestrutura também tem papel no desempenho em relação ao desgaste. A estrutura lamelar perlítica e quantidade tem influência nas propriedades mecânicas, de modo que uma

maior presença desta fase leva a uma maior resistência ao desgaste. Em sua pesquisa, Weitao et al. [73] estudam o desempenho tribológico do ferro fundido cinzento através do controle microestrutura, indicam que a presença dos veios de grafita com uma morfologia mais refinada associada a um também refinamento da matriz perlítica aumentam a resistência ao desgaste em ferros fundidos cinzentos. Em consideração a grafita, estudos Singhal e Saxena [74] apontam seu papel lubrificante sob condições de deslizamento a seco. Comportamento esse testado por Polat et al. [75], foi realizado um estudo comparando a resistência ao desgaste de ferros fundidos cinzentos, GG 20 e GG 25, foi-se observado uma maior presença da grafita em veios no GG 20, foi associada a uma maior dureza e menor coeficiente de atrito para essa mesma liga. Entretanto, mesmo com sendo o material de maior dureza, o GG 20 teve um maior volume perdido, os autores concluem que tal comportamento se deve a tendência de ruptura da grafita sob carga, que é formada em maior quantidade devido a maior presença de carbono neste material.

A área de influência de fase foi-se determinada da mesma maneira que para o aço SAE 1045, embora neste caso a área encontrada indica a presença da grafita em 17,51%, figura 51.

Figura 51 – Região com espectro claro da grafita na bucha DIN GG 20, com aumento em 100x, área de 17,51%.



Fonte: o autor.

5.6 DUREZA

Está apresentada na tabela 12 os resultados das medições de dureza nos pinos usados nos ensaios. Houve uma significativa variação entre a dureza média no pino 1 em relação as medidas nos pinos 2 e 3. Mesmo que produzidas da mesma barra, austenitizadas juntas, temperadas no mesmo meio e revenidas em um mesmo ciclo essa diferenciação não é incomum. Neves et. Al [76] relatam que há um maior

desvio da medição da dureza entre diferentes amostras de SAE 1045 temperadas em água e posteriormente revenidas do que aquelas temperadas em óleo e posteriormente revenidas.

Tabela 12 – Dureza nos pinos SAE 1045 após têmpera e revenimento.

		Dureza (HRC)						
		#1	#2	#3	#4	#5	Média	Desvio Padrão
SAE 1045	Pino 1	43,1	42	46,3	43,7	45	44,02	1,67
	Pino 2	37,3	40,4	40,7	37,6	38,2	38,84	1,60
	Pino 3	37,4	40,6	37,1	38,9	37,5	38,30	1,46

Fonte: o autor.

Como apresentado na sessão anterior, a diferença metalográfica do pino 1 em relação aos outros pinos é apreciada neste incremento de dureza. Ainda que existam casos em que uma maior resistência ao desgaste em aços carbono não esteja vinculada com uma maior dureza, como apontado por Zambrano et al. [69] devido ao mecanismo preferencial no sistema e a condição de severidade do desgaste, não é o caso aqui. A maior dureza reportada foi justamente no pino 1, aquele que apresentou menor desgaste após os ensaios. Odi-Owei mostra que a severidade do desgaste também transita em função da carga aplicada e não somente da dureza, o mesmo aços carbono pode apresentar comportamentos distintos quando submetidos a diferentes cargas normais durante os ensaios. [77]

Já para o caso das buchas confeccionadas em DIN GG20 não houve variação entre a média das durezas e todas apresentaram o mesmo valor. Está apresentado na Tabela 13 as medições de dureza para uma das amostras. Diferentemente das medições nos pinos de aço que apresentaram discrepantes valores de dureza, na primeira amostra, as buchas de ferro fundido não apresentaram essa variação. Tal dessemelhança possivelmente está associado a uma diferença morfológica do material elevada pelos posteriores tratamentos térmicos que foram realizados no pino, enquanto na bucha foi mantida a condição comercial.

Tabela 13 – Dureza da bucha DIN GG20.

		Dureza (HRB)						
		#1	#2	#3	#4	#5	Média	Desvio Padrão
DIN GG20		97,5	98,7	98,9	98,9	98,5	98,5	0,58

Fonte: o autor.

Também foi constatado que o maior desgaste entre as buchas de ferro fundido foi observada naquela cuja contraparte apresentou maior dureza, pino 1. Devido a diferença de dureza entre as contrapartes era já esperado uma maior perda de massa nas buchas do que nos pinos. Entretanto, a relação entre a dureza do par tribológico e a suas respectivas perdas de massa não é mais habitual encontrado na literatura. Quando avaliado a perda de massa entre ferros fundidos de diferentes durezas e suas contrapartes em aço sob variadas cargas, Woodward, Toumpis e Galloway [78] relatam a perda de volume em função da dureza – ocasionada pelas diferenças microestruturais e da própria carga. A mudança na severidade do desgaste foi associada a transição os mecanismos de desgaste.

5.7 RUGOSIDADE

As verificações de rugosidade Ra, Rq e Rz tanto do pino SAE 1045, como da bucha DIN GG20 para os ensaios 2 e 3 estão dispostas nas figuras 52,53 e 54.

Primeiramente observa-se uma diferença entre valores médios das rugosidades iniciais quando comprados bucha e pino. Para os pinos a rugosidade apresenta-se em patamar mais baixo do que para a bucha em ambos os casos. Isto se dá pela escolha dos processos de fabricação dos itens. De modo a representar a condição mais próxima a encontrada na situação problema a bucha foi apenas usinada pelo processo de torneamento, enquanto o pino passou também pelo processo de retificação. Valores da rugosidade das amostras estão em conformidade com valores apresentados na literatura como típicos para os processos escolhidos. [79]. Também se evidencia um maior prolongamento do erro padrão na medição inicial. Fato esse que em comparação entre bucha e pino caracteriza uma tendência durante a continuidade dos testes de desgaste. Embora haja pontos que os valores se distanciem da média, não há uma perda de tendência de redução da rugosidade avaliada. Se comparada a rugosidade inicial no ensaio 2, houve uma redução de 65% do Ra, 53% do Rq e 58% do Rz no pino, enquanto houve redução a rugosidade medida na bucha em 23% 23% 20% para Ra, Rq, Rz respectivamente. Para o ensaio 3 um mesmo comportamento se repete, embora em valores um poucos menores para o pino 47% 50% 52% enquanto levemente superior na bucha 32% 23% 22%.

Figura 52 – Rugosidade Ra para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.

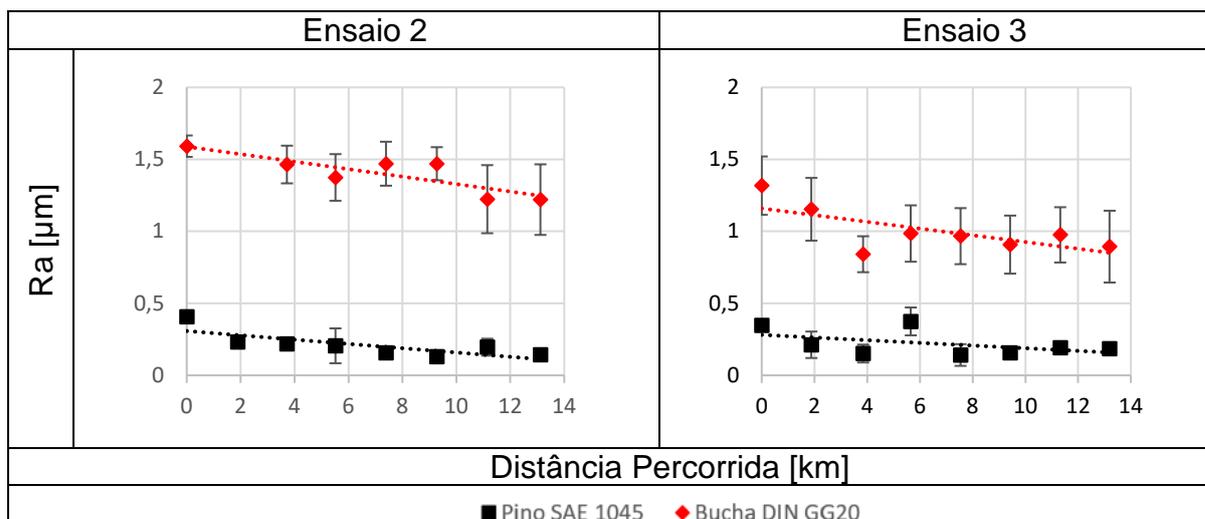


Figura 53 – Rugosidade Rq para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.

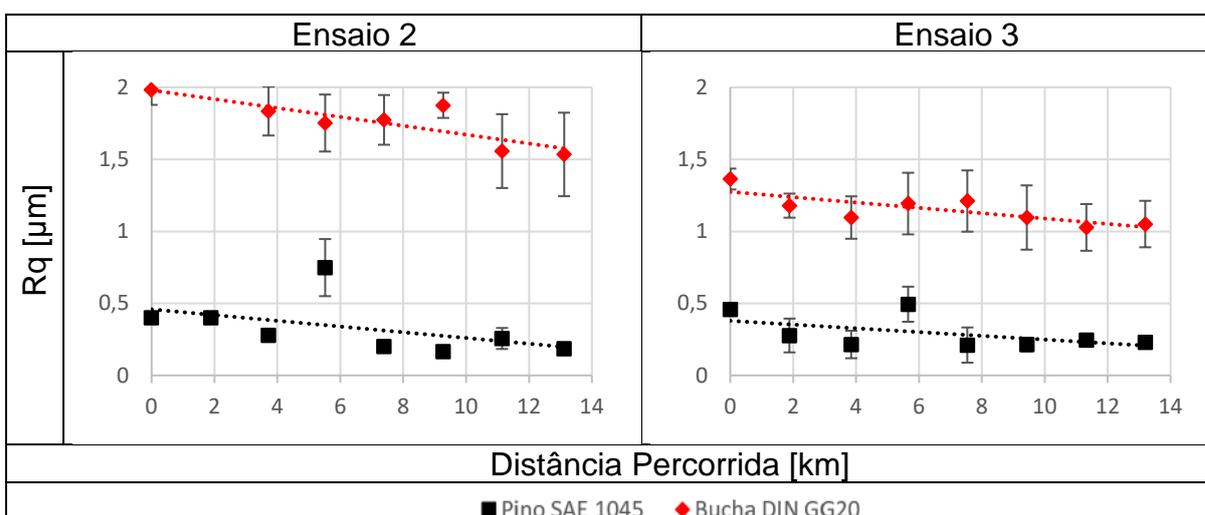
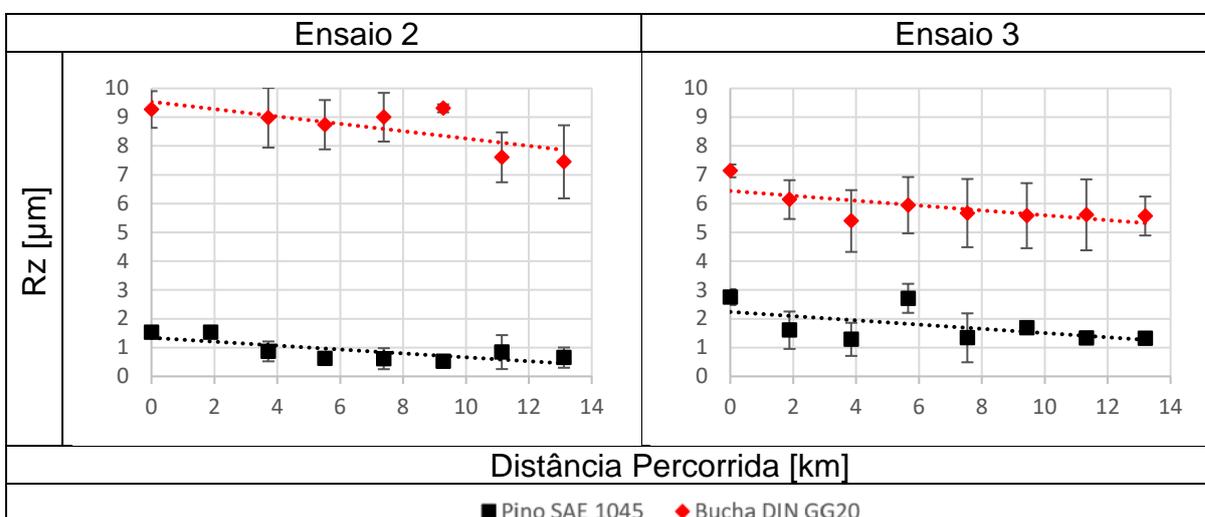


Figura 54 – Rugosidade Rz para o SAE 1045 e Bucha DIN GG20.



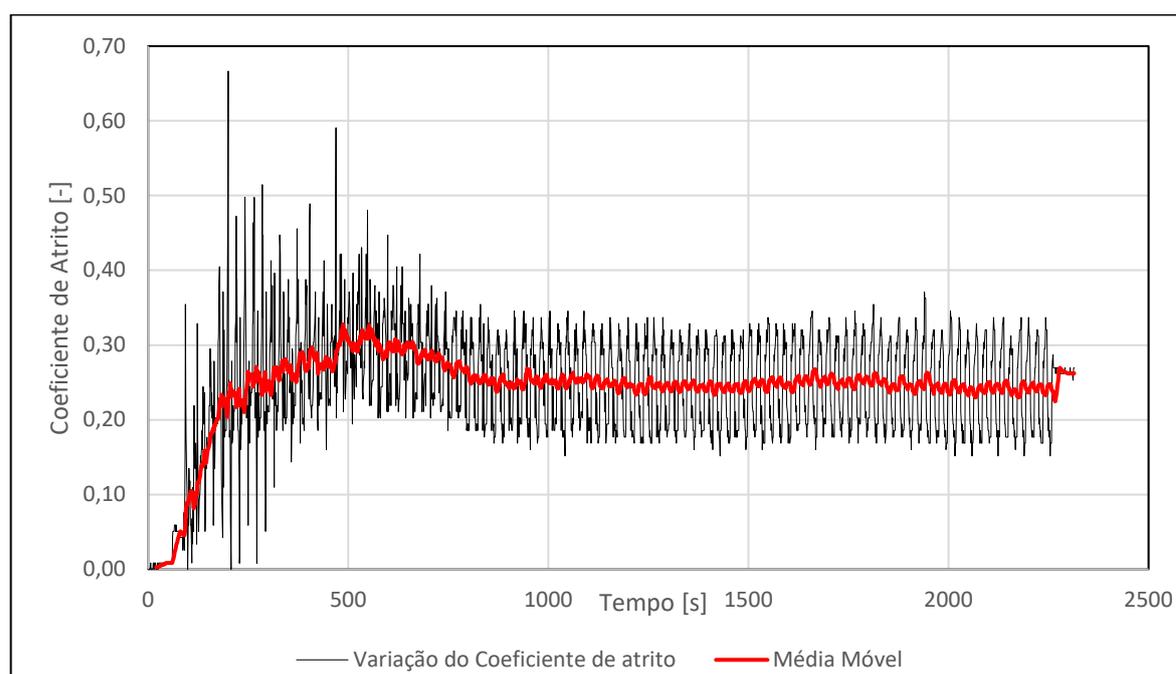
Fonte: o autor.

A mudança das características superficiais, tal como representado aqui pelos valores de rugosidade, devido a evolução do desgaste não é singular a este estudo. Embora a sejam apontados aumento da rugosidade superficial em outros estudos [59] [69], o que não é observado aqui. Houve uma redução da rugosidade em função da distância percorrida. Mesmo que existam pontos divergentes a tendência, dada as condições dos resultados deste teste aponta-se um modo de desgaste preferencial, o que será melhor comentado nas seguintes sessões.

5.8 COEFICIENTE DE ATRITO

Em vista que os dados coletados durante o ensaio representam sinais aleatórios no tempo, noções estatísticas podem ser aplicadas, onde a variável apresenta-se constante e seus momentos estáticos também irão se apresentar são constantes. [80] De tal modo, apresenta-se o espectro da variação do coeficiente de atrito de uma carga estática ao longo do tempo, figura 55. Observa-se também e de maneira mais clara, o comportamento quando aplicado o método da média móvel, aqui usando pela média de vinte pontos, anteriores e posteriores. Técnica similar é usada por Pantaleon, Tanaka e Bernardes. [80]

Figura 55 – Espectro da variação do sinal na determinação do coeficiente de atrito entre SAE 1045 e DIN GG20 com carga de 5kg.

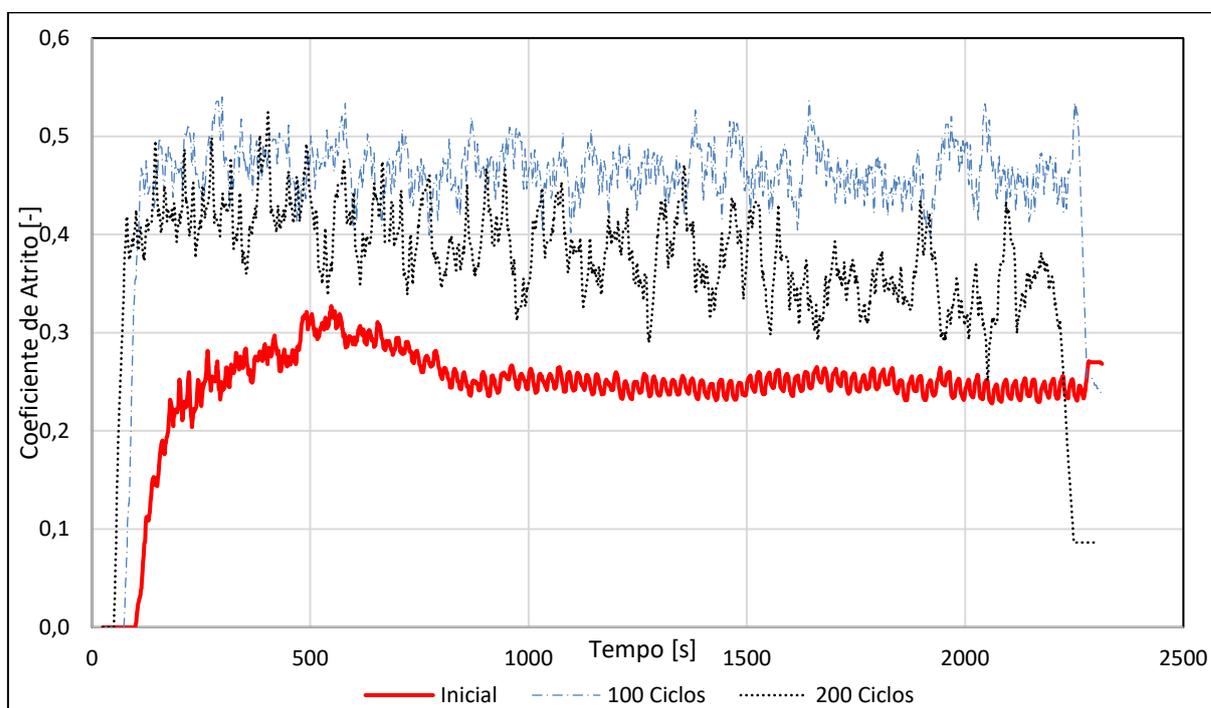


Fonte: o autor.

Da mesma maneira como apontado na literatura, em capítulo anterior, percebe-se a existência de um primeiro estágio (*running-in*), onde não há uma homogeneidade na leitura do coeficiente de atrito. Nesse primeiro momento, as asperezas de ambos os materiais são submetidas a esforços que levam a deformação ou quebra de picos e vales. Estas mudanças ocasionam aumento e diminuição do coeficiente de atrito até uma estabilização quando o coeficiente entra em um estágio mais estável. Zambrano et. Al encontraram correlação entre o limite de endurecimento por encruamento no estágio de *running-in* e do início do comportamento estável [81]. Após a estabilização o valor do coeficiente de atrito é de 0,25.

É mostrado na figura 56 a variação do comportamento do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos completos. Os ensaios foram conduzidos em sequência, com os mesmos corpos de prova e utilizando de limpeza mecânica entre os três levantamentos de coeficiente de atrito.

Figura 56 – Variação do comportamento do coeficiente de atrito entre SAE 1045 e DIN GG 20 com carga de 5kg.



Fonte: o autor.

No primeiro caso, ali denominado “inicial” verifica-se um dinâmica de flutuação do coeficiente de atrito menos acentuada do que os dois casos seguintes, isso pode ser explicado devido homogeneidade das superfícies em contato antes da execução

do ensaio, uma vez que há ocorrência de modificações nas condições superficiais das amostras. Tais flutuações estão correlacionadas ao desgaste, quebra de óxidos, remoção de debris [82]. No segundo caso, após a ocorrência de 100 ciclos de operação, mesmo que anteriormente o coeficiente de atrito encontrado tenha sido de 0,25 o ensaio mostra uma mudança neste comportamento e o coeficiente necessário para a manutenção do movimento é elevado para 0,5 o qual se mostra seguir uma média constante durante o período registrado. Já para o terceiro caso, após 200 ciclos, inicialmente o coeficiente aparenta seguir um valor próximo ao registrado no caso anterior seguido por uma tendencia de queda para valores próximos do caso inicial. Entretanto, denota-se que as flutuações encontradas neste último casos são as maiores registradas durante todo o ensaio. Os comportamentos observados refletem a significância das condições superfícies na medição do coeficiente de atrito, uma vez que modificadas as superfícies, devido ao desgaste, correlacionam-se então condições superfícies ao coeficiente de atrito.

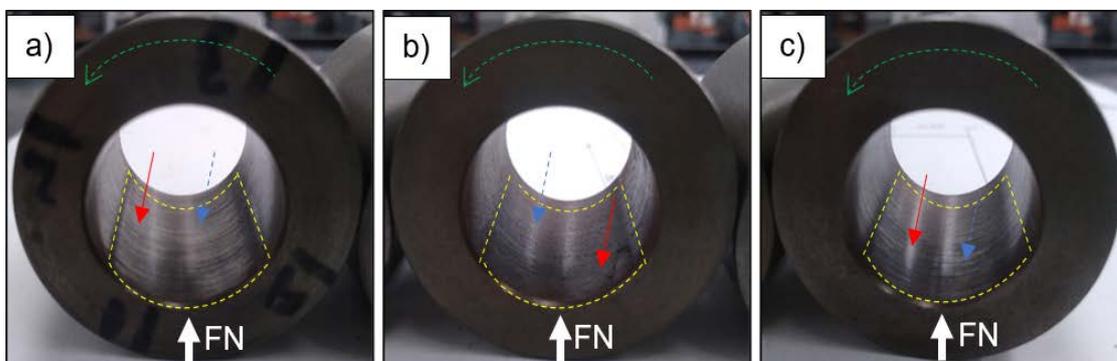
Em trabalho sobre ferros fundidos Ghasemi e Elmquist [83] estudam as condições que levam a formação de um tribofilme entre as superfícies em desgaste. No decorrer do desgaste, partículas de grafite são fraturadas e empurradas para fora das lamelas e agem como lubrificante sólido. Esta mudança de coeficiente de atrito mostrada na figura 56, para patamares superiores, está associada a retirada deste filme com característica autolubrificante dos ferros fundidos entre a paradas para as medições. Wang et. Al [84] encontraram mudanças nos valores observados para coeficiente de atrito seguindo duas condições: ensaio contínuo e ensaio com paradas a cada 100s. No teste com paradas, a amostra era retirada e limpa, então recolocada para continuidade do ensaio. Houve o aumento no coeficiente de atrito quando retirados os debris

5.9 ANÁLISE VISUAL

Após a realização dos ensaios foram registradas as trilhas desgastadas das buchas em DIN GG20 e pinos em SAE 1045 identificados na figura 58 e figura 57, respectivamente. Na imagem estão dispostas: zona desgastada no ensaio (retângulo tracejado amarelo), o sentido de deslizamento (seta verde tracejada). Também estão identificadas duas regiões de distintas características, a primeira (seta pontilhada azul)

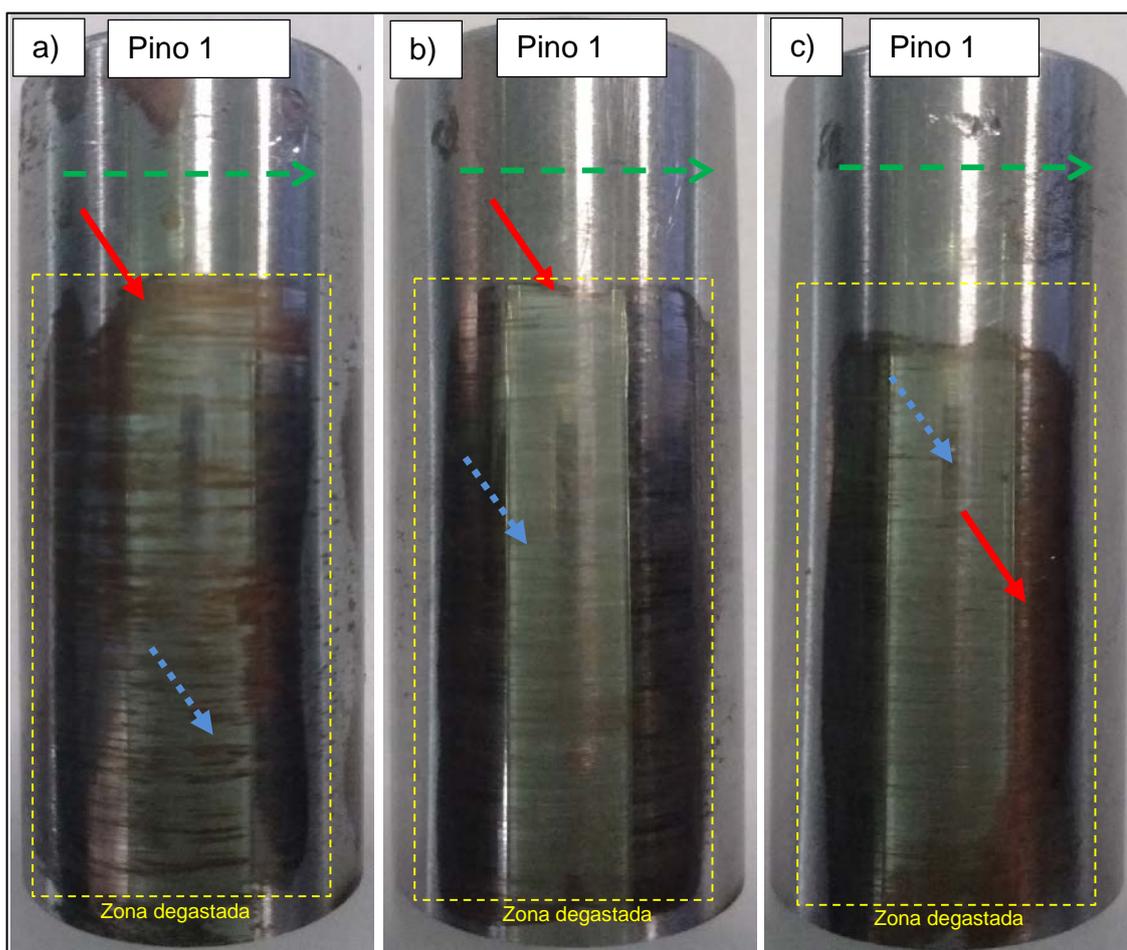
aponta para marcas de cor metálica brilhante, enquanto a segunda aponta para marcas em cor marrom/vermelho (seta contínua vermelha).

Figura 57 – Buchas DIN GG 20 após ensaios de desgaste



Fonte: o autor.

Figura 58 – Trilhas de desgaste nos pinos SAE 1045: a) pino 1, b) pino 2, c) pino 3.



Fonte: o autor.

Devido a característica de montagem do tribômetro utilizado, os pinos são fabricados com comprimento maior que a contraparte bucha, disto observa-se

claramente a distribuição das marcas do desgaste somente onde há o contato entre o par. Essas marcas subdividem-se em duas, uma de cor metálica e outra de cor vermelha/marrom. Uma vez que essas marcas encontrassem em posição preferencial e não em todo o pino, resultados sugerem a presença de oxidação induzida pelo contato e posterior quebra dos óxidos pelo desgaste da superfície. É comumente categorizado na literatura o desgaste de acordo com a sua severidade. [85] [86]

Para Woodward, Toumpis e Galloway [78] o que classifica a condição quanto a severidade do desgaste em moderado é baixa perda de volume e a presença de oxidação que não danifica a matriz subjacente enquanto o desgaste severo ocasionado pela danificação da matriz resulta em riscamento; sulcamento, arraste e descamação. O estudo do comportamento tribológico entre ferro fundido cinzento e aço realizado pelos autores indica que desgaste moderado e severo pode ser distinguido através da inspeção visual da marca de desgaste, com o desgaste leve aparecendo em vermelho/marrom descolorido devido à oxidação, e o desgaste severo exibindo uma cor metálica brilhante e refletiva devido à exposição da matriz danificada.

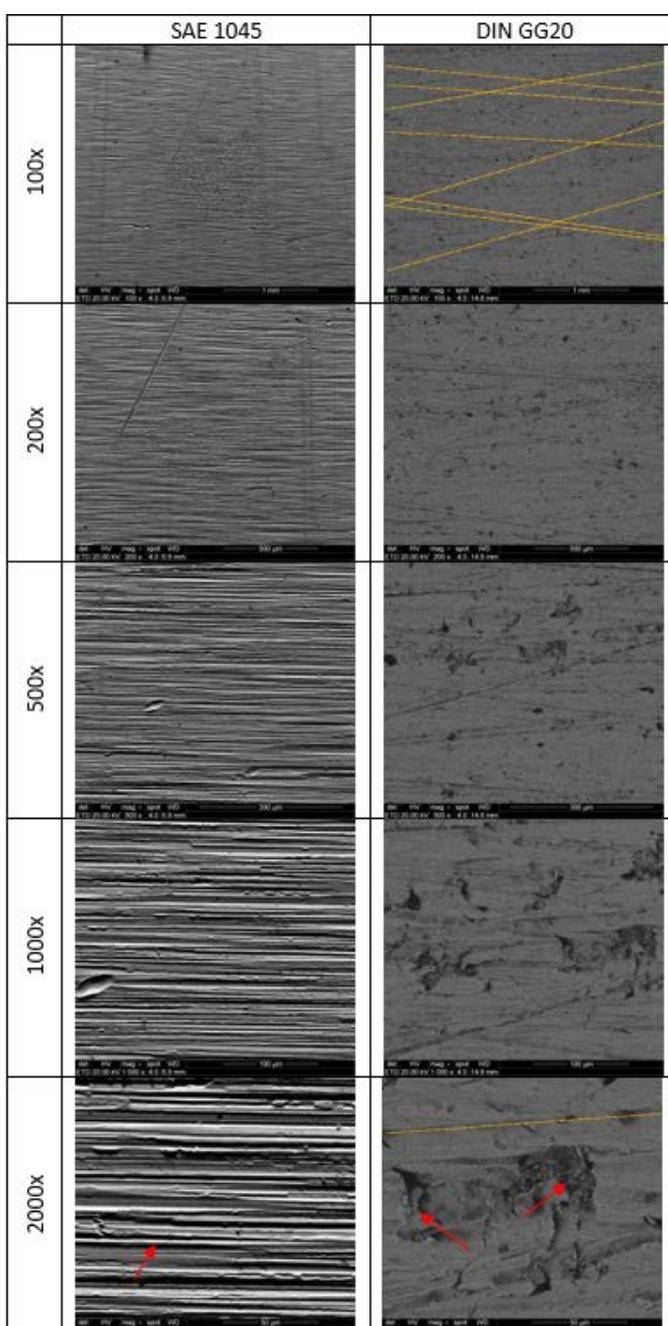
Diferentemente do encontrado pelos pesquisadores, camadas sobrepostas de óxido não foram observadas no corpo das amostras quando em análise MEV. Esse fenômeno pode estar associado a geometria do contato efetiva entre o pino e a bucha, visto que a configuração do tribômetro utilizado neste trabalho facilita a expulsão do debris gerado para fora da zona do ensaio. Observa-se também o início da transição do desgaste leve ao severo pela diminuição das áreas oxidadas e exposição da do corpo metálico.

Mesmo havendo visual diminuição das zonas oxidadas, e conseqüentemente aparecimento das zonas metálicas, é necessário evidenciar a baixa taxa de desgaste observada nos ensaios (na ordem de 10^{-6}). E, portanto, segundo a classificação apontada na tabela 2 o desgaste observado é de ordenamento leve. Ademais, uma baixa taxa de desgaste também poderia ser observada em sistemas considerados lubrificados. O comportamento autolubrificante e a formação de um tribofilme de grafite em ferros fundidos é conhecida [83] e então análoga a lubrificação limite abordado no referencial teórico (figura 11).

5.10 IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As amostras foram observadas em microscópio eletrônico de varredura e as imagens formadas por elétrons secundários em diferentes magnificações são apresentadas na figura 59.

Figura 59 – Condições topográficas do SAE 1045 e DIN GG20 anteriores ao ensaio de desgaste em diferentes magnificações.



Fonte: o autor.

A topografia mostrada corresponde a encontrada nos pinos em SAE 1045 na condição anterior ao ensaio. Sob um olhar desatencioso as diferentes magnificações podem aparentar um acabamento “grosseiro”, entretanto o que não é o caso. Devido o contato entre a ferramenta de corte e o material em determinado ângulo ocorre deformação plástica e então verifica-se a formação de sulcos paralelos ao sentido de giro do pino e perpendiculares a direção do avanço da ferramenta. Mesmo depois do tratamento térmico e posterior retificação o mesmo processo ocorre, pois, a roda abrasiva apresenta grão não afiados e com orientação aleatória, porém com a rugosidade superficial diminuída. Alguns riscos transversais e de maior profundidade não oriundos da retificação também podem ser observados. É conveniente recordar que a rugosidade Ra desta área apresentada é de 0,4 [μm]

Já para a bucha na condição anterior ao ensaio de desgaste, percebe-se a presença de riscos em forma de “x” provenientes do processo de torneamento. Essas marcas são perceptíveis a olhos nu e são muito comuns na indústria metalmeccânica. Ademais, também foi observado a presença de crateras anteriores ao ensaio de desgaste. Segundo Vadiraj et al, essas imperfeições ocorrem no ferro fundido é devido a fragilidade da grafita o que leva há formações de crateras [87].

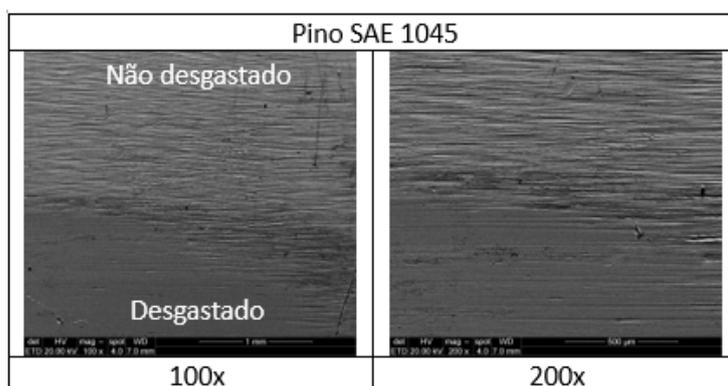
Uma vez que não há uma distribuição uniforme, a presença dessas falhas explica as maiores variações na medida rugosidades, e erro percebido, no material DIN GG0 do que as encontradas no SAE 1045.

A seguir são mostradas as imagens pós ensaio de desgaste. Conforme indicado anteriormente, o pino tem comprimento maior do que a bucha, assim enquanto o desgaste ocorre em todo o corpo da bucha, no pino as extremidades não são desgastadas. Na figura 60 está identificada essa zona de transição entre a área afetada no ensaio e a não desgastada. É possível perceber a ausência dos sulcos formados na retificação e uma homogeneização entre os picos e vales mensurados pelo rugosímetro, assim resultando nos baixos valores registrados. O que não se mostra uma tendencia nos ensaios de desgaste padronizados e encontrados na literatura. Onde há um aumento nos valores de rugosidade após o desgaste. [59]

Diversos estudos apontam o aumento da preponderância do mecanismo de abrasão em função da distância percorrida ou do tempo no SAE 1045. [88] Entretanto o comportamento aqui observado nas imagens se assemelha ao processo de brunimento. Onde rolos são deslisados sobre uma superfície e sob ação de uma força normal a área de contato com intuito de melhora as condições superficiais de

acabamento. O processo gera superfícies mais lisas por deformação plástica e um baixo desgaste, porém introduz tensões superficiais. [89]

Figura 60 – Zona de transição de rugosidade do Pino SAE 1045.



Fonte: o autor.

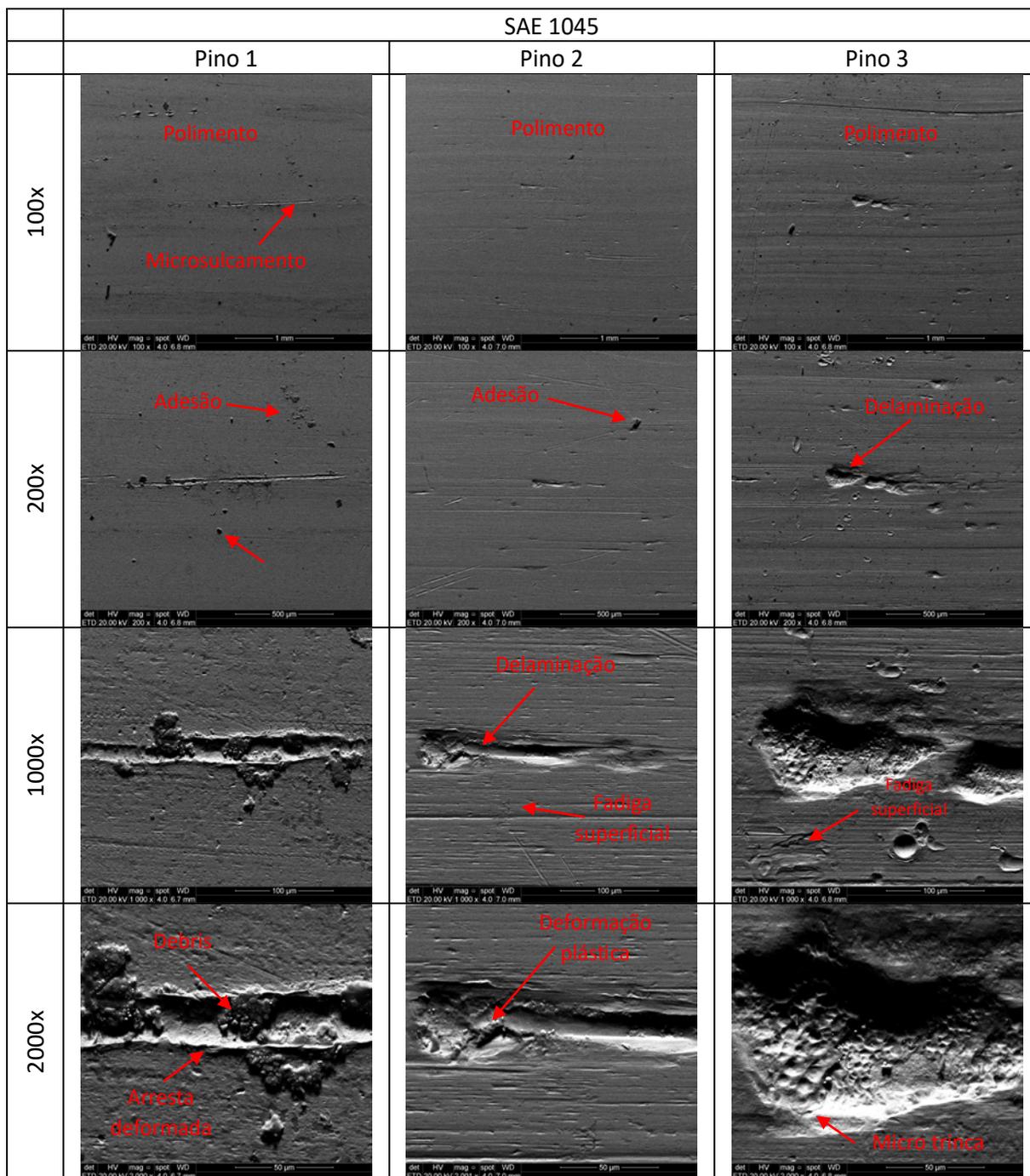
Em duas pesquisas sobre influência do brunimento em aço SAE 1045, os autores registraram morfologia da superfície desgastada através de microscopia eletrônica de varredura similares as quais aqui apontadas, onde obtiveram uma diminuição da rugosidade através do polimento causado pelo brunidor e aumento da dureza superficial. Os autores também apontam para aumento na resistência ao desgaste devido esse processo [90] [91]

Na figura 61 são apresentadas imagens em diferentes magnificações das áreas desgastadas nos três pinos ensaiados. Além do polimento, também é possível destacar a presença partículas aderidas, crateras, sulcos e riscos em todos os pinos. Mesmo após tratamento térmico em que foram obtidas proporções microestruturais distintas resultado assim em duas médias de dureza diferentes, os mesmos mecanismos aparentam estar presentes e em condições semelhantes.

As extremidades afiadas na superfície são indicativos de desgaste abrasivo, uma vez que a carga normal utilizadas no ensaio são muito inferiores ao limite de escoamento do pino SAE 1045 e a dureza do par DIN GG20 é menor, o processo de riscamento no pino se dá através de um terceiro corpo. Um contínuo endurecimento do debris através encruamento até que ocorra o riscamento [92]. É possível identificar nas imagens algum debris no interior do risco que se aderiram localmente, outros riscos em direções aleatórias também foram formados por particular menores se aderiram a superfície do pino.

A formação de crateras pode estar associada um deslocamento devido a uma dupla operação entre fadiga superficial e adesão. Uma periódica deformação plástica nas regiões subsuperficiais causada por um carregamento cíclico propaga micro trincas e suscetibiliza a área a adesão e deslocamento. [93]

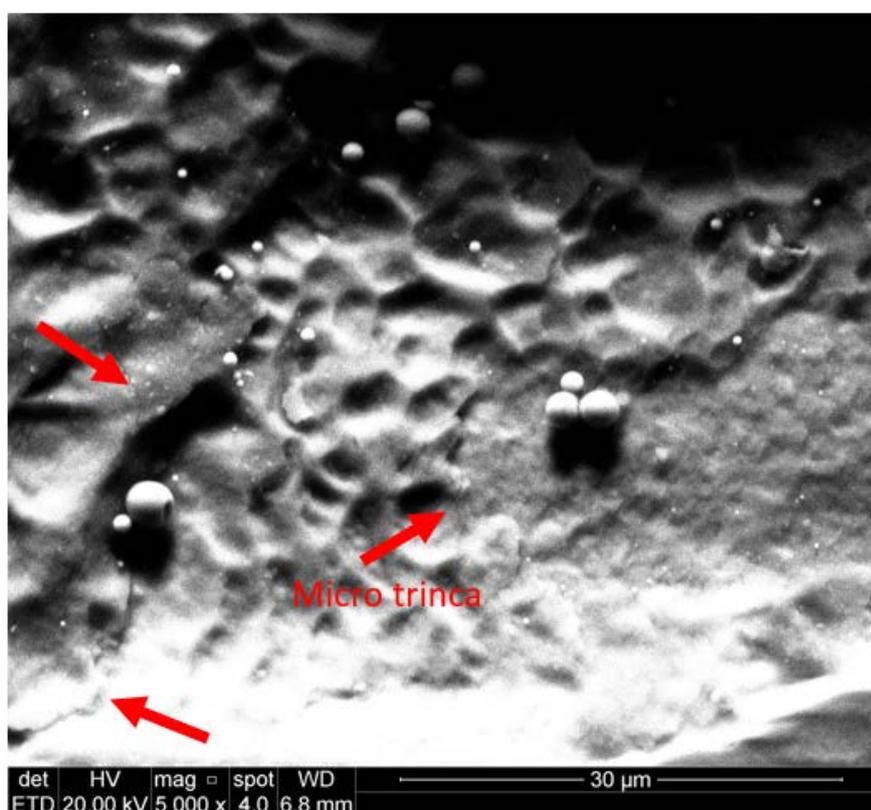
Figura 61 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do pino SAE 1045 após ensaio.



Fonte: o autor.

É possível visualizar as trincas e suas respectivas direções de propagação no interior da cavidade formada, indicadas na figura 62. Também é notável a existência de debris em formato perfeitamente esféricos e de tamanhos variados distribuídos no em toda a cavidade. Esse tipo de formação está associado a fadiga em rolamentos quando o debris é submetido ao sucessivo rolamento entre as superfícies. Inicialmente em formato aleatório ele passa de uma a apresentar uma maior esfericidade ao longo do tempo. O aparecimento desse tipo de debris é maior ao longo do período em que a situação de trabalho se estende. [94]

Figura 62 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de microtrincas no pino SAE 1045.

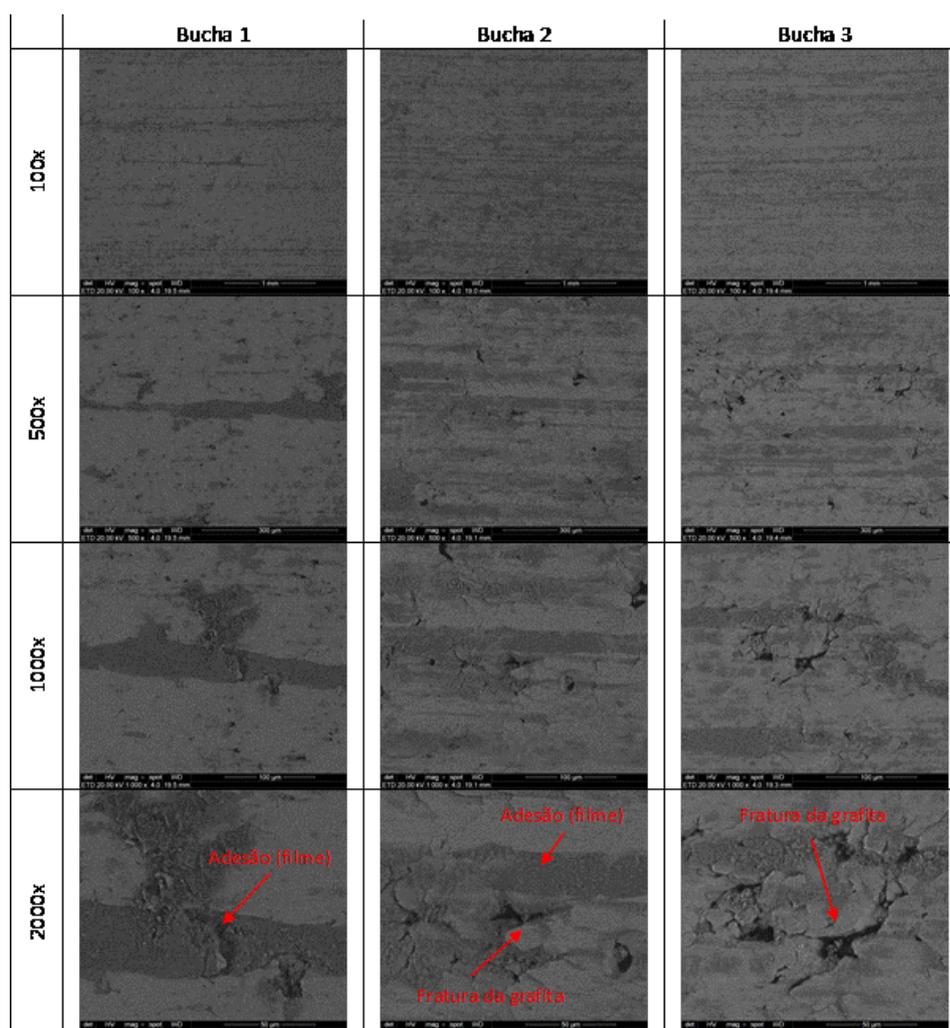


Fonte: o autor.

Na figura 63 são apresentadas as imagens, por microscopia eletrônica de varredura, das buchas em DIN GG20 após o ensaio de desgaste. Primeiramente observa-se ao desaparecimento das marcas em forma de “x” previamente mencionadas, o que juntamente com a redução na leitura da rugosidade que um processo de polimento ocorreu ao longo de toda superfície em contato. Diferentemente dos pinos, onde não há uma clara distinção na comparação do

desgaste entre os ensaios, nas áreas analisadas das buchas em DIN GG20 existe um certo distanciamento entre o ensaio 1 em relação ao 2 e 3. Nota-se o aparecimento de regiões escuras em maiores quantidades nas buchas 2 e 3. Correlatam-se a presença destas áreas a uma menor perda de massa nos pinos 2 e 3. Estes achados corroboram com os encontrados por Prasad [95], onde descreve que formação de manchas escuras no ferro fundido cinzento e adesão dos veios de grafite nas superfícies de desgaste indica a formação de filme lubrificante sólido. A perda por desgaste diminui nesses casos, pois o filme reduz a extensão e a gravidade do contato direto de metal com metal. Mesmo com uma menor perda de massa nos casos 2 e 3 observa-se uma maior presença de crateras, isso está associado a propagação de trincas que se iniciam nos veios da grafita e se desenvolvem em fraturas [96]

Figura 63 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da bucha DIN GG20 após ensaio.



Fonte: o autor.

6 CONCLUSÕES

A metodologia proposta se mostrou adequada para a simulação de desgaste em sistema tribológico bucha-pino. Pode-se fazer medições de massa e rugosidade em intervalos homogêneos sem que houvesse travamento do sistema com carga de 5kg. No modelo de testes atual, não se mostrou viável a utilização de cargas maiores 10 e 17kg, uma vez que houve falha catastrófica (travamento) que inutiliza as amostras. É possível que a formação de debris oriundos da bucha exerçam grande influência nesse tipo ocorrência, uma relação entre carga e folga dimensional nas amostras dos corpos de prova deve ser melhor estudada para se propor melhorias.

Mesmo o tratamento térmico de martêmpera contemple uma formação martensítica completa, no caso do aço SAE 1045 as distintas proporções microestruturais apresentadas nos pinos, os quais foram submetidos a processos idênticos, atestam a baixa efetividade deste método para o material o qual foi submetido.

A perda de massa observada mostrou-se intimamente ligada a relação de dureza entre o par. Quanto maior a diferença entre o pino e a bucha, maior é o desgaste da bucha e menor desgaste no pino. Pino 1 teve a menor perda de massa, já a bucha 1 teve a maior perda de massa registrada, uma relação de perda de aproximadamente 17x. Para as amostras 2 e 3 a média da razão de perda de massa foi de apenas 2,5x.

Quanto a severidade do desgaste encontrada nas amostras, seguem ordenamento de 10^{-6} para os pinos em SAE 1045 e 10^{-5} para as buchas em DIN GG20. Em ambos os casos o desgaste observado é classificado como leve.

Coeficiente de desgaste (K) e coeficiente de desgaste específico (k) apresentaram-se menores no pino 1, assegurando o entendimento de maior resistência ao desgaste àquele de maior dureza, dentre as amostras neste ensaio.

A proporção de fases da microestrutura aparece como fator importante na avaliação do desgaste quando os pinos apresentaram durezas próximas. Mesmo com dureza menor, o pino que apresentou menor presença de fase ferrítica demonstrou uma maior resistência ao desgaste.

O coeficiente de atrito para contato deslizante a seco do tipo bucha pino apresenta-se como dependente das condições superficiais iniciais. As paradas para medição seguidas de limpeza das amostras causaram aumento no coeficiente de

atrito indicando influência da lubrificação sólida inerente do grafite desprendido pelo ferro fundido. Passando de 0,25 [-] para 0,5 [-] seguido por uma nova redução intermediária.

Para o ensaio em tribômetro do tipo bucha-pino entre par SAE 1045 e DIN GG20 a rugosidade apresentou tendência de redução em função da distância percorrida. Considerando todos os valores de rugosidade medidos, houve uma redução de rugosidade de forma geral em 56,85% nos pinos e de 27,81% para as buchas.

Foram encontrados indícios da presença de mecanismos de desgaste por adesão, corrosão, fadiga superficial e abrasão. Em especial, abrasão por polimento apresentou-se como mecanismo operante tanto nos pinos quanto nas buchas. Sendo identificável em toda a zona desgastada tanto para o pino quanto para a bucha.

Nos pinos a presença de arestas deformadas plasticamente observados diretamente na vizinhança de sulcos na análise do MEV indicam a presença do micro mecanismo de sulcamento (micro-ploughing). Além disso, também foram observados no interior de crateras, microtrincas que levam a deslocamento de seções afetadas.

Nas buchas percebeu-se a propagação das zonas fraturadas da grafita, que já eram preexistentes ao ensaio.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento de procedimento experimental para ensaio de desgaste para cargas superiores a 50N.
- Comparação entre comportamento tribológico para diferentes ligas de ferro fundido.
- Estudo da influência da microestrutura na resistência ao desgaste em aços com diferentes composições químicas e de mesma dureza.

8 REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho do setor de Fundição - ABRIL/2018**. [S.l.], p. 3. 2018.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho do setor de Fundição - ABRIL/2019**. [S.l.], p. 1. 2019.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho do setor de Fundição - ABRIL/2020**. [S.l.], p. 3. 2020.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Desempenho do setor de Fundição - ABRIL/2021**. [S.l.], p. 3. 2021.
5. CARVALHO, P. S. L. D.; MESQUITA, P. P. D.; CARDARELLI, N. A. MINERAÇÃO E METALURGIA. In: BNDES **Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2017. p. 232. ISBN 9788587545633. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14214/2/PanoramasSetoriais-2030.pdf>>. Acesso em: 1 Junho 2021.
6. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Indicadores Econômicos CNI. **Indicadores Industriais**, Brasília, n. 4, Abril 2021. Disponível em: <https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/2e/59/2e59fc22-8760-4cc3-8750-4618b1d9790f/indicadoresindustriais_abril2021_2.pdf>. Acesso em: 11 Junho 2021.
7. CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. D. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 33, p. 121-162, 2008.
8. ABIFA/APEX. **Relatório Final- Prospecção do Mercado Internacional de Fundidos**. [S.l.]. 2006.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIDOS. Índices Setoriais. **Fundição & Matérias-Primas**, n. 214, p. 19, Setembro 2019. ISSN issn 2359-702x. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/revista17/index.html#p=1>>. Acesso em: 1 Julho 2021.
10. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos Materiais**. 9ª. ed. São Paulo: Artliber, 2014.
11. ZHAO, Y. **An Integrated Process Planning System for Machining and Inspection**. University of Auckland. [S.l.], p. 283. 2009.

12. BAGSHAW, R. W.; NEWMAN, S. T. Manufacturing data analysis of machine tool errors within a contemporary small manufacturing enterprise. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 9, n. 42, March 2002. 1065-1080.
13. BI, Z. M. .; ZHANG, W. J. Flexible fixture design and automation: review, issues and future direction. **International Journal of Production Research**, 39, n. 13, 2001. 2867–2894.
14. WARDAK, K. R.; TASCH, U.; CHARALAMBIDES, P. G. Optimal fixture design for drillingthrough deformable plate workpieces: Part I. Model formulation. **Journal of Manufacturing Systems**, n. 20, 2001. 23-32.
15. NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Inegradada**. Tradução de João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar. 2ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
16. STACHOWIAK, G. W. (Ed.). **Wear - Materials Mechanisms and Practice**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
17. HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, 17 May 2017. p.263–284.
18. OLIVEIRA, C. G. E. S. I. P. P. Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia. **Revista de Ensino de Engenharia**, 2015. 3-10.
19. TYLCZAK, J. H. Friction, Lubrication, and Wear Technology. In: _____ **ASM Handbook**. Ohio: ASM International, 1992.
20. STOLARSKI, T. A. **Tribology in Machine Design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1990.
21. STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 4^a. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2014.
22. BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2^a. ed. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
23. ZUM GAHR, K.-H. **Tribology Series: Microstructure and Wear of Materials**. [S.l.]: Elsevier, v. 10, 1987.
24. BENINCÁ, E. **TRIBÔMETRO PARA AVALIAÇÃO DE DESGASTE EM SISTEMA BUCHA-PINO**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS. Caxias do Sul, p. 74. 2019. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Luis; Co-orientador: Prof. Dr. André Zimmer.
25. BREZEANU, L. C. Contact Stresses Between two cylindrical bodies: cylinder and cylinder cavity with parallel axes - part I Theory and FEA 3D Modeling. **Procedia**

Technology, Tirgu-Mures, 19, 9-10 October 2014. 169-176. 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG.

26. FAGAN, M. J.; MCCONNACHIE, J. A review and detailed examination of non-layered conformal contact by finite element analysis. **JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS**, 36, n. 2, 2001. 177-195.
27. ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook - Friction, Lubrication, and Wear Technology**. Materials Park: ASM International, v. 18, 1992.
28. HUTCHINGS, I.; SHIPWA, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2^a. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
29. KATO, K. Wear Mechanisms. **New Direction in Tribology**, London, 1997. 39-56.
30. BAYER, R. G. **Mechanical Wear Prediction and Prevention**. New York: Dekker, 1994. 200-291 p.
31. BLAU, P. J. Embedding Wear Models into Friction Models. **Tribol Lett**, 34, 2009. 75-79.
32. RODRIGUES, J. M. C.; MARTINS, P. A. F. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia de Deformação Plástica**. 2^a. ed. Lisboa: Escolar, v. I, 2010.
33. PETERSON, M. B.; WINER, W. O. **Wear control Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1980.
34. BISWAS, S. K. Wear of Metals: A Material Approach. In: STACHOWIAK, G. W. **Wear – Mechanisms, Materials and Practice**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. p. 21–36.
35. HUTCHINGS, I. M. The Challenge of Wear. In: STACHOWIAK, G. W. **Wear – Mechanisms, Materials and Practice**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. p. 1-7.
36. LUDEMA, K. 'Third Bodies: Perspectives on Modeling in Lubricated Contacts, in Close Fitting Contacts, etc: Following on the Concepts of Dr Maurice Godet. **Tribology Series**, Lyon, n. 31, 5-8 September 1995. pp. 3–19.
37. VERBEEK, H. J. Tribological systems and wear factors. **Wear**, vol. 56, ed. 1, 56, n. 1, 1979. 81–92.
38. LANCASTER, J. K. A Review of the Influence of Environmental Humidity and Water on Friction, Lubrication and Wear. **Tribology International**, n. 23, 1990. 371-389.

39. LANCASTER, J. K.; PRITCHARD, J. R. . The Influence of Environment and Pressure on the Transition to Dusting Wear of Graphite. **Journal of Physics D: Applied Physics**, n. 14, 1981. 747–762.
40. BERTHIER, Y. Background on Friction and Wear. In: _____ **Handbook of Materials Behavior Models**. [S.I.]: Lemaître Academic Press, 2001. p. 676–699. ISBN ISBN 012 443341 3.
41. M. GOUIDER, Y. B. P. J. B. R. S. B. H. E.-S. ‘Mass Spectrometry During C/C Composite Friction: Carbon Oxidation Associated with High Friction Coefficient and High Wear Rate. **Wear**, 256, 2004. 1082-1087.
42. DESCARTES, S.; BERTHIER, Y. Rheology and Flows of Solid Third Bodies: Background and Application to na MoS1.6 Coating. **Wear**, 252, 2002. 546–556.
43. NICCOLINI, E.; BERTHIER, Y. . Progression of the Stick/Slip Zones in a Dry Wheel–Rail Contact: Updating Theories on the Basis of Tribological Reality. **Elsevier Tribology Series**, Leeds, 41, 3–6 September 2002. Proceedings of the 29th Leeds–Lyon Symposium on Tribology.
44. BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. 2^a, revised and expanded. ed. [S.I.]: Dekker, 2004.
45. ASTM INTERNATIONAL. **Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications 2001**. [S.I.]: [s.n.], 200.
46. HOGMARK, S.; JACOBSON, S. Hints and Guidelines for Tribotesting and Evaluation. **Lubrication Engineering**, 48, n. 5, 1992. 401-409.
47. TAKESUE, M. **Methods to Evaluate the Practical Tribological Performance of Sliding Parts in Machines**. University of Kyusyu. [S.I.]. 1999.
48. NEALE, M.; GEE, M. **A Guide to Wear Problems and Testing for Industry**. [S.I.]: William Andrew Inc, 2001. ISBN 978-0-8155-1471-8.
49. MÖHRINGA, H.-C.; WIEDERKEHRB, P. **Intelligent Fixtures for High Performance Machining**. 7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting. [S.I.]: Procedia CIRP. 2016. p. 383 – 390.
50. OLAIZA, E. et al. Adaptive fixturing system for the smart and flexible positioning of large volume workpieces in the wind-power sector. **24th CIRP Design Conference**, n. 21, 2014. 183 – 188.
51. FLEISCHER, J. et al. Handling in Metal Cutting Machines. **Manufacturing Technology**, 555, fev. 2006.
52. MORONI, G. et al. **Robust design of fixture configuration**. 24th CIRP Design Conference. [S.I.]: Procedia CIRP. 2014. p. 189-194.

53. BOYLE, I.; RONG, Y.; BROWN, D. C. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, n. 27, 2011. 1-12.
54. LI, B.; MELKOTE; S.N. Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 39, 1999. 871-883.
55. WANG, M. **Wang, M. An optimum design for 3-d fixture synthesis in a point set domain**. IEEE T Robotic Autom. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 839 –846.
56. CATELAN, J. **Minimização do Erro de Circularidade Causado pela Fixação de Peças com Baixa Rigidez Através da Modificação Estrutural**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, p. 158. 2015.
57. NEE, A.; TAO, Y. C.; ZUMAR, Z. J. **An advanced treatise on fixture design and planning**. [S.l.]: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda, 2004.
58. HIBBELER, R. C. **Engineering Mechanics - Combined Statics & Dynamics**. 12th Edition. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2009.
59. MAYRHOFER, A. **COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO SAE 4140 TEMPERADO E REVENIDO**. UFRGS. Porto Alegre. 2019.
60. ANIRUDHAN POTTIRAYIL; KAILAS, S. V.; BISWAS, S. K. Experimental estimation of friction force in lubricated cutting of steel. **Wear**, 2010. 557–564.
61. CASTRO, V. V. D. et al. Lubricated sliding wear of SAE 1045 and SAE 52100 steel against alumina in the presence of biodiesel, diesel and a 50:50 blend of those fuels. **Wear**, 1 October 2016. 267-277.
62. GHIBAN, B.; BRAN, D. T. **Heat treatment behavior of alternator shafts steels**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.]: [s.n.]. 2019.
63. KWIETNIEWSKI, C. E. F. et al. **Tratamentos Térmicos de Aço e Ferro Fundido**. [S.l.]: UFRGS, 2014.
64. NUNURA, C. R. N.; SANTOS, C. A. D.; SPIM, J. A. Numerical – Experimental correlation of microstructures, cooling rates and mechanical properties of AISI 1045 steel during the Jominy end-quench test. **Materials and Design**, n. 76, 2015. 230-243.
65. ASM INTERNATIONAL. **Metallography and Microstructures**. [S.l.]: [s.n.], v. 9, 2004. 147 p.
66. MULYADI, M. et al. The Effect of Quenching Media on the Hardness of AISI 1045 Steel. **Atlantis Highlights in Engineering**, 9, 2021.

67. MASASHI NISHIMOTO, I. M. T. D. K. K. Y. S. Effect of quenching in aqueous polyvinylpyrrolidone solutions on the microstructure and pitting corrosion resistance of AISI 1045 carbon steel. **Materials and Corrosion**, 74, 7 December 2022. 724-733.
68. ISHTIAQ, M. et al. Microstructural, mechanical, and electrochemical analysis of carbon doped AISI carbon steels. **Applied Microscopy**, 52, 20 October 2022.
69. ZAMBRANO, O. A. et al. The sliding wear behaviour of steels with the same hardness. **Wear**, 418-419, 2019. 201-207.
70. DODO, R. M. et al. Mechanical properties and microstructures data of AISI 1070 steel quenched in epoxidized transesterified cottonseed oil. **Data in Brief**, 32, 2020.
71. YU, J.; SONG, B. Effects of heating time on the microstructure and properties of an induction cladding coating. **Physics**, 11, 2018.
72. AVCI, A. et al. Mechanical and microstructural properties of low-carbon steel-plate-reinforced gray cast iron. **Journal of Material Technology**, 2009. 1410-1416.
73. WEITAO, S. et al. Controlling the tribology performance of gray cast iron by tailoring the microstructure. **Tribology International**, 167, March 2022.
74. SINGHAL, P.; SAXENA, K. K. Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview. **Materials Today: Proceedings**, 26, 3 March 2020. 1393-1401.
75. POLAT, Ş. et al. **Investigation of Dry Sliding Wear Mechanism of GG20 and GG25 Cast Iron Materials Used for Valves**. 3rd International Conference of Engineering Against Failure - ICEAF III. Kos-Greece: [s.n.]. 2013.
76. NEVES, J. R. D. et al. **Avaliação do tratamento térmico de têmpera e revenimento em diferentes meios de resfriamento no aço SAE 1045**. 6º Simpósio Nacional de Ciências e Engenharias. Anápolis: [s.n.]. 2021.
77. ODI-OWEI, S.; ONUBA, A. S. Experimental Investigation on Tribological Behaviour of Carbon Steels. **The West Indian Journal of Engineering**, 39, January 2017. 36-39.
78. WOODWARD, R. G.; TOUMPIS, A.; GALLOWAY, A. The influence of cementite spheroidizing duration on the microstructure and sliding wear response of grey cast iron against AISI 4330. **Wear**, 488-489, 15 January 2022.
79. HALEVI, G. **Process and Operation Planning**. 1. ed. [S.I.]: SPRINGER-SCIENCE+BUSINESS MEDIA, B.V, 2003.

80. PANTALEÓN, E. M.; DOS SANTOS LIMA, G. Z. **Analysis of wavelet transform applied in frictional coefficient signal**. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering. Natal: [s.n.]. 2011.
81. ZAMBRANO, O. A. et al. Running-in period for the abrasive wear of austenitic steels. **Wear**, 452-453, 2020.
82. PANTALEÓN, E. M.; TANAKA, D. K.; BERNARDES, F. G. Análise das variações do coeficiente de atrito e as correlações com os mecanismos de desgaste. **HOLOS**, 1, 2012. 62-72.
83. GHASEMI, R.; ELMQUIST, L. **Cast iron and the self-lubricating behaviour of graphite under abrasive wear conditions**. 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10. Mar del Plata, Argentina: [s.n.]. 2014.
84. WANG, P. et al. Effect of nanoscale surface roughness on sliding friction and wear in mixed lubrication. **Wear**, 530-531, 8 Junho 2023.
85. BHATTACHARYYA, S. Wear and friction in steel, aluminum and magnesium alloys. **Wear**, 61, 1980. 133-141.
86. QUINN, T. F. J. Review of oxidational wear - Part I: The origins of oxidational wear. **Tribology International**, 16, October 1983. 252-271.
87. VADIRAJ, A. et al. Mechanical and wear behavior of quenched and tempered alloyed hypereutectic gray cast iron. **Materials & Design**, 32, n. 4, April 2011. 2438-2443.
88. GONGA, W. et al. Coupling fractal model for adhesive and three-body abrasive wear of AISI 1045 carbon steel spool valves. **Wear**, 418-419, 2019. 75-85.
89. SALDAÑA-ROBLES, A. et al. **Análisis teórico-numérico de esfuerzos generados para bruñido de bola sobre cilindros rotativos**. 20th Int. Conf. Mech. Eng. Santiago de Querétaro, Mexico: [s.n.]. 2014.
90. SALDAÑA-ROBLES, A. et al. Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel. **Surface and Coatings Technology**, 339, 15 April 2018. 191-198.
91. VELÁZQUEZ-CORRAL, E. et al. **Wear resistance enhancement of AISI 1045 steel by vibration assisted ball**. 6th CIRP Conference on Surface Integrity. [S.l.]: Elsevier. 2022. p. 287–292.
92. DESCARTES, S. et al. Presence and role of the third body in a wheel–rail contact. **Wear**, 258, March 2005. 1081-1090.

93. GONG, W. et al. Adhesion-fatigue dual mode wear model for fractal surfaces in AISI 1045 cylinder-plane contact pairs. **Wear**, 430–431, 15 July 2019. 327-339.
94. SCOTT, D.; MILLS, G. H. Spherical debris—Its occurrence, formation and significance in rolling contact fatigue. **Wear**, 24, n. 2, May 1973. 235-242.
95. PRASAD, B. K. Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters. **Tribology International**, 44, 3 January 2011. 660–667.
96. RIAHI, A. R.; ALPAS, A. T. Wear map for grey cast iron. **Wear**, 225, 2003. 401–409.
97. SCALLAN, P. **Process Planning: The Design/Manufacture Interface**. Oxford: butterworth-heinemann, 2003. ISBN ISBN 0 7506 5129 6.
98. ZHOU, Y.; LI, Y.; WANG, W. A feature-based fixture design methodology for the manufacturing of aircraft structural parts. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, n. 27, 2011. 986-993.
99. FILHO, J. M. C.; PAULA, P. I. D. **Estudo dos erros de usinagem em decorrência das forças de reação em sistemas de fixação**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. [S.l.]: [s.n.]. 2006.
- 100 A, R. S. C. et al. Edges, clearances, and wear: Little things that make big differences in bushing. **Wear**, 268, 2010. 41–49.
- 101 STOTT, F. H. The role of oxidation in the wear of alloys. **Tribology International**, . 31, 1998. 61-71.
- 102 LYU, Y.; ZHU, Y.; OLOFSSON, U. Wear between wheel and rail: A pin-on-disc study of environmental conditions and iron oxides. **Wear**, 328–329, 15 April 2015. 277-285.