

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

ANÁLISE DE DESGASTE DE MATERIAIS APLICADOS EM FERRAMENTAS DE
FORJAMENTO A FRIO

por

Gláucio Accadrolli

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

Orientador: Dr. Lirio Schaeffer

Porto Alegre, dezembro de 2020.

**ANÁLISE DE DESGASTE DE MATERIAIS APLICADOS EM FERRAMENTAS DE
FORJAMENTO A FRIO**

por

Gláucio Accadrolli

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Lirio Schaeffer
Orientador

Prof. Dr. Afonso Reguly
Coordenador do PPGE3M

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS) _____

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos (PUCRS) _____

Prof. Dr. José Lesina César (ULBRA) _____

Dedico este trabalho em memoria do meu querido *nonno*
Domingos Accadrolli, que sempre foi e sempre será o melhor
exemplo do mundo para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as portas que ele vem me ajudando a abrir, as dificuldades que me ajuda a superar, assim como as pessoas incríveis que ele colocou e coloca junto a mim.

Agradeço ao apoio imensurável e amor de minha mãe Lorena Accadrolli e de minha noiva Bruna Mara Postingher (garotas, grato pela paciência e parceria!), assim como todo o suporte familiar que recebo, em especial de meu querido tio Milton Accadrolli.

Agradeço especialmente ao professor Lirio Schaeffer que me acolheu no programa de mestrado, bem como o compartilhamento de sua bagagem técnica e pela expansão de meus horizontes perante a conformação mecânica. Muito obrigado professor!

Aos amigos da UFRGS Thomas Gomes e André Rosiak pelo apoio na utilização dos laboratórios e pela prontidão em ajudar-me, e agradeço especialmente ao amigo Diego Alba por toda parceria e pelas suas valiosas dicas.

Aos meus queridos amigos engenheiros de longa data, que contribuíram com suas habilidades e grande conhecimento para a realização deste trabalho: Eduardo Fagundes, Henrique Waldman, Luis Agostini e Samuel Badin. Agradeço especialmente ao Fernando Azuma por tornar meus horários maleáveis, para poder cursar as disciplinas do mestrado.

Aos meus amigos Cláudio Costa e Fabricio Postingher por toda ajuda prestada na atualização do dispositivo.

“O ignorante pode achar, só o sábio inventa”
Os Trabalhadores do Mar - Victor Hugo

ACCADROLLI, G. **Análise de desgaste de materiais aplicados em ferramentas de forjamento a frio**. 2020. 114 folhas. Dissertação - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

A utilização de ensaios tribológicos possibilita inúmeras vantagens no desenvolvimento de projetos, principalmente em relação à seleção de materiais e técnicas de beneficiamento dos mesmos. Este trabalho busca contribuir com a exploração destas vantagens aplicando técnicas de avaliação tribológica, através da utilização experimental de um dispositivo para ensaios tribológicos do tipo pino-sobre-disco (P-S-D), adaptado para possibilitar em condições de deslizamento um regime cíclico de contato superficial entre as amostras. Os materiais que compõem as amostras do tipo disco foram os aços AISI D6 e AISI H13, caracterizados de forma a reproduzir configurações específicas encontradas em ferramentas de forjamento a frio, como dureza e acabamento superficial. Os materiais utilizados como amostras do tipo pino foram os aços SAE 1020 e SAE 1045, caracterizados como *billet*. Com a finalidade de reproduzindo de forma controlada o sistema tribológico do processo de forjamento a frio, foi utilizado valores de parâmetros selecionáveis em reais condições de processo, visando reproduzir de maneira coesa o sistema tribológico do processo. A análise tribológica avaliou o comportamento das amostras caracterizadas como ferramental perante o desgaste. Informações como mecanismos de desgaste, taxa de desgaste e coeficiente de desgaste foram obtidas, tendo como base 5 combinações de ensaios, onde foram adotadas variáveis como: material de pino (SAE 1020 e SAE 1045), tipos de lubrificantes (Lubrificante 01 e Lubrificante 02) e condições de lubrificação (ensaio lubrificado ou não-lubrificado).

PALAVRAS-CHAVE: Forjamento, tribologia, desgaste, ferramental.

ACCADROLLI, G. **Wear analysis of materials applied in cold forging tools.** 2020. 114 sheets. Dissertation - Graduate Program in Mining, Metallurgical and Materials Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

The use of tribological tests allows many advantages in the development of projects, mainly in relation to the selection of materials and techniques for their improvement. This work seeks to contribute to the exploitation of these advantages by applying tribological assessment techniques, through the experimental use of a device for pin-on-disc (P-O-D) tribological tests, adapted to allow under sliding conditions a cyclic regime of surface contact between the samples. The materials that make up the disc-type samples are AISI D6 and AISI H13 steels, characterized in order to reproduce specific configurations found in cold forging tools, such as hardness and surface finish. The materials used as pin-type samples were SAE 1020 and SAE 1045 steels, characterized as billet. In order to reproduce in a controlled manner the tribological system of the cold forging process, selectable parameter values were used in real process conditions, aiming at cohesively reproducing the tribological system of the process. The tribological analysis evaluated the behavior of samples characterized as tooling before wear. Information such as wear mechanisms, wear rate and wear coefficient were obtained, based on 5 test combinations, where variables were adopted such as: pin material (SAE 1020 and SAE 1045), types of lubricants (Lubricant 01 and Lubricant 02) and lubrication conditions (lubricated or non-lubricated test).

KEYWORDS: Forging, tribology, wear, tooling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA	18
1.1.1 Aspecto Tecnológico	19
1.1.2 Aspecto Econômico	19
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 TRIBOLOGIA	20
2.1.1 Importância da Tribologia na Indústria	21
2.1.2 Tribômetros.....	22
2.1.3 Norma ASTM G99.....	24
2.1.4 Categorias de Desgaste	25
2.1.5 Técnicas para Determinação do Desgaste.....	35
2.1.6 Taxa de Desgaste e Coeficiente de Desgaste	40
2.1.7 Tribologia na Conformação Mecânica dos Materiais.....	41
2.2 FORJAMENTO	43
2.2.1 Forjamento a Frio.....	44
2.2.2 Ferramentas Utilizadas para Conformação a Frio.....	46
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A FRIO	47
2.3.1 O Efeito do Atrito e Desgaste	48
2.3.2 Condições Topográficas Superficiais.....	49
2.3.3 Lubrificantes e Lubrificação	50
2.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO.....	52
2.4.1 Aços para Ferramentas Aplicados a Conformação a Frio	54
2.4.2 Tratamentos e Acabamentos Superficiais.....	55
2.4.3 Modificações e Revestimentos Superficiais	56
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 TRIBÔMETRO P-S-D	59
3.1.1 Adaptação: Sistema de Carga	60
3.1.2 Atualização: Condição Cíclica.....	61

3.2 DISCOS E PINOS (AMOSTRAS)	62
3.2.1 Disco	62
3.2.2 Pino	63
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	64
3.4 ANÁLISES PRÉ-ENSAIO	66
3.4.1 Massa Inicial	66
3.4.2 Rugosidade Superficial.....	67
3.4.3 Microscopia Óptica	69
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	71
4.1 PARÂMETROS DE ENSAIO	71
4.1.1 Força	71
4.1.2 Pista de Degaste e Velocidade de Deslizamento	72
4.1.3 Distância de Deslizamento e Tempo de Duração do Ensaio	73
4.2 ENSAIO TRIBOLÓGICO.....	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
5.1 MUDANÇA DE MASSA E MECANISMOS DE DESGASTE	77
5.1.1 Grupo A: Ensaio 01 e 03	78
5.1.2 Grupo B: Ensaio 02 e 04	84
5.1.3 Grupo C: Ensaio 05	91
5.1.4 Compilação de Resultados de Mudança de Massa dos Discos	96
5.2 TAXA DE DESGASTE	97
5.3 INFLUÊNCIA DO LUBRIFICANTE NO DESGASTE	98
5.4 RELAÇÃO: MATERIAL, DUREZA E RUGOSIDADE	101
6. CONCLUSÕES.....	102
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO 01 – Certificado de Qualidade: AISI D6	109
ANEXO 02 – Certificado de Qualidade: AISI H13	110
ANEXO 03 – Certificado de Qualidade: SAE 1020	111
ANEXO 04 – Certificado de Qualidade: SAE 1045	112

ANEXO 05 – Estado superficial das amostras do tipo disco – Ampliação 50X..... 113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico do procedimento experimental para obtenção do objetivo através da análise tribológica.....	20
Figura 2 – Variações de tribômetros comerciais	22
Figura 3 - Configurações de amostras utilizadas em contatos de deslizamento seco ou parcialmente lubrificadas.....	23
Figura 4 - Esquema simplificado do sistema de ensaio de desgaste pino-sobre-disco, de acordo com a ASTM G99.....	25
Figura 5 – Contato superficial durante o desgaste adesivo.....	27
Figura 6 - Categorias de desgaste abrasivo.....	29
Figura 7 - O efeito da dureza na taxa de desgaste abrasivo de dois corpos de diferentes classes de materiais	30
Figura 8 - O efeito da dureza na taxa de desgaste abrasivo de dois corpos em metais puros, quando o abrasivo é mais duro em relação a superfície de desgaste	30
Figura 9 - Modelo geral para desgaste superficial por fadiga.....	32
Figura 10 – Danos por Desgaste por Fadiga.....	32
Figura 11 - Variação da principal tensão de cisalhamento em diferentes profundidades abaixo do ponto de contato entre superfícies	33
Figura 12 - Acúmulo de tensões cíclicas em contatos por deslizamento	34
Figura 13 - Componente de um rolamento de aço após ação do desgaste corrosivo	34
Figura 14 - Conceito básico do fenômeno de desgaste químico (Remoção de um filme de óxido por consequência do atrito).....	35
Figura 15 - Detritos provenientes de um tipo severo de desgaste abrasivo.....	36
Figura 16 - Diferença entre superfície desgastada e taxa de desgaste linear.....	36
Figura 17 - Parcela superficial de uma amostra do tipo disco de vidro-cerâmica mensurada por perfilometria.....	39
Figura 18 - Influência entre o tamanho da seção transversal do pino e o tamanho da pista de desgaste do disco na utilização do sistema de mensuração LVDT	40
Figura 19 - Abordagem do sistema tribológico na conformação mecânica dos materiais.....	42
Figura 20 - Fatores que impactam o sistema tribológico	42

Figura 21 - Exemplo de componentes fabricados por forjamento a quente, a morno e a frio	44
Figura 22 - Esquema das etapas de forjamento a frio de uma ponta de eixo a partir de um <i>billet</i>	45
Figura 23 - Processo de forjamento a frio sem rebarba	47
Figura 24 - Danos em ferramentas de conformação a frio	48
Figura 25 - Regimes de lubrificação aplicados à conformação mecânica dos metais	51
Figura 26 - Diagrama de compatibilidade metalúrgica para pares metálicos	53
Figura 27 - Revestimentos CVD e PVD (materiais, estrutura e camada).....	57
Figura 28 - Fluxograma da metodologia experimental de análise tribológica de materiais de ferramentas de forjamento a frio	59
Figura 29 - Tribômetro P-S-D: (a) adaptações e (b) atualização.....	60
Figura 30 - Novo sistema de carga controlada.....	61
Figura 31 - Novo porta Amostra Disco	61
Figura 32 - Diagrama operacional do ensaio tribológico	62
Figura 33 - Amostras do tipo Disco	62
Figura 34 - Amostras do tipo Pino	64
Figura 35 - Medição da dureza de um disco	65
Figura 36 - Medição da rugosidade.....	67
Figura 37 - Sentindo de medição da rugosidade.....	68
Figura 38 - Estado superficial de um disco confeccionado com o aço AISI D6 após retifica (ampliado 50X)	69
Figura 39 - Estado superficial de um disco confeccionado com o aço AISI H13 após retifica (ampliado 50X)	70
Figura 40 - Distância linear: (a) contato direto e (b) intervalo de contato	73
Figura 41 - Sistema de conservação de lubrificante.....	76
Figura 42 - Momentos iniciais de um dos ensaios tribológicos.....	76
Figura 43 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 01	78
Figura 44 – Ensaio 01: Amostra DH09.....	79
Figura 45 – Ensaio 01: Amostra DD07	79
Figura 46 – Ensaio 01: Amostra DD08.....	80
Figura 47 – Ensaio 01: Amostra DD03.....	80
Figura 48 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 03	81

Figura 49 - Ensaio 03: Amostra DH04.....	82
Figura 50 - Ensaio 03: Amostra DH08.....	82
Figura 51 - Ensaio 03: Amostra DH01.....	83
Figura 52 - Ensaio 03: Amostra DD06.....	83
Figura 53 - Ensaio 01 e 03: mecanismos de desgaste combinados.....	84
Figura 54 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 02	85
Figura 55 - Ensaio 02: Amostra DH06.....	86
Figura 56 - Ensaio 02: Amostra DD10.....	86
Figura 57 - Ensaio 02: Amostra DD09.....	87
Figura 58 - Ensaio 02: Amostra DD01.....	87
Figura 59 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 04	88
Figura 60 - Ensaio 04: Amostra DH05.....	89
Figura 61 - Ensaio 04: Amostra DH10.....	89
Figura 62 - Ensaio 04: Amostra DH03.....	90
Figura 63 - Ensaio 04: Amostra DD04.....	90
Figura 64 - Ensaio 02 e 04: mecanismos de desgaste combinados.....	91
Figura 65 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 05	92
Figura 66 - Ensaio 05: Amostra DH02.....	93
Figura 67 - Ensaio 05: Amostra DD02.....	93
Figura 68 - Ensaio 05: Amostra DH07.....	94
Figura 69 - Ensaio 05: Amostra DD05.....	95
Figura 70 - Ensaio 05: mecanismos de desgaste combinados.....	95
Figura 71 – Variação de massa das amostras do tipo disco	96
Figura 72 - Comparação entre massa inicial e final das amostras do tipo disco	97
Figura 73 - Influência do Lubrificante 01 perante o desgaste.....	99
Figura 74 - Influência do Lubrificante 02 perante o desgaste.....	99
Figura 75 - Comparativo entre os Lubrificantes 01 e 02.....	100
Figura 76 - Comparativo entre os Lubrificantes 01 e 02.....	100
Figura 77 - Aspecto superficial de um pino (PA2) após um ensaio tribológico.....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização de usuais técnicas de mensuração de desgaste	37
Tabela 2 - Materiais forjáveis a frio	45
Tabela 3 - Composição química dos aços AISI D6 e AISI H13	64
Tabela 4 - Composição química dos aços ao carbono a serem utilizados como amostras do tipo pino	65
Tabela 5 - Identificação, massa inicial e dureza: Amostras do tipo Disco	66
Tabela 6 - Identificação, massa inicial e dureza: Amostras do tipo Pino	67
Tabela 7 - Rugosidade superficial das amostras Disco.....	68
Tabela 8 - Rugosidade superficial das amostras Pino	69
Tabela 9 - Condições X Parâmetros definidos para ensaios tribológicos.....	75
Tabela 10 - Características e propriedades dos Lubrificantes utilizados no ensaio tribológico.....	75
Tabela 11 - Valores de mudança de massa: Ensaio 01	78
Tabela 12 - Valores de mudança de massa: Ensaio 03	81
Tabela 13 - Valores de mudança de massa: Ensaio 02	85
Tabela 14 - Valores de mudança de massa: Ensaio 04	88
Tabela 15 - Valores de mudança de massa: Ensaio 05	92
Tabela 16 - Valores de taxa de desgaste do aço AISI D6.....	97
Tabela 17 - Valores de taxa de desgaste do aço AISI H13.....	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFM	<i>Atomic Force Microscope</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EP	<i>Extreme Pressure</i>
HB	<i>Hardness Brinell</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell (Escala C)</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
P-S-D	<i>Pino-Sobre-Disco</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
RPM	<i>Rotações por minuto</i>
UFRGS	<i>Universidade Federal do Rio Grande do Sul</i>
VPN	<i>Vickers Pyramid Number</i>

LISTA DE SIMBOLOS

A_p	Área do pino	[mm]
C	Número de ciclos	[-]
d	Diâmetro do pino ou diâmetro da esfera	[mm]
D	Diâmetro do disco	[mm]
F	Força normal	[N]
H	Dureza	[Pa]
K	Coefficiente de desgaste	[-]
K_a	Constante da taxa de desgaste	[mm ³ /Nm]
L	Distância de deslizamento	[m]
L_d	Distância de deslizamento em um disco	[m]
L_{tc}	Distância de deslizamento total de um ciclo	[m]
M	Perda de massa	[g]
n	Coefficiente de relação entre a diferença de dureza superficial e a dureza do elemento abrasivo	[-]
P	Pressão	[MPa]
R_a	Rugosidade - desvio médio aritmético do perfil avaliado	[μm]
r_d	Raio da pista de desgaste	[m]
R_q	Rugosidade - desvio padrão do perfil de avaliado	[μm]
R_z	Rugosidade - altura máxima do perfil avaliado	[μm]
r_p	Raio do pino	[mm]
t_i	Intervalo de tempo	[min.]
t_t	Tempo de total de ensaio	[min.]
t_u	Tempo de contato unitário de cada amostra	[min.]
V	Velocidade de deslizamento linear	[m/s]
V	Velocidade de deslizamento linear	[m/s]
V_a	Volume removido por desgaste adesivo	[mm ³]
VD	Volume desgastado	[mm ³]

V_p	Velocidade de deslizamento parcial	[m/min.]
VPN	Dureza	[kg/mm ²]
W	Taxa de desgaste	[mm ³ /m]
W_r	Força suportada pelas asperezas de contato	[N]
W_c	Força total ($W_r + W_s$)	[N]
W_s	Força suportada pela película lubrificante	[N]
μ	Coefficiente de atrito	[-]
ρ	Densidade do material amostra	[g/cm ³]
ω	Velocidade angular	[rad/s]

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de compreender os fenômenos tribológicos é cada vez mais necessária na indústria. Através do ensaio tribológico características como volume desgastado e atrito podem ser mensurados. Há diversas modalidades de ensaios tribológicos. Porém, para analisar o comportamento tribológico dos materiais utilizados na confecção de ferramentas de forjamento a frio, com suas reais condições de trabalho, o ensaio mais coerente consiste na utilização experimental de um tribômetro do tipo pino-sobre-disco (P-S-D) equipado com um porta amostras que permite o contato de forma cíclica entre as amostras, reproduzindo de tal modo situações operacionais mais próximas a real condição encontradas no processo de forjamento a frio. Os ensaios tribológicos que utilizam a metodologia pino-sobre-disco são caracterizados pela aplicação de uma força controlada exercida através de um pino sobre um disco (estando uma destas amostras estática e a outra em movimento giratório constante com velocidade uniforme). O deslizamento desse par de materiais é parametrizado com uma dada distância a ser percorrida em um perímetro onde ocorrerá o desgaste. Esta distância dita o início e o término do ensaio.

1.1. JUSTIFICATIVA

O custo da manutenção de uma ferramenta de forjamento impacta diretamente no custo final de cada produto forjado produzido pela mesma, assim como o tempo de vida útil desta ferramenta, quando se faz necessário substituí-la, e até mesmo o tempo em que o equipamento que utiliza essa ferramenta ficará parado. O projeto do ferramental de trabalho a frio deve prever e minimizar o desgaste proveniente do processo, visando o maior intervalo possível de manutenção e substituição do ferramental. O projeto deve prever também menores pressões durante o forjamento, favorecendo um menor impacto tribológico ao ferramental. Todas essas premissas de projeto contribuem para um menor custo do produto final, sem comprometer a qualidade e o tempo de fabricação, favorecendo o produto perante a concorrência industrial, nos aspectos tecnológico e econômico.

1.1.1 Aspecto Tecnológico

A importância em submeter materiais utilizados na confecção de ferramentas de forjamento a frio a análises tribológicas preliminares, antes de se iniciar a construção do ferramental contribui para uma seleção de material com maior assertividade, assim como a seleção do tratamento superficial mais adequado em que a ferramenta deverá possuir, podendo-se avaliar até mesmo a influência ao desgaste exercida pela matéria-prima do próprio componente a ser forjado (*billet*).

Uma análise tribológica preliminar minimiza custos, pois aborda de forma isolada cada um dos fatores e dos fenômenos que ocorrem no par de material (material do *billet* x material do ferramental). Para tanto, são utilizados parâmetros conhecidos que fazem parte do processo de fabricação, tais como: velocidade de deslizamento, força aplicada, tipo de lubrificante, distância de deslizamento (pode-se mensura-lo conforme o tempo da operação e etc.).

1.1.2 Aspecto Econômico

A quantidade de energia perdida e o desgaste do material de um componente em operação são as principais causas da elevação dos custos ocasionados pela ineficiência tribológica à economia de uma nação. Os custos da ineficiência tribológica quando mensurada em uma máquina ou componente isolado são relativamente baixos, porém quando esse custo é multiplicado pelo número da população dessa determinada máquina ou componente, os custos podem ser bastante significativos (Stachowiak e Batchelor, 2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento de desgaste dos aços AISI D6 e AISI H13 caracterizados como ferramental que comumente compõem o sistema tribológico no processo de forjamento a frio, através de um procedimento experimental (Figura 1), utilizando um dispositivo para ensaios tribológicos do tipo P-S-D adaptado para poder simular as condições do processo de forjamento a frio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar as amostras do tipo disco como ferramental, conferindo particularidades como dureza e acabamento superficial utilizadas na confecção de uma ferramenta real.
- b) Caracterizar como *billet* as amostras do tipo pino, através do emprego dos aços SAE 1020 e SAE 1045, conferindo na região de contato superficial, valores de rugosidade provenientes do processo de corte.
- c) Identificar os mecanismos de desgaste nos materiais empregados como discos após o ensaio tribológico;
- d) Determinar a taxa de desgaste dos materiais ensaiados (amostras do tipo disco);
- e) Analisar o comportamento da utilização de lubrificantes no desgaste dos materiais estudados.

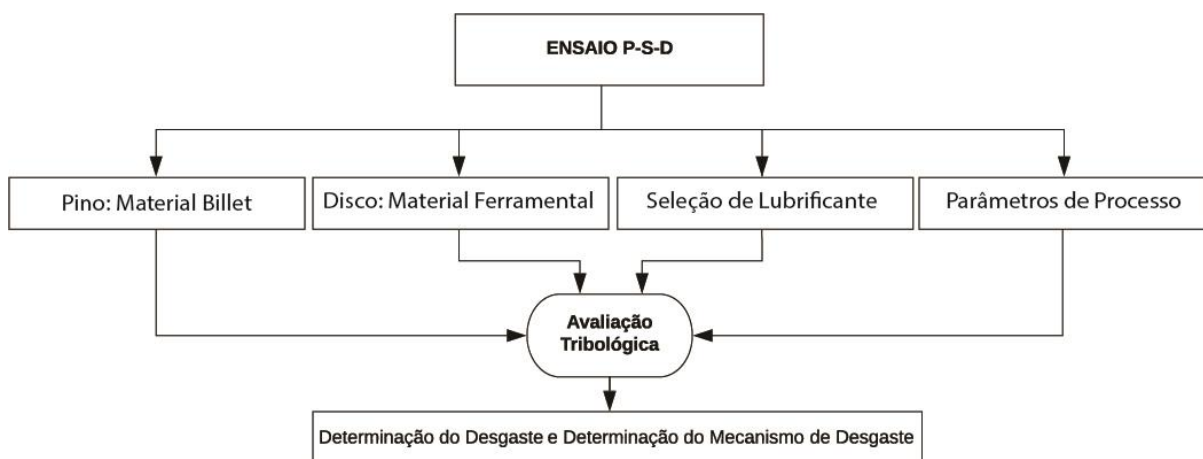


Figura 1 - Fluxograma básico do procedimento experimental para obtenção do objetivo através da análise tribológica

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRIBOLOGIA

Procedente da palavra grega *tribos* que significa atrito. Uma tradução singela define a palavra tribologia como sendo a “ciência do atrito”. Segundo Da Silva, essa

tradução é um tanto superficial, portanto foi tomada como definição para a palavra tribologia: Ciência e tecnologia das superfícies interagindo em movimento relativo a materiais e métodos com elas relacionados (Da Silva, 1985).

Já Bhushan, define a tribologia como a arte de aplicar análises operacionais a problemas de grande importância econômica, que demandam confiabilidade como manutenção e desgaste de máquinas e equipamentos (Bhushan, 2013).

2.1.1 Importância da Tribologia na Indústria

A tribologia contribui com a indústria moderna que faz uso de equipamentos com superfícies em contatos deslizantes ou rolantes. O atrito produtivo é desejável na obtenção de determinados efeitos tais como em freios, embreagens, rodas ferroviárias, parafusos e porcas. Assim como há modalidades de desgastes produtivos como quando se está escrevendo com um lápis, realizando um serviço de usinagem ou polimento. Entretanto, em aplicações tais como em motores de combustão interna, aeronaves, engrenagens, cames, rolamentos e vedações pode ocorrer o atrito e desgaste improdutivo, que demonstram os efeitos negativos da tribologia (Bhushan, 2013).

A falta de conhecimento a respeito da área tribológica é responsável por prejuízos econômicos significativos. Segundo Bhushan, somente nos Estados Unidos, estas perdas giraram em torno de 4% do seu produto interno bruto e aproximadamente, 1/3 dos recursos energéticos do mundo aparecem relacionados de alguma forma com a questão do atrito. Com base nesses dados a importância no controle tribológico (atrito e desgaste) não pode ser desprezada por questões econômicas e confiabilidade na indústria (Bhushan, 2013).

Todos os níveis e campos da tecnologia podem ser beneficiados pelas pesquisas na área tribológica, pois esta aponta estratégias de minimização e eliminação de perdas provocadas pelo desgaste e atrito. Desta forma, é possível obter maior eficiência e melhor desempenho de mecanismos que envolvam contato entre superfícies, refletindo em diminuição de avarias e conseqüentemente economia de recursos (Bhushan, 2013).

2.1.2 Tribômetros

Tribômetro é a definição de um equipamento universal que tem por finalidade realizar ensaios tribológicos (Figura 2). A maioria desses dispositivos possui um propósito específico de acordo com o tipo de avaliação tribológica, assim como a simulação de condições operacionais a qual deseja-se submeter as amostras a serem ensaiadas (Stachowiak e Batchelor, 2004).



Figura 2 – Variações de tribômetros comerciais

Fonte: Site Anton-Paar. Disponível em: www.anton-paar.com/corp-en/products/group/tribometer/
Acesso em maio de 2018.

A classificação dos mecanismos de ensaios tribológicos, ilustrados na Figura 3, são as configurações mais utilizadas de tribômetros dedicados a deslizamento de amostras na modalidade seco ou com a utilização de lubrificantes. Esses grupos de equipamentos são os mais produzidos e comercializados (Stachowiak e Batchelor, 2004).

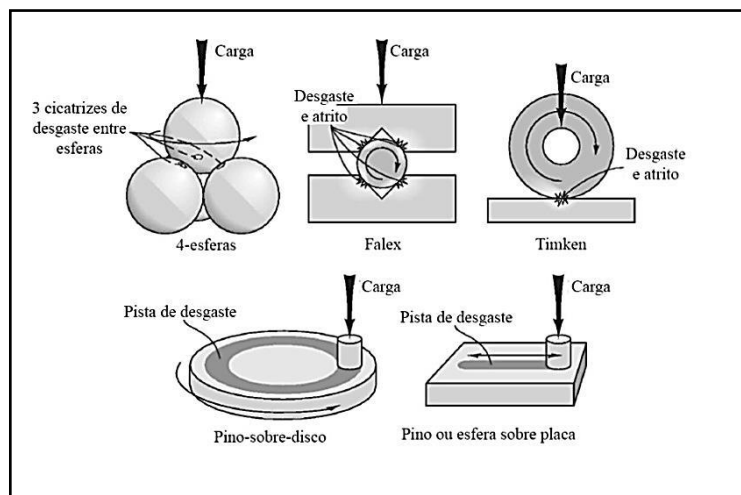


Figura 3 - Configurações de amostras utilizadas em contatos de deslizamento seco ou parcialmente lubrificadas

Fonte: Stachowiak e Batchelor, 2004.

A maioria das análises tribológicas realizadas com propósito de simular as condições de um mecanismo de desgaste ou atrito são feitas com o auxílio de tribômetros. Entre as vantagens da utilização destes dispositivos destacam-se a minimização de limitações de tempo, custos e outras dificuldades encontradas em avaliações em equipamentos em que a interação tribológica ocorre (Stachowiak e Batchelor, 2004).

Através da utilização de um tribômetro, é possível simular o desgaste, assim como em algumas configurações determinar o coeficiente de atrito (em condições monitoráveis, com o auxílio de equipamentos de instrumentação), já que é possível controlar fatores como umidade, força aplicada, velocidade de deslizamento e temperatura. Os tribômetros geralmente apresentam estrutura de bancada (utilizado em condições laboratoriais ou em condições industriais) sendo possível adaptar um equipamento de acordo com as necessidades de cada finalidade de ensaio e incrementá-los com a utilização de outros dispositivos específicos como fornecimento de lubrificante, atmosfera gasosa, arrefecedores de temperatura ou fontes de aquecimento. Estas modificações muitas vezes são necessárias, pois há uma variedade de fatores operacionais que impactam nos mecanismos tribológicos, pois o desgaste pode ocorrer em condições de deslizamento puro, rolamento puro, rolamento e deslizamento combinado, impacto, abrasão, adesão, fadiga ou corrosão

e cada mecanismo de desgaste possui características específicas que requerem um tribômetro devidamente projetado para tal finalidade (Stachowiak e Batchelor, 2004).

Existe menos de 100 tipos de ensaios tribológicos disponíveis a nível laboratorial, entretanto, um levantamento realizado pela Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação, apontou que existem 300 tipos de ensaios tribológicos no mundo. Contudo, muitos desses ensaios são variações e adaptações feitas pelas necessidades industriais (Neale e Gee, 2001; Stachowiak e Batchelor, 2004).

2.1.3 Norma ASTM G99

A norma ASTM G99, juntamente com a norma alemã DIN 50324 são as únicas normas padronizadas que regem os ensaios de desgaste através de equipamentos do tipo pino-sobre-disco. A norma que é mais difundida entre a comunidade tribológica é a ASTM G99, cujo título original é: *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*, e pode ser traduzida como: Método de teste padrão para ensaios de desgaste com um aparelho pino-sobre-disco. O procedimento indicado na norma ASTM G99 é exclusivamente de âmbito laboratorial, com parâmetros controlados de temperatura e umidade relativa do ar. A principal finalidade da norma é padronizar a metodologia de medição do desgaste de um par de material, porém, o atrito quando possível pode também ser avaliado.

O par de material é definido na norma ASTM G99 como duas amostras de diferentes formas geométricas, confeccionadas em diferentes tipos de materiais ou não, sendo uma delas estacionária e a outra desempenhando um movimento rotativo. Uma das amostras deve possuir o formato geométrico de pino ou esfera, sendo esta responsável por exercer uma força previamente especificada perpendicularmente sobre a amostra em forma de disco, originando um contato iterativo. Como é exemplificado na Figura 4, esse contato é constante e percorre a pista de desgaste (também conhecido como trilha de desgaste) com um raio definido na amostra disco gerando, quando há desgaste significativo, uma cicatriz de desgaste (ASTM G99, 2017).

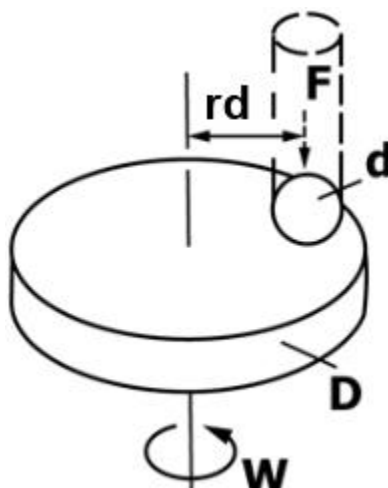


Figura 4 - Esquema simplificado do sistema de ensaio de desgaste pino-sobre-disco, de acordo com a ASTM G99

Onde: F é a Força Normal exercida sobre o pino, dada em N , d é o Diâmetro do Pino ou Diâmetro da Esfera, dada em mm , D é o Diâmetro do Disco, dado em mm , rd é o Raio da Pista de Desgaste, dado em mm e ω é a Velocidade angular de Rotação do Disco, dada em RPM .

Fonte: ASTM G99, 2017.

Os resultados do desgaste das amostras pino e disco são avaliados separadamente e após são informados na forma de perda volumétrica. A norma ASTM G99 recomenda que ao ensaiarem-se diferentes tipos de materiais, ambas as amostras devem assumir o papel de disco e de pino (ASTM G99, 2017).

O ensaio de desgaste na modalidade pino-sobre-disco pode ser realizado em diversos tipos de materiais, porém devem-se respeitar as dimensões das amostras, pois elas necessitam suportar as condições impostas durante o ensaio tribológico, como por exemplo: falhas, vibrações e flexões excessivas. Em resumo a preparação das amostras deve atender critérios como: dimensão, acabamento superficial, tipo de material, forma geométrica, composição química, microestrutura, dureza e identificação de tratamentos oriundos de um determinado processo. A preparação da superfície exige cuidados para evitar danos superficiais e no substrato que alteram significativamente as propriedades do material (ASTM G99, 2017).

2.1.4 Categorias de Desgaste

O desgaste é definido como um dano causado na superfície de um material, onde as formas mais comuns de danos são caracterizadas pela perda ou

deslocamento de material. Contudo, um material apenas pode ser removido da superfície sólida por contato de três maneiras: por fusão, por dissolução ou pela separação física atômica (Ludema, 1992; Bayer, 2004).

Há seis tipos de fenômenos distintos que classificam o desgaste. Tais fenômenos possuem apenas uma característica em comum, a remoção ou deslocamento de material sólido das superfícies de contato. Bhushan destaca que a remoção de material ocorre através de todos os fenômenos de desgaste, exceto por fadiga, sendo que existem muitas situações em que o desgaste é originado por um mecanismo e prossegue por outro meio. Estes fenômenos são categorizados como desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga, desgaste químico (corrosivo), desgaste erosivo e desgaste induzido por arco elétrico, sendo os primeiros quatro tipos os de maior relevância (Stolarski, 1990; Bhushan, 2013).

Em quase todas as situações em que o desgaste ocorre é possível identificar o principal mecanismo de desgaste, que é normalmente determinado pelas propriedades mecânicas do material, pela estabilidade química do material, pela temperatura gerada na zona em que ocorrem o contato dos corpos e as condições de operação (Stolarski, 1990). Bhushan complementa que além do desgaste ocorrer por meios mecânicos ou químicos, ele é geralmente acelerado pela ação de aquecimento devido ao atrito ou por intermédio de fontes térmicas (Bhushan, 2013).

2.1.4.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo (Figura 5) surge quando duas superfícies sólidas (e planas) estão em movimento deslizante, independente da presença de lubrificação. A adesão ocorre nos contatos superficiais através de suas asperezas. Por sua vez as asperezas superficiais contêm picos que são cortados pela ação do movimento de deslizamento, o que muitas vezes gera fragmentos, que movem-se através da área de contato e com isso alguns destes fragmentos são fraturados no processo de carga e descarga, resultando em uma partícula solta entre os corpos em movimento deslizante (Bhushan, 2013).

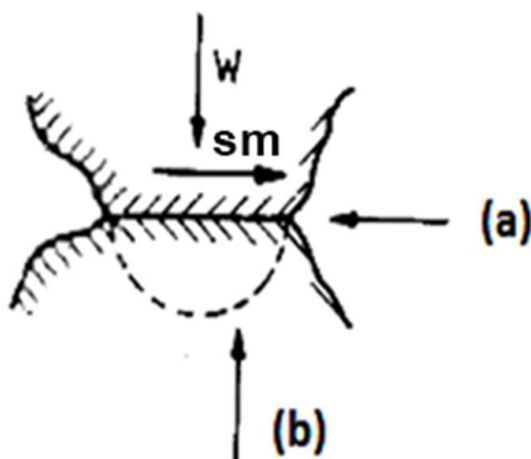


Figura 5 – Contato superficial durante o desgaste adesivo

Onde: W é a Força Aplicada, F é o Sentido do Movimento, (a) Contato Adesivo e (b) Fratura.

Fonte: Adaptado de Stolarski, 1990.

A adesão é muito suscetível à contaminação superficial e a influências ambientais, conseqüentemente é complexo encontrar alguma associação entre os mecanismos de desgaste adesivo e o volume de material. Stolarski sugere a equação de Archard (1) como uma alternativa de estimar o volume de material removido, entretanto, esta equação só é validada para desgaste entre contatos a seco (Stolarski, 1990).

$$V_a = K \frac{Wr}{H} L \quad (1)$$

Onde: V_a é o Volume removido de material por desgaste adesivo dado em mm^3 , K é a Coeficiente de desgaste, L é a Distância de deslizamento dado em mm Wr é a Força suportada pelas asperezas de contato dado em N e H é a Dureza dado em Pa .

Segundo Stolarski o coeficiente de desgaste (k) é uma função de várias propriedades dos materiais em contato deslizante a seco, e seu valor numérico pode ser localizado em literaturas dedicadas exclusivamente aos fundamentos da tribologia. Para estimar o volume de material removido por consequência do desgaste adesivo entre contatos lubrificados, tem-se como base a teoria da lubrificação elastohidrodinâmica parcial. Nesta teoria, ambas as asperezas de contato e o filme lubrificante contribuem para suportar a carga, conforme pode ser observado na equação (2) (Stolarski, 1990).

$$W_c = W_s + W_r \quad (2)$$

Onde: W_c é a *Força total* dada em N , W_s é a *Força suportada pela película lubrificante* dada em N e W_r é a *força suportada pelas asperezas de contato* dada em N .

Apenas parte da força total pode contribuir para o desgaste adesivo, ou seja a força suportada pelas asperezas de contato (W_r). Stolarski enfatiza que a estrutura atômica, estrutura cristalina, orientação cristalina e a resistência a aderência, são as principais características que exercem influência no desgaste adesivo de superfícies em contato deslizante (Stolarski, 1990).

2.1.4.2 Desgaste Abrasivo

O movimento forçado entre superfícies sólidas que apresentam partículas e protuberâncias superficiais duras são os originadores do desgaste do abrasivo. A taxa de desgaste abrasivo é atribuída às características de cada superfície de contato, além de fatores como: presença de elementos abrasivos, velocidade de contato e condições ambientais. Stolarski enfatiza que sob a influência de uma força normal, as asperezas superficiais de maior dureza penetram na superfície relativamente mais macia, causando conseqüentemente deformação plástica (Stolarski, 1990; Tylczak, 1992).

Há basicamente duas categorias de desgaste abrasivo, conforme pode ser observado na Figura 6. A primeira categoria, Figura 6 – (a), é conhecida como abrasão de dois corpos, pois o elemento abrasivo desliza ao longo de uma superfície. A segunda categoria, Figura 6 – (b), é denominada abrasão de três corpos que se caracteriza por um elemento abrasivo preso entre duas superfícies sólidas, com dureza suficiente para danificá-las (Tylczak, 1992; Bhushan 2013).

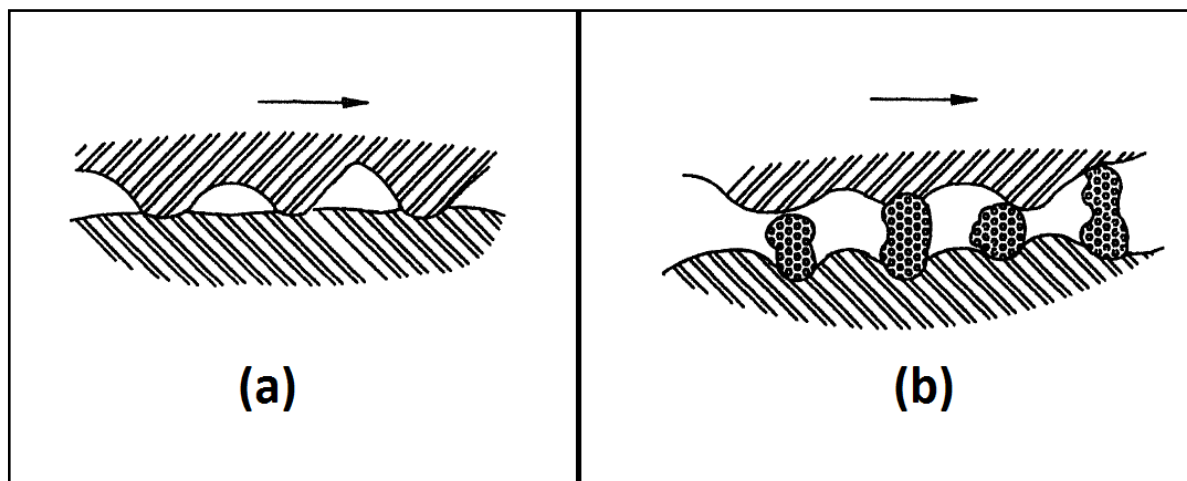


Figura 6 - Categorias de desgaste abrasivo

Legenda: (a) Desgaste abrasivo entre dois corpos e (b) Desgaste abrasivo entre três corpos.

Fonte: Adaptado de Bayer, 2004.

Bayer sugere a utilização das equações: (3), (4) e (5) para tratamento matemático relacionado ao volume desgastado:

A equação (3) é utilizada na maioria de classes de materiais, independentemente da dureza da superfície em relação ao elemento abrasivo ou até mesmo do tipo de categoria de desgaste abrasivo. Nesta equação, o coeficiente de desgaste (K) é uma função do material utilizado, dos elementos abrasivos, do movimento de partículas soltas ou do meio em que o desgaste abrasivo transcorre (Bayer, 2004).

$$VD = K \cdot F \cdot L \quad (3)$$

Onde: VD é o *Volume desgastado* dado em mm^3 , K é o *Coefficiente de desgaste*, F é a *Força normal* dada em N e L é a *Distância de deslizamento* dado em mm .

- A equação (4) é geralmente aplicada a todas as classes de materiais e categorias de desgaste abrasivo, quando o elemento abrasivo é mais duro em relação à superfície. Além disso, o coeficiente de desgaste (K), neste caso, tende a ser dependente apenas do tipo de material, não de materiais individuais, conforme pode ser observado na Figura 7 e na Figura 8 (Bayer, 2004).

$$VD = \frac{K.F.L}{H} \quad (4)$$

Onde: VD é o Volume desgastado dado em mm^3 , K é o Coeficiente de desgaste, F é a Força normal dada em N , L é a Distância de deslizamento dado em mm e H é a Dureza dado em Pa .

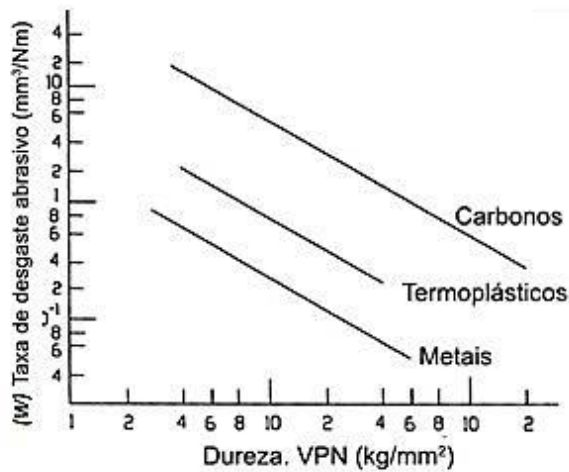


Figura 7 - O efeito da dureza na taxa de desgaste abrasivo de dois corpos de diferentes classes de materiais

Fonte: Engel, 1978 apud Bayer, 2004.

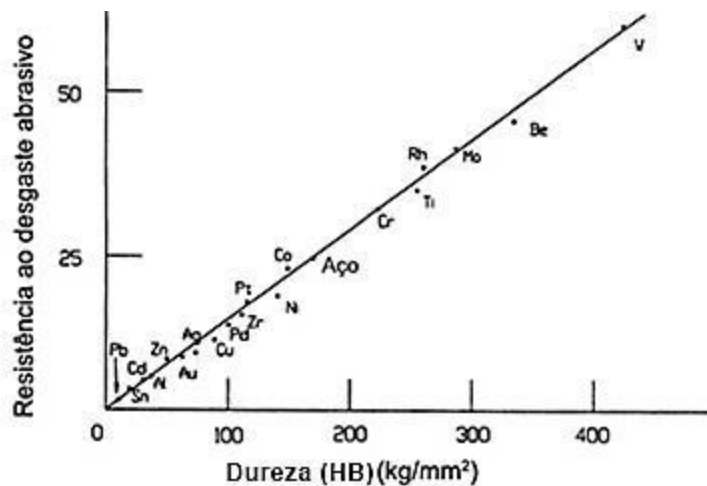


Figura 8 - O efeito da dureza na taxa de desgaste abrasivo de dois corpos em metais puros, quando o abrasivo é mais duro em relação a superfície de desgaste

Fonte: Kruschov & Babichev, 1960 apud Bayer 2004.

- A equação (5) aplica-se a situações em que a dureza da superfície e do elemento abrasivo são semelhantes ou quando a superfície é mais dura em relação ao elemento abrasivo. É usual utilizar-se em caso de dureza semelhante um valor de n próximo a 10. Nos casos em que a superfície é mais dura em relação ao elemento abrasivo, utiliza-se um valor de n próximo a 5. A mudança na dependência de dureza para o valor de n é a consequência da mudança no tipo de mecanismo de desgaste dominante, ou seja, deformação de ciclo único até a deformação de ciclo repetido (Bayer, 2004).

$$V = \frac{K \cdot F \cdot L}{H^n} \quad (5)$$

Onde: VD é o Volume desgastado dado em mm^3 , K é o Coeficiente de desgaste, F é a Força normal dada em N , L é a Distância de deslizamento dado em mm , H é a Dureza dado em Pa e n é o Coeficiente de relação entre a diferença de dureza superficial e a dureza do elemento abrasivo.

Deformação de ciclo único é a denominação adotada para o mecanismo de desgaste caracterizado quando o elemento abrasivo é mais duro em relação à superfície desgastada, de outro modo o termo deformação de ciclo repetido é utilizado quando o mecanismo de desgaste tem como característica o elemento abrasivo mais macio do que a superfície desgastada (Bayer, 2004).

2.1.4.3 Desgaste por Fadiga

O fenômeno de desgaste por fadiga é definido como um desgaste que ocorre em uma superfície sólida resultante da remoção de partículas soltas por fadiga (Figura 9), por decorrência de tensões cíclicas. Tais ciclos de carga e descarga empregados a uma superfície sólida induzem na formação de fissuras subterrâneas ou superficiais. Estas fissuras podem progredir e resultar uma falha por fadiga, em forma de crateração (remoção de pequenos fragmentos de material da superfície, também conhecido como *pitting*, detalhe (B) da Figura 10). A progressão da crateração sob efeito de tensões cíclicas evolui para uma falha por lascamento, também conhecida como *spalling*, que é caracterizada por uma perda maior de material, conforme pode ser observado no detalhe (A) da Figura 10. (Bayer, 2004; Bhushan, 2013).

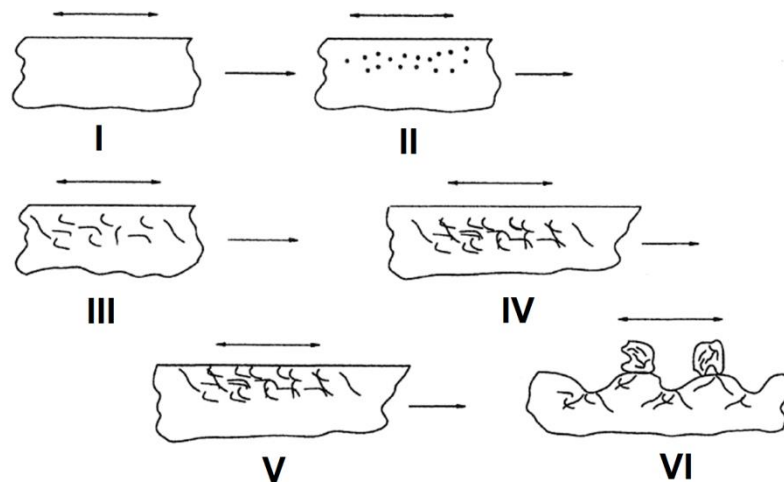


Figura 9 - Modelo geral para desgaste superficial por fadiga

Legenda: Estágio I - Ciclo de tensão superficial; Estágio II - Nucleação de fissuras em regiões próximas a superfície; Estágio III - Crescimento de fissuras; Estágio IV - Coalescência de fissuras; Estágio V- Interseção de fissuras com a superfície; Estágio VI - Formação de partículas de desgaste soltas.

Fonte: Bayer, 2004.

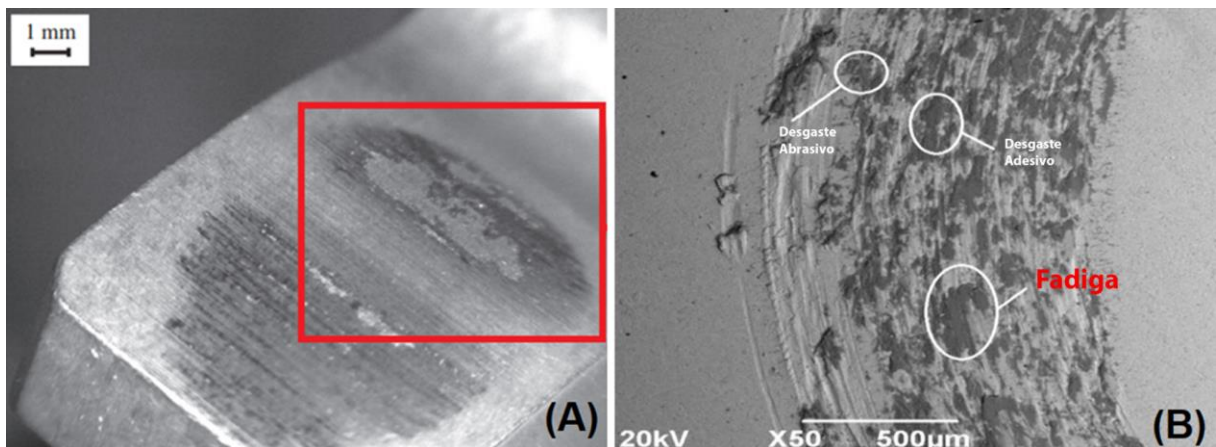


Figura 10 – Danos por Desgaste por Fadiga

Legenda: (A) Evidência da ocorrência de um *pitting* no flanco de um dente de engrenagem e (B) Micrografia de uma pista de desgaste obtida em um ensaio P-S-D com resolução de X50.

Fonte: Adaptado de Santus, C., et al, 2012 e Ortiz, C. H., et al, 2019.

Em casos que praticamente não ocorre desgaste por não haver contato entre superfícies através da atuação de um filme lubrificante (como por exemplo, rolamentos devidamente projetados) as superfícies estão sob grande pressão e geralmente falham por fadiga em nível subsuperficial (Bhushan, 2013).

Conforme observado na Figura 11, em contatos rolantes as tensões máximas de compressão ocorrem na superfície, porém as máximas tensões de cisalhamento advêm abaixo da mesma, assim como uma fissura ocasionada por fadiga progride até a separação do metal base até ser exposta superficialmente, geralmente produzindo partículas soltas de desgaste. Devido ao endurecimento superficial, adotado geralmente em contatos deslizantes, a superfície é considerada frágil, propiciando a surgimentos de fissuras superficiais resultantes de tensões trativas. Observa-se na Figura 11-o ponto de contato inicial entre duas superfícies duras em rolamento puro ($\mu = 0$). Para um valor de μ alto, tem-se o contato de deslizamento puro e para um valor de atrito (μ) moderado, tem-se uma combinação entre os movimentos de rolamento e deslizamento. O μ em um contato deslizante é considerado alto, quando comparado a um contato rolante, além de a tensão máxima cisalhante ocorrer na superfície, conduzindo posteriormente em fadiga superficial (Bhushan, 2013).

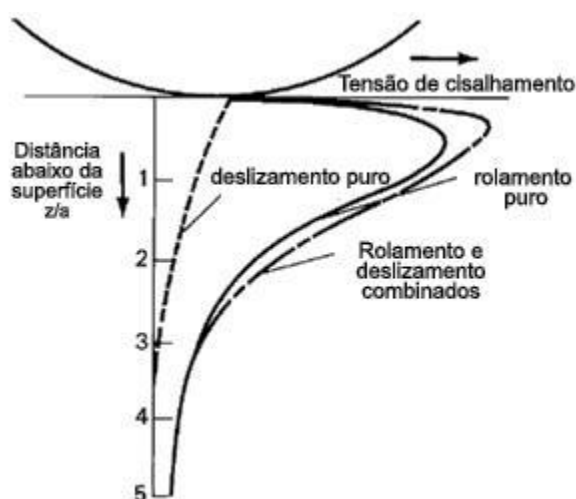


Figura 11 - Variação da principal tensão de cisalhamento em diferentes profundidades abaixo do ponto de contato entre superfícies

Onde: “z” é a Distância abaixo da superfície na direção vertical e “a” é metade do diâmetro hertziano.

Fonte: Bhushan, 2013.

Stolarski complementa que em contatos por deslizamento, as asperezas superficiais também estão propensas a acúmulo de tensões cíclicas (Figura 12), gerando fissuras que posteriormente se propagarão (Stolarski, 1990).

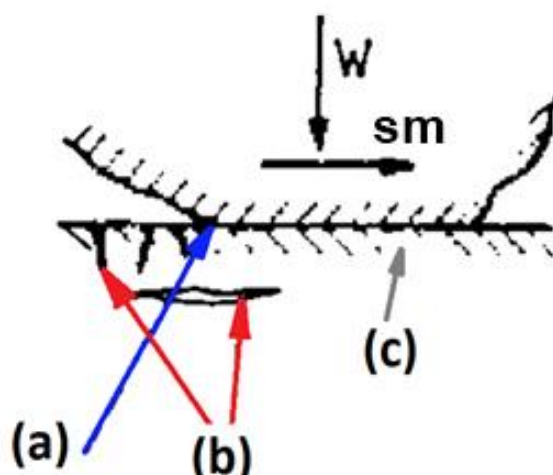


Figura 12 - Acúmulo de tensões cíclicas em contatos por deslizamento

Legenda: (a) Tensão, (b) Fissuras e (c) Compressão, onde: W é a força aplicada e sm é o sentido do movimento.

Fonte: Adaptado de Stolarski, 1990.

2.1.4.4 Desgaste Químico

O desgaste químico (Figura 13) é uma reação química que interage com o meio ambiente e ocorre durante o deslizamento entre superfícies em um ambiente propício à corrosão, por consequência, essa modalidade de desgaste também é conhecida como desgaste corrosivo. O desgaste químico é dependente da influência de alguma reação química à ação do atrito e geralmente ocorre de forma mais acelerada em ambientes de alta temperatura e na presença de fluidos classificados como corrosivos, que podem produzir um meio condutor propício para que ocorra corrosão eletroquímica nas superfícies em contato (Bayer, 2004; Bhushan, 2013).

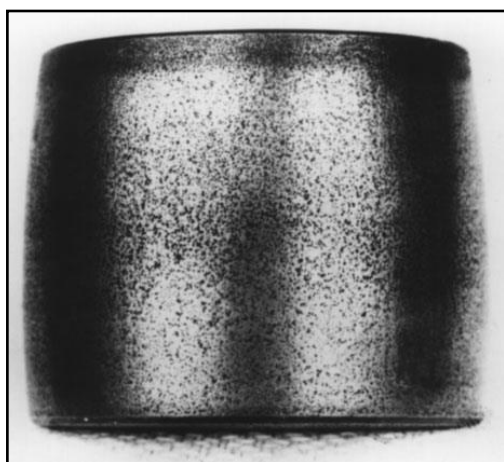


Figura 13 - Componente de um rolamento de aço após ação do desgaste corrosivo

Fonte: Tallian et al., 1974 apud Bhushan, 2013.

Geralmente o produto do desgaste corrosivo é constituído de filmes de óxidos frágeis e na maioria dos casos não são duráveis em decorrência da ação mecânica do deslizamento (Figura 14). Além disso, o desgaste corrosivo e outras modalidades de desgastes quando ocorrem no mesmo tribosistema, comumente não atuam de forma dependente, sendo que a ação mecânica e conseqüentemente a influência térmica da mesma, aceleram o efeito corrosivo (Stachowiak e Batchelor, 2004; Bhushan 2013). Contudo, a taxa de crescimento de filme e a taxa de remoção definem o taxa de desgaste químico (Bhushan, 2013).

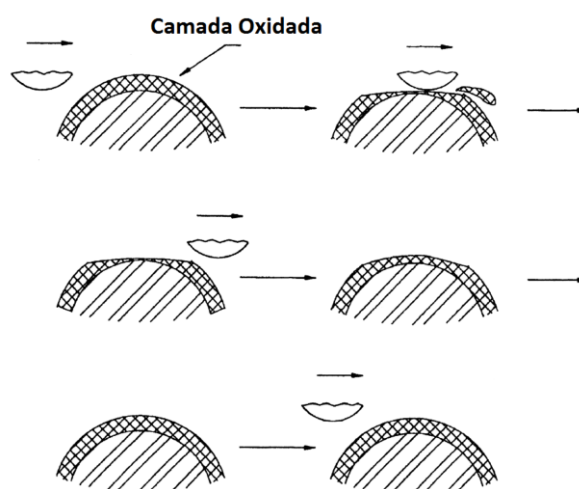


Figura 14 - Conceito básico do fenômeno de desgaste químico (Remoção de um filme de óxido por consequência do atrito)

Fonte: Bayer, 2004.

2.1.5 Técnicas para Determinação do Desgaste

Na maioria das análises tribológicas, a taxa de desgaste é indicada pela quantidade exata de material removido em forma de detritos (Stachowiak e Batchelor, 2004). Como pode ser observado na Figura 15, detritos são resíduos originados através do contato entre superfícies que possuem asperezas, ou seja, o desgaste é causado pela remoção dessas asperezas que se tornam partículas soltas entres as superfícies em contato (Mulhearn e Samuels, 1962, apud Glaeser, 2001).



Figura 15 - Detritos provenientes de um tipo severo de desgaste abrasivo

Fonte: Rigney, 1992 apud Glaeser, 2001.

Contudo, há situações em que o volume do material desgastado é deslocado em sua superfície, através da força aplicada ao mesmo, fazendo com que os detritos não sejam completamente desprendidos da superfície do componente em desgaste (Figura 16). Essas situações, quando deparadas, evidenciam a dificuldade na metodologia de determinação do desgaste em casos em que o material não é removido. Stachowiak e Batchelor sugerem que em casos como este, a melhor técnica de medição de desgaste seria mensurar a distância entre a superfície desgastada (conhecida como cicatriz de desgaste) e compará-la aos dados iniciais antes da aplicação da força (Stachowiak e Batchelor, 2004).

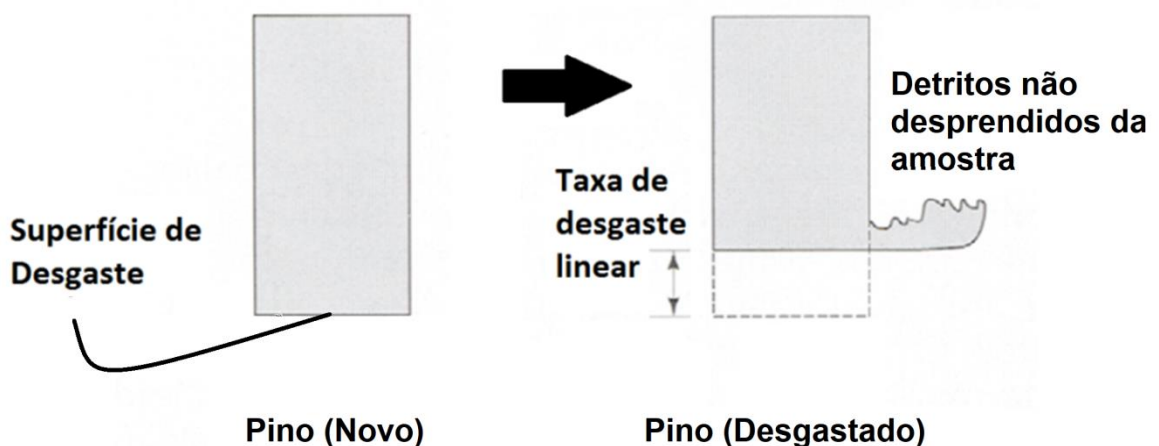


Figura 16 - Diferença entre superfície desgastada e taxa de desgaste linear

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2004.

Stachowiak e Batchelor recomendam que na maioria das análises, a utilização de duas técnicas de medição de desgaste se faz necessária para confirmação dos dados obtidos (Stachowiak e Batchelor, 2004). Na Tabela 1, estão relacionadas as técnicas mais usuais na medição do desgaste e sua classificação.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização de usuais técnicas de mensuração de desgaste

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Mudança de massa	Dados simples e precisos	Dados corrompidos por material deslocado ou aderido de uma amostra a outra
Redução dimensional	Dados precisos, permitindo o registro contínuo de taxas de desgaste	Não discrimina entre o desgaste de cada amostra
Perfilometria	Dados muito precisos. Fornece a distribuição de desgaste entre amostras	Mensuração lenta e elevado custo do equipamento

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2004.

2.1.5.1 Determinação do Desgaste por Mudança de Massa

Resultados confiáveis através da técnica de mudança de massa são alcançados frequentemente com o auxílio de uma balança analítica (adequadamente calibrada), para tal, deve-se conduzir corretamente o preparo dos mensurandos, adotando cuidados como limpeza adequada e correto manuseio dos mesmos, através da utilização de luvas e pinças (Stachowiak e Batchelor, 2004).

A mudança de massa é medida como a diferença entre a massa da amostra registrada antes e depois do ensaio tribológico. Da mesma forma como todos os detritos provenientes do ensaio devem ser coletados e reservados para análises posteriores (Neale e Gee, 2001).

A relação entre a perda de massa e a densidade da amostra é utilizada para determinar o volume desgastado (Equação (6)) em medições de perda de massa. (Neale e Gee, 2001).

$$VD = \frac{M}{\rho} \cdot 1000 \quad (6)$$

Onde: VD é o Volume desgastado dado em mm^3 , M é a Perda de massa dada em g e ρ é a Densidade da amostra dada em g/cm^3 .

Nos casos em que as amostras contenham revestimentos superficiais a determinação do desgaste deve ser avaliada apenas dentro da zona da camada revestida. A densidade do material de revestimento também deve ser adotada ao

modelamento matemático (Neale e Gee, 2001). Stachowiak e Batchelor complementam que a capacidade de absorção das amostras, assim como a corrosão, desgaste em ambientes corrosivos e utilização de fluidos orgânicos como lubrificantes, são fortes fatores que influenciam a determinação do desgaste (Stachowiak e Batchelor, 2004).

2.1.5.2 Determinação do Desgaste por Técnicas de Perfilometria e Microscopia de Força Atômica

A determinação do desgaste pela utilização da técnica de perfilometria pode ser realizada por três formas: Perfilometria de projeção óptica, perfilometria de contato (ou caneta) e perfilometria de varredura a laser, entretanto, há situações específicas, onde a adoção de técnicas similares utilizando-se um microscópio de força atômica (AFM) é necessária (Bhushan, 2000; Stachowiak e Batchelor, 2004).

A utilização das técnicas de mensuração de desgaste através de perfilometria óptica apesar de simples podem ser influenciadas pelo deslocamento do material não desprendido da cicatriz de desgaste das amostras, pela leitura distorcida realizada pelo equipamento, impedindo a projeção verdadeira do perfil de desgaste analisado. Tanto as técnicas de perfilometria de contato quanto as técnicas de perfilometria a laser podem proporcionar uma imagem combinada, ou seja, uma compilação de várias imagens uniformemente espaçadas entre a ponteira (no caso da perfilometria de contato) ou o laser (no caso da perfilometria a laser) e a cicatriz de desgaste do material em análise (Stachowiak e Batchelor, 2004).

Bhushan indica a utilização de um AFM para procedimentos que necessitam de dados detalhados de rugosidade ou medição de mudanças sutis de desgaste, porem, para superfícies macias ou com super acabamentos tanto a utilização do AFM quanto da técnica de perfilometria óptica é recomendado. O AFM é fortemente indicado também em condições onde a carga é baixa, pois a deformação das asperezas é dependente das propriedades mecânicas do material, da rugosidade e da força aplicada (Bhushan, 2000).

A Figura 17 exemplifica através de uma parcela de uma amostra do tipo disco a variação da escala de rugosidade superficial de milímetros a nanômetros, encontrados na utilização de técnicas de AFM, perfilometria óptica e perfilometria de contato (Bhushan, 2000).

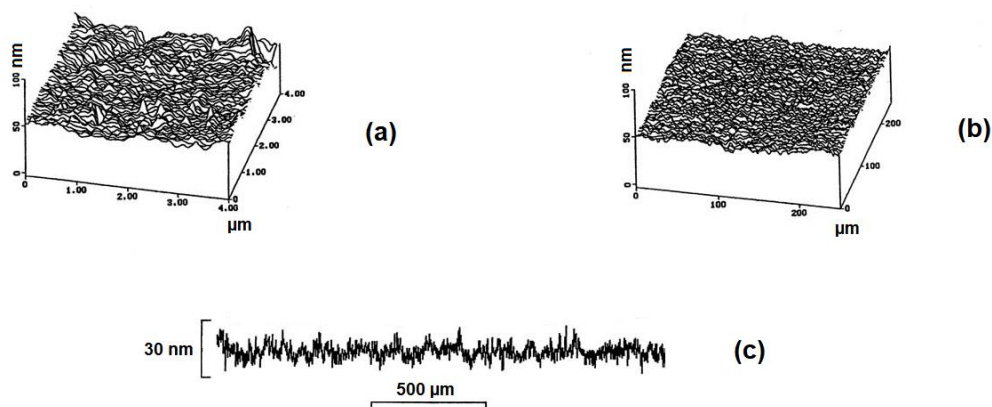


Figura 17 - Parcela superficial de uma amostra do tipo disco de vidro-cerâmica mensurada por perfilometria

Onde: (a) Microscópio de força atômica (Com resolução aproximadamente de 15 nm); (b) Perfilometro óptico (Com resolução espacial de aproximadamente 1 μm); (c) Perfilometro de contato (Com raio da ponteira de aproximadamente 0,2 μm).

Fonte: Adaptado de Bhushan, 2000.

2.1.5.3 Determinação do Desgaste por Redução Dimensional

A técnica de mensuração da redução dimensional da amostra em função do desgaste é adotada em tribômetros equipados com transdutores de deslocamento linear (LVDT) interligado na superfície da amostra, isto é, acima da cicatriz de desgaste. Na grande maioria dos tribômetros que utilizam LVDT, o contato entre o transdutor e a amostra é proporcionado pela compressão exercida por uma força estipulada. A utilização do sistema LVDT fornece contínuas informações em relação ao desgaste progressivo da amostra, contudo, a maior eficiência dessa tecnologia ocorre quando o desgaste está ocorrendo em apenas uma das amostras do par de material (Stachowiak e Batchelor, 2004).

O grande obstáculo encontrado em medições que utilizam o sistema LVDT pode ser verificado na Figura 18, onde o par de material (a) tende a uma mensuração próxima a realidade, pelo fato da pista de desgaste do disco ser maior em relação a seção transversal do pino. Em contrapartida, discos com pistas de desgaste curtas em relação a seção transversal dos pinos, como pode ser observado em (b), convergem a serem mais complexas na mensuração do desgaste, em face da seção transversal do pino contemplar grande parte da pista do disco, originando uma taxa de desgaste muito semelhante em ambas amostras do

par de material, caracterizando o uso do transdutor LVDT não apropriado para tal medição (Stachowiak e Batchelor, 2004).

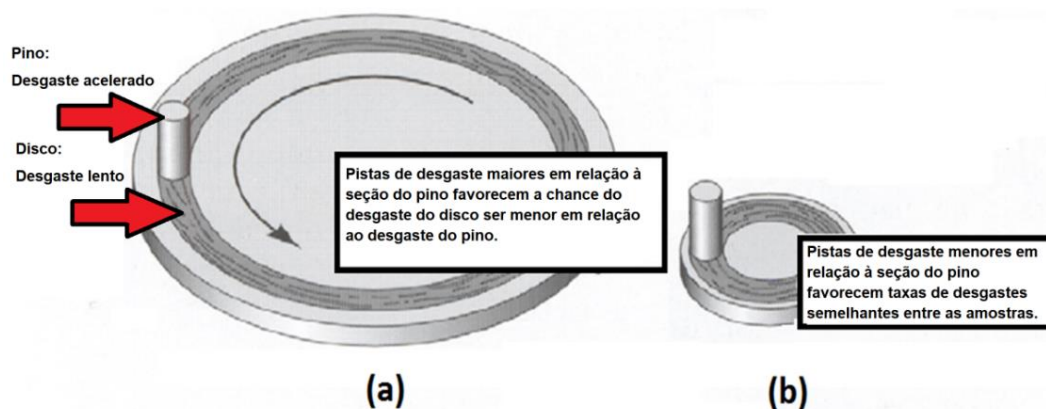


Figura 18 - Influência entre o tamanho da seção transversal do pino e o tamanho da pista de desgaste do disco na utilização do sistema de mensuração LVDT

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor, 2004.

2.1.6 Taxa de Desgaste e Coeficiente de Desgaste

Quando ocorre desgaste, como em um deslizamento entre superfícies, há perda de material. Esta perda de material é definida pela taxa de desgaste (Equação (7)). Para obter W , é necessário saber o volume de material removido, que pode ser obtido através de diferentes técnicas de mensuração de desgaste, juntamente com a distância de deslizamento (Ashby, 2012). Neste trabalho, a determinação do volume desgastado (VD) ocorreu através da técnica de mudança de massa, e utilizou a Equação (6).

$$W = \frac{VD}{L} \quad (7)$$

Onde: W é a Taxa de desgaste dado em mm^3/m , VD é o Volume desgastado dado em mm^3 e L é a Distância de deslizamento dada em m.

Para conhecer a constante da taxa de desgaste (Equação (8)), utilizada em gráficos de seleção de materiais, que podem ser verificados em Ashby, 2012, é necessário saber a força aplicada nas superfícies em contato. As propriedades do

material, tais como taxa de desgaste, força e dureza, podem ser utilizadas para obter o coeficiente de desgaste, conforme exposto pela Equação (9).

$$k_a = \frac{W}{F} \quad (8)$$

Onde: k_a é a Constante da taxa de desgaste dado em $\text{mm}^3/\text{N.m}$, W é a Taxa de desgaste dado em mm^3/m e F é a Força dada em N.

$$K = \frac{W}{F} \cdot H \quad (9)$$

Onde: K é o Coeficiente de desgaste que é adimensional [adm], W é a Taxa de desgaste dado em mm^3/m e F é a Força dada em N e H é a dureza dada em Pa.

2.1.7 Tribologia na Conformação Mecânica dos Materiais

A tribologia tradicionalmente surge na conformação mecânica através do atrito entre o *billet* e o ferramental evoluindo para uma situação de desgaste entre o par de material, pois a força necessária para a conformação do material gera uma tensão normal na superfície da ferramenta, assim como o surgimento de tensões cisalhantes através da velocidade de deslizamento do *billet* em relação ao ferramental (Lange, 1985).

O sistema tribológico (Figura 19) deve ser visto como um todo, pois é fundamental não adotá-lo de forma isolada, pois o sistema atua de forma coletiva, considerando todas as variáveis atuantes no processo, como: ferramental, sistema de lubrificação, parâmetros de processo e matéria-prima a ser conformada. Na conformação mecânica, o ferramental e o material a ser conformado (*billet*) exercem respectivamente o papel de corpos e contra-corpos, ou seja, o par de material atuante no sistema tribológico, assim como o lubrificante e o meio-ambiente que cerca o par de material. Além disso, o somatório de cargas externas (forças exercidas durante a conformação), temperatura originada pelo contato superficial e velocidade de deslizamento, além de outras variáveis provenientes do processo, formam o sistema tribológico (Klocke, 2013).

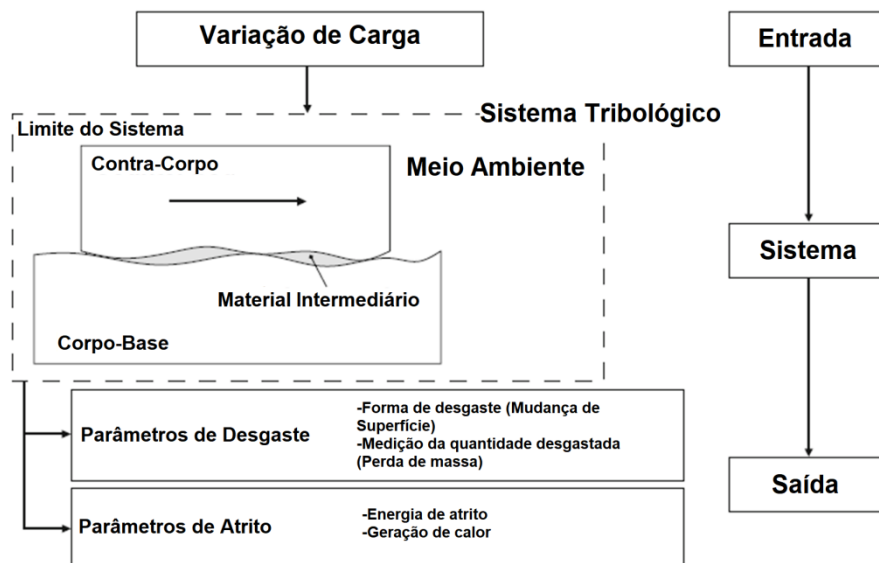


Figura 19 - Abordagem do sistema tribológico na conformação mecânica dos materiais

Fonte: Adaptado de Klocke, 2013.

Há muitos fatores que impactam o sistema tribológico, conforme pode ser observado na Figura 20. Além do par de material, a distribuição da tensão proferida pelo carregamento local, dependente das micro protuberâncias das superfícies que tem grande responsabilidade no atrito (Klocke, 2013).

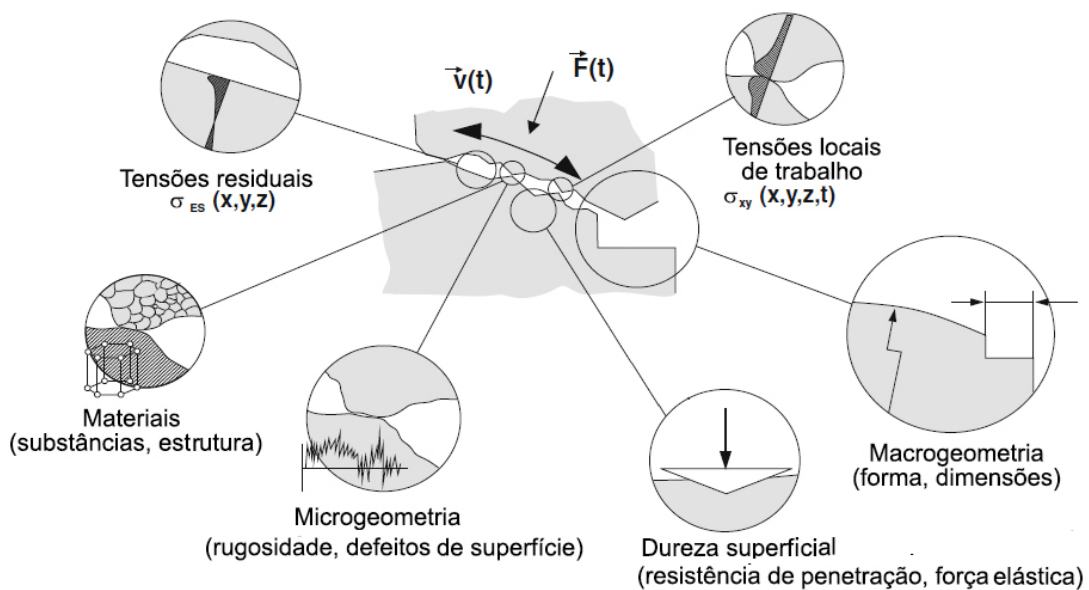


Figura 20 - Fatores que impactam o sistema tribológico

Fonte: Adaptado de Klocke, 2013.

A otimização dos fatores tribológicos no processo de conformação mecânica visa melhorar fatores, como: limitações do processo, custo efetivo, qualidade da peça conformada, meio-ambiente, ambiente de trabalho e conservação de recursos naturais. Klocke exemplifica que tais otimizações, como por exemplo, a melhoria do fluxo do material em função da diminuição do atrito, que está relacionado diretamente com as forças definidas no processo de conformação. Portanto, a diminuição do atrito acarreta na redução das forças atuantes no processo de conformação, contribuindo assim para a conservação dos recursos energéticos, além da extensão da vida útil do ferramental (custo efetivo) com a diminuição do desgaste do mesmo e conseqüentemente a qualidade da peça produzida (Klocke, 2013).

2.2 FORJAMENTO

O forjamento é considerado um dos mais fundamentais processos de conformação mecânica, no qual é possível confeccionar componentes de alta resistência mecânica, com elevado valor agregado e que impulsiona o desenvolvimento tecnológico nos mais variados campos de aplicação, como por exemplo: automobilístico, agrícola, aeroespacial, eletroeletrônico e etc. O processo de forjamento é dividido basicamente em dois grupos (forjamento em matriz aberta e forjamento em matriz fechada). O processo de forjamento pode ser realizado em condições de temperaturas operacionais conhecidas como: a quente, a morno ou a frio (Figura 21). A matéria-prima a ser conformada é constituída por peças de geometria relativamente simples, em forma de barras oriundas do processo de laminação, posteriormente cortadas em um dimensional desejado, denominado *billets* (Schaeffer, 2016).

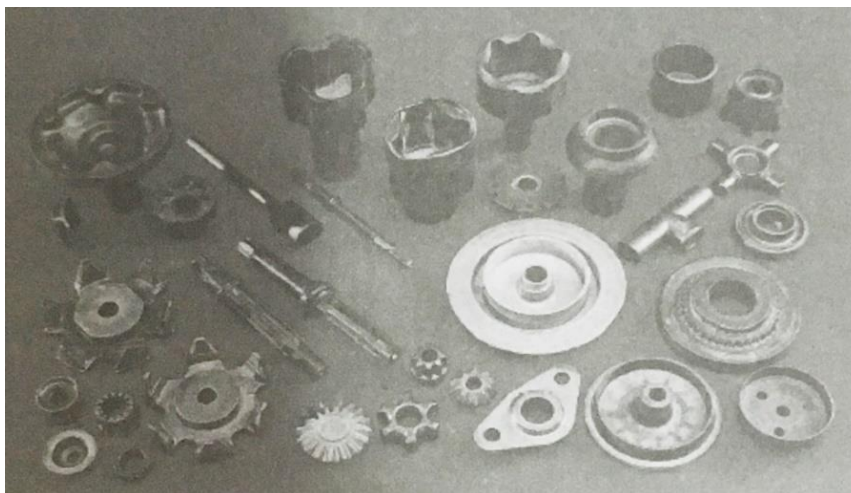


Figura 21 - Exemplo de componentes fabricados por forjamento a quente, a morno e a frio

Fonte: Grüning, K. 1986, apud Schaeffer, 2016.

Schaeffer complementa as observações de Lange, enfatizando que o processo de forjamento possibilita grande economia energética, quando comparado a processos como fundição e usinagem, através da fabricação de produtos que exigem melhores propriedades mecânicas, metalúrgicas, tolerâncias dimensionais e confiabilidade em sua aplicação, além de proporcionar relevante economia de matéria-prima suprimindo perdas que originam sucata, principalmente em elevadas quantidades produtivas, oportunizando com que os custos com o ferramental sejam amortizados com maior facilidade (Lange, 1985; Schaeffer, 2006).

2.2.1 Forjamento a Frio

O forjamento frio é caracterizado por conformar materiais em condições de temperatura ambiente, sem qualquer tipo de aquecimento inicial. O grupo de materiais forjáveis a frio é constituído basicamente por aço e ligas de alumínio, assim como outras ligas como: cobre, zinco, estanho, titânio, berílio e níquel. A Tabela 2 destaca alguns desses materiais. De regra, materiais que apresentam ductilidade em temperatura ambiente podem ser conformados a frio (Altan et al., 2004).

Tabela 2 - Materiais forjáveis a frio

Descrição	Liga (AISI / SAE)					
Aços para cementação	1010	1015	1020			
Aços ligados para cementação	5115	5120	3115			
Aços tratáveis termicamente	1035	1045				
Aços ligados tratáveis termicamente	5140	4130	4140	8620		
Aços inoxidáveis perlíticos	410	430	431			
Aços inoxidáveis austenítico	302	304	316	321		
Ligas de alumínio puras ou quase puras	1285	1070	1050	1100		
Ligas de alumínio não endurecíveis	3003	5152	5052			
Ligas de alumínio endurecíveis	6063	6053	6066	2017	2024	7075

Fonte: Adaptado de Altan et al., 2004.

No forjamento a frio o metal em temperatura ambiente escoá plasticamente através da força exercida pelo ferramental, originando geralmente componentes de pequenas dimensões, quando comparado a gama de componentes que o forjamento a quente possibilita. Outra característica ímpar do processo a frio é a não geração de rebarbas, pois a dimensão, massa e acabamento superficial dos *billets*, são rigorosamente controlados para evitar o sobrecarga em relação a capacidade da prensa e conseqüentemente para não danificar o ferramental (Altan et al., 2004).

Dependendo da complexidade da geometria, várias etapas são adotadas no processo de forjamento para gerar um componente final. Na Figura 22 se pode observar um exemplo de seqüência utilizada para confeccionar uma ponta de eixo.

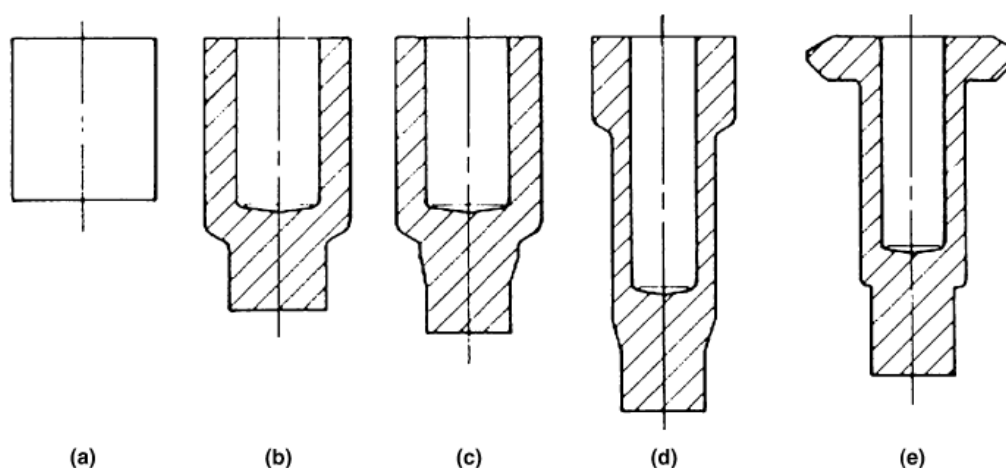


Figura 22 - Esquema das etapas de forjamento a frio de uma ponta de eixo a partir de um *billet*

Onde: (a) Billet cortado; (b) extrusão direta e indireta combinada; (c) extrusão direta; (d) extrusão indireta (e) perfuração simultânea do flange e prensagem do ombro.

Fonte: Sagemuller, F. 1968, apud Altan et al., 2004.

2.2.1.1 Forjamento a Frio: Vantagens e desvantagens

A conformação a frio exerce uma série de vantagens em relação a conformação a quente, dentre as quais se destacam: não há custos com energia para aquecimento, baixa influência na velocidade de conformação, não há perda de material (rebarbas), acabamento superficial superior e melhora as propriedades de resistência mecânica. Entretanto, existem também desvantagens como: limitação de dimensões dos componentes conformados, necessidade de equipamentos que exerçam pressões elevadas, economicamente viável para lotes seriados e cargas elevadas no ferramental (Schaeffer, 2006; Klocke, 2013).

2.2.2 Ferramentas Utilizadas para Conformação a Frio

Uma matriz é uma das ferramentas mais usuais no processo de forjamento a frio. A operação de conformação a frio em matriz ocorre através da deformação plástica exercida por compressão através da ferramenta (punção) em uma determinada matéria-prima, denominada *billet*, que por sua vez assume a geometria impressa da matriz, conforme pode ser observado na Figura 23, a matéria-prima a ser conformada é totalmente abrangida pelo ferramental (Dieter, 1981; Klocke, 2013).

Klocke ressalta que conforme a pressão exercida pela ferramenta sobre o *billet*, o sentido do fluxo de material tende a seguir três direções em relação ao movimento exercido pela ferramenta:

- Mesmo sentido em relação ao movimento da matriz;
- Sentido oposto em relação ao movimento da matriz;
- Sentido transversal em relação ao movimento matriz.

Ao menos dois dos movimentos anteriormente citados atuam simultaneamente no fluxo de material em uma matriz durante a execução do processo, além disto, ocorrem longos movimentos de deslizamento entre o *billet* e a superfície da matriz, principalmente movimentos perpendiculares em relação ao movimento exercido pela ferramenta, sob elevada tensão normal (Klocke, 2013).

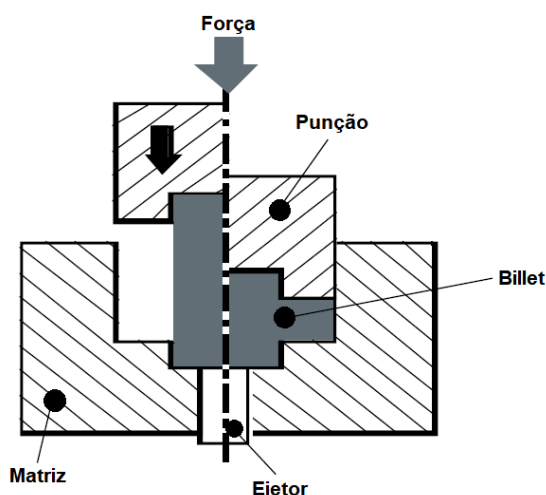


Figura 23 - Processo de forjamento a frio sem rebarba

Fonte: Adaptado de Altan et al., 2004.

O punção também é uma ferramenta constantemente utilizada no processo de conformação a frio, sendo este responsável por conformar a parte superior interna de um componente conformado. Este componente além de trabalhar com elevadas cargas de compressão e flexão, está muito propenso a acentuado desgaste, aumentando assim a temperatura em suas superfícies de trabalho que estão em movimento interativo com o *billet* (Altan et al., 2004).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA VIDA ÚTIL DE FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A FRIO

Alguns dos principais danos encontrados em matrizes de forjamento a frio são expostos na Figura 24, são eles: sobrecarga, fadiga e desgaste. Esses danos geralmente ocorrem de forma relacionada no ferramental e estão conexos aos elevados níveis de tensão que o ferramental está constantemente exposto durante o processo de conformação.

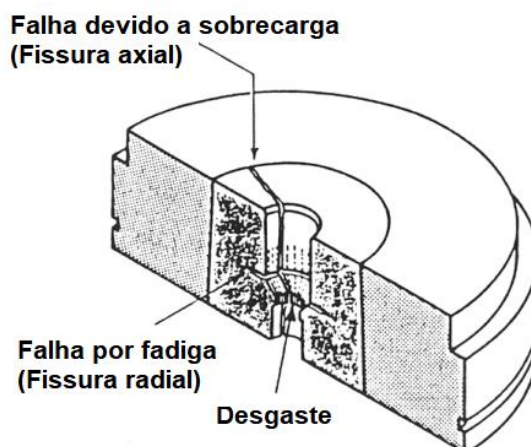


Figura 24 - Danos em ferramentas de conformação a frio

Fonte: Bay e Lange, 1992.

2.3.1 O Efeito do Atrito e Desgaste

Hutchings define o atrito como a resistência encontrada por um corpo em movimento relativo a outro. A intensidade da força de atrito é descrita como sendo o valor do coeficiente de atrito que pode variar entre uma ampla gama de valores conforme a aplicabilidade e materiais envolvidos. Geralmente o coeficiente de atrito é representado pela letra grega μ e seu valor situa-se nos intervalos mais estreitos, entre 0,1 a 1 (Hutchings, 1992; Larsen-Basse 1992).

O processo de forjamento pode apresentar várias repetições de ciclos para confeccionar peças em série. Em um ciclo, a matriz sofre com elevadas pressões desde o fechamento da mesma até o alívio da pressão no momento da ejeção do componente forjado da ferramenta. As condições topográficas dessa interação (principalmente em relação ao *billet*) elevam essas pressões, assim como a influência dos picos em regiões pontuais de elevadas temperaturas. Devido à dificuldade de ancoragem de lubrificantes nas zonas de conformação, as consequências do efeito do atrito e do desgaste no ferramental são muitas vezes mais eminentes, assim como na qualidade final do produto forjado. Uma consequência evidente do aumento do atrito é uma maior solicitação de energia, ocasionando um aumento significativo na pressão de conformação, contribuindo para uma menor vida útil do ferramental, além de em determinadas regiões ocorrem aumento de temperatura afetando assim o fluxo do material, alterando a resistência de deformação do *billet* (Button, 2012; Klocke, 2013).

O desgaste nas ferramentas incide particularmente em regiões onde há maior contato (interação) entre *billet* x matriz por elevadas velocidades de deslizamento, ocasionando uma alta taxa de transferência de calor. Nessas áreas estão inclusas cantos, bordas, gravuras e geometrias convexas (Klocke, 2013; Behrens, B-A., et al., 2014).

2.3.2 Condições Topográficas Superficiais

Em interações entre superfícies, compreender as características topográficas superficiais se torna necessário para o entendimento dos fenômenos tribológicos que atuam durante o contato superficial. A análise das características da superfície também são informações fundamentais para o entendimento dos mecanismos de desgaste, assim como o atrito. Contaminantes atmosféricos, presença de óxidos, dureza e planicidade em escala microscópica, são algumas características que devem ser observadas em contatos entre superfícies (Sarkar, 1976).

A rugosidade superficial é uma particularidade que exerce influência no patamar de contato entre as protuberâncias das superfícies. Para manter baixa a possibilidade de alguma interação entre protuberâncias de superfícies, a utilização de lubrificantes é necessária em determinados níveis de rugosidade, contudo, em contatos rolantes em condições normais de carga, velocidade e lubrificação pode haver deformação elástica das mesmas com uma película lubrificante entre as superfícies. A influência da rugosidade em uma superfície apenas é relevante quando ocorre o rompimento das protuberâncias ou rompimento do filme lubrificante, ocasionando o contato com a superfície oposta (Stolarski, 1990).

A textura das superfícies é classificada conforme suas características:

- Nano e micro rugosidade: variações superficiais no comprimento de uma ondulação, caracterizados por picos e vales com amplitudes e espaçamentos variados.
- Ondulação: irregularidade superficial definida como macro rugosidade; suas principais causas são resultados do processo de fabricação como a incorreta fixação da peça, vibração e deformações ocasionadas por tratamentos térmicos.

- Camada: termo definido por Bhushan (2000), é conhecido como direção das estrias, que indica a direção principal das irregularidades superficiais causadas pelo método de fabricação na qual a superfície foi condicionada.
- Falhas: interrupções indesejadas na textura superficial que contém desvios abruptos da forma nominal de um componente. O termo falha é conhecido como erro de forma.

As texturas da maioria das superfícies utilizadas na engenharia são classificadas como: aleatórias, isotrópicas ou anisotrópicas, além de estarem atreladas ao processo de fabricação (Bhushan, 2013).

Na conformação mecânica, a influência da topografia superficial da matéria-prima durante o processo varia conforme o tamanho e forma geométrica do *billet*, além de um prévio tratamento mecânico superficial realizado, como por exemplo, o jateamento (Klocke, 2013). Estudos apontam que um tratamento prévio superficial além do efeito de limpeza melhora a aderência do lubrificante na superfície do *billet* (Neudecker, 2004, apud Klocke, 2013, p. 153). A presença de uma boa lubrificação impacta diretamente na influência da topografia do *billet* durante o processo. A topografia superficial do ferramental também impacta no efeito do atrito e desgaste do processo, pois o acabamento do ferramental afeta diretamente as propriedades tribológicas do sistema (Klocke, 2013).

2.3.3 Lubrificantes e Lubrificação

A aplicação de lubrificantes no processo de forjamento a frio tem a finalidade de manter separadas as superfícies interativas, além de minimizar o atrito para melhorar o fluxo de material durante o processo, minimizar a troca de calor entre o *billet* e a ferramenta, remover o calor da ferramenta e diminuir o desgaste entre as superfícies da ferramenta e *billet* (Button, 2012; Klocke, 2013).

A correta seleção do lubrificante varia conforme diversos fatores: temperatura e velocidade de processo, compatibilidade químico-física do lubrificante em relação ao material da ferramenta e do *billet*, assim como a facilidade de aplicação e remoção do mesmo (Button, 2012).

No geral, os lubrificantes devem apresentar características como:

- Não possuir efeito corrosivo no ferramental ou *billet*;
- Devem ser facilmente aplicáveis;

- Não devem deixar resíduos no ferramental ou *billet*.

Segundo Klocke, os lubrificantes destinados ao processo de forjamento são constituídos por uma porção sólida (grafite, sulfureto de molibdênio, nitreto de boro, fosfatos alcalinos, vidro e grafite), por um transportador (água, óleos e gordura) e aditivos (Klocke, 2013).

Há quatro tipos de regimes de lubrificação que podem atuar entre as superfícies do ferramental e do *billet* (Figura 25). Esses regimes são dependentes de características como: temperatura de processo, rugosidade da superfície da ferramenta e do *billet*, viscosidade, qualidade e compressibilidade do lubrificante, assim como dos parâmetros do processo (Button, 2012).

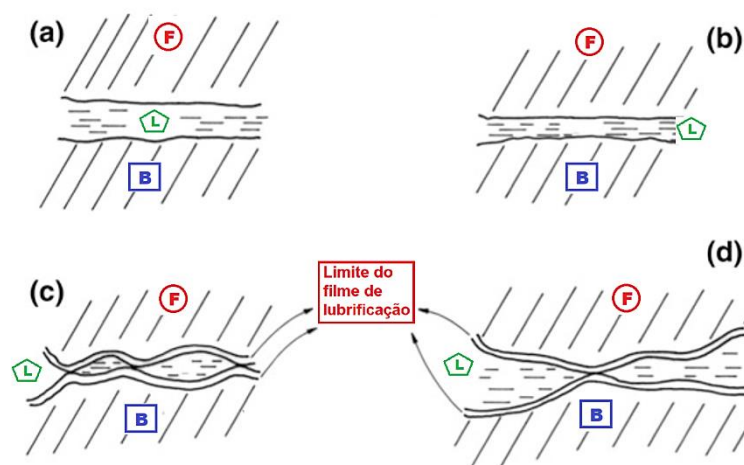


Figura 25 - Regimes de lubrificação aplicados à conformação mecânica dos metais

Onde: (a) Lubrificação hidrodinâmica: as superfícies são completamente separadas por uma película lubrificante geralmente mais espessa do que a rugosidade de ambas as superfícies (*billet* e ferramenta) e do que o tamanho molecular do próprio lubrificante. Entretanto, algumas protuberâncias podem soltar-se e quebrar o filme lubrificante, ocasionando um contato metálico direto entre as superfícies, assim como as demais superfícies ásperas, elevando as cargas durante a conformação e conseqüentemente o desgaste da ferramenta; (b) Lubrificante de filmes finos: possui espessura entre 3 à 10 vezes o tamanho da rugosidade média das superfícies em contato; (c) Lubrificação de contorno: é definido como uma película de lubrificante com espessura igual ao tamanho a nível molecular do lubrificante. Tal regime sofre influência da rugosidade e das propriedades da superfície em interação; (d) Lubrificação Mista: é caracterizado quando os vales dos picos de rugosidades são ocupados pelo lubrificante que mantém o filme de lubrificação contínuo.

Fonte: Adaptado de Button, 2012.

Os lubrificantes são reunidos em quatro grupos utilizados no processo de conformação mecânica:

- Fluidos com elevada viscosidade, como óleos minerais leves à graxas sintéticas, que formam um filme contínuo e promovem uma lubrificação hidrodinâmica;
- Emulsões com composições adequadas que reagem quimicamente com as ferramentas e a peça gerando filmes muito finos e estabelecendo uma lubrificação de contorno;
- Materiais orgânicos com aditivos para elevadas pressões (aditivos EP) que reagem com as ferramentas e peças de trabalho para formar camadas de compostos na interface de contato;
- Sólidos como: grafite, vidro, nitreto de boro e dissulfeto de molibdênio, usados para separar as superfícies do ferramental e *billet*.

2.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE TRABALHO A FRIO

A seleção do material do ferramental, assim como a correta seleção do lubrificante, exerce forte influência no sistema tribológico do processo de forjamento, mais precisamente suas características de superfície e de bordas, tais características definem a resistência da ferramenta perante a atuação do desgaste, além de afetarem diretamente as condições de atrito nos intervalos de lubrificação. Para mitigar a atuação do desgaste no ferramental é necessário definir os possíveis mecanismos de desgaste que atuarão no sistema tribológico do processo, para finalmente selecionar o material da ferramenta que melhor atenderá o projeto (Klocke, 2013).

As principais características tribológicas que devem ser consideradas na seleção do material do ferramental são:

- **Adesão:** Em um material, sua configuração eletrônica e seus elementos de liga são fatores que podem contribuir para a ocorrência do desgaste do tipo adesivo (Klocke, 2013). A tendência dos metais em interagir e aderirem um ao outro é indicada pela sua compatibilidade metalúrgica (Figura 26), que é o grau de solubilidade do sólido quando dois metais estão em interação (Rabinowicz, 1995). Em resumo quanto mais semelhantes forem os materiais em interação, o desgaste adesivo será mais propenso a ocorrer, portanto

quanto mais diferentes forem as características do material da ferramenta em relação ao material do *billet*, menor será efeito do desgaste adesivo (Rabinowicz, 1995; Klocke, 2013). Klocke exemplifica que um desgaste adesivo entre aços austeníticos e aços inoxidáveis não pode ser evitado com o uso de um aço ferramenta com alto teor de cromo ou níquel (Klocke, 2013).

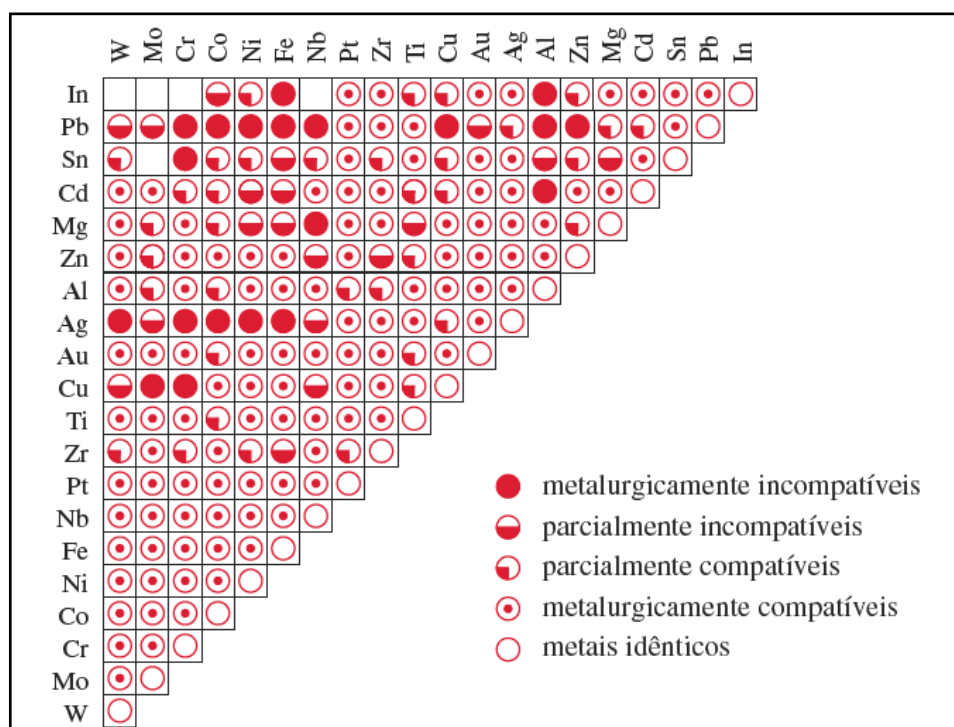


Figura 26 - Diagrama de compatibilidade metalúrgica para pares metálicos

Fonte: Rabinowicz, 1980, apud Norton, 2013, p. 428.

- **Abrasão:** A dureza de um material é considerada a sua escala de resistência ao desgaste abrasivo, portanto regiões de grande incidência de atrito devem possuir a maior dureza possível. A seleção de um material que possua boa temperabilidade é fundamental, assim como a preferência a elementos de ligas que conferem dureza ao material como cromo, tungstênio, vanádio e molibdênio (Klocke, 2013).
- **Desgaste superficial por Fadiga:** Materiais que possuem alto teor de cobalto ou níquel apresentam alta resistência térmica e mecânica, assim como tenacidade e são geralmente selecionados para projetos em que possa ocorrer maior fadiga superficial. Uma análise no material em relação a

presença de inclusões e defeitos metalúrgicos minimizam a ocorrência de fraturas, assim como a qualidade do acabamento superficial do ferramental e a não presença de pontos concentradores de tensão, como ranhuras, micro rachaduras ou entalhes (Klocke, 2013).

- **Desgaste químico:** Para minimizar os danos causados por essa modalidade de desgaste o material do ferramental deve ser resistente à oxidação e ter elevada condutividade térmica. Geralmente, os lubrificantes utilizados no processo de forjamento a frio são dotados de aditivos que causam a ocorrência do desgaste químico, por conter cloreto ferro em sua composição, por exemplo. No forjamento a frio o desgaste químico pode ocorrer de forma cíclica, pela adição do lubrificante no ferramental no momento em que o billet será conformado, e posteriormente na “remoção” do lubrificante através do próprio billet (já conformado). Entretanto, o desgaste químico é desejado, desde que de forma controlada, uma vez que utilizado aditivos EP (Klocke, 2013). Klocke e Rabinowicz alertam que aditivos EP são eficientes na maioria dos casos apenas para materiais não revestidos. Para aplicações em materiais revestidos o efeito da eficácia do aditivo EP deve ser verificado previamente (Rabinowicz, 1995; Klocke, 2013).

2.4.1 Aços para Ferramentas Aplicados a Conformação a Frio

Os aços destinados a aplicações em ferramentas de trabalho a frio, com exceção dos aços do Grupo “D”, são empregados geralmente a situações que não envolvam aquecimento contínuo, cíclico ou prolongado a temperaturas superiores a 205 a 260°C, pelo fato de não possuírem teores de ligas necessários para conferir resistência ao amolecimento a elevadas temperaturas (Bayer et al., 1995).

Os aços para trabalhos a frio são classificados pela AISI e pela SAE em três distintas categorias:

- Grupo “O”: Aços de baixa liga, temperáveis em óleo;
- Grupo “A”: Aços de média liga, temperáveis ao ar;
- Grupo “D”: Aços de alto teor de carbono e cromo, temperáveis ao ar ou em óleo.

2.4.1.1 Aços Ferramenta Grupo “D”

Os aços ferramentas classificados como o Grupo “D” destacam-se por possuírem em sua composição química elevado teor de carbono (1,50 a 2,35%) e elevado teor de cromo (12%), além de possuírem outros elementos de liga como cobalto, molibdênio e tungstênio (Bayer et al., 1995).

Os aços relacionados no Grupo “D” apresentam propriedades mecânicas como: tenacidade, excepcional resistência ao desgaste e resistência ao amolecimento a temperaturas elevadas, além de tais propriedades, admitem grande profundidade de endurecimento (estes aços são temperáveis em temperaturas entre 955 a 1040°C), possuem deformação relativamente baixíssima. As aplicações típicas dos aços do Grupo “D” incluem matrizes de conformação e corte, ferramentas para laminação de roscas, rolos e facas para corte e talhadeiras (Chiaverini, 1986).

2.4.1.2 Aços Ferramenta Grupo “H”

Os aços ferramenta para trabalho a quente do Grupo “H” são comumente utilizados para projetos de ferramentas de forjamento a quente, pois podem ser submetidos a temperaturas de processo que variam de 600°C à 1200°C (Altan et al., 2004). Todavia, algumas ferramentas utilizadas no processo de forjamento a frio são confeccionadas com um aço pertencente a este grupo, o aço H13, que é empregado em peças que são suscetíveis a desgaste, como os moldes de matrizes utilizados em processos de extrusões a frio (Bay e Lange, 1992).

Para conferir dureza e resistência térmica e mecânica, os aços do Grupo “H” possuem em sua composição química elementos de liga, como: cromo, tungstênio (apresenta melhor dureza a quente), vanádio (aumenta a resistência à abrasão e ao amolecimento) e molibdênio (proporciona maior resistência ao amolecimento). Esses aços são endurecidos por têmpera com resfriamento ao ar ou em banhos de sais (Altan et al., 2004).

2.4.2 Tratamentos e Acabamentos Superficiais

No processo de forjamento, a influência de fatores como acabamento superficial, composição química do material da ferramenta e da matéria-prima a ser conformada são consideradas fontes adicionais ao sistema tribológico por intermédio do atrito. A influência que a superfície da ferramenta exerce em relação ao atrito

durante a conformação é tão relevante a ponto de obter-se valores diferentes de atrito, conforme a direção de deslizamento do componente em relação à direção do sentido de usinagem utilizada para confeccionar a ferramenta (Klocke, 2013).

Os tratamentos superficiais proporcionam significativas reduções de incidências de danos causados por fadiga. A indução de tensões residuais compressivas através da utilização de técnicas como polimento mecânico, *shot peening* ou nitretação retardam o início de trincas, assim como podem abolir a progressão de futuras trincas, originadas por entalhes. Entretanto, tratamentos superficiais cujo principal objetivo é proporcionar resistência ao desgaste, através da utilização de ações que utilizam cromo, níquel e zinco podem ser prejudiciais às propriedades necessárias para resistência à fadiga (Altan, 1988).

2.4.3 Modificações e Revestimentos Superficiais

As técnicas de revestimentos superficiais mais importantes são CVD (Deposição Química de Vapor) e PVD (Deposição Física de Vapor), assim como suas variantes.

- O processo de CVD consiste, basicamente, na introdução de reagentes gasosos no interior de um reator, tais reagentes geram reações químicas na superfície do material a ser revestido.
- O processo de PVD é um grupo de técnicas de deposição, as quais tem em comum o fato de permitirem o transporte material no estado sólido ao material do alvo a ser revestido. As principais técnicas PVD podem são a evaporação e a pulverização.

A Figura 27 exemplifica alguns dos principais revestimentos (óxidos, nitreto, carboneto e boreto) que podem ser utilizados através das técnicas de deposição CVD e PVD.

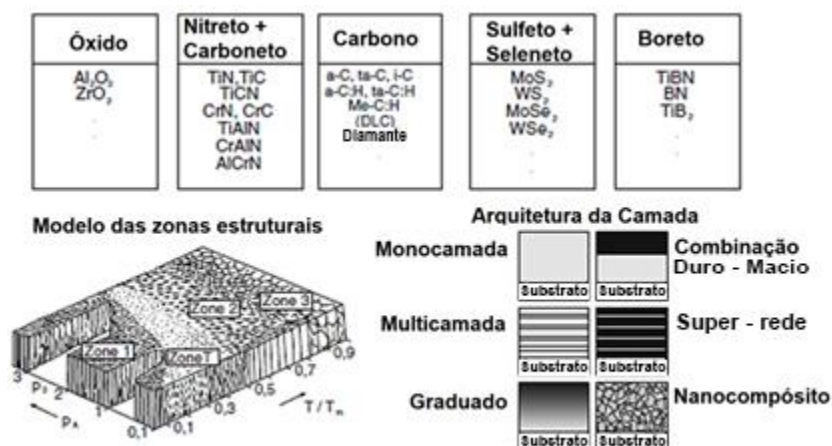


Figura 27 - Revestimentos CVD e PVD (materiais, estrutura e camada)

Fonte: Klocke, 2013.

As propriedades dos revestimentos são influenciadas e atuam em função das seguintes características:

- Preparação e limpeza do substrato;
- Material e estruturação da camada;
- Processo de revestimento.

Essas técnicas permitem a criação de revestimentos de materiais rígidos, com espessuras que variam de 1µm à 5 µm, extremamente resistentes ao desgaste e em alguns casos, redutores de atrito. Os revestimentos mais espessos geralmente apresentam elevadas tensões residuais e tendem a rachar ou descamar durante o regime elástico. Tal situação é conhecida como "efeito casca de ovo", que é quando a camada revestida se desprende completamente do substrato (Klocke, 2013).

Em ferramentas com camadas revestidas a microtopografia exerce a interação entre as superfícies (ferramenta e *billet*) e o lubrificante. Klocke exemplifica que os lubrificantes utilizados em superfícies com camada PVD aderem muito mais em relação aos lubrificantes empregado em superfícies de camada completamente lisa ou polida, melhorando a atuação do lubrificante, pois o lubrificante penetra nos espaçamentos entre os cristalitos, que por sua vez é carregado entre a ferramenta e o *billet*. Dependendo da seleção de parâmetros no processo de revestimento, a estrutura da camada e seus efeitos podem variar. No entanto, a utilização de revestimentos em ferramentas de conformação também causa um efeito negativo ao

sistema tribológico do processo de forjamento, pois quando a superfície metálica da ferramenta é substituída, por uma não metálica e muito mais dura, há uma grande mudança nas ações físico-químicas envolvidas no contato tribológico durante o desenvolvimento do processo, afetando os mecanismos de atrito e desgaste. Embora o desgaste seja reduzido pelos revestimentos e a ação dos lubrificantes atue de forma otimizada, em geral, apenas alguns sistemas de revestimento são capazes de reduzir o atrito (Klocke, 2013).

Em tratamentos termoquímicos superficiais, as variantes do processo modificam a composição química superficial da ferramenta através de um ou mais elementos químicos que se difundem no material. Os tratamentos termoquímicos proporcionam ao material aumento de dureza, resistência a elevadas temperaturas, ancoragem de revestimentos e diminuição do desgaste adesivo (Klocke, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos principais propósitos deste trabalho é empregar parâmetros utilizados em reais condições de processo, propondo reproduzir o sistema tribológico do processo de forjamento a frio, com a finalidade de avaliar o comportamento das amostras do tipo disco, caracterizadas como ferramental, perante o desgaste. Partindo desta ideia, uma metodologia foi desenvolvida (Figura 28) com o propósito de viabilizar a concretização deste trabalho que pode ser dividido em quatro partes: atualização e adaptações do tribômetro, confecção das amostras, ensaio tribológico e avaliação tribológica.

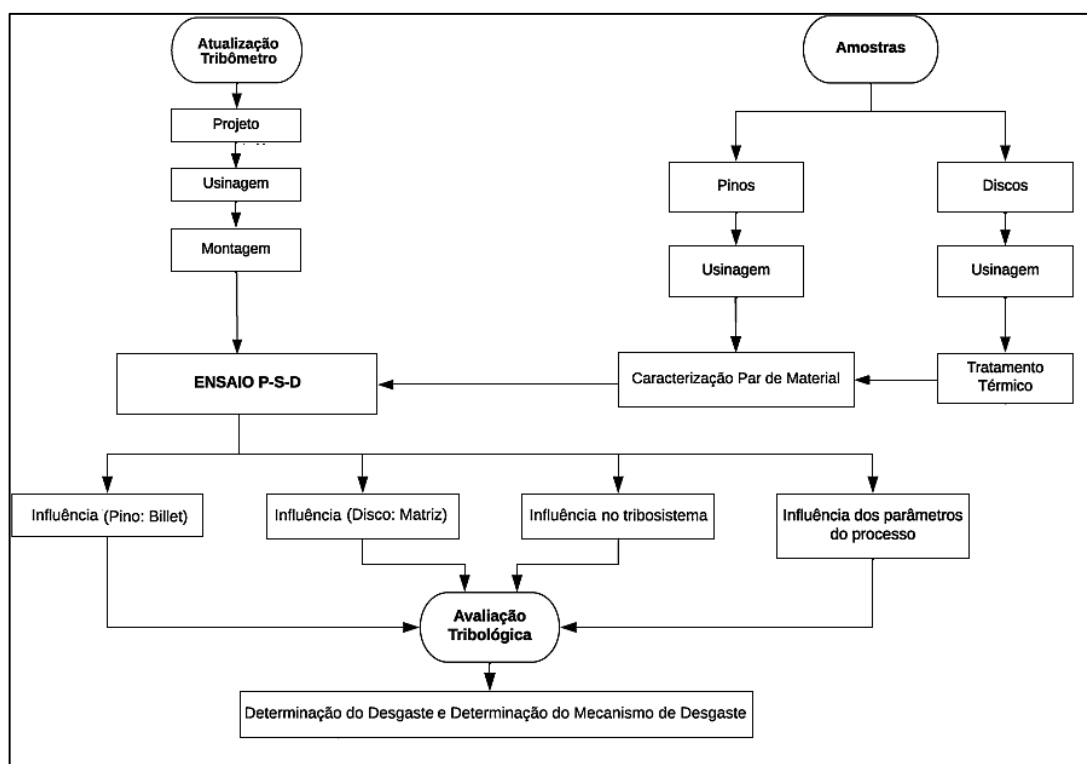


Figura 28 - Fluxograma da metodologia experimental de análise tribológica de materiais de ferramentas de forjamento a frio

3.1 TRIBÔMETRO P-S-D

A maioria dos tribômetros P-S-D destinam-se apenas a teste em ambientes e condições laboratoriais, mas em alguns casos específicos tais equipamentos podem ser modificados para uso em um ambiente diferenciado (Neale e Gee, 2001).

Para atender a premissa básica deste trabalho, foi necessário adotar adaptações no sistema de carga controlada (Figura 29, detalhe “a”), assim como

atualizar o sistema de fixação das amostras do tipo disco (Figura 29, detalhe “b”) de um tribômetro P-S-D destinado para análises laboratoriais. Este equipamento foi anteriormente desenvolvido para atuar em ambientes laboratoriais e seu desenvolvimento pode ser observado no estudo de Accadrolli e Verney (2017).

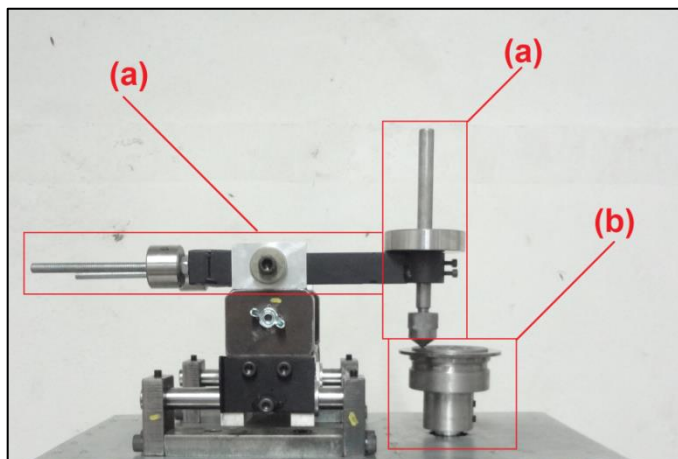


Figura 29 - Tribômetro P-S-D: (a) adaptações e (b) atualização

Onde: (a) adaptações no reforço estrutural do sistema de carga controlada, possibilitando a adoção de um peso morto maior e haste estendida para possibilitar fixar um bloco de metal (peso morto) e (b) atualização do projeto do porta amostra disco, permitindo o contato intermitente sem oscilação de carga, além de comportar quatro unidades.

3.1.1 Adaptação: Sistema de Carga

As adaptações no sistema de carga controlada (Figura 30) permitiram comportar um peso morto maior sem interferir na articulação da parte superior do tribômetro. A ordem de força máxima que o tribômetro atualmente pode operar é de 406N.

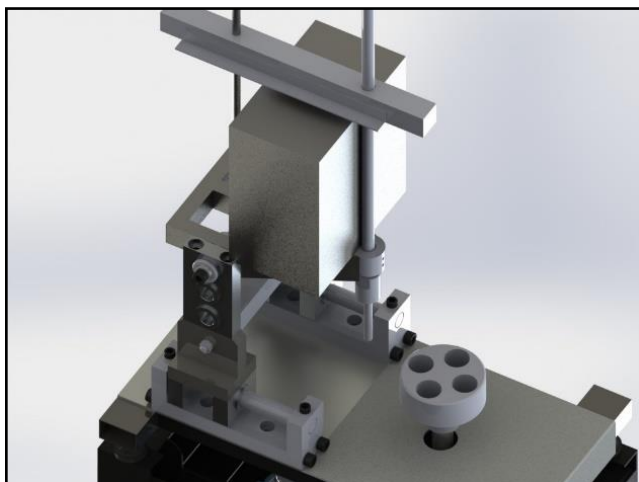


Figura 30 - Novo sistema de carga controlada

3.1.2 Atualização: Condição Cíclica

Um fator de grande relevância para a reprodução do sistema tribológico especificado deste trabalho foi desenvolver um componente denominado: “Porta Amostra Disco” (Figura 31), que possibilita um contato intermitente entre as amostras pino e disco, visando propiciar uma condição cíclica na qual o pino (desempenhando o papel de *billet*) entra em contato com o disco (caracterizado como matriz). Isto é, este componente habilita o dispositivo P-S-D que possui velocidade constante e contato contínuo a atuar de forma cíclica, ou seja, ele propicia uma modalidade de contato intermitente entre as amostras pino e disco.

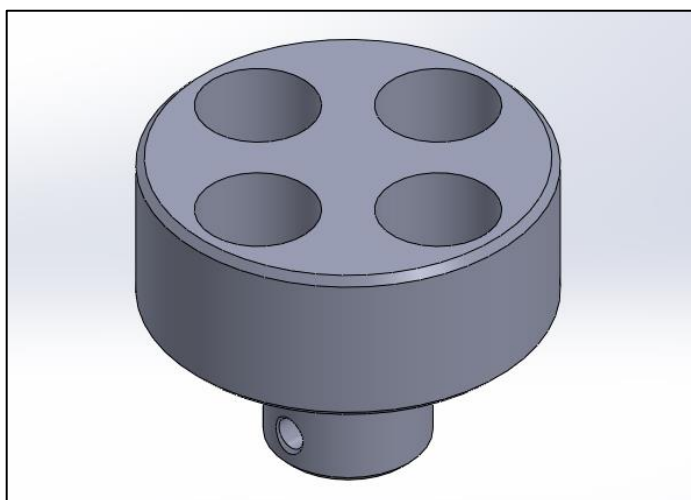


Figura 31 - Novo porta Amostra Disco

Após o contato o disco sofre um resfriamento natural, propiciado pela pausa (intervalo) do atrito causado pelo contato com o pino; e por um lubrificante (em caso

de ensaios lubrificado) que atua na superfície do disco. Um diagrama que esquematiza um ciclo de operação do ensaio e exemplifica o funcionamento do por amostra disco, pode ser observado na Figura 32.

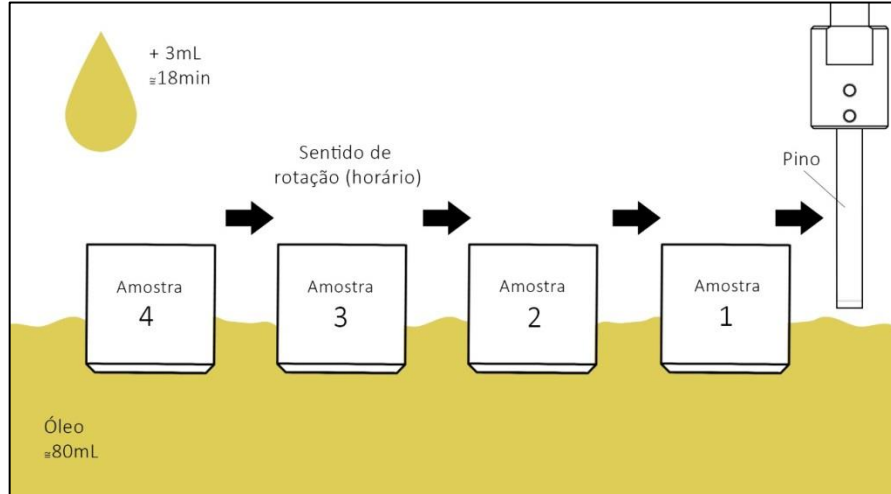


Figura 32 - Diagrama operacional do ensaio tribológico

3.2 DISCOS E PINOS (AMOSTRAS)

3.2.1 Disco

As amostras do tipo disco foram desenvolvidas utilizando materiais e acabamentos superficiais empregados ao projeto do ferramental para trabalho a frio (Figura 33).

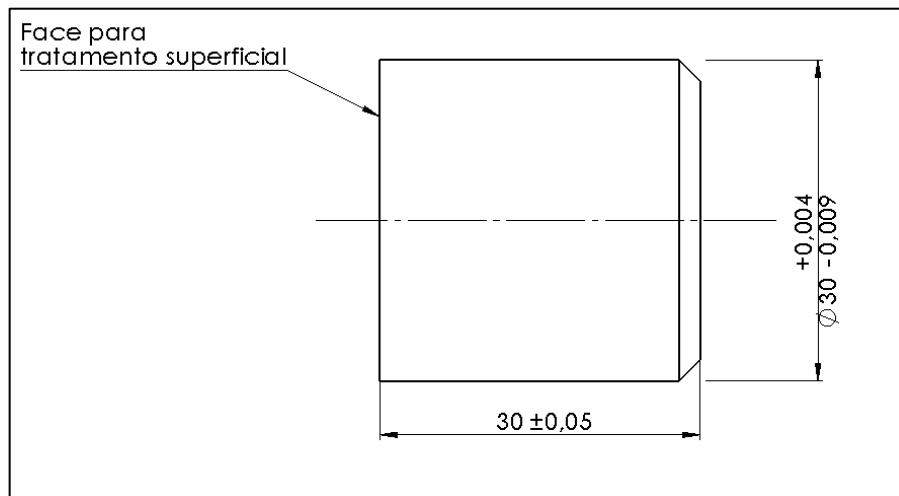


Figura 33 - Amostras do tipo Disco

Os componentes utilizados como amostras do tipo disco foram confeccionados através dos processos de usinagem, seguido de têmpera, revenimento e posterior retificação.

A matéria-prima utilizada foram os aços AISI D6 e AISI H13:

- O aço AISI D6, por suas características mencionadas neste trabalho é um dos materiais mais utilizado no processo de forjamento a frio.
- O aço AISI H13, por questões técnicas é um material muito utilizado no processo de forjamento a quente em matriz fechada, porém pode ser utilizado em ferramentais específicos na conformação a frio.

Os tratamentos térmicos das amostras do aço AISI D6 foi realizado através do processo de têmpera superficial. As amostras foram aquecidas até a temperatura de 980°C, após sofreram um resfriamento em óleo (aquecido em 70°C), até uma temperatura de 300°C e sofreram um duplo revenimento: o primeiro em 300°C e o segundo em 480°C.

O tratamento térmico de têmpera superficial das amostras do aço AISI H13 ocorreu da seguinte forma: as amostras foram aquecidas até a temperatura de 1010°C, após sofreram um resfriamento em óleo semelhante ao realizado nas amostras do aço AISI D6, até uma temperatura próxima de 300°C e posteriormente foram revenidas em duas etapas: a primeira em 540°C e a segunda em 480°C, com a finalidade de aliviar tensões internas oriundas de têmpera superficial, adquirindo durezas entre 54 HRC e 59 HRC.

3.2.2 Pino

As amostras do tipo pino (Figura 34) são confeccionadas nos aços SAE 1020 e SAE 1045 (amplamente empregados como matéria-prima no processo de forjamento a frio). As amostras do tipo pino foram projetadas com cabeça plana para reproduzir patamares de rugosidades encontradas comumente nos *billets* após o processo de corte, utilizando uma serra-fita de bancada.

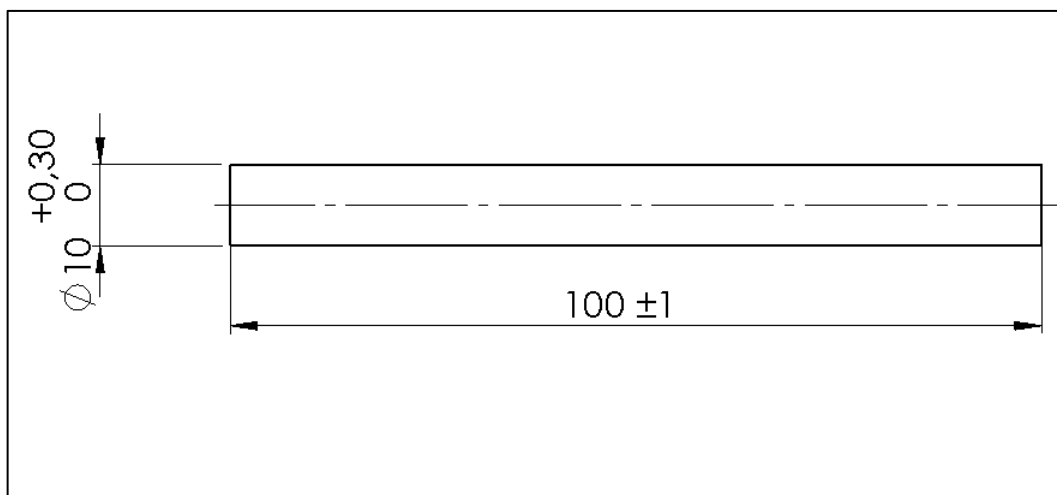


Figura 34 - Amostras do tipo Pino

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os materiais utilizados para confeccionar as amostras do tipo disco são os aços ferramenta AISI D6 e AISI H13. A Tabela 3 relaciona a composição química desses aços. O certificado de qualidade da matéria prima utilizada nos discos pode ser verificado nos Anexo 01 e Anexo 02. Em temperatura ambiente (20°C), os aços AISI D6 e AISI H13 possuem, respectivamente, densidade de 7,67 g/cm³ e 7,80 g/cm³.

Tabela 3 - Composição química dos aços AISI D6 e AISI H13

Tipo	C	Mn	P máx.	S máx.	Si	Cr	W	Mo	V
AISI D6	2,00	0,30	0,03	0,03	0,20	11,00	0,60	-	-
	2,25	0,60			0,40	13,00	1,25		
AISI H13	0,32	0,20	0,03	0,03	0,80	4,75	-	1,10	0,80
	0,45	0,50			1,20	5,50		1,75	1,20

Fonte: Adaptado do catálogo Aços Favorit

Os materiais que compõem as amostras do tipo pino são amplamente empregados na construção mecânica por suas características que proporcionam boa forjabilidade a frio. A Tabela 4 relaciona a composição química dos aços SAE 1020 e SAE 1045, ambos possuem densidade de 7,87 g/cm³ em temperatura ambiente. O certificado de qualidade da matéria prima utilizada nos pinos pode ser verificado nos Anexo 03 e Anexo 04.

Tabela 4 - Composição química dos aços ao carbono a serem utilizados como amostras do tipo pino

Tipo	C	Mn	P máx.	S máx.
SAE 1020	0,18 0,23	0,30 0,60	0,040	0,050
SAE 1045	0,43 0,50	0,60 0,90	0,040	0,050

Fonte: Adaptado do catálogo Aços Favorit

3.3.1 Ensaio de Dureza

Com o auxílio de um durômetro (marca: Fortel, modelo: MRS), foi realizado ensaio (Figura 35) para obter a dureza superficial das amostras do tipo disco. Os valores obtidos em laboratório são informados na Tabela 5. Este ensaio atendeu a norma ASTM E 10-15.



Figura 35 - Medição da dureza de um disco

A dureza do *billet* também é um fator de extrema importância, pois está diretamente interligado com a forjabilidade do aço a ser conformado, portanto é fundamental conhecer-se a dureza das amostras do tipo pino para realização do ensaio tribológico, para isso, com o auxílio de um durômetro (marca: Fortel, modelo: MRS), foram realizados ensaios para obter a dureza média das amostras do tipo pino, são elas:

- Pino SAE 1020, dureza de 156 HB;
- Pino SAE 1045, dureza de 240 HB.

3.4 ANÁLISES PRÉ-ENSAIO

As amostras do tipo disco foram identificadas com o prefixo “D” seguida de uma segunda letra que indica o material em que a mesma foi confeccionada: “D” para amostras em AISI D6 e “H” para amostras AISI H13; na sequência há um numeral. As amostras do tipo pino foram identificadas como o prefixo “P”, seguido da letra “A” ou “B”, que indica respectivamente o seu material, SAE 1020 ou SAE 1045; na sequência há um numeral.

3.4.1 Massa Inicial

A medição da massa inicial dos discos (Tabela 5) foi obtida através da utilização de uma balança analítica com resolução de 0,0001g e capacidade para amostras até 210,0000g (marca: Ohaus, modelo: Explorer), em um ambiente laboratorial.

Tabela 5 - Identificação, massa inicial e dureza: Amostras do tipo Disco

Amostras	Tipo	Material	Massa Inicial (g) ^[1]	Dureza HB	TT ^[2]
DD01	Disco	AISI D6	161,6400	250	Não
DD02	Disco	AISI D6	162,0839	262	Não
DD03	Disco	AISI D6	161,8180	271	Não
DD04	Disco	AISI D6	161,9246	711	Sim
DD05	Disco	AISI D6	161,4462	735	Sim
DD06	Disco	AISI D6	161,9153	711	Sim
DD07	Disco	AISI D6	161,6025	711	Sim
DD08	Disco	AISI D6	162,1296	735	Sim
DD09	Disco	AISI D6	161,7429	735	Sim
DD10	Disco	AISI D6	162,1240	711	Sim
DH01	Disco	AISI H13	162,6598	208	Não
DH02	Disco	AISI H13	162,9520	208	Não
DH03	Disco	AISI H13	162,7995	208	Não
DH04	Disco	AISI H13	162,5380	601	Sim
DH05	Disco	AISI H13	163,0381	613	Sim
DH06	Disco	AISI H13	162,6580	601	Sim
DH07	Disco	AISI H13	163,1170	613	Sim
DH08	Disco	AISI H13	162,6691	613	Sim
DH09	Disco	AISI H13	163,2684	592	Sim
DH10	Disco	AISI H13	162,8787	552	Sim

^[1]: Condições laboratoriais: temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 56%.

^[2]: TT: Tratamento Térmico.

O equipamento para mensurar a massa inicial dos pinos (Tabela 6) foi uma balança analítica com capacidade de 0,0001g e capacidade para amostras até 210,0000g (marca: Ohaus, modelo: Explorer).

Tabela 6 - Identificação, massa inicial e dureza: Amostras do tipo Pino

Amostras	Tipo	Material	Massa Inicial (g) ^[1]	Dureza HB	TT ^[2]
PA1	Pino	SAE 1020	55,7633	156	Não
PA2	Pino	SAE 1020	55,6952	156	Não
PA3	Pino	SAE 1020	55,8003	156	Não
PB1	Pino	SAE 1045	55,0863	240	Não
PB2	Pino	SAE 1045	55,1968	240	Não

^[1]: Condições laboratoriais: temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 56%.

^[2]: TT: Tratamento Térmico.

3.4.2 Rugosidade Superficial

A rugosidade das amostras foi mensurada utilizando um rugosímetro eletrônico portátil (marca: Mitutoyo, modelo: SJ210), conforme ilustrado pela Figura 36.



Figura 36 - Medição da rugosidade

As medições de rugosidade das amostras do tipo disco foram realizadas em duas direções: uma em relação ao mesmo sentido das marcas originadas pelo rebolo da retífica e outra em 90° em relação às marcas do rebolo da retífica (Figura 37). Os valores obtidos são informados na Tabela 7.

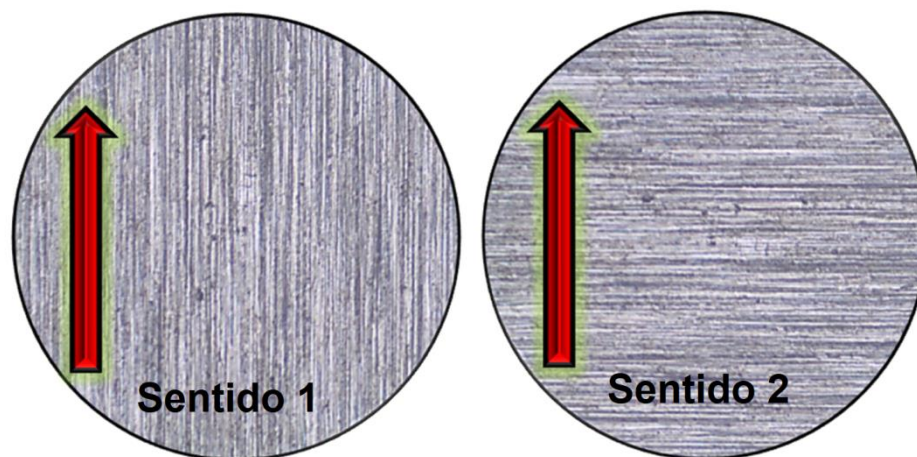


Figura 37 - Sentindo de medição da rugosidade

Onde: Sentido 1 é o lado paralelo em relação a rugosidade obtida no processo de retífica e Sentido 2 é o lado perpendicular em relação a rugosidade obtida no processo de retífica.

Tabela 7 - Rugosidade superficial das amostras Disco

Amostra Disco	Ra (μm) ^[1]			Rz (μm) ^[2]			Rq (μm) ^[3]		
	Sentido 1	Sentido 2	Média	Sentido 1	Sentido 2	Média	Sentido 1	Sentido 2	Média
DD01	0,228	0,279	0,2535	2,530	3,178	2,8540	0,302	0,384	0,3430
DD02	0,130	0,210	0,1700	0,917	2,237	1,5770	0,163	0,273	0,2180
DD03	0,150	0,231	0,1905	1,101	2,296	1,6985	0,189	0,306	0,2475
DD04	0,168	0,459	0,3135	1,913	2,712	2,3125	0,225	0,601	0,4130
DD05	0,183	0,212	0,1975	1,344	2,020	1,6820	0,236	0,285	0,2605
DD06	0,138	0,157	0,1475	1,325	1,696	1,5105	0,188	0,207	0,1975
DD07	0,103	0,136	0,1195	0,720	1,251	0,9855	0,127	0,175	0,1510
DD08	0,143	0,149	0,1460	1,110	1,321	1,2155	0,184	0,201	0,1925
DD09	0,158	0,365	0,2615	0,877	2,630	1,7535	0,189	0,470	0,3295
DD10	0,153	0,365	0,2590	2,027	2,630	2,3285	0,209	0,470	0,3395
DH01	0,257	0,370	0,3135	1,967	3,321	2,6440	0,332	0,471	0,4015
DH02	0,297	0,497	0,3970	1,733	4,673	3,2030	0,366	0,661	0,5135
DH03	0,256	0,421	0,3385	1,987	3,682	2,8345	0,344	0,532	0,4380
DH04	0,238	0,292	0,2650	1,801	2,481	2,1410	0,310	0,372	0,3410
DH05	0,330	0,346	0,3380	2,088	3,390	2,7390	0,418	0,446	0,4320
DH06	0,394	0,419	0,4065	2,210	3,205	2,7075	0,466	0,529	0,4975
DH07	0,231	0,405	0,3180	1,632	3,077	2,3545	0,286	0,505	0,3955
DH08	0,245	0,301	0,2730	1,483	2,505	1,9940	0,294	0,385	0,3395
DH09	0,216	0,346	0,2810	1,444	2,813	2,1285	0,274	0,440	0,3570
DH10	0,284	0,361	0,3225	1,576	2,828	2,2020	0,369	0,454	0,4115

^[1]: Ra: Rugosidade - desvio médio aritmético do perfil avaliado.

^[2]: Rq: Rugosidade - desvio padrão do perfil de avaliado.

^[3]: Rz: Rugosidade - altura máxima do perfil avaliado.

As medições de rugosidade das amostras do tipo pino (Tabela 8) foram medidas apenas na direção que assemelha-se ao sentido 2 apresentado pela Figura 37, pois devido ao nível de rugosidade das mesmas ser demasiadamente superior aos valores de rugosidade das amostras do tipo disco, apresentam vales mais profundos pelo fato de serem obtidas através processo de corte realizada por uma serra-fita. Estes valores de rugosidade superficial não são abrangidos pela norma ASTM G99, em função de reproduzirem justamente valores reais obtidos pelo processo de corte.

Tabela 8 - Rugosidade superficial das amostras Pino

Amostra Pinos	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
PA1	7,329	43,567	9,236
PB1	8,374	52,917	10,580
PA3	5,356	35,170	6,753
PB2	9,730	59,464	12,368
PA2	7,475	40,820	9,181

3.4.3 Microscopia Óptica

Visando uma comparação entre o estado inicial das superfícies das amostras do tipo disco antes da realização dos ensaios tribológico, as amostras AISI D6 (Figura 38) e AISI H13 (Figura 39) passaram por uma prévia avaliação superficial com o auxílio de um microscópio ótico (marca: Olympus, modelo: GX51), utilizando uma ampliação de 50X.

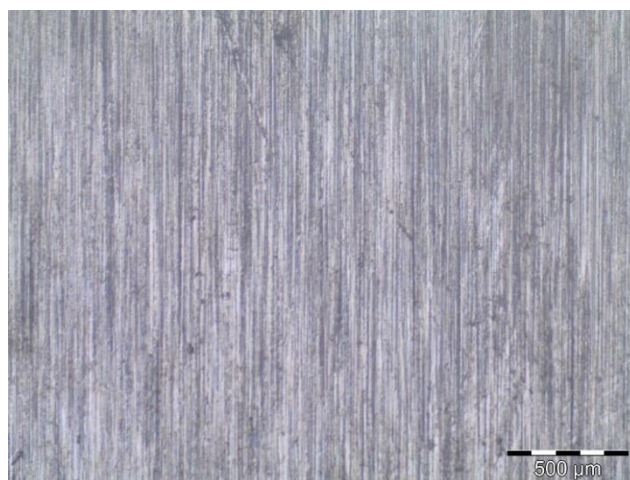


Figura 38 - Estado superficial de um disco confeccionado com o aço AISI D6 após retifica (ampliado 50X)

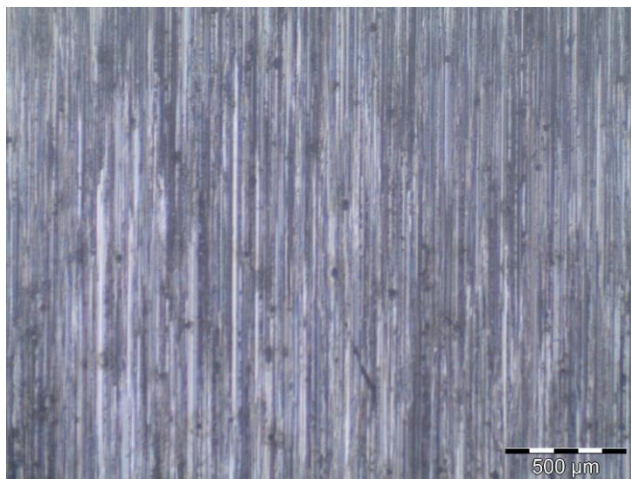


Figura 39 - Estado superficial de um disco confeccionado com o aço AISI H13 após retifica (ampliado 50X)

As demais imagens obtidas através do microscópio, referentes as amostras do tipo disco de ambos os materiais, podem ser verificadas no Anexo 05.

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para a realização do ensaio tribológico, foram adotadas premissas básicas e boas práticas informadas na norma ASTM G99 que rege os ensaios tribológicos que utilizam dispositivos do tipo P-S-D cabíveis ao ensaio em questão, pois a norma não cita orientações em métodos adotados em ambientes não laboratoriais.

4.1 PARÂMETROS DE ENSAIO

4.1.1 Força

A força aplicada foi calculada com base em dados obtidos na literatura disponível, pois conforme Bay, a pressão na superfície de uma ferramenta de forjamento a frio pode chegar até 2500 MPa, assim como a temperatura de operação cíclica pode chegar até 200°C, com picos localizados que podem alcançar até 600°C (Bay, 1994).

Tendo os valores de 1500 MPa a 2500 MPa como valores máximos de pressão exercida durante o processo de forjamento a frio, adotou-se na interface das amostras do tipo disco a máxima capacidade em que o equipamento pode suportar (406 N), pois conforme pode ser visto nos estudos de Choi et al., as cargas utilizadas em ensaios tribológicos semelhantes a finalidade deste trabalho são geralmente no máximo até 100N, muitas vezes sendo limitadas pela capacidade do dispositivo (Choi et al., 2012).

Ao utilizar a força de 406 N, a pressão exercida pelo pino sobre o disco é de 5,7 MPa, conforme pode ser observado na equação (10).

$$P = \frac{F}{A_p} \quad (10)$$

$$P = \frac{F}{\pi \cdot r_p^2}$$

$$P = \frac{406 \text{ N}}{\pi \cdot (4,75 \text{ mm})^2}$$

$$P = \frac{406 \text{ N}}{70,88 \text{ mm}^2}$$

$$P \cong 5,73 \text{ MPa}$$

Onde: P é a Pressão dada em MPa , F é a Força normal dada em N , A_p é a Área do Pino dada em mm^2 e r_p é o Raio do Pino dado em mm .

4.1.2 Pista de Degaste e Velocidade de Deslizamento

Os valores de velocidade de deslizamento linear encontrados em estudos de conformação a frio variam muito, na ordem de 0,01 m/s a 0,10 m/s, em função do tipo de par de material (ferramental x *billet*), tipo de lubrificante e etc. Adotou-se o valor de 0,055m/s como valor da média de valores mencionados em outros estudos (Groche et al., 2013; Dubar et al., 2014). Na equação (11) pode-se observar a dedução da velocidade angular adotada.

$$\omega = \frac{V}{r_d} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{0,055 \text{ m/s}}{0,030 \text{ m}}$$

$$\omega = 1,8333 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 1,8333 \text{ rad/s} \cdot 2\pi$$

$$\omega = 11,5191 \text{ RPS} \cdot 60 \text{ s}$$

$$\omega = 691,15 \text{ RPM}$$

$$\omega \cong 691 \text{ RPM}$$

Onde: ω é a Velocidade angular dada em RPM, V é a Velocidade de deslizamento linear dada em m/s e r_d é o Raio da pista de desgaste dado em m.

Para controlar o parâmetro de distância de deslizamento, foi calculada a velocidade de deslizamento no intervalo de tempo de um minuto, através da equação (12).

$$V_p = (2\pi \cdot r_d) \cdot \omega \quad (12)$$

$$V_p = (2\pi \cdot 0,030\text{m}) \cdot 691\text{RPM}$$

$$V_p = 130,250 \frac{\text{m}}{\text{min.}}$$

Onde: V_p é a Velocidade de deslizamento parcial dada em m/s, r_d é o Raio da pista de desgaste dado em m e ω é a velocidade angular dada em RPM.

4.1.3 Distância de Deslizamento e Tempo de Duração do Ensaio

Segundo Hirschvogel e Dommelen, o ciclo de vida útil de uma ferramenta de forjamento a frio varia de 20000 a 50000 peças (Hirschvogel e Dommelen, 1992).

Adotando o valor de 50000 como o número de ciclos e a distância linear de contato direto entre o pino e o disco de 29 mm (Figura 40, detalhe “a”), pode-se elaborar a equação (13) para chegar-se aos valores de distância de deslizamento total de um ciclo e conseqüentemente ao tempo de contato unitário de cada amostra, conforme demonstrado na equação (14).

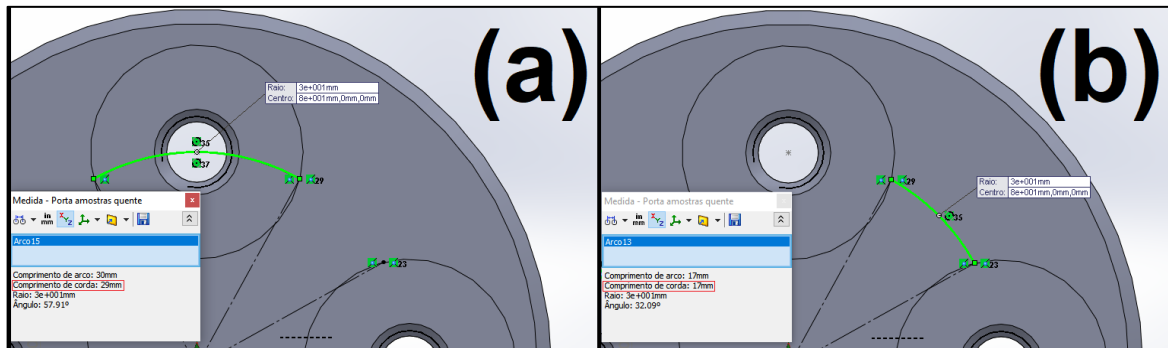


Figura 40 - Distância linear: (a) contato direto e (b) intervalo de contato

$$L_{tc} = C \cdot L_d \quad (13)$$

$$L_{tc} = 50000 \text{ Peças} \cdot 0,029 \text{ m}$$

$$L_{tc} = 1450 \text{ m}$$

Onde: L_{tc} é a Distância de deslizamento total de um ciclo dada em m, C é o Número de ciclos [adm.] e L_d é a Distância de deslizamento em um disco dada em m.

$$t_u = \frac{L_{tc}}{V_p} \quad (14)$$

$$t_u = \frac{1450 \text{ m}}{130,250 \text{ m/min.}}$$

$$t_u = 11,13 \text{ min.}$$

Onde: t_u é o Tempo de contato unitário de cada amostra dado em min., L_{tc} é a Distância de deslizamento total de um ciclo dada em m e V_p é a Velocidade de deslizamento parcial é dada em m/min.

Para determinar o tempo total de duração do ensaio, equação (15), em função da distância a ser percorrida em cada amostra, multiplica-se o tempo de contato unitário de cada amostra, conforme visto na equação (14), pelo número de unidades de amostras (4 unidades) e soma-se o intervalo de tempo de contato (Figura 40, detalhe “b”) multiplicado pelo número de intervalos, conforme a equação (16).

$$tt = (t_u \cdot 4) + t_i \quad (15)$$

$$tt = (11,13 \text{ min.} \cdot 4) + t_i$$

$$t = 44,52 \text{ min.} + 27,32 \text{ min.}$$

$$tt = 72,24 \text{ min.}$$

$$tt \cong 73 \text{ min.}$$

Onde: tt é o Tempo total de ensaio dado em min., t_u é o Tempo de contato unitário de cada amostra dado em min. e t_i é o Intervalo de tempo de dado em min.:

$$t_i = \left(\frac{C \cdot L_i}{V_p} \right) \cdot 4 \quad (16)$$

$$t_i = \left(\frac{50000 \text{ Peças} \cdot 0,017 \text{ m}}{130,250 \text{ m/min.}} \right) \cdot 4$$

$$t_i = (6,53 \text{ min.}) \cdot 4$$

$$t_i = 27,32 \text{ min.}$$

Onde: t_i é o Intervalo de tempo de dado em min., C é o Número de ciclos [adm.] e L_i é a Distância de deslizamento em um disco dada em m. e V_p é a Velocidade de deslizamento parcial é dada em m/min.

4.2 ENSAIO TRIBOLÓGICO

Os ensaios tribológicos foram realizados obedecendo 4 condições de ensaio (Tabela 9, ensaio 1 a 4), além destas 4 condições, foi realizado um ensaio em condição e tempo específico (Tabela 9, ensaio 5), com a finalidade de avaliar as configurações das amostras em condições de desgaste a seco (sem lubrificação).

Tabela 9 - Condições X Parâmetros definidos para ensaios tribológicos

Condição	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
Material Pino	SAE 1020	SAE 1045	SAE 1020	SAE 1045	SAE 1020
Lubrificante	Lubrificante 01	Lubrificante 02	Lubrificante 01	Lubrificante 02	-
Condição de desgaste	Lubrificado	Lubrificado	Lubrificado	Lubrificado	Não Lubrificado
Temperatura ambiente	20 °C	21,1 °C	21,2 °C	20,7 °C	24,4 °C
Umidade relativa do ar	53%	47%	57%	65%	52%
Força	406 N	406 N	406 N	406 N	406 N
Pista de desgaste	Ø60 mm	Ø60 mm	Ø60 mm	Ø60 mm	Ø60 mm
Sentido de rotação	Horário	Horário	Horário	Horário	Horário
Velocidade de deslizamento	0,055 m/s	0,055 m/s	0,055 m/s	0,055 m/s	0,055 m/s
Distância de deslizamento	1450 m ^[1]	1450 m ^[1]	1450 m ^[1]	1450 m ^[1]	725 m ^[2]
Duração do ensaio	73 min.	73 min.	73 min.	73 min.	36 min. e 30 seg. ^[3]

^[1]: Valor relativo ao contato direto em cada amostra do tipo disco durante o ensaio lubrificado, com a finalidade de reproduzir 50000 ciclos.

^[2]: Valor relativo ao contato direto em cada amostra do tipo disco durante o ensaio não lubrificado, com a finalidade de reproduzir 25000 ciclos, tendo em vista a máxima deformação plástica cabível suportada na amostra pino, no regime não lubrificado.

^[3]: Valor atribuído ao tempo total de duração, com a finalidade de reproduzir 25000 ciclos, tendo em vista a máxima deformação plástica cabível suportada na amostra pino, no regime não lubrificado.

Foram definidos como lubrificantes dois tipos distintos de óleos, conforme pode ser observado na Tabela 10. A finalidade da seleção destes lubrificantes teve como objetivo estudar apenas o comportamento das amostras metálicas sob influência dos mesmos.

Tabela 10 - Características e propriedades dos Lubrificantes utilizados no ensaio tribológico

Amostra	Tipo	Massa (1,0 mL)	Densidade a 20/4°C	Viscosidade, cSt a 40°C (mm ² /s)
Lubrificante 01	Óleo Mineral - Aditivado	0,9473 g	0,945	100
Lubrificante 02	Óleo Mineral - Comum	0,9309 g	0,930	90

O mecanismo de lubrificação durante o ensaio sucedeu-se através de uma quantidade pré-estabelecida de lubrificante (80 mL), assim como a manutenção da mesma em intervalos de 18 min. e 25 seg., com acréscimos de 3 mL, com o auxílio de uma seringa graduada, o diagrama apresentado na Figura 32 ilustra este artifício. Para minimizar a perda de lubrificante durante o ensaio, em função do movimento

giratório, foi adotado um sistema de proteção equipado com um quebra-onda (conforme indicado pela seta na Figura 41).

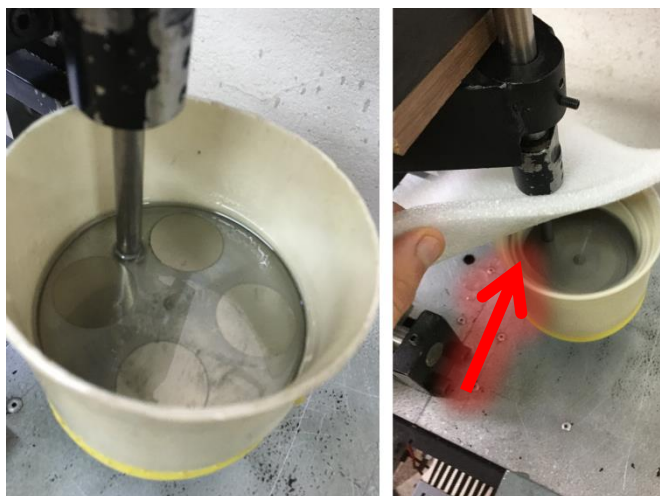


Figura 41 - Sistema de conservação de lubrificante

O início do ensaio (Figura 42) ocorreu a partir do momento em que as amostras entraram em contato interativo e sem paradas intermediárias, conforme recomendação da norma ASTM G99. Durante o ensaio a velocidade foi monitorada constantemente através da utilização de um tacômetro óptico, devidamente calibrado, com a finalidade de verificar se houve variações devido à influência da elevada carga atuante. Verificou-se que não houve variações consideráveis de velocidade nos ensaios lubrificados (aproximadamente, 2 RPM de decréscimo). Porém, no ensaio não lubrificado, houve um decréscimo significativo (31 RPM), que foi facilmente compensado elevando a velocidade tangencial no variador de frequência do motor do dispositivo.



Figura 42 - Momentos iniciais de um dos ensaios tribológicos

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios realizados têm como propósito expor o comportamento tribológico dos pares de materiais através da influência de variáveis (materiais e lubrificantes) e parâmetros que compõem o processo de forjamento a frio, através da utilização de um procedimento experimental utilizando um dispositivo para ensaios tribológicos, equipado com um mecanismo que proporciona uma condição cíclica (Figura 31). Estes resultados poderão auxiliar como base para a realização de futuros estudos utilizando ensaios tribológicos semelhantes ao procedimento experimental adotado, possibilitando a utilização de uma vasta gama de parâmetros em diferentes combinações de materiais e lubrificantes.

5.1 MUDANÇA DE MASSA E MECANISMOS DE DESGASTE

A medição da massa das amostras do tipo disco foi obtida através da utilização da mesma balança analítica utilizada para medir a massa inicial dos discos. A mudança de massa dos discos foi mensurada a partir da diferença de massa inicial (antes da realização do ensaio tribológico) e final. A apresentação da mudança de massa é organizada por três grupos. Estes grupos possuem diferentes tipos e mecanismos de lubrificação e seus pinos possuem duas especificações de material (SAE 1020 e SAE 1045). Os parâmetros de ensaio são comuns aos três grupos, com exceção da duração do mesmo no ensaio 05.

- **Grupo A: Ensaio 01 e 03** - Lubrificante 01 e pinos confeccionados em SAE 1020.
- **Grupo B: Ensaio 02 e 04** - Lubrificante 02 e pinos confeccionados em SAE 1045.
- **Grupo C: Ensaio 05** - pino confeccionado em SAE 1020 e não utiliza lubrificante.

Os valores de perda de massa (M) são expostos, relacionados às amostras que compuseram cada um dos 5 ensaios, bem como o comportamento das mesmas perante a variação individual de massa. Tais valores quando prefixados com “-” (sinal negativo), significam que houve perda de massa. Na legenda das imagens, são discriminados os mecanismos de desgastes atuantes verificados através de microscopia ótica.

5.1.1 Grupo A: Ensaio 01 e 03

5.1.1.1 Ensaio 01

Os materiais empregados no Ensaio 01 foram AISI H13 temperado, AISI D6 temperado e AISI D6 não temperado (Tabela 11). Uma visão geral da variação de massa das amostras dos discos relativas ao Ensaio 01 pode ser verificada na Figura 43.

Tabela 11 - Valores de mudança de massa: Ensaio 01

Ensaio ^[1]	Material	Amostras	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Varição de Massa (g)
Ensaio 1	H13	DH09	163,2684	163,2227	-0,0457
Ensaio 1	D6	DD07	161,6025	161,5943	-0,0082
Ensaio 1	D6	DD08	162,1296	162,1199	-0,0097
Ensaio 1	D6	DD03	161,8180	161,8303	0,0123

^[1] Condições laboratoriais: temperatura de 21,5°C e umidade relativa do ar de 62%.

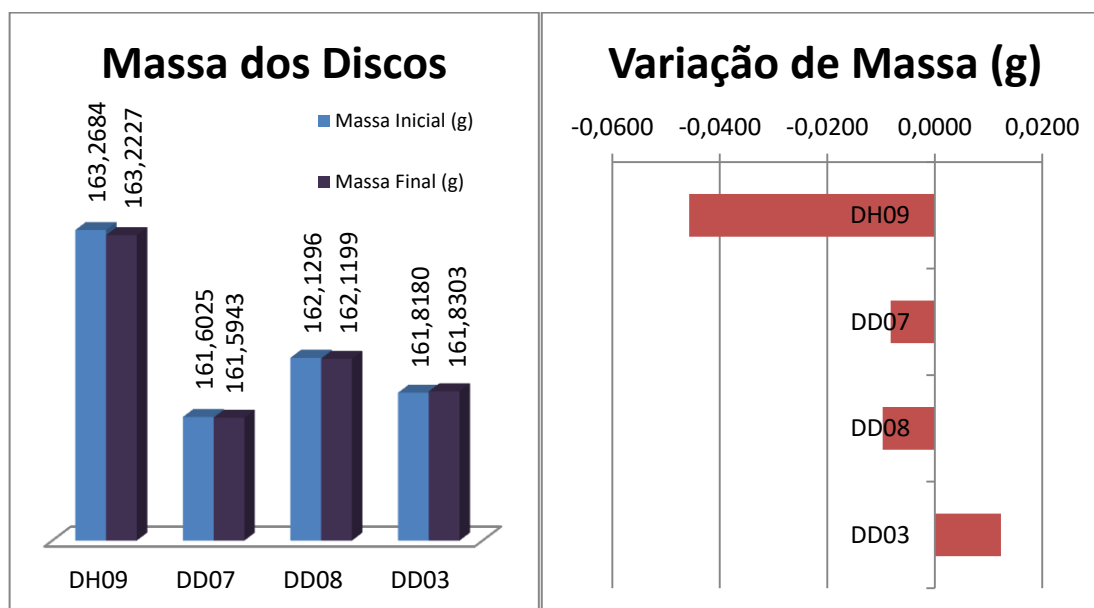


Figura 43 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 01

A amostra DH09 (Figura 44) sofreu uma maior perda de massa neste ensaio que utilizou o Lubrificante 01 juntamente com um pino confeccionado em SAE 1020 (amostra PA1). A amostra referida possui uma rugosidade maior em relação as demais confeccionadas em D6, assim como a menor dureza em relação às amostras temperadas utilizadas no Ensaio 01, essa combinação propiciou um desgaste mais

acentuado. Conforme pode ser observado na Figura 44, é evidenciada a atuação de diversos mecanismos de desgaste, entre eles pode-se notar a adesão de material. Essa adesão é uma provável combinação de detritos de desgastes provenientes da amostra pino e/ou até mesmo os detritos das demais amostras do Ensaio 01.

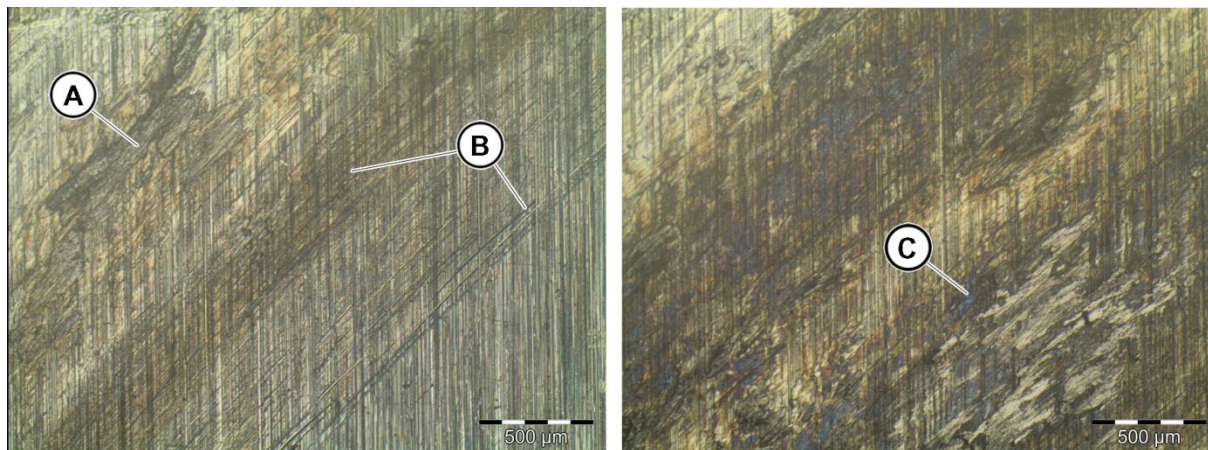


Figura 44 – Ensaio 01: Amostra DH09

Onde: (A) adesão de material, (B) desgaste abrasivo com riscos no sentido transversal e (C) pontos de superaquecimento com fusão de detritos ou partículas soltas provenientes do desgaste.

A amostra DD07 e a amostra DD08 possuem dureza semelhante, assim como sua rugosidade superficial e obtiveram patamares próximos de perda de massa. Assim como a amostra DH09, as amostras confeccionadas em AISI D6 temperadas apresentaram vários mecanismos de desgaste, como desgaste adesivo e abrasivo (Figura 45 e Figura 46).

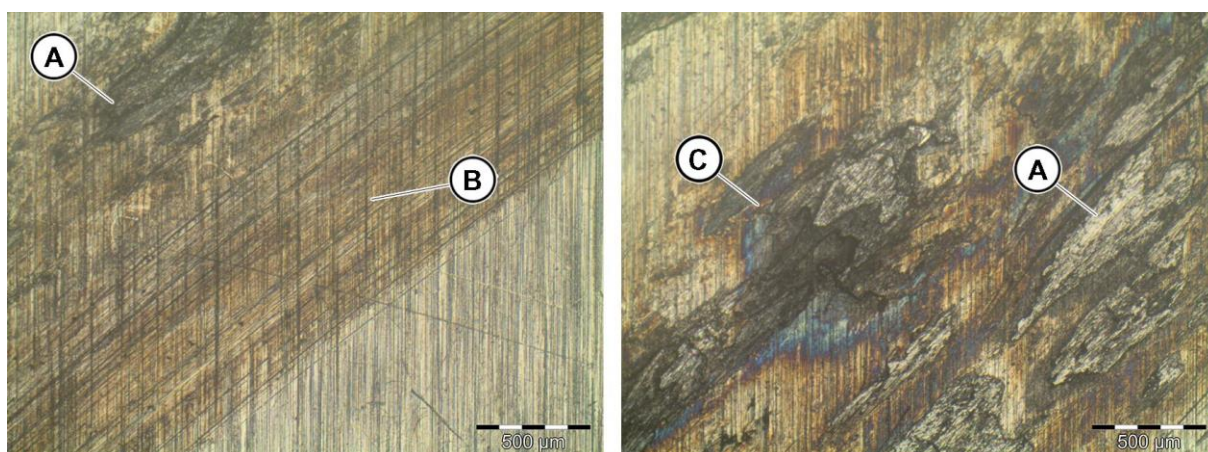


Figura 45 – Ensaio 01: Amostra DD07

Onde: (A) desgaste adesivo, (B) desgaste abrasivo com riscos no sentido transversal e (C) pontos de superaquecimento com fusão de detritos ou partículas soltas provenientes do desgaste.

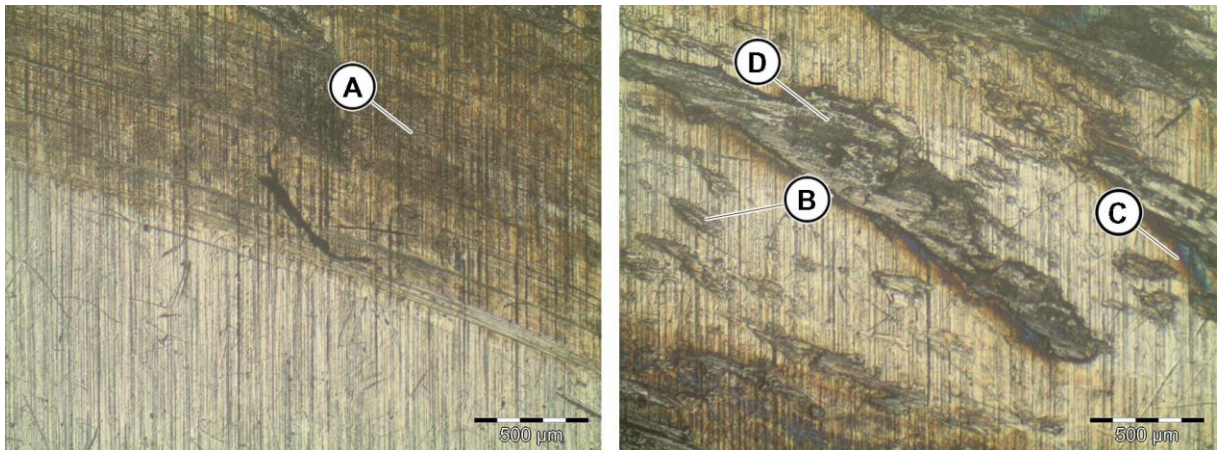


Figura 46 – Ensaio 01: Amostra DD08

Onde: (A) desgaste abrasivo com riscos no sentido transversal, (B) desgaste abrasivo com pontos de erosão, (C) pontos de superaquecimento com fusão de detritos ou partículas soltas provenientes do desgaste e (D) adesão de material.

A amostra DD03 é confeccionada no aço AISI D6 e ao contrário das demais amostras utilizada no Ensaio 01, é a única que não apresenta tratamento térmico. Em termos de mudança de massa, apresentou um índice superior de ganho de massa em relação às demais amostra do mesmo ensaio. Conforme observa-se na Figura 47, o mecanismo de desgaste do tipo adesivo não foi o único a atuar na superfície da amostra, pois pode-se notar um severo desgaste abrasivo (principalmente por abrasão de três corpos), assim como pontos de superaquecimento, evidenciando fusão de partículas desprendidas durante o ensaio.

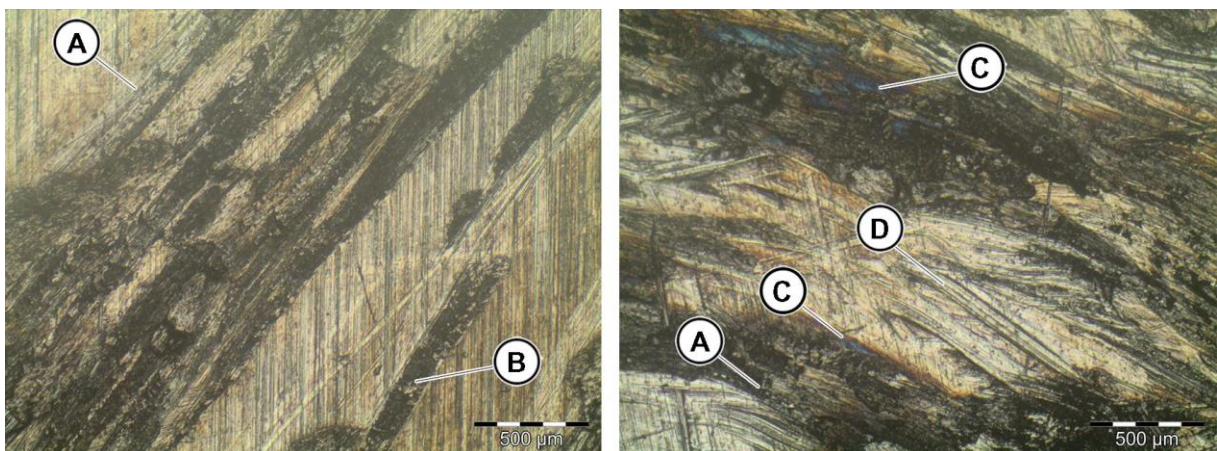


Figura 47 – Ensaio 01: Amostra DD03

Onde: (A) desgaste abrasivo com riscos no sentido transversal, (B) desgaste por adesão, (C) pontos de superaquecimento com fusão de detritos ou partículas soltas provenientes do desgaste e (D) desgaste severo por abrasão de três corpos.

5.1.1.2 Ensaio 03

Os materiais utilizados no Ensaio 03 são: AISI H13 temperado e não temperado e AISI D6 temperado (Tabela 12). O ensaio ocorreu utilizando um pino (PA3) confeccionado em SAE 1020, em um ambiente lubrificado através do Lubrificante 01. Os dados de variação de massa podem ser verificados na Figura 48.

Tabela 12 - Valores de mudança de massa: Ensaio 03

Ensaio	Material	Amostras	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Varição de Massa (g)
Ensaio 3	H13	DH04	162,5380	162,6744	0,1364
Ensaio 3	H13	DH08	162,6691	162,5289	-0,1402
Ensaio 3	H13	DH01	162,6598	162,6693	0,0095
Ensaio 3	D6	DD06	161,9153	161,9036	-0,0117

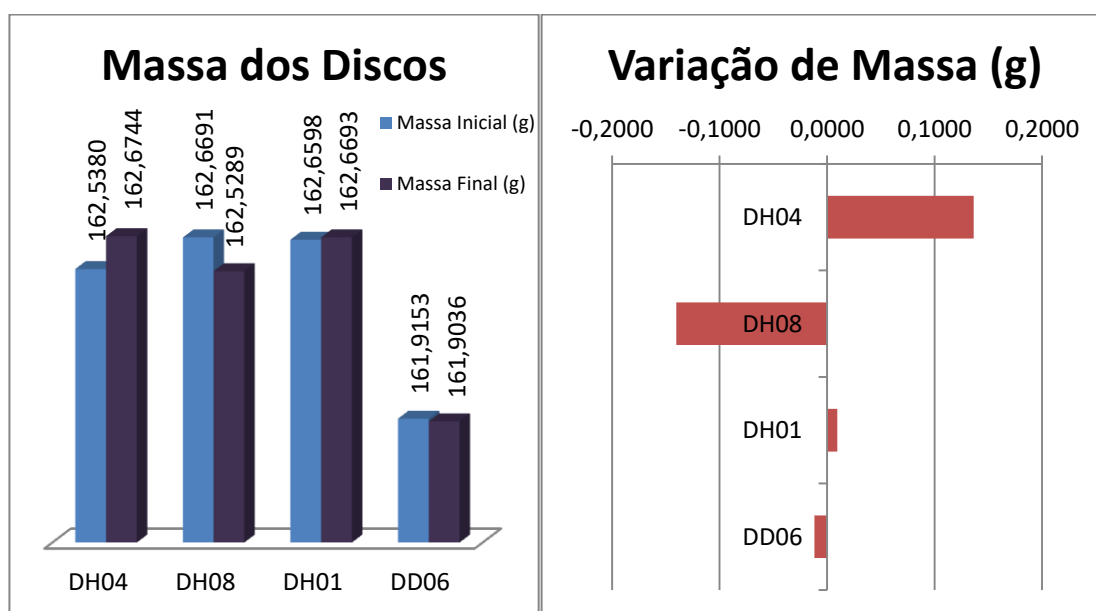


Figura 48 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 03

Os valores de mudança de massa das amostras DH04 e DH08 foram inversamente proporcionais, ou seja, na amostra DH04 ocorreu um valor de aderência de materiais maior em relação a amostras DH08, pois conforme é apresentado na Figura 49, a cicatriz de desgaste ocasionada através do contato com o pino, atuou como base promotora para aderir parte dos detritos gerados durante o Ensaio 03 em múltiplas regiões da superfície da amostra. A amostra DH08 possui desgaste do tipo adesivo moderado, porém, nota-se em um dos detalhes "A" da Figura 50, a ocorrência local de desgaste adesivo severo, evidenciado pelo acúmulo de material aderido à superfície da amostra.

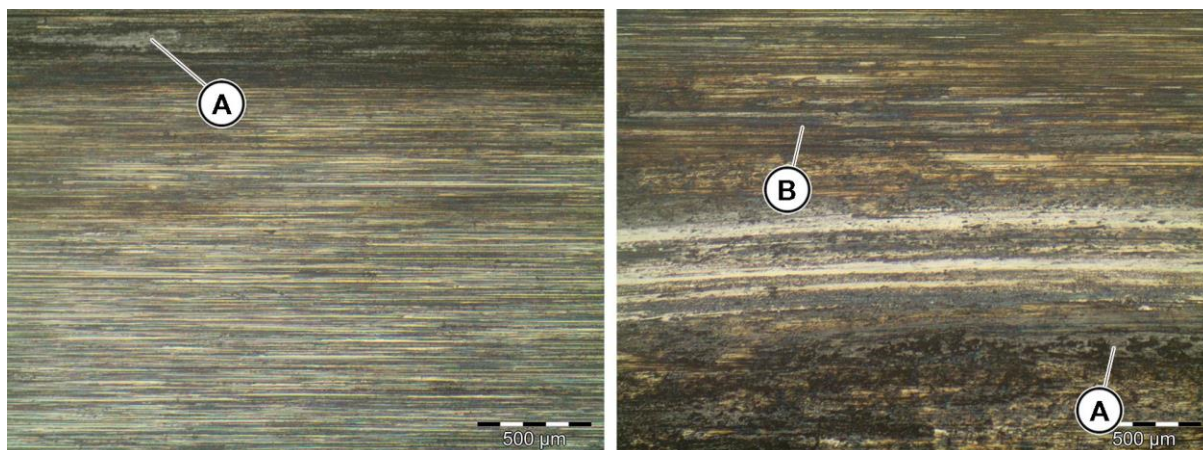


Figura 49 - Ensaio 03: Amostra DH04

Onde: (A) desgaste adesivo em múltiplas regiões e (B) pontos de superaquecimento localizados.

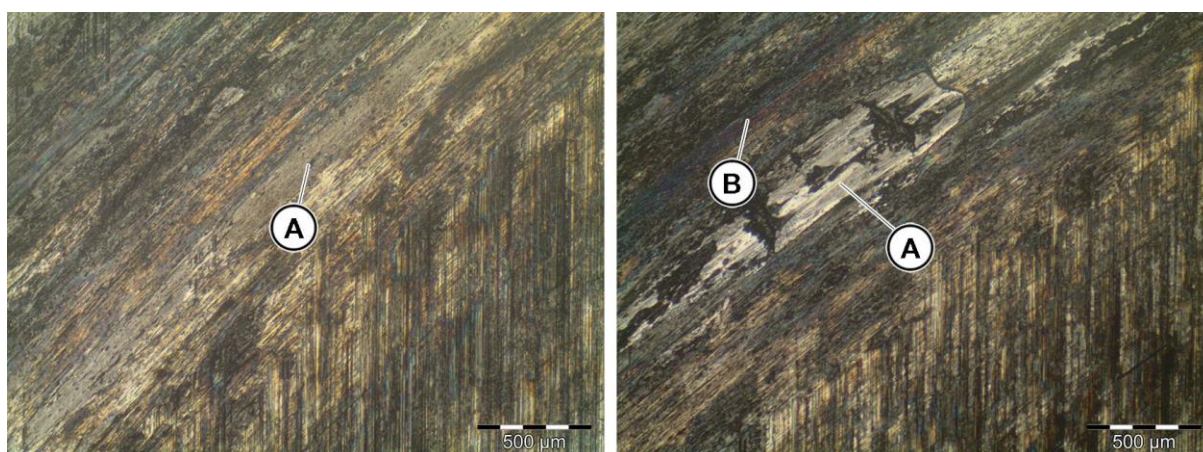


Figura 50 - Ensaio 03: Amostra DH08

Onde: (A) desgaste adesivo moderado em múltiplas regiões e desgaste adesivo severo localizado e (B) região localizada apresentando superaquecimento.

Na Figura 51 pode-se verificar os mecanismos de desgaste atuante na amostra DH01 (não temperada), devido ao baixo valor de dureza em relação as demais amostras que compuseram o Ensaio 03, pode-se notar no detalhe “A” da Figura 51, a ocorrência de desgaste por abrasão de três corpos que caracterizou-se pela presença de detritos (oriundo das demais amostras) preso entre as duas superfícies (pino e disco), com dureza superior para danificá-las, além de mecanismos de desgaste adesivo, fundidos a própria superfície danificada da amostra, detalhes “B” e “C”, da Figura 51. Isso elucida a relação entre o dano severo evidenciado pelo microscópio com o baixo valor de desgaste obtido no ensaio.

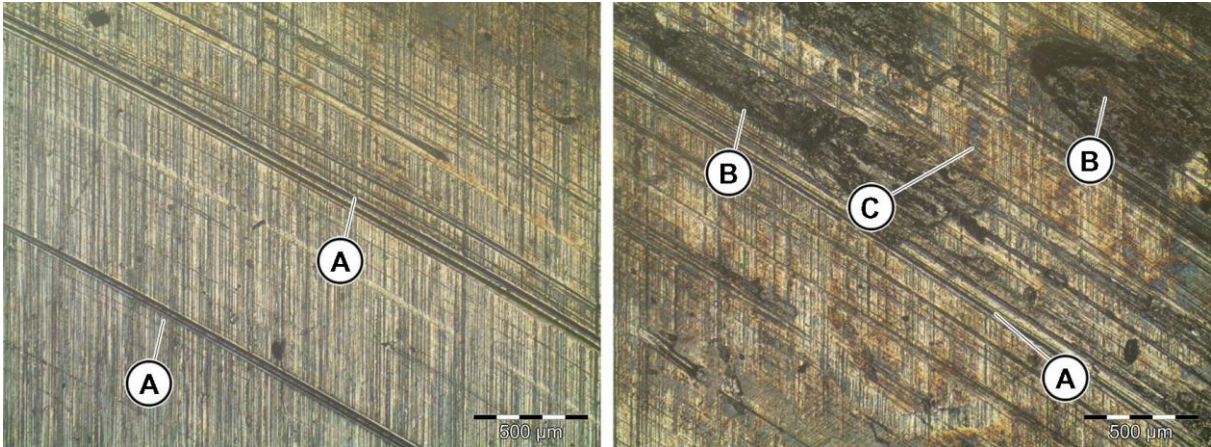


Figura 51 - Ensaio 03: Amostra DH01

Onde: (A) desgaste abrasivo por risco, provocado por partículas soltas, (B) desgaste adesivo em múltiplas regiões e (C) região localizada apresentando superaquecimento.

A superfície da amostra DD06 após o Ensaio 03 apresentou danos provocados por desgaste abrasivo através de partículas soltas, observados no detalhe “B” da Figura 52, assim como superaquecimento (detalhe “A”, Figura 52) isento de material aderido, que evidencia que partículas com dureza inferior atuaram por contato deslizante, porém sem causar avarias secundárias. Pode-se observar indícios da presença de desgaste do tipo adesivo de forma moderada em uma localidade da amostra no detalhe “C” da Figura 52. A amostra DD06 apresenta menor rugosidade e maior dureza do que as demais amostras que constituíram o Ensaio 03.

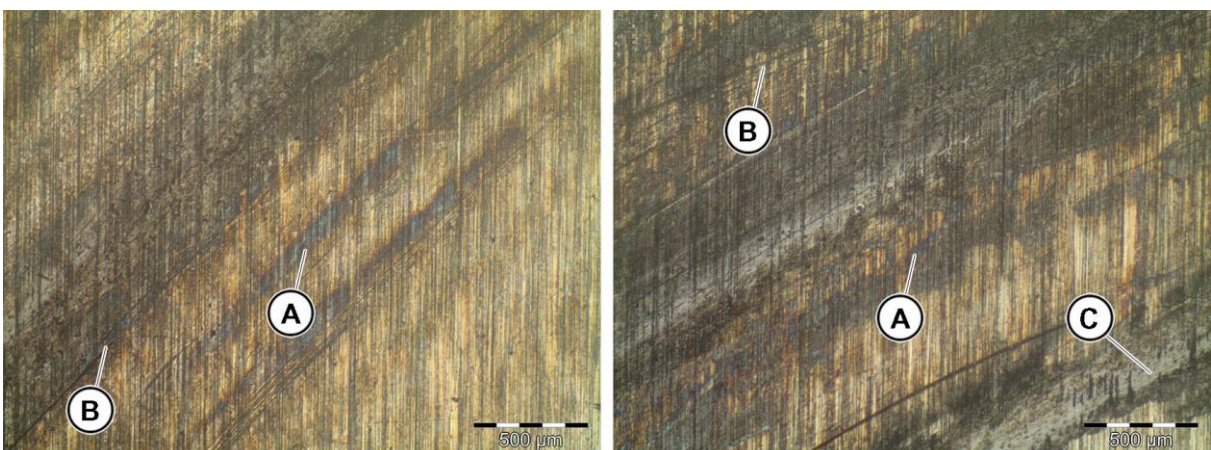


Figura 52 - Ensaio 03: Amostra DD06

Onde: (A) regiões localizadas apresentando superaquecimento, (B) desgaste abrasivo por risco, provocado por partículas soltas e (C) desgaste adesivo localizado.

5.1.1.3 Mecanismos de desgaste combinados: Ensaio 01 e Ensaio 03

A Figura 53 fornece a compilação dos mecanismos de desgaste combinados relativos aos ensaios 01 e 03, que utilizaram como matéria-prima de pino o aço SAE 1020; e o Lubrificante 01. Se observa que houve desgaste do tipo adesivo em 100% das amostras destes ensaios, em ambos os materiais. Assim como a ocorrência de superaquecimento. O desgaste abrasivo incide em 100% das amostras, porém, apenas nas amostras confeccionadas com o aço AISI D6.

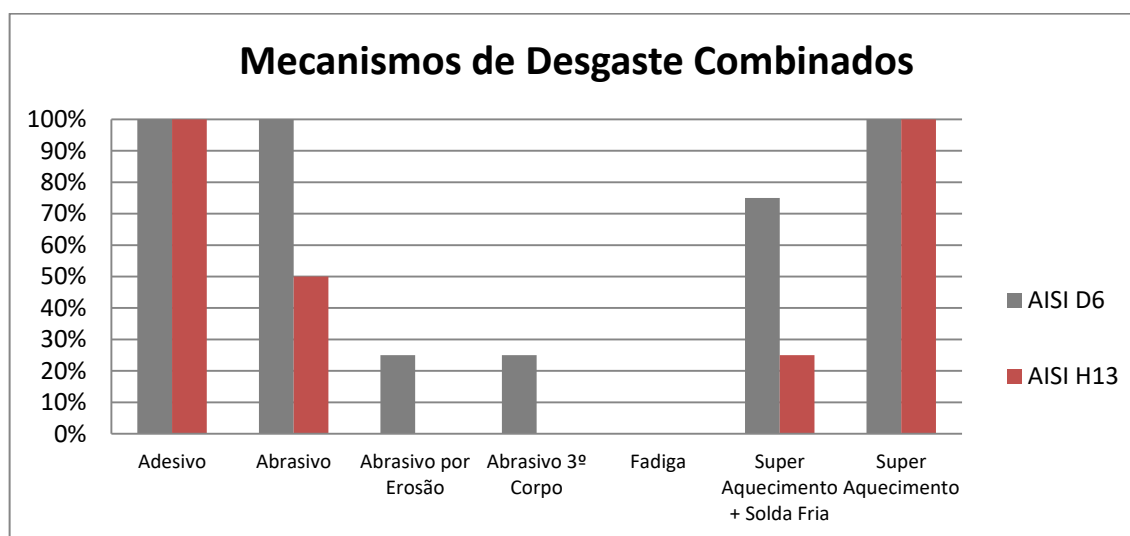


Figura 53 - Ensaio 01 e 03: mecanismos de desgaste combinados

5.1.2 Grupo B: Ensaio 02 e 04

5.1.2.1 Ensaio 02

A mudança de massa encontrada nas amostras do tipo disco do Ensaio 02 foi de acréscimo de material, ou seja, ganho de massa oriunda de detritos do material (SAE 1045) utilizado como pino (PB1) ou em uma combinação desses detritos juntamente com os detritos das amostras do tipo disco (AISI H13 e AISI D6) em um ambiente com a presença do Lubrificante 02. Os materiais empregados no Ensaio 02 foram: AISI H13 temperado, AISI D6 temperado e não temperado (Tabela 13). Uma visão geral da perda de massa das amostras dos discos relativas ao Ensaio 02, assim como a variação de massa, pode ser verificada na Figura 54.

As amostras em AISI D6 possuem rugosidade semelhante, com exceção da amostra AISIH13 que apresenta uma rugosidade superior as demais.

Tabela 13 - Valores de mudança de massa: Ensaio 02

Ensaio	Material	Amostras	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Varição de Massa (g)
Ensaio 2	H13	DH06	162,6580	162,6709	0,0129
Ensaio 2	D6	DD01	161,6400	161,6510	0,0110
Ensaio 2	D6	DD10	162,1240	162,1344	0,0104
Ensaio 2	D6	DD09	161,7429	161,7541	0,0112

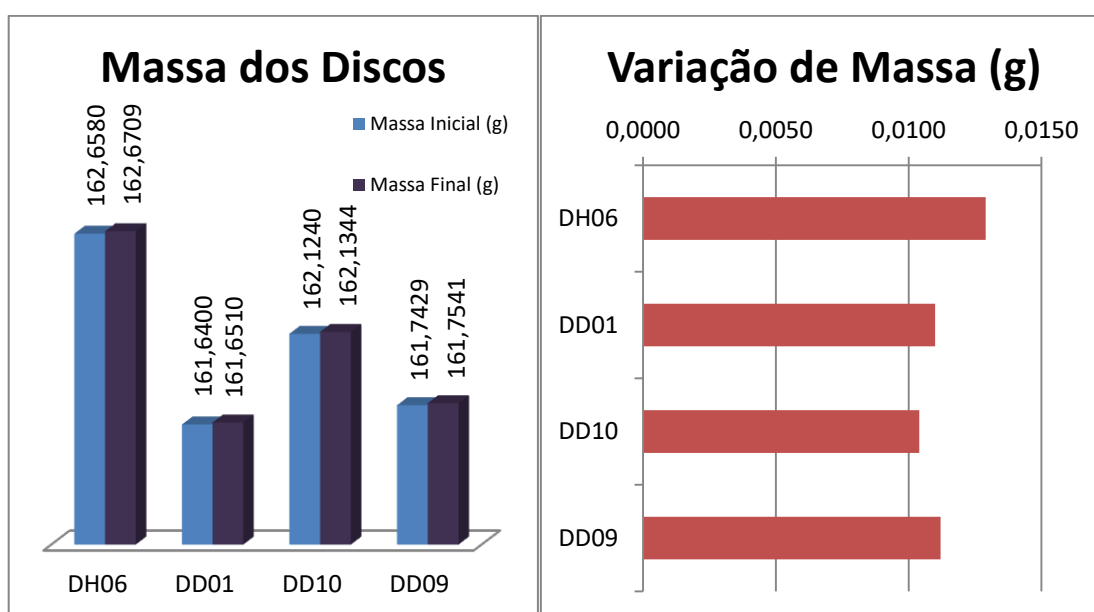


Figura 54 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 02

Embora as amostras do Ensaio 02 apresentem um nível de desgaste semelhante e com acréscimo de material, pode-se observar que a atuação dos mecanismos de desgaste são distintos, como se nota na amostra DH06 (Figura 55) que sofreu um ligeiro ganho de massa no Ensaio 02. Essa amostra foi a única deste ensaio a apresentar pontos de superaquecimento (mesmo que sutis), além dos mecanismos de desgastes, como desgaste adesivo e abrasivo comum às demais amostras utilizadas neste ensaio.

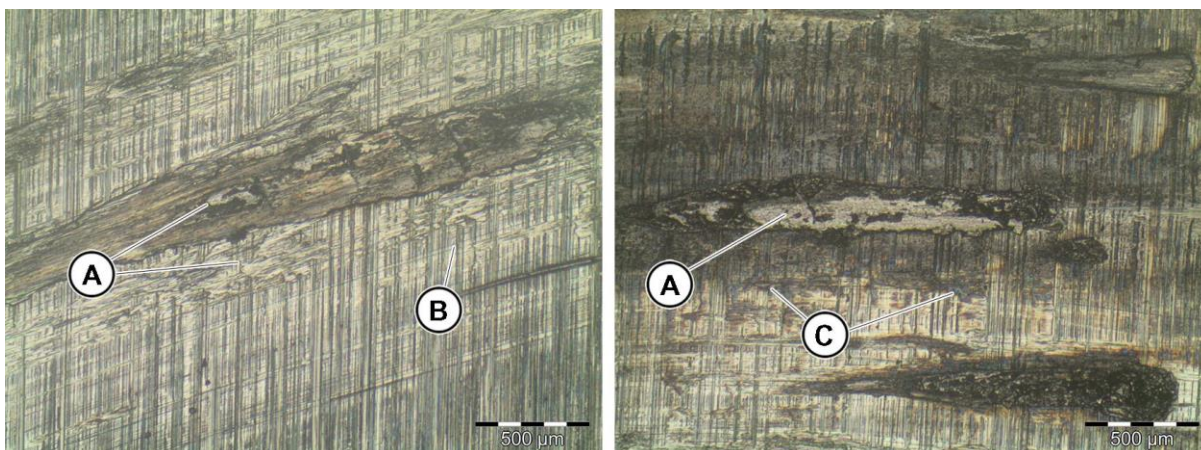


Figura 55 - Ensaio 02: Amostra DH06

Onde: (A) adesão de material em múltiplas regiões, (B) desgaste abrasivo leve com riscos no sentido transversal e (C) pontos de superaquecimento com fusão de detritos ou partículas soltas provenientes do desgaste.

As amostras confeccionadas em AISI D6 temperadas apresentaram mecanismos de desgastes semelhantes como desgaste do tipo adesivo e abrasivo, assim como o grau de intensidade observado, onde o desgaste adesivo severo prevaleceu nas amostras DD09 e DD10. Houve, contudo a ocorrência localizada ou em alguns pontos de desgaste abrasivo erosivo de intensidade leve, conforme pode ser observado na Figura 56 e Figura 57.

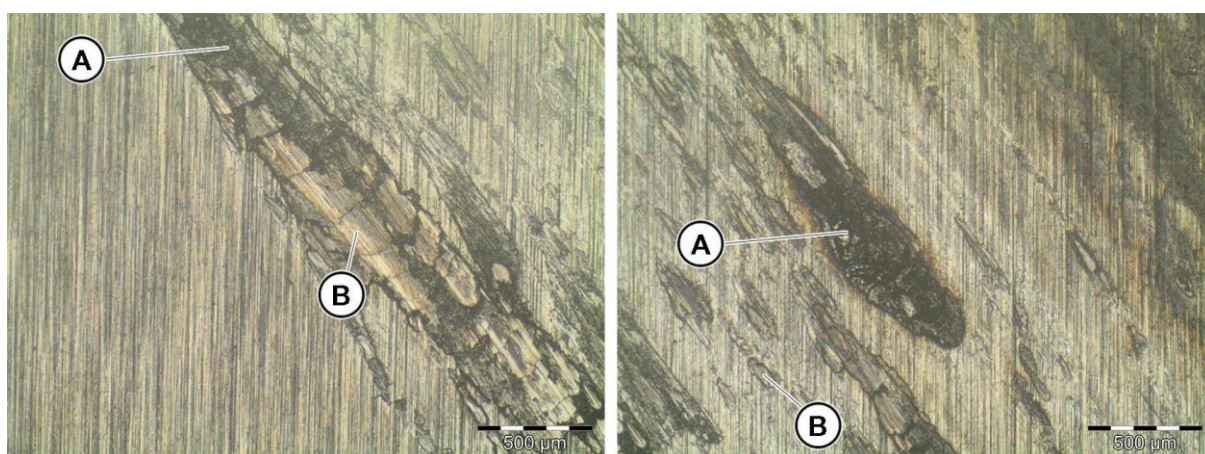


Figura 56 - Ensaio 02: Amostra DD10

Onde: (A) desgaste adesivo severo em múltiplas regiões com adesão de material e (B) desgaste abrasivo por erosão em múltiplos pontos.

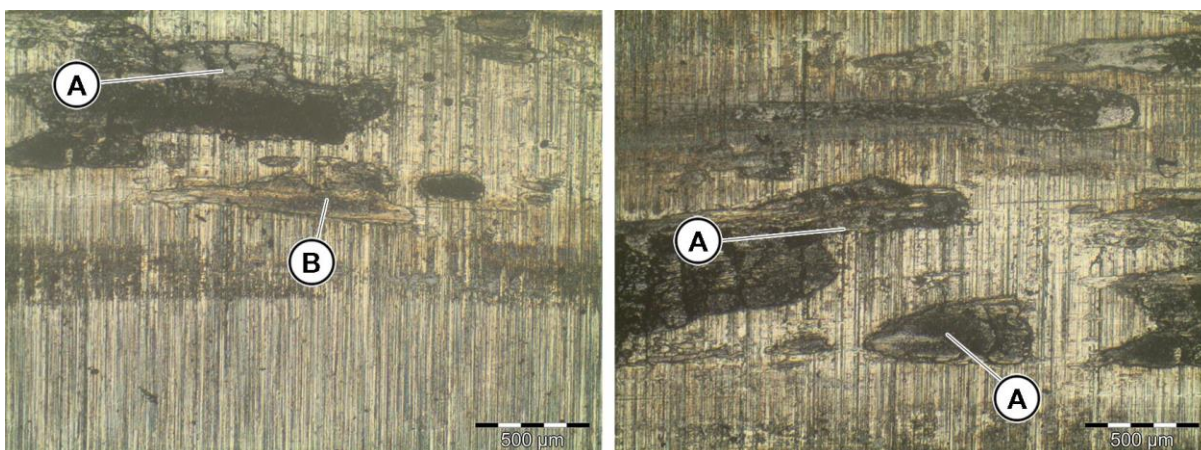


Figura 57 - Ensaio 02: Amostra DD09

Onde: (A) desgaste adesivo severo em múltiplas regiões com adesão de material e (B) leve desgaste abrasivo localizado.

A amostra DD01 (não temperada) apresentou os mesmos mecanismos das demais amostras (AISI D6) do Ensaio 02, porém a intensidade de desgaste do tipo adesivo foi classificada como severa, pelos danos observados (Figura 58, detalhe “B”), assim como há a presença de desgaste abrasivo moderado em algumas regiões onde é possível notar sua atuação através de partículas soltas entre as superfícies em contato (Figura 58, detalhe “A”).

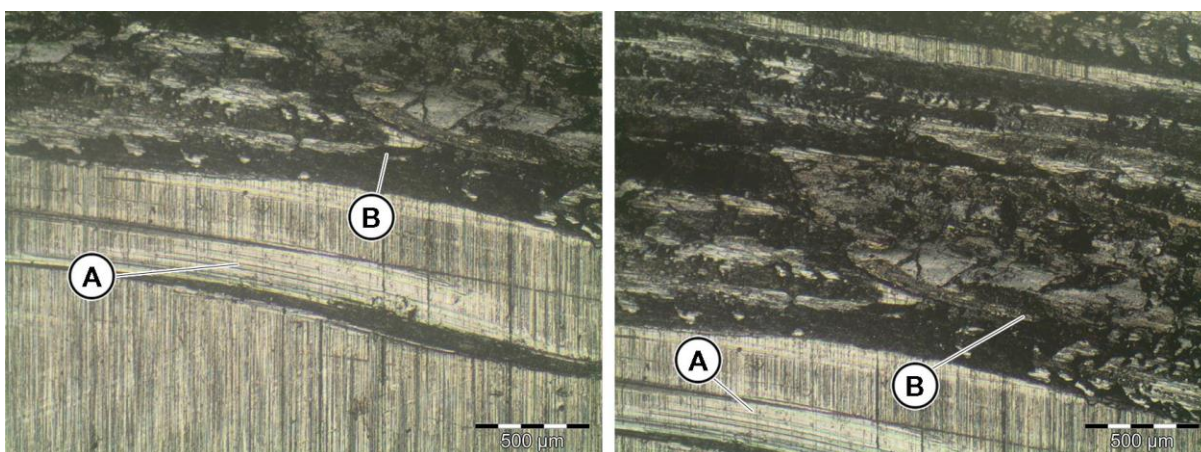


Figura 58 - Ensaio 02: Amostra DD01

Onde: (A) desgaste por abrasão de três corpos moderado e (B) desgaste adesivo severo em múltiplas regiões com adesão de material.

5.1.2.2 Ensaio 04

O Ensaio 04 utilizou o Lubrificante 02 e como par de material um pino (PB2) confeccionado em SAE 1045 juntamente com discos confeccionados nos aços AISI D6 temperado e AISI H13 temperado e não temperado (Tabela 14). Os valores de mudança de massa ocorreram de forma a acrescentar material a superfície das amostras (Figura 59). Nas amostras temperadas os mecanismos de desgaste se assemelham, assim como parte dos danos gerados nas suas superfícies. Em relação a danos superficiais, a amostra DH03 (não temperada) foi a mais afetada do que as demais do Ensaio 03.

Tabela 14 - Valores de mudança de massa: Ensaio 04

Ensaio	Material	Amostras	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Varição de Massa (g)
Ensaio 4	H13	DH10	162,8787	162,8823	0,0036
Ensaio 4	H13	DH05	163,0381	163,0467	0,0086
Ensaio 4	H13	DH03	162,7995	162,9565	0,1570
Ensaio 4	D6	DD04	161,9246	161,9340	0,0094

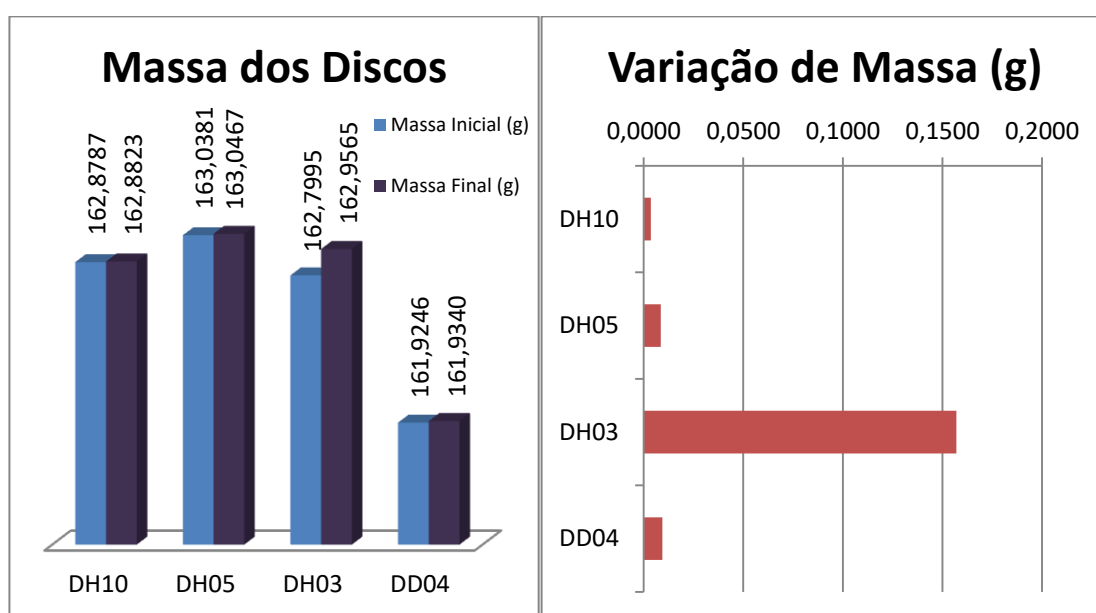


Figura 59 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 04

Como observa-se nas Figura 60 e Figura 61 os mecanismos de desgaste foram basicamente os mesmos nas amostras DH05 e DH10, assim como os danos ocasionados a superfície. Nota-se a presença de desgaste do tipo adesivo em zonas localizadas nas amostras, devido à rugosidade superficial ser semelhante. A única diferença nos danos entre as amostras DH05 e DH10 é o grau de severidade de

desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas com dureza superior soltas entre as superfícies durante o contato, que no caso da amostra DH10 e maior, pois sua dureza é inferior a dureza da amostra em comparação.

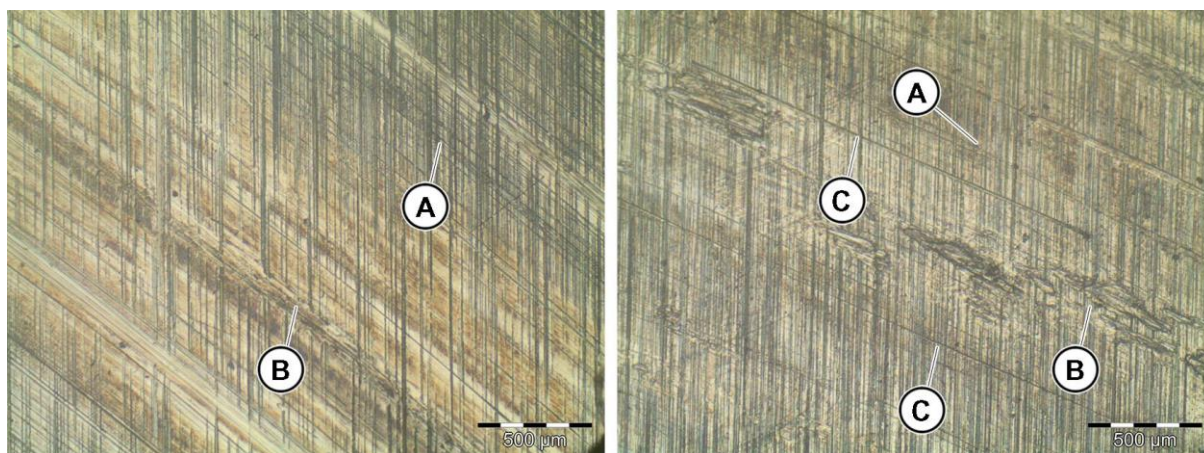


Figura 60 - Ensaio 04: Amostra DH05

Onde: (A) desgaste abrasivo por risco, (B) desgaste adesivo em regiões localizadas e (C) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato.

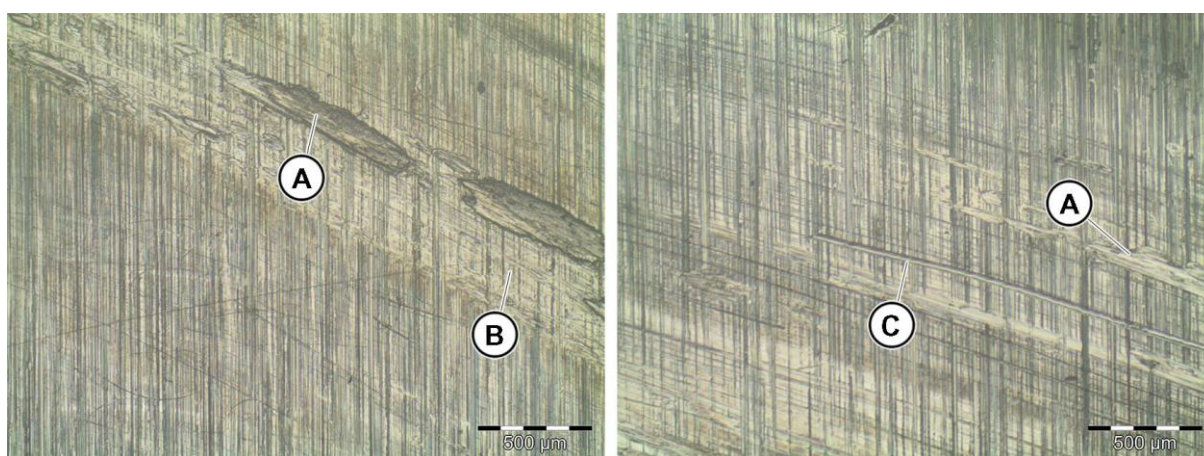


Figura 61 - Ensaio 04: Amostra DH10

Onde: (A) desgaste adesivo em regiões localizadas com adesão de material, (B) desgaste abrasivo por risco e (C) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato.

A amostra DH03 (não temperada) apresentou severo desgaste abrasivo provocado por partículas soltas devido sua baixa dureza, assim como superaquecimento em regiões localizadas evidenciando a fusão de detritos oriundos das amostras envolvidas no Ensaio 04, caracterizando desgaste do tipo adesivo, conforme ilustrado nos detalhes “B” e “C” da Figura 62.

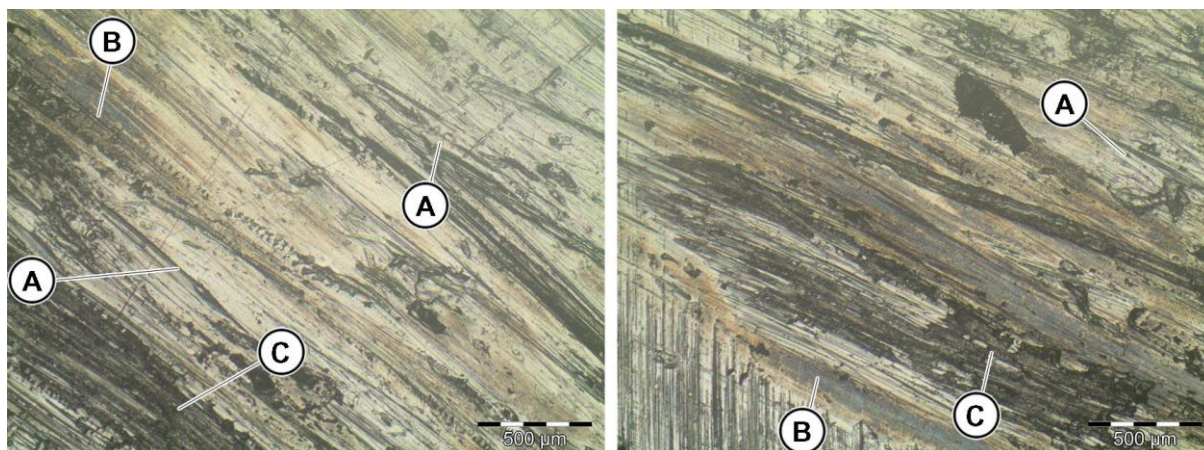


Figura 62 - Ensaio 04: Amostra DH03

Onde: (A) desgaste abrasivo provocado por partículas soltas, (B) regiões localizadas apresentando superaquecimento e (C) desgaste adesivo severo.

A amostra DD04 apresentou em sua superfície duas modalidades de desgaste abrasivo. Pode-se observar no detalhe “B”, Figura 63, o desgaste de dois corpos, pois o próprio pino com partículas duras aderidas provenientes das amostras do tipo disco atuou como elemento abrasivo durante o contato deslizante entre suas superfícies. Também pode-se verificar o detalhe “A” da Figura 63, onde o desgaste abrasivo de três corpos apresentou-se de forma moderada, através de partículas soltas, além da incidência de desgaste adesivo em algumas regiões distintas (detalhe “C”, Figura 63). A amostra referida apresentou rugosidade semelhante às demais amostras do Ensaio 04.

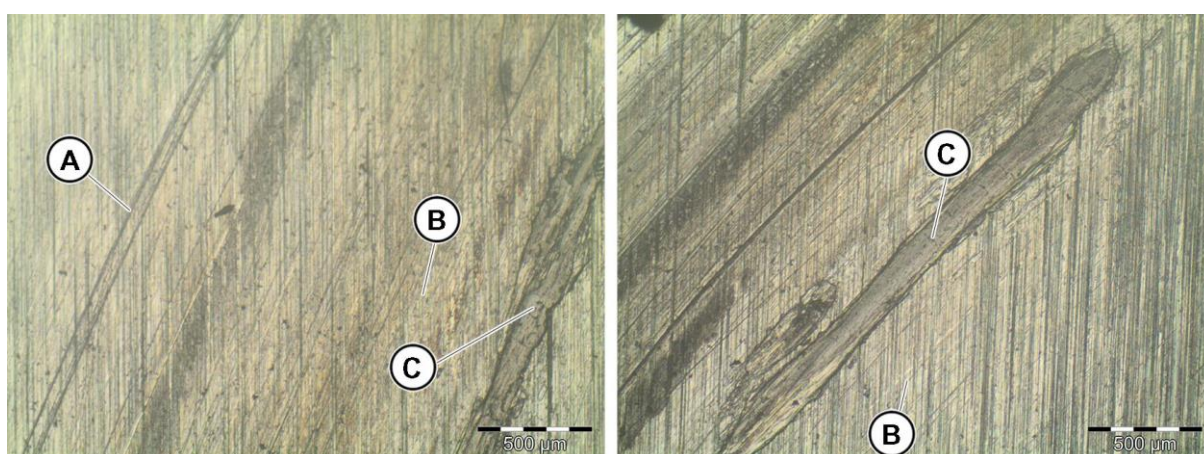


Figura 63 - Ensaio 04: Amostra DD04

Onde: (A) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato, (B) desgaste abrasivo por risco e (C) desgaste adesivo em regiões localizadas com adesão de material.

5.1.2.3 Mecanismos de desgaste combinados: Ensaio 02 e Ensaio 04

A Figura 64 expõe a compilação dos mecanismos de desgaste combinado relativos aos ensaios 02 e 04, que utilizaram o Lubrificante 02 e como material de pino o aço SAE 1045. Se observa que o mecanismo de desgaste predominante em todas as amostras de ambos os materiais é o desgaste do tipo adesivo. O desgaste do tipo abrasivo também ocorre em 100% das amostras, porém, apenas em amostras confeccionadas em AISI H13.

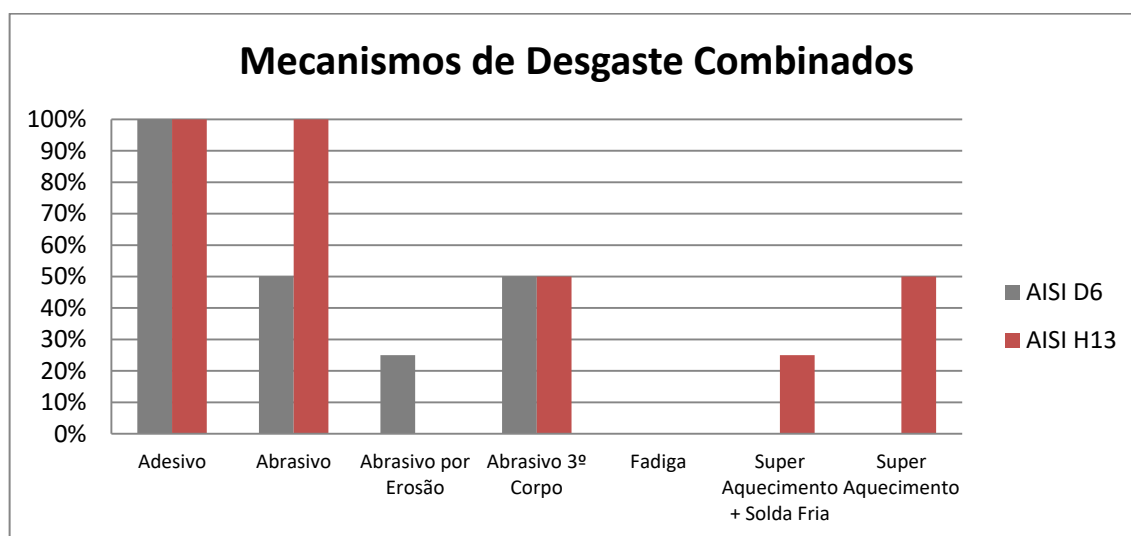


Figura 64 - Ensaios 02 e 04: mecanismos de desgaste combinados

5.1.3 Grupo C: Ensaio 05

5.1.3.1 Ensaio 05

O Ensaio 05 teve por finalidade avaliar a mudança de massa de amostras do tipo disco confeccionadas como os materiais objetos de estudo sem a influência de um meio lubrificante, utilizando um pino (amostra PA2) confeccionado em aço SAE 1020. Para realizar o ensaio sem a presença de lubrificação, o número de ciclos foi reduzido, tendo em vista a máxima deformação plástica cabível suportada na amostra do tipo pino (25000 ciclos). A avaliação das amostras nesta condição visou exemplificar os possíveis danos causados por uma eventual falha de lubrificação sofrida em alguma região do ferramental, em um ambiente industrial.

Nas amostras do Ensaio 05 a mudança de massa ocorreu em forma de perda (Tabela 15). A percepção de perda de massa entre as amostras temperadas e não temperadas, em ambos os materiais, pode ser observado na Figura 65.

Tabela 15 - Valores de mudança de massa: Ensaio 05

Ensaio	Material	Amostras	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Varição de Massa (g)
Ensaio 5	H13	DH07	163,1170	163,0401	-0,0769
Ensaio 5	H13	DH02	162,9520	162,6748	-0,2772
Ensaio 5	D6	DD02	162,0839	161,8904	-0,1935
Ensaio 5	D6	DD05	161,4462	161,4370	-0,0092

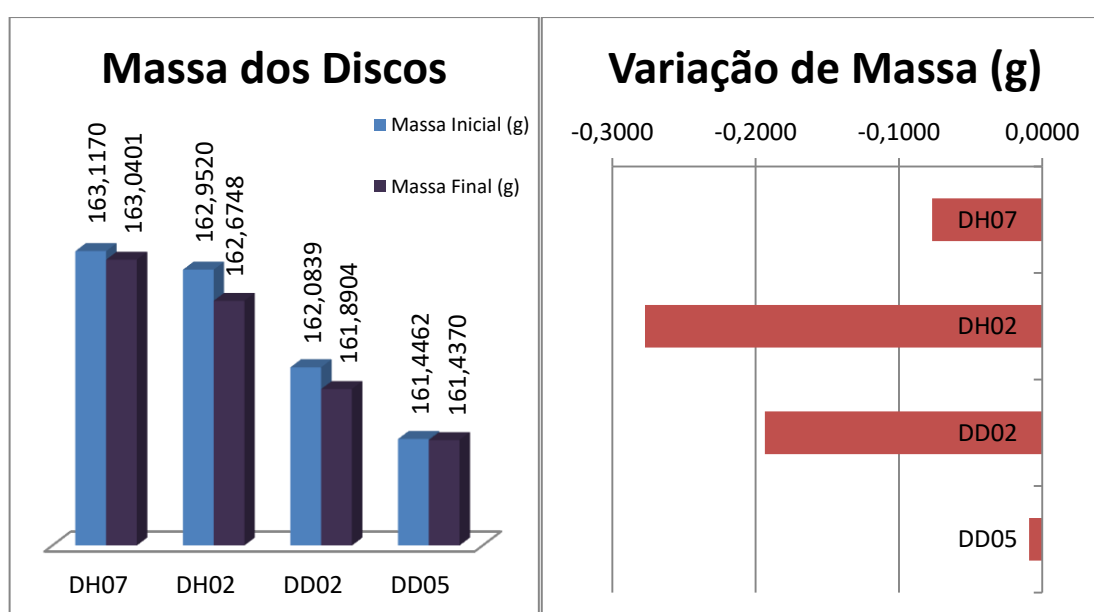


Figura 65 - Comportamento tribológico dos discos: Ensaio 05

As amostras dos 5 ensaios realizados que apresentaram maior variação de massa foram respectivamente as amostras DH02 e DD02, por apresentarem uma condição tribológica que combinou: baixa rugosidade superficial, baixa dureza e a ausência de um meio lubrificante. Tal condição tribológica, propiciado por esta combinação, juntamente com a atuação de cargas cíclicas resultaram em severos danos denominados desgaste por fadiga (Figura 66, detalhe “B” e Figura 67, detalhe “B”). Pode-se observar que estes danos ocasionados por fadiga propiciaram o desprendimento de material de suas superfícies. Este material uma vez desprendido é conhecido como detrito que posteriormente provocou desgaste adesivo, pois pode-se observar várias regiões em ambas amostras danificadas por esse fenômeno (Figura 66, detalhe “C” e Figura 67, detalhe “C”).

Nas amostras DH02 e DD02 houve também a ocorrência de desgaste abrasivo de três corpos provocado por um detrito abrasivo com dureza superior ao das mesmas, provenientes das amostras que compuseram o Ensaio 05 (DH07 e DD05), o detalhe “A” da Figura 66 e o detalhe “A” da Figura 67 ilustra tal dano ocorrido.

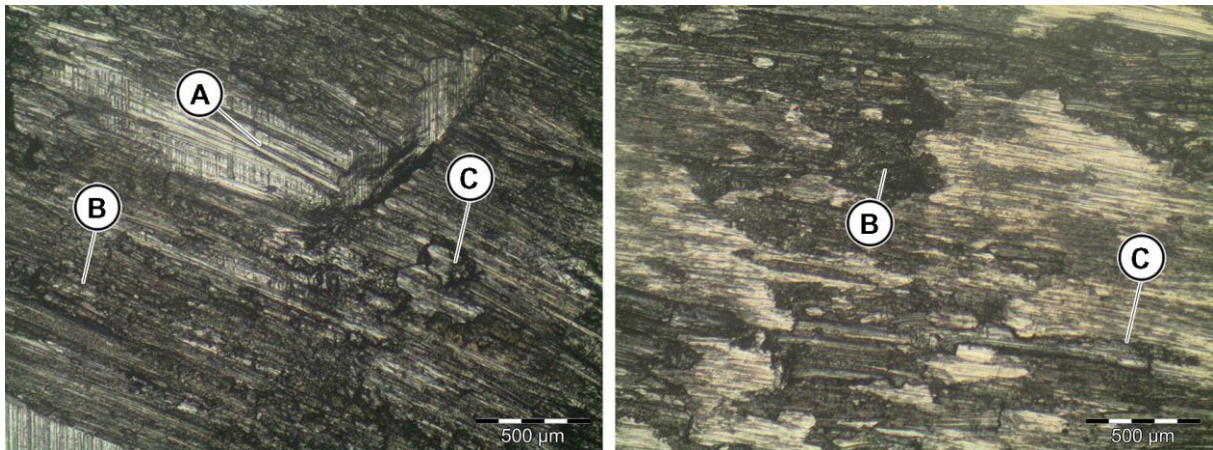


Figura 66 - Ensaio 05: Amostra DH02

Onde: (A) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato, (B) desgaste por fadiga provenientes das flutuações de tensão e (C) desgaste adesivo com adesão de material.

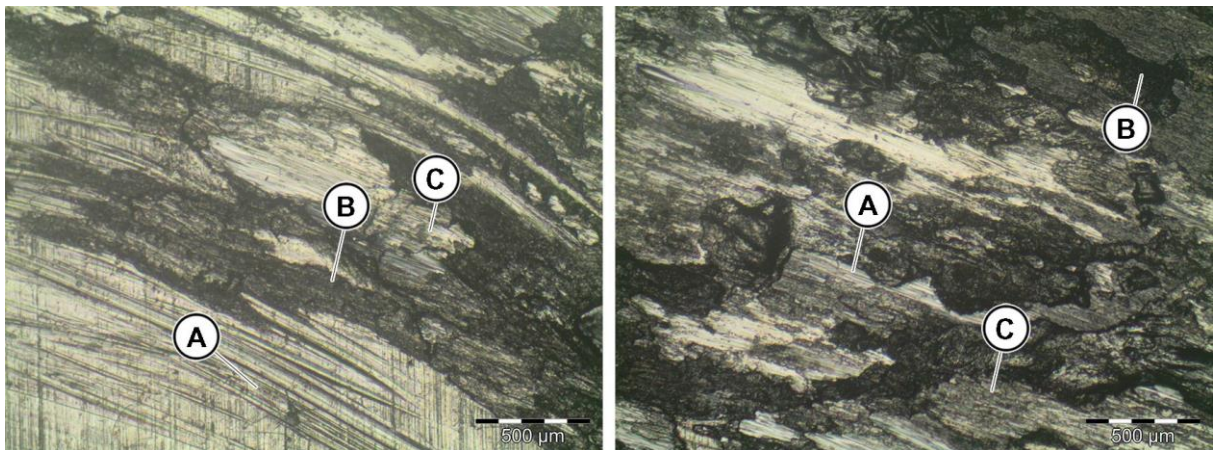


Figura 67 - Ensaio 05: Amostra DD02

Onde: (A) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato, (B) desgaste por fadiga provenientes das flutuações de tensão e (C) desgaste adesivo com adesão de material.

Em relação a amostra DH07, pode-se examinar na Figura 68 (detalhe “A”) a presença em determinadas regiões um leve desgaste abrasivo de três corpos,

causado por detritos gerados muito provavelmente da amostra DD05, que possui dureza superior. No detalhe “B” da Figura 68 nota-se a evidência da presença moderada de desgaste ocasionado pela carga cíclica durante o ensaio, bem como observa-se no detalhe “C” da mesma figura a incidência severa de desgaste adesivo proveniente da quantidade de perda de massa de todas as amostras que compuseram o Ensaio 05, assim como detritos do próprio pino utilizado.

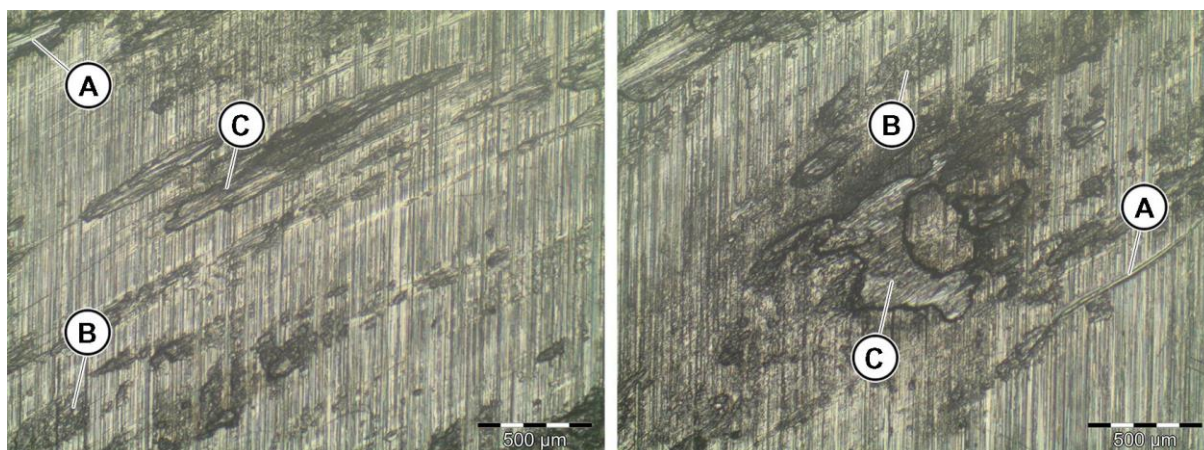


Figura 68 - Ensaio 05: Amostra DH07

Onde: (A) desgaste abrasivo de três corpos, provocado por partículas soltas entre as superfícies durante o contato, (B) desgaste por fadiga provenientes das flutuações de tensão e (C) desgaste adesivo com adesão de material.

A amostra DD05 sofreu moderado desgaste por fadiga em regiões pontuais, evidentemente devido a não presença de um meio promotor de lubrificação, assim como pela atuação de tensões cíclicas geradas no ensaio (Figura 69, detalhe “B”).

O mecanismo de desgaste predominante na amostra DD05 foi o desgaste do tipo adesivo. Um fator que favoreceu a potencialização da ocorrência deste fenômeno foi o nível baixíssimo de rugosidade superficial, atrelado com a elevada dureza do material, propiciando a aderência de partículas desprendidas das amostras não temperadas, assim como do próprio material do pino.

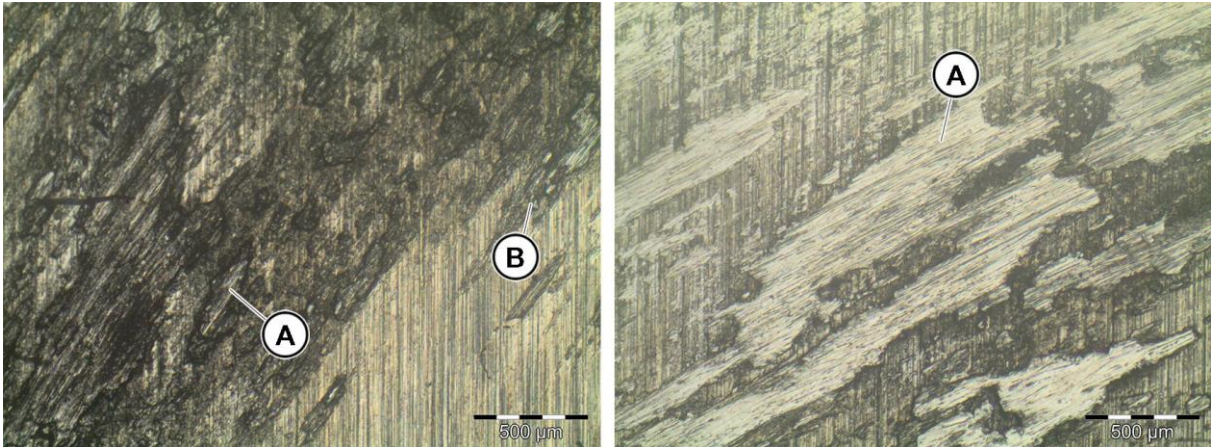


Figura 69 - Ensaio 05: Amostra DD05

Onde: (A) desgaste adesivo severo com adesão de material e (B) desgaste por fadiga provenientes das flutuações de tensão.

5.1.3.2 Mecanismos de desgaste combinados: Ensaio 05

A compilação dos mecanismos de desgaste combinado do Ensaio 05 é apresentada na Figura 70. Este ensaio utilizou um pino confeccionado no aço SAE 1020, e ocorreu a seco, ou seja, não houve a influência dos lubrificantes utilizados nos demais ensaios. Nota-se que o desgaste do tipo adesivo ocorreu em todas as amostras de ambos os materiais, assim como o desgaste fadiga. Contudo, o desgaste do tipo abrasivo de 3º corpo ocorreu em 100% das amostras, porém, apenas nas amostras confeccionadas em AISI H13.

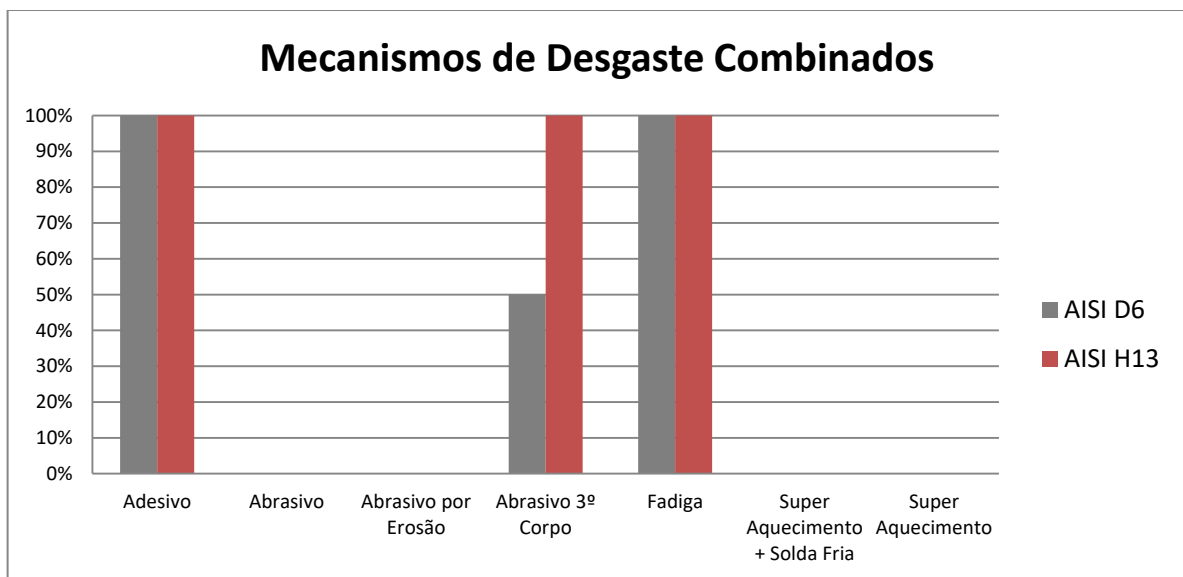


Figura 70 - Ensaio 05: mecanismos de desgaste combinados

5.1.4 Compilação de Resultados de Mudança de Massa dos Discos

A Figura 71 ilustra o comportamento das amostras do tipo disco perante a variação de massa, através da compilação dos valores mensurados dos 5 ensaios realizados.

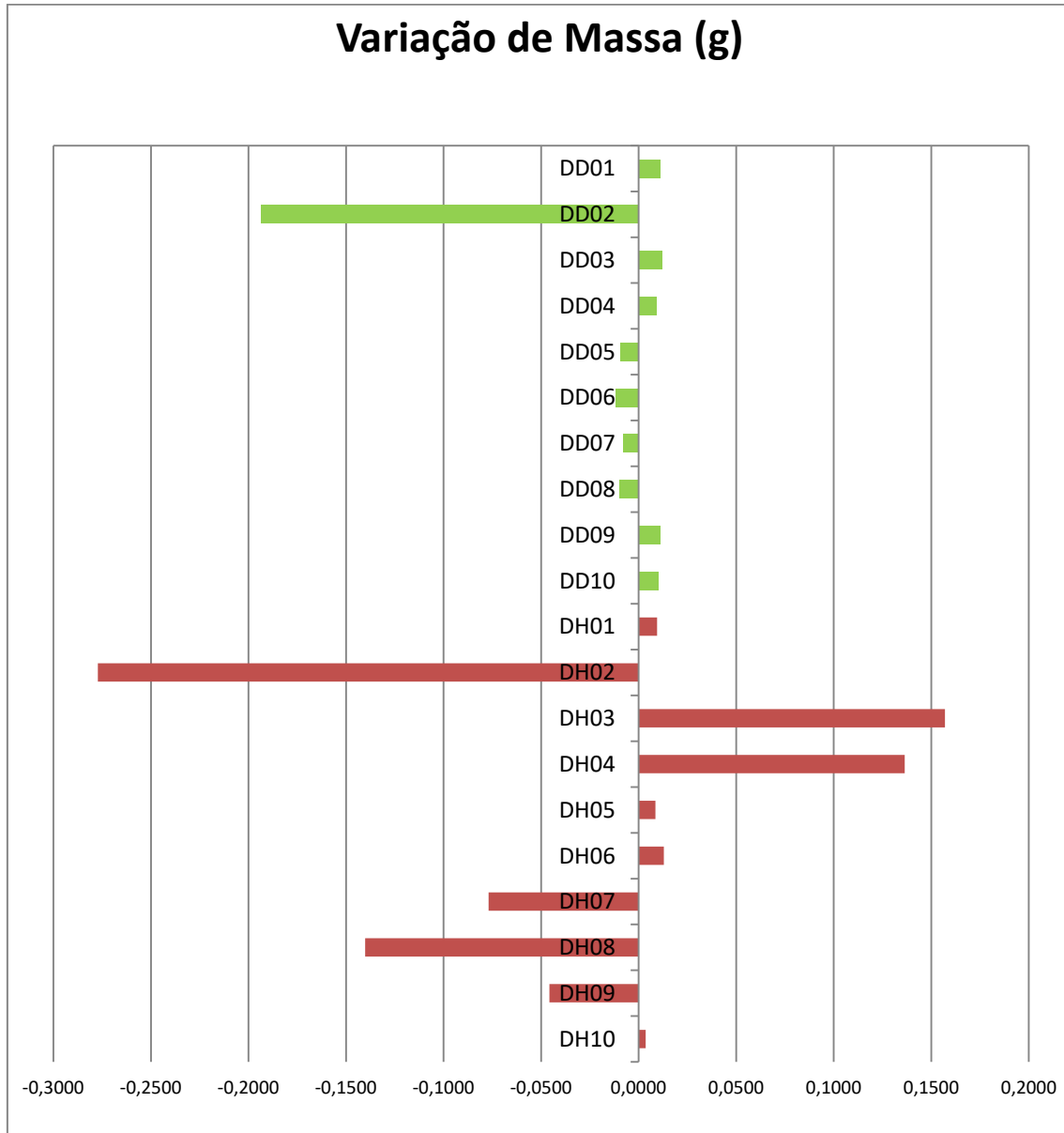


Figura 71 – Variação de massa das amostras do tipo disco

A Figura 72 apresenta de forma compilada a comparação entre a massa inicial e final das amostras do tipo disco de todos os ensaios.

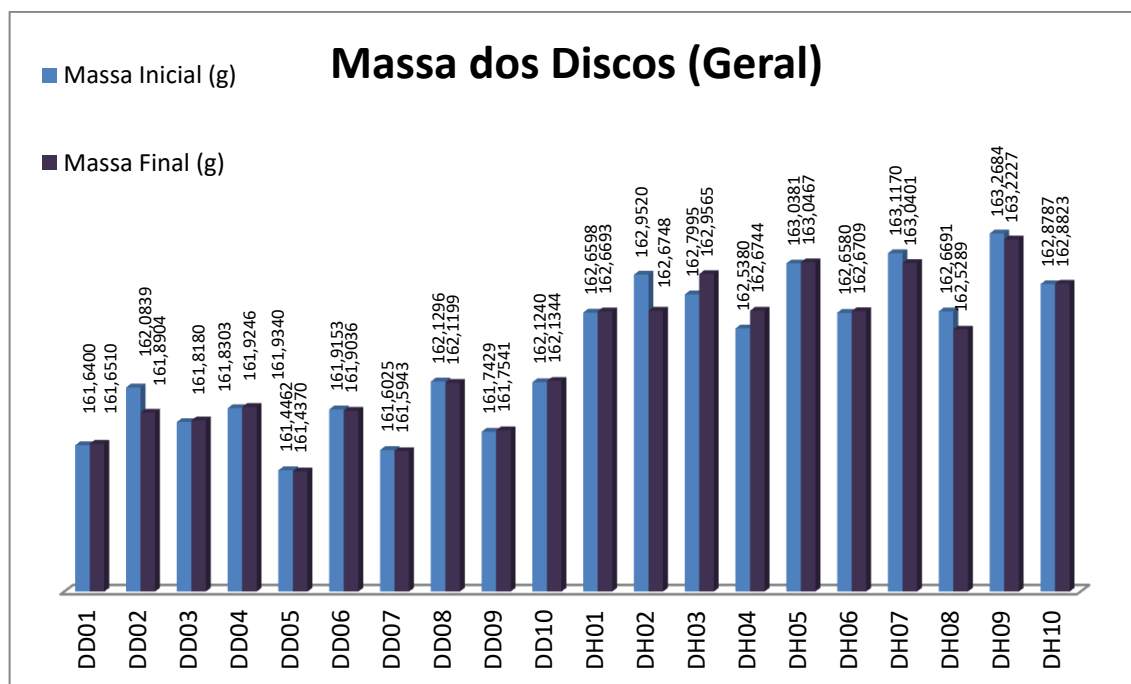


Figura 72 - Comparação entre massa inicial e final das amostras do tipo disco

5.2 TAXA DE DESGASTE

Os valores de taxa de desgaste, constante da taxa de desgaste e coeficiente de desgaste foram obtidos, respectivamente, através da utilização das equações (7), (8) e (9). A Tabela 16 apresenta os valores encontrados para o aço AISI D6 e a Tabela 17 os valores obtidos para o aço AISI H13.

Tabela 16 - Valores de taxa de desgaste do aço AISI D6

Amostra Disco	Taxa de Desgaste ($10^{10} \text{mm}^3/\text{m}$)	Constante da Taxa de Desgaste ($10^{10} \text{mm}^3/\text{N.m}$)	Coeficiente de Desgaste (10^3adm)
DD02	766,465	1,888	22,456
DD08	70,309	0,173	5,779
DD05	36,442	0,090	2,995
DD06	23,172	0,057	1,842
DD07	16,240	0,040	1,291
DD04	^[1] 18,617	^[1] 0,046	^[1] 1,480
DD10	^[1] 20,598	^[1] 0,051	^[1] 1,638
DD01	^[1] 21,786	^[1] 0,054	^[1] 0,609
DD09	^[1] 22,182	^[1] 0,055	^[1] 1,823
DD03	^[1] 24,361	^[1] 0,060	^[1] 0,738

^[1]: Valores obtidos nas amostras que sofreram ganho de massa

Tabela 17 - Valores de taxa de desgaste do aço AISI H13

Amostras	Taxa de Desgaste (10 ¹⁰ mm ³ /m)	Constante da Taxa de Desgaste (10 ¹⁰ mm ³ /N.m)	Coefficiente de Desgaste (10 ³ adm)
DH02	1079,706	2,659	25,113
DH07	299,529	0,738	20,532
DH08	273,042	0,673	18,716
DH09	89,002	0,219	5,892
DH10	^[1] 7,011	^[1] 0,017	^[1] 0,433
DH05	^[1] 16,749	^[1] 0,041	^[1] 1,148
DH01	^[1] 18,501	^[1] 0,046	^[1] 0,430
DH06	^[1] 25,123	^[1] 0,062	^[1] 1,688
DH04	^[1] 265,642	^[1] 0,654	^[1] 17,853
DH03	^[1] 305,761	^[1] 0,753	^[1] 7,112

^[1] Valores obtidos nas amostras que sofreram ganho de massa.

A taxa de desgaste é comumente elaborada através da perda de massa através da geração de detritos despreendido das amostras. Contudo, a adoção de uma carga elevada neste estudo, acarretou no deslocamento plástico dos detritos em forma de material aderido (conforme advertido por Stachowiak e Batchelor, 2004, Figura 16), dificultando a obtenção do real valor da taxa de desgaste através da técnica de mudança de massa.

Porém, a técnica por mudança de massa expõem os danos tribológicos como um todo, ou seja, em uma situação real em um processo de conformação o material deslocado plasticamente fica aderido a superfície do componente. Por este fato, deve-se ter em mente que o desgaste do ferramental não é traduzido apenas pela remoção de material de sua superfície e sim no material deslocado que também possui influência na geração de danos ao tribosistema em questão.

5.3 INFLUÊNCIA DO LUBRIFICANTE NO DESGASTE

O comportamento perante o desgaste das amostras do tipo disco dos Ensaios 01, 02, 03 e 04 foi influenciado pela utilização de dois tipos distintos de lubrificantes, ambos foram empregados com a mesma quantidade de amostras, mesmo material e dureza, variando apenas o material do *billet* e a qualidade do próprio lubrificante.

Através da comparação da variável de rugosidade (Rz) com a Taxa de desgaste obtida por mudança de massa, pode-se verificar a influência na seleção do lubrificante. Compiladas na Figura 73 pode-se verificar a atuação do Lubrificante 01 e na Figura 74 a do Lubrificante 02.

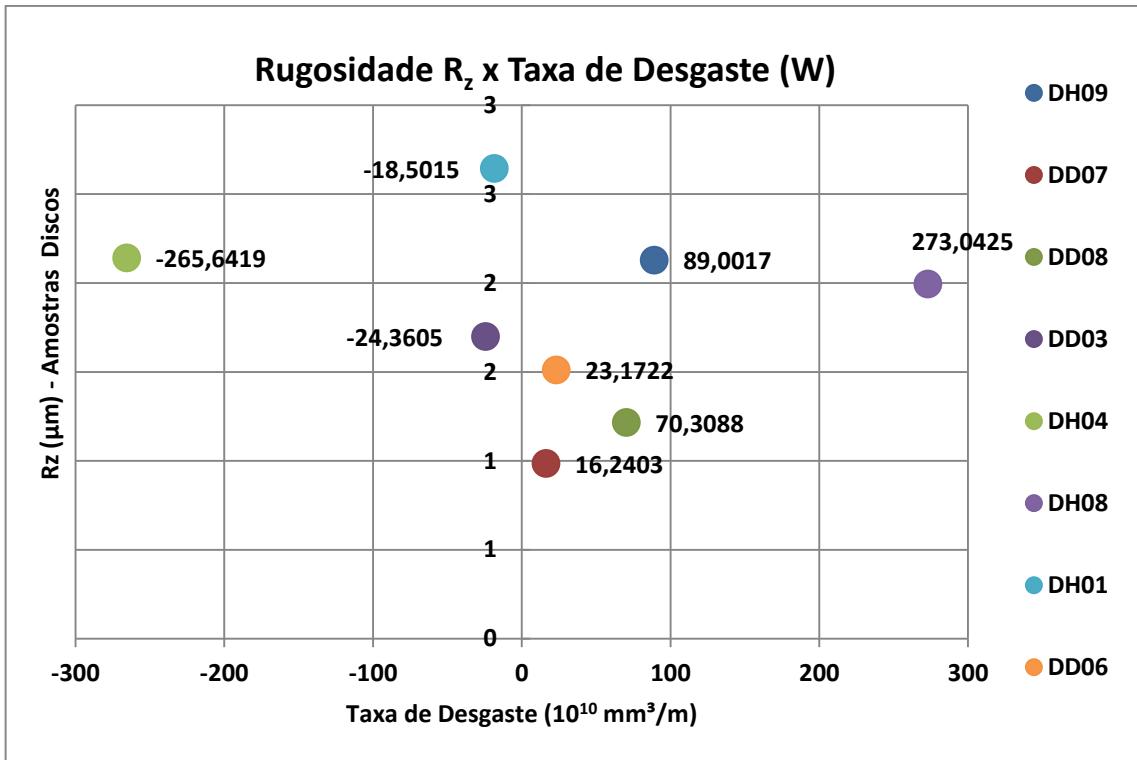


Figura 73 - Influência do Lubrificante 01 perante o desgaste

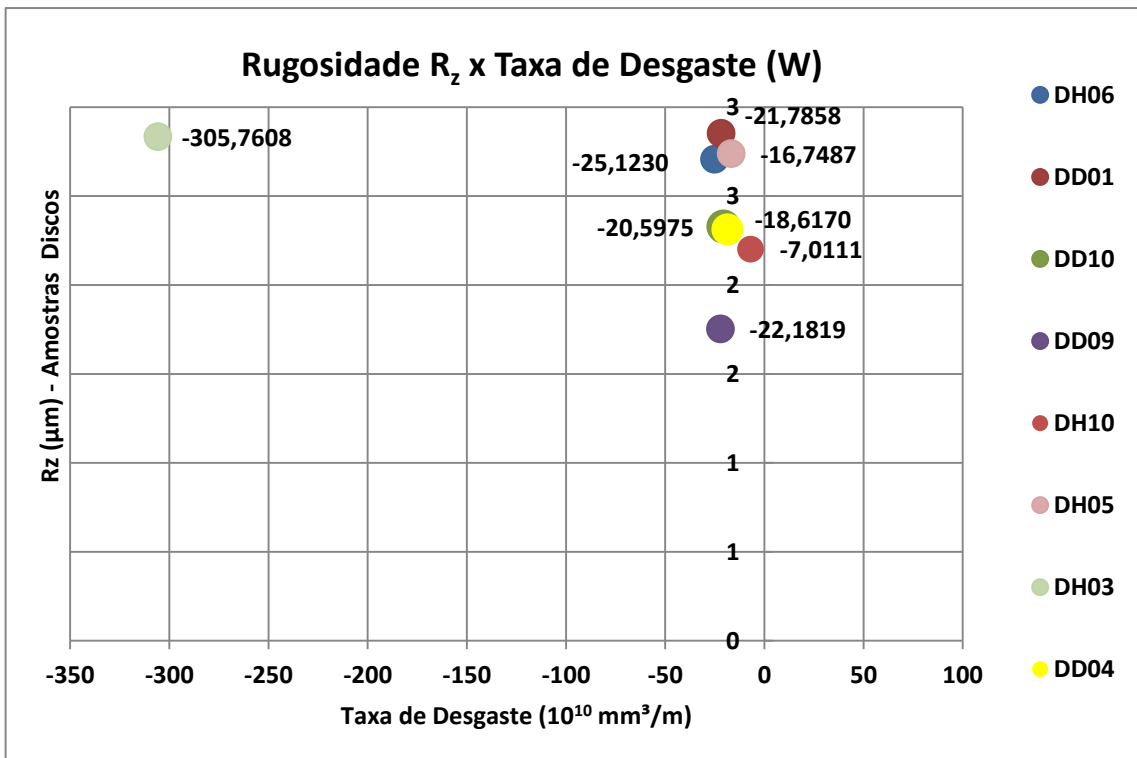


Figura 74 - Influência do Lubrificante 02 perante o desgaste

Nos ensaios que utilizaram o Lubrificante 02 notou-se ocorrência de adesão de material em todas as amostras do tipo disco, pois as mesmas sofreram acréscimo

de material. A amostra DH03 (não temperada) sofreu uma aderência muito maior em relação as demais amostras que utilizaram o Lubrificante 02 (que obtiveram valores de massa aderida mais uniformes).

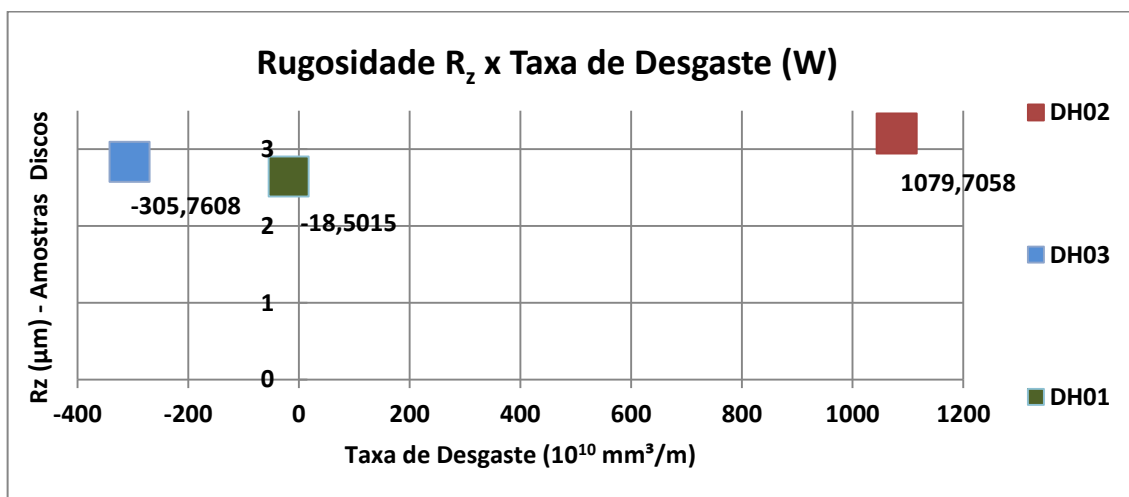


Figura 75 - Comparativo entre os Lubrificantes 01 e 02

Analisando a Figura 75 de forma geral em relação à utilização ou não de lubrificante (ou qual tipo utilizar), pode-se adotar como exemplo as amostras DH01 (ensaiada com o Lubrificante 01), DH03 (ensaiada com o Lubrificante 02) e DH02 (ensaiada sem lubrificação), onde é possível verificar que o desempenho do Lubrificante 01 foi superior em relação ao Lubrificante 02, pois as amostras em questão possuem o mesmo patamar de dureza e rugosidade semelhante, além de utilizarem parâmetros de ensaio idênticos. Na amostra DH02 não ocorreu acréscimo considerável de material em relação às amostras DH01 e DH03, contudo a perda de material atingiu um patamar elevadíssimo, que pode ser distinguido sem requerer ao auxílio de técnicas de microscopia ótica, conforme observado na Figura 76.

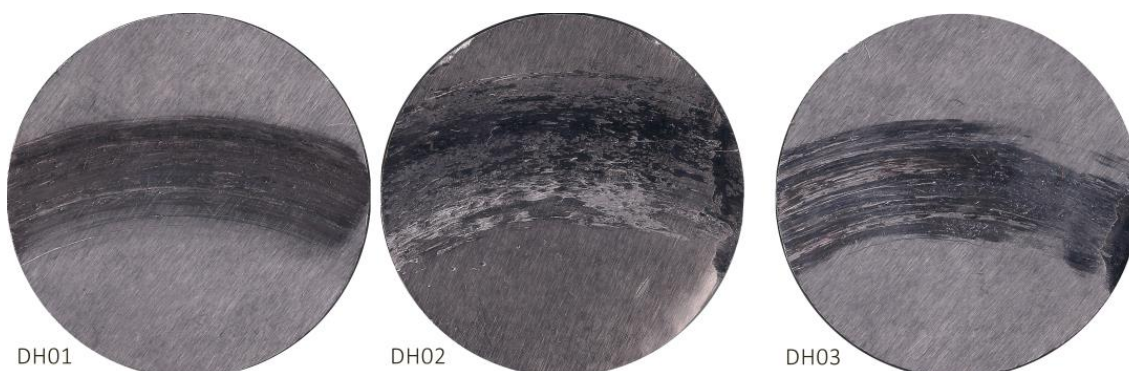


Figura 76 - Comparativo entre os Lubrificantes 01 e 02

5.4 RELAÇÃO: MATERIAL, DUREZA E RUGOSIDADE

A Influência do material empregado como *billet* nos danos tribológicos apresentados neste trabalho, assim como sua rugosidade superficial foi muito mais danosa nos primeiros momentos do ensaio. Conforme pode-se observar em estudos realizados, como por exemplo em Accadrolli et al. (2019), em um período de tempo relativamente menor aos adotados neste estudo, a influência da rugosidade e do material do pino são extremamente relevantes no desgaste inicial, lubricado ou não-lubricado. Contudo, no presente estudo a distância de deslizamento é elevadíssima, o que propiciou ao material do pino um aspecto mais uniforme no tocante rugosidade, em relação a outros ensaios realizados com menores distâncias de deslizamentos. Na Figura 77 pode-se observar que o aspecto dos picos após a conclusão do ensaio tribológico estão com a superfície uniforme devido ao contato interativo entra as superfícies, pelo fato da superfície do material empregado como ferramenta ser muito mais dura em relação ao material empregado como *billet*.

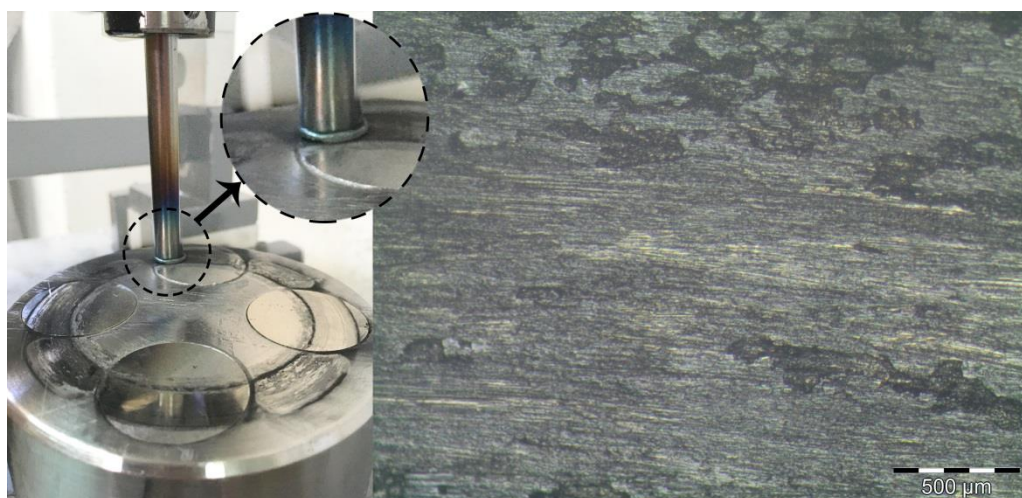


Figura 77 - Aspecto superficial de um pino (PA2) após um ensaio tribológico

6. CONCLUSÕES

Através da realização deste trabalho foi possível obter as seguintes conclusões:

- Foi possível realizar o objetivo principal deste estudo através de uma abordagem tribológica com a finalidade de reproduzir condições e parâmetros de processo no forjamento a frio.
- A força utilizada foi a máxima suportada pelo tribômetro, porém após a conclusão dos ensaios observou-se que as amostras apresentaram deformações plásticas. No caso das amostras do tipo disco esse fenômeno foi observado através da mudança de massa, onde foi possível identificar a ocorrência predominante de desgaste do tipo adesivo e adesão de detritos. Deformações plásticas neste tipo de ensaio dificultam a compreensão dos resultados, pois muitas vezes necessitam de mais de uma técnica de mensuração.
- O mecanismo de desgaste predominante foi o desgaste do tipo adesivo, em ambos os materiais, devido à elevada pressão exercida entre as superfícies em contato relativo, combinada com o fato da velocidade de deslizamento adotada para o ensaio ser um valor condizente com a literatura, porém intermediário. Outros mecanismos de desgaste foram identificados, como desgaste abrasivo e desgaste por fadiga.
- Através de interações entre as superfícies em contato, houve a remoção de material em forma de detritos, que por sua vez desprendidos danificaram as superfícies do material do disco, aderindo-se na mesma ou atuando como um terceiro corpo abrasivo entre as superfícies (nos casos em que o material possui dureza relativamente superior), acarretando em uma série de danos tribológicos.
- A contribuição deste trabalho para diminuir ou prevenir os efeitos do desgaste em ferramentais de forjamento a frio foi atendida, uma vez que se observou o

comportamento e a maneira em que o desgaste manifesta-se através de seus mecanismos, nos materiais submetidos aos ensaios nas condições selecionadas.

- A escolha entre a utilização entre os dois materiais ensaiados varia conforme a incidência ou a perspectiva do tipo de dano tribológico em que o material da ferramenta está exposto, por exemplo, em determinadas ocasiões foram observados picos de temperaturas em momentos distintos, causando superaquecimento localizado, onde o material AISI D6 comportou-se mais adequadamente em relação ao AISI H13. Já em outra situação, a presença de fragmentos soltos em meio ao lubrificante, favoreceu a incidência de desgaste abrasivo por erosão, onde o material AISI H13 evidenciou ser mais apto.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Análise da viabilidade econômica da influência do acabamento superficial de um *billet* usinado x acabamento de usina no desgaste de um ferramental utilizado em conformação a frio;
2. Análise tribológica através da seleção de diferentes tipos de lubrificantes utilizados em processos de forjamento a frio, utilizando pares de material padrão (com variáveis conhecidas);
3. Análise perante o desgaste de ferramentas através da mínima utilização de lubrificante e diluição do mesmo no processo de forjamento a frio;
4. Avaliação da influência no desgaste do ferramental dos diferentes patamares de rugosidade encontrados nos *billets* utilizados no processo de forjamento a frio, obtidos através de processos como: corte e cisalhamento;
5. Análise térmica durante o ensaio tribológico a frio analisando a influência do aumento de temperatura de pico na taxa de desgaste do ferramental.
6. Análise do ponto de transição do fenômeno de deformação plástica em um ensaio P-S-D através da utilização de cargas de forma decrescente, utilizando um tribo-sistema de forjamento a frio.
7. Comparação entre a utilização de duas técnicas de mensuração de desgaste (mudança de massa e perfilometria) com a finalidade de verificar a ocorrência de deformações plástica nas amostras, utilizando parâmetros e materiais idênticos a este estudo.
8. Análise tribológica utilizando pinos no estado de recozimento, através de materiais empregados como *billet* no processo de forjamento a frio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCADROLI, G. et al. **Influência de um Lubrificante Utilizado em Processos de Conformação Mecânica na Taxa de Desgaste de um Aço em Diferentes Patamares de Rugosidade.** 39º SENAFOR, Porto Alegre, v. 26, p. 1-14, 2019.

ACCADROLI, G. & VERNEY, J. C. K. **Desenvolvimento de um Dispositivo para Ensaio Tribológico do tipo Pino-Sobre-Disco.** Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, Sapucaia do Sul, v. 1, p. 10-15, 2017.

ALTAN, T. **ASM Handbook: Forming and Forging. Vol. 14.** Ohio: ASM International, 1988. ISBN 0871700204.

ALTAN, T.; NGAILE, G. & SHEN, G. **Cold and hot forging: fundamentals and applications.** Ohio: ASM international, 2004. ISBN: 0-87170-805-1.

ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. ISBN: 978-85-352-4521-9

ASTM E 10 - 15: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International. 2015.

ASTM G 99 - 17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM International. 2017.

BAY, Niels; LANGE, K. **International cooperation in cold forging technology: The International cold forging group.** Journal of materials processing technology, Lyngby, v. 35, Issues 3-4, p. 303-314, 1992.

BAY, N. **The State of The Art in Cold Forging Lubrication.** Journal of Materials Processing Technology, Lyngby, v. 46, Issues 1-2, p. 19-40 1994.

BAYER, A. M.; VASCO, T. & WALTON, L. R. **Properties and Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys,** ASM Handbook Vol. 1. Ohio: ASM International, 1995. ISBN 978-0-87170-377-4

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing,** revised and expanded. Vestal: CRC Press, 2004. ISBN 0-8247-4620-1.

BEHRENS, B-A. et al., in **Comprehensive Materials Processing, Volume 4.** 5.11 – Tribology in Hot Forging, S. Hashmi, Ed., Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014. ISBN: 978-0-08-096533-8

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology.** Ohio: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-119-94453-9.

BHUSHAN, B. **Modern Tribology Handbook,** two volume set. Ohio: CRC press, 2000. ISBN 0-8493-8403-6

BUTTON, S. T. **Tribology in Metal Forming Processes.** In: **Tribology in Manufacturing Technology.** Berlin: Springer, 2012. ISBN: 978-3-642-31683-8

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica Volume III**. São Paulo: McGraw Hill, 1986. ISBN 9780074500910.

CHOI, W. S. et al. **Tribological Characteristics on the Helical Gear in Cold Forging Mold**. Materials Science Forum, Raleigh, v. 704-705, p. 277-283, 2012.

DA SILVA, F. A. P. **Tribologia: Noções Gerais**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. ISBN 9789723101904.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**, 2ª edição. Rio de Janeiro; Ed Guanabara, 1981.

DUBAR, L.; PRUNCU, C. I.; DUBOIS, A. & DUBAR, M. **Effects of Contact Pressure, Plastic Strain and Sliding Velocity on Sticking in Cold Forging of Aluminium Billet**. Procedia Engineering, Nagoya, v.81, Issues 1877-7058, p. 1842-1847, 2014.

ENGEL, P. **Impact Wear of Materials**. In: BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**, revised and expanded. Vestal: CRC Press, 2004. ISBN 0-8247-4620-1.

FAVORIT, Catálogo Técnico: **Aços especiais**, 2017.

GROCHE, P.; STAHLMANN, J. & MÜLLER, C. **Mechanical Conditions in Bulk Metal Forming Tribometers - Part One**. Tribology International, Darmstadt, v. 62, p. 223-231, 2013.

GRÜNING, K. **Umformtechnik, Vieweg**. In: SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016. ISBN 978-85-7697-435-2

HIRSCVOGEL, M. & DOMMELEN, H. V. **Some Applications of Cold and Warm Forging**. Journal of materials processing technology, Denklingen, v. 35, Issue 3-4, p. 343-356, 1992.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: CRC Press. 1992. ISBN 0-340-56184-X

KRUSCHOV, N. & BABICHEV, M. **Investigation into the Wear of Materials**. In: BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**, revised and expanded. Vestal: CRC Press, 2004. ISBN 0-8247-4620-1.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 4: Forming**. Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36772-4.

LANGE, K. & PÖHLANDT, K. **Handbook of Metal Forming**. Michigan: McGraw-Hill, 1985. ISBN 9780070362857.

LARSEN-BASSE, J. **ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. Vol. 18**. Ohio: ASM International, 1992. ISBN 0871703807.

LUDEMA, K. C. **ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. Vol. 18.** Ohio: ASM International, 1992. ISBN 0871703807.

MULHEARN, T. O. & SAMUELS, L. E. **The Abrasion of Metals.** In: GLAESER, W. A. **Modern Tribology Handbook. Vol. 1.** Ohio: CRC press, 2001. ISBN 0-8493-8403-6.

NEALE, M. & GEE, M. **A Guide to Wear Problems and Testing for Industry.** Norwich: William Andrew, 2001. ISBN 9780815514718.

NEUDECKER, T. **Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge: Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung.** In: KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 4: Forming.** Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36772-4.

ORTIZ, C. H., et al. **Influence of the Number of Bilayers on the Mechanical and Tribological Properties in [TiN/TiCrN] n Multilayer Coatings Deposited by Magnetron Sputtering.** Tribology in Industry, Cali, v.41.3, p. 330-343, 2019.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials.** New York: John Wiley & Sons. Inc., 1995. ISBN 9780471830849.

RABINOWICZ, E. **Wear Control Handbook.** In: NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas.** Porto Alegre: Bookman, 2013. ISBN 9788582600238.

RIGNEY, D.A. **The Role of Characterization in Understanding Debris Generation.** In: GLAESER, W. A. **Modern Tribology Handbook. Vol. 1.** Ohio: CRC press, 2001. ISBN 0-8493-8403-6.

SAGEMULLER, F. **Cold Impact Extrusion of Large Formed Parts.** In: ALTAN, T.; NGAILE, G. & SHEN, G. **Cold and hot forging: fundamentals and applications.** Ohio: ASM international, 2004. ISBN: 0-87170-805-1

SANTUS, C., et al. **Surface and Subsurface Rolling Contact Fatigue Characteristic Depths and Proposal of Stress Indexes.** International Journal of Fatigue, Pisa, v.45, p. 71-81, 2012.

SARKAR, A. D. **Wear of Metals: International Series in Materials Science and Technology.** Manchester: Elsevier, 1976. ISBN 9781483140100.

SCHAEFFER, L. **Forjamento: Introdução ao Processo.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006. ISBN 857697041-4.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica.** Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016. ISBN 978-85-7697-435-2.

STACHOWIAK, G., & BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-12-397047-3.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W. & STACHOWIAK G. B. **Experimental Methods in Tribology (Vol. 44).** Holanda: Elsevier, 2004. ISBN 0444515895.

STOLARSKI, T.A. **Tribology in Machine Design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1990. ISBN 9780080519678.



TALLIAN, T. E. et al. **Rolling Bearing Damage**, SKF Industries Inc. In: BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. Ohio: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-1-119-94453-9.

Tribometer. Fonte: Site Anton-Paar. Disponível em: <<https://www.anton-paar.com/corp-en/products/group/tribometer/>> Acesso em maio de 2018.



TYLCZAK, J.H. **ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. Vol. 18**. ASM International, 1992.

TYLCZAK, J.H. **ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology. Vol. 18**. Ohio: ASM International, 1992. ISBN 0871703807.



ANEXO 01 – Certificado de Qualidade: AISI D6

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570 94930-660 -CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446				CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 610999 / 004			
CLIENTE /CUSTOMER									
Produto / Product				I.L.		Nota Fiscal / Invoice	Data / Date		
ACO AISI D6 DESC RED 31.750X 0.500 (1 PC)				M76050		610999	18/02/2020		
OC		IC		Peso / Weight (Kg)		Corrida / Heat			
				3.169		18203121974			
Composição Química / Chemical Composition									
C	SI	MN	P	S	W	CR	V	MO	CO
2.1000	0.2800	0.2500	0.0210	0.0020	0.6900	11.4100			
NI	CU	N2	BI	N	AL	SN	PB	NB	TI
					0.0150				
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza <i>Hardness</i>	Limite Resistência <i>Tensile Strength</i>	Limite Escoamento <i>Yield Point</i>	Alongamento <i>Elongation</i>	Estricção <i>Reduction of Area</i>	Tam. Grão Austenítico <i>Austenitic Grain Size</i>	Grau Esferoidização <i>Degree of Globularizing</i>			
HB	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
241					6				
Observações / Observation						 GELSON JUNG Controle de Qualidade Quality Control			
Exame de ultrassom aprovado. H = 0,0001%.									
COPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA <i>COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL</i>									
CACHOEIRINHA 18 DE FEVEREIRO DE 2020									



ANEXO 02 – Certificado de Qualidade: AISI H13

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570 94930-650 -CACHOEIRINHARS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446				CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 610999 / 003			
CLIENTE /CUSTOMER									
Produto / Product				LL.		Nota Fiscal / Invoice	Data / Date		
ACO AISIH13 DESC RED 31.750X 0.500 (1 PC)				M73526		610999	18/02/2020		
OC		IC		Peso / Weight (Kg)		Corrida / Heat			
				3.069		081286			
Composição Química / Chemical Composition									
C	SI	MN	P	S	CR	MO	V	NI	CU
0.4000	0.9300	0.3500	0.0200		5.1500	1.2500	0.8400	0.2400	0.0700
N2	BI	N	AL	SN	PB	SB	TI	NB	W
		0.0089	0.0220						0.0300
CO	CA								
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza <i>Hardness</i>	Limite Resistência <i>Tensile Strength</i>	Limite Escoamento <i>Yield Point</i>	Alongamento <i>Elongation</i>	Estricção <i>Reduction of Area</i>	Tam. Grão Austenítico <i>Austenitic Grain Size</i>	Grau Esferoidização <i>Degree of Globularizing</i>			
HBW	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
194									
Observações / Observation						 GELSON JUNG Controle de Qualidade Quality Control			
S < 0,0010 Nb < 0,01 B < 0,0005 Pb < 0,0025 Sn < 0,0050 As < 0,005 Bi < 0,005 H:									
0,00013									
DUREZA CONFORME NORMA ASTM E10									
ULTRASSOM APROVADO CONFORME NBR 15575-1 COPY FILED TO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL									
CACHOEIRINHA 18 DE FEVEREIRO DE 2020									

ANEXO 03 – Certificado de Qualidade: SAE 1020

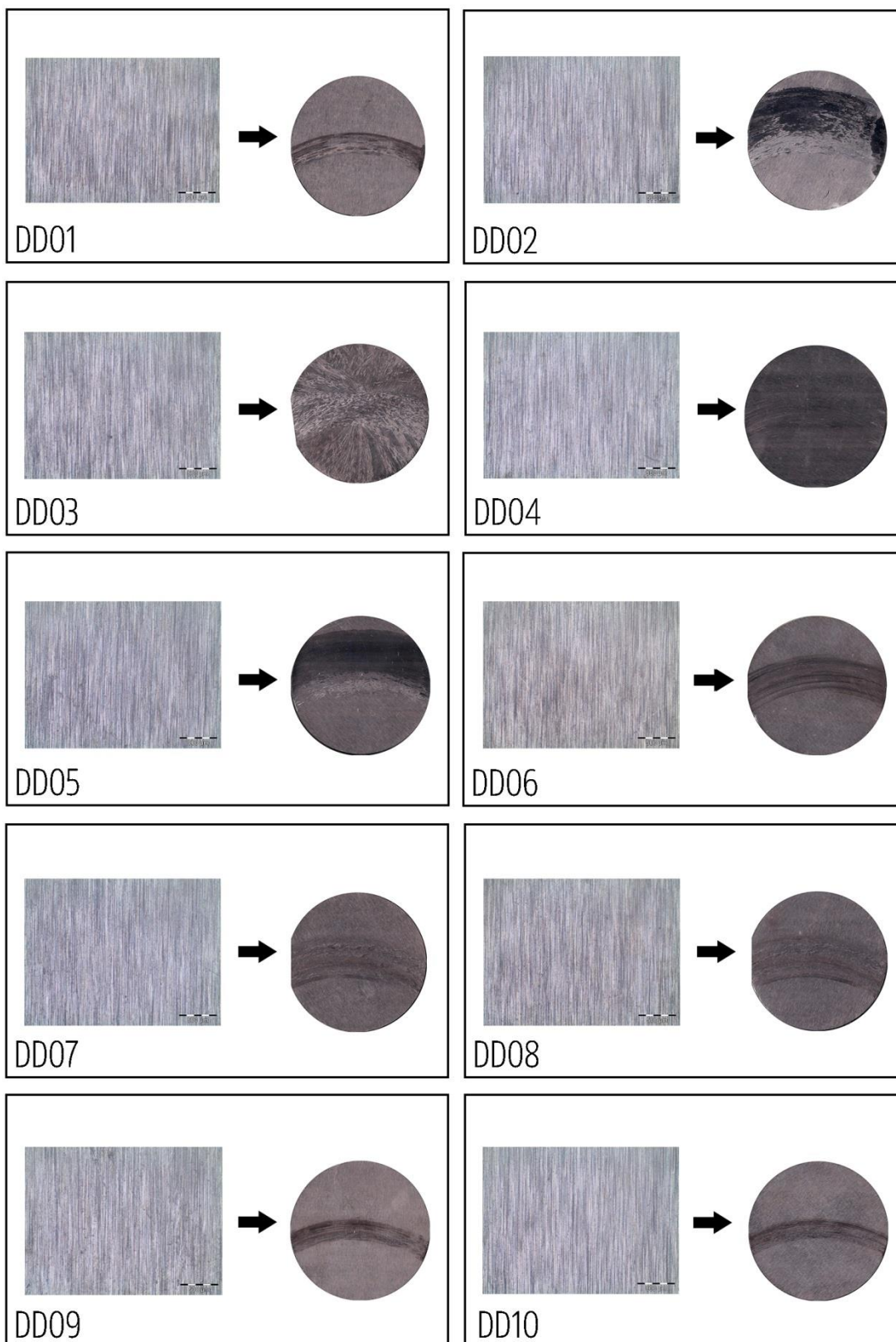
		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570 94930-650 -CACHOEIRINHAVRS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446			CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 612807 / 004				
CLIENTE /CUSTOMER									
Produto / Product			IL.		Nota Fiscal / Invoice	Data / Date			
ACO SAE 1020 TREF h11 RED 9.530X 6.000 (1 BR)			M76644		612807	04/03/2020			
OC		IC		Peso / Weight (Kg)		Corrida / Heat			
				3.384		G428200			
Composição Química / Chemical Composition									
C	SI	MN	P	S	AL	NI	MO	CR	CU
0.2040	0.0960	0.4590	0.0186	0.0092	0.0238	0.0105	0.0025	0.0192	0.0223
N2	BI	N	SN	PB	SB	TI	NB	V	CA
			0.0022					0.0022	
B	W	CO	ZN	AS	ZR	H	C...	CEQ	
0.0002									
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza <i>Hardness</i>	Limite Resistência <i>Tensile Strength</i>	Limite escoamento <i>Yield Point</i>	Alongamento <i>Elongation</i>	Estricção <i>Reduction of Area</i>	Tam. Grão Austenítico <i>Austenitic Grain Size</i>	Grau Esferoidização <i>Degree of Globularizing</i>			
HB	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
Observações / Observation						 GELSON JUNG Controle de Qualidade Quality Control			
COPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA <i>COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL</i>									
			CACHOEIRINHA		4 DE MARCO		DE 2020		

ANEXO 04 – Certificado de Qualidade: SAE 1045

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570 94930-650 - CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446				CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 612807 / 003			
CLIENTE / CUSTOMER									
Produto / Product					I.L.		Nota Fiscal / Invoice		Data / Date
ACO SAE 1045 TREF h11 RED 9.530X 6.000 (1 BR)					M71277		612807		04/03/2020
OC		IC		Peso / Weight (Kg)			Corrida / Heat		
				3.434			99001072		
Composição Química / Chemical Composition									
C	MN	P	S	SI	AL	CR	NI	MO	CU
0.4700	0.6800	0.0110	0.0050	0.1800		0.0100	0.0100		
N2	BI	N	V	SN	PB	SB	TI	NB	CA
AS	H	CO	ZN	ZR	C...	C...	CEQ	B	W
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza <i>Hardness</i>	Limite Resistência <i>Tensile Strength</i>	Limite Escoamento <i>Yield Point</i>	Alongamento <i>Elongation</i>	Estricção <i>Reduction of Area</i>	Tam. Grão Austenítico <i>Austenitic Grain Size</i>	Grau Esferoidização <i>Degree of Globularizing</i>			
HB	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
Observações / Observation						 GELSON JUNG Controle de Qualidade Quality Control			
COPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA <i>COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL</i>									
CACHOEIRINHA 4 DE MARCO DE 2020									

ANEXO 05 – Estado superficial das amostras do tipo disco – Ampliação 50X

1. Microscopia ótica das amostras do tipo disco (AISI D6) antes e após o ensaio tribológico:



2. Microscopia ótica das amostras do tipo disco (AISI H13) antes e após o ensaio tribológico:

