

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO PAR STELLITE 6 E COLMONOY 56  
UTILIZADO EM REVESTIMENTO DE MANCAL DE EXTRUSORA MONOROSCA

Por

Édison Pedroso Kolton

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO PAR STELLITE 6 E COLMONOY 56  
UTILIZADO EM REVESTIMENTO DE MANCAL DE EXTRUSORA MONOROSCA

Édison Pedroso Kolton  
Engenheiro de Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Dr. Leonardo Ladeira de Oliveira

Dra. Juliane Vicenzi

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

*Todo guerreiro já ficou com medo de entrar em combate.*

...

*Todo guerreiro já perdeu a fé no futuro.*

*Todo guerreiro já trilhou um caminho que não era dele.*

*Todo guerreiro já sofreu por bobagens.*

...

*Todo guerreiro já achou que não era guerreiro.*

*Todo guerreiro já falhou em suas obrigações.*

*Todo guerreiro já disse "SIM" quando queria dizer "NÃO".*

*Todo guerreiro já feriu alguém que amava.*

*Por isso é um guerreiro; porque passou por estes desafios, e não perdeu a esperança de ser melhor do que era.*

*Paulo Coelho, escritor brasileiro (24 Agosto 1947). Escritor, filósofo, produtor musical e letrista brasileiro. Trabalha com gêneros literários de drama e romance esotérico. Eleito integrante da academia brasileira de letras em 25 de julho 2002. Em setembro de 2007, a ONU nomeou o escritor seu novo Mensageiro da Paz.*

## **AGRADECIMENTOS**

Muitas pessoas participaram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. E a todas deixo meus sinceros agradecimentos. Em especial agradeço ao meu orientador, Professor Carlos P. Bergmann, por ter permitido essa experiência valorosa de desenvolver essa dissertação e a realização desse sonho de me tornar mestre pelo Departamento de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais na Escola de Engenharia da UFRGS e por sua valorosa contribuição para esta dissertação desde o início.

Agradeço também aos professores Telmo Roberto Strohaecker e Afonso Reguly que sempre com grande interesse permitiram que ensaios e laudos técnicos necessários a esse trabalho fossem desenvolvidos com agilidade e competência. Agradeço ao Rubem Manoel de Braga, engenheiro do LAMEF que forneceu valiosas contribuições com sua experiência na interpretação de questões técnicas e encaminhamento de soluções. Da mesma forma, agradeço ao Marino Pinheiro técnico da Lanxess pelo suporte fornecendo informações e detalhes fundamentais técnicos para realização desse trabalho. Agradeço ao engenheiro Joaquim Altivo Almada da Braskem S.A pelo apoio e facilidades oferecidas para que os estudos necessários fossem feitos em paralelo com os trabalhos na empresa e pela compreensão da necessidade do desenvolvimento intelectual de seus liderados.

Agradeço imensamente aos meus pais, Estanislau e Joaquina, que me mostraram mais com seus atos que com suas palavras que podemos nos desenvolver com equilíbrio e humildade, dando o verdadeiro valor e dimensão aos eventos de nossa vida. Agradeço aos meus filhos amados Gabriel, Lucas e Iasmin, seres propulsores de meus atos e motivação. Finalmente agradeço a minha esposa Maria Cristina pelo constante apoio por de traz dos bastidores para que eu pudesse figurar nesse trabalho.

# SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABELAS .....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....	X
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1.    Objetivos Específicos.....	4
3. Revisão Bibliográfica .....	5
3.1.    Contato entre Superfícies .....	5
3.1.1.    Deformação de Uma Única Aspereza.....	5
3.1.2.    Teoria Simplificada do Contato de Múltiplas Asperezas.....	8
3.1.3.    Teoria Estatística do Contato de Múltiplas Asperezas.....	8
3.1.4.    Atrito .....	13
3.1.5.    Tipos de Desgastes .....	20
3.1.6.    Efeito da Lubrificação no Desgaste entre Superfícies .....	28
3.2.    Extrusoras .....	30
3.2.1.    Extrusora Monorosca.....	31
3.2.2.    Mancal Frontal.....	32
3.2.3.    Desgastes em Extrusoras .....	32
3.2.4.    Análise do Desgaste do Mancal Frontal .....	33
3.3.    Revestimentos Contra Desgastes .....	36
3.4.    Métodos de Testes de Desgaste .....	38
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	41
4.1.    Materiais.....	42
4.2.    Métodos .....	43
4.2.1.    Deposição da Camada de Stellite 6 pelo processo TIG .....	44
4.2.2.    Deposição da Camada de Colmonoy 56 pelo processo TIG.....	45
4.2.3.    Medição do Desgaste.....	48
4.2.4.    Desgaste do Bloco de desgaste .....	49
4.2.5.    Desgaste do Bloco e Anel de desgaste.....	50
4.2.6.    Teste de Campo .....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1.    Desgaste do Bloco de Desgaste .....	53
5.2.    Desgaste do Bloco e Anel de Desgaste.....	55
5.3.    Teste de Campo .....	56
6. CONCLUSÕES.....	58
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
ANEXO I.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Deformação elástica de uma esfera de raio $r$ , pressionada contra uma superfície plana por uma carga $w$ [Hutchings, 1996].	6
Figura 3.2 – Distribuição da tensão normal (pressão de contato) em uma esfera carregada elasticamente em relação a um plano [Hutchings, 1996].	7
Figura 3.3 – Modelo de contato entre uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida [Hutchings, 1996].	9
Figura 3.4 – Índice de plasticidade versus tensão de contato em função do grau de acabamento superficial. [Hutchings, 1996].	11
Figura 3.5 – Distribuição de máximas tensões de cisalhamento sub-superficiais para o caso da presença de atrito [Mao; Sun e Bell, 1994].	12
Figura 3.6 – Desenvolvimento de atrito quando um corpo experimenta movimento em relação a outro corpo. [Hutchings, 1996].	13
Figura 3.7 – Efeito da pressão de oxigênio no coeficiente de atrito desenvolvido no ferro puro [Hutchings, 1996].	16
Figura 3.8 – Efeito da presença de um filme de óxido no atrito desenvolvido no cobre em função da carga aplicada [Hutchings, 1996].	17
Figura 3.9 – Efeito da temperatura sobre o atrito de três grupos de estruturas cristalinas [Hutchings, 1996].	18
Figura 3.10 – Efeito da transformação em estado sólido do cobalto sob as características de atrito [Hutchings, 1996].	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 20
Figura 3.11 – Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste. [Kato, 2001].	21
Figura 3.12 – Diagrama de compatibilidade para pares de metais baseado em diagramas de fase binários proposto por Rabinowicz. [Hutchings, 1996].	26
Figura 3.13 – Regime de lubrificação desenvolvida em função da razão $\lambda$ (Hutchings, 1996).	30
Figura 3.14 – Extrusora monorosca para elastômeros com mancal frontal de deslizamento. [Fonte: Manual Japan Stell Work – JSW, extrusora instalada na Lanxess RS-Brasil].	31
Figuras 3.15 – Componentes do mancal frontal da extrusora mono rosca, camisa e bucha (peças com desgaste). [Fonte: Mancal da extrusora JSW instalada na Lanxess RS-Brasil].	32
Figura 3.16 – Trincas perpendiculares ao sentido de rotação e lascamentos na superfície revestida com Stellite 6 da bucha do mancal. A posição das trincas foi reforçada com caneta para melhor visualização.	34
Figura 3.17 – Trincas perpendiculares ao sentido de rotação na superfície do revestimento de Stellite 6. Trincas iniciando em regiões com encruamento superficial. Aumento 200x.	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 4
Figura 3.18 – Gráfico das tensões residuais principais ao longo da profundidade do revestimento da bucha do mancal.	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 4
Figura 3.19 – Micrografia mostrando o risco provocado por um diamante que se movimentou da esquerda para direita sobre a superfície de um Colmonoy 56. Note que o cristal de Boreto de Cromo ao centro não sofreu o mesmo dano. [COLMONOY, 1987]. Aumento 200x.	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 6
Figura 3.20 – Diversos tipos de arranjos experimentais para a avaliação do desgaste por deslizamento. [Hutchings, 1996].	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 7
Figura 3.21 – Geometria dos contatos não concentrados (a) e concentrados(b). [Hutchings, 1996].	<b>Erro! Indicador não definido.</b> 8
Figura 4.1 – Tribômetro utilizado nos ensaios de desgaste (esquerda). Desenho esquemático do ensaio (direita). [LACER-Laboratório de Materiais Cerâmicos-UFRGS].	40
Figura 4.2 – Dimensões dos corpos-de prova (Bloco e anel de desgaste).	42
Figura 4.3 – Perfil utilizado do controle de temperatura da peça de 316L (metal base) revestida com Stellite 6. [Procedimento fornecido pela JSW-Japão Stell Work].	42
Figura 4.4 – Aspecto micrográfico do revestimento de Stellite 6. Observam-se os carbonetos de cobalto e a matriz de austenita com grande quantidade de carbonetos. Aumento 200x.	42
Figura 4.5 – Aspecto micrográfico do revestimento de Colmonoy 56. Observam-se a microestrutura composta de martensita e carbonetos de boro, bem mais finos que os que foram encontrados no revestimento de Stellite 6.. Aumento 200x.	42

Figura 4.6 – Esquema do desgaste medido na peça ensaiada e sua relação com a fórmula utilizada para <b>quantificá-lo (volume de material desgastado)</b> . [ASTM G77, 2010]. .....	46
Figura 4.7 – Gráfico do perfil de micro dureza Vickers HV <sub>0,2</sub> da camada de Colmonoy 56.....	47
Figura 4.8 – Aspecto micrográfico da interface entre solda de Colmonoy 56 e metal-base. No metal base a microestrutura é de austenita, enquanto no revestimento é austenita e carbonetos. Aumento 200x.....	48
Figura 4.9 – Aspecto micrográfico do revestimento de Colmonoy 56. Matriz de austenita com grande quantidade de carbonetos. 200x.....	48
Figura 5.1 – Comparação entre os desgastes obtidos nos blocos de testes quando utilizado diferentes pares de metais (disco & bloco) .....	49
Figura 5.2 – Corpos de prova após o ensaio de desgaste.....	50
Figura 5.3 – Comparação entre os desgastes obtidos pelos pares blocos & disco.....	50



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Revestimentos para aplicação como camada resistente ao desgaste em hélices de roscas de extrusoras e mancais de deslizamentos (Fonte: murex technik ag) .....	35
Tabela 4.1 – Composição química e dureza das ligas estudadas. [Metal Handbook, 1977; CABOT Stellite, 1975; Wall Colmonoy, 2000] .....	40
Tabela 4.2 – Composição química dos materiais dos revestimentos dos corpos de provas. ....	43
Tabela 4.3 – Dureza Rockwell C dos materiais dos revestimentos dos corpos de provas.....	44
Tabela 4.4 – Perfil de Micro dureza Vickers HV <sub>0,3</sub> dos revestimento dos corpos de provas.....	45
Tabela 4.5 – Valores das durezas Rockwell medidos na superfície do revestimento e na superfície do metal base do mancal testado. ....	47
Tabela 5.1 – Valores dos volumes removidos nos testes de desgaste calculados segundo a equação mostrada na Figura 4.4. ....	49

# LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**Τριβο** - tribo (esfregar)

**Λογος** - logos (estudar)

**μ** - coeficiente de atrito

**w** - carga normal

**P<sub>média</sub>** - pressão média

**Y** - tensão uniaxial de escoamento

**∝** - proporcional

**A** - área

**Z** - altura de uma aspereza

**d** - distância

**ψ** - índice de plasticidade

**φ(z)** - função de densidade probabilidade

**prob** - probabilidade

**∞** - infinito

**N** - número total de asperezas

**n** - número esperado de contatos

**σ\*** - desvio padrão

**H** – dureza

**Kgf** - quilograma força

**cm<sup>2</sup>** - centímetro quadrado

**F** - força tangencial

**F<sub>adesão</sub>** - força de atrito devido adesão

**S** - resistência ao cisalhamento

**nm** –nanômetro

**h** - hora

**mmHg** - milímetros de mercúrio

**OECD** - organização para econômica cooperação e desenvolvimento

**Q** - volume removido pela abrasão

**l** - distância do deslizamento

**k<sub>1</sub>** - probabilidade de formação de fragmentos de desgaste

**k<sub>2</sub>** - proporção média de volume da ranhura removido quando fragmentos são formados

**k<sub>3</sub>** - constante que depende da forma da partícula ou protuberância

**σ** - carga aplicada por unidade de área

**V** - volume de desgaste

**S** - distância de deslizamento

**L** - carga

**k** - fator de probabilidade

$\lambda$  - razão entre a espessura do filme de lubrificante e a média quadrática da altura das asperezas

**K** - coeficiente de desgaste

**E** - módulo de elasticidade

**mm** - milímetros

**$\mu\text{m}$**  – micrometro

$\nu$  – coeficiente de Poisson

**°C** – grau celsius

**°F** – grau fahrenheit

**°K** – grau kelvin

**HRC** - dureza Rockwell C

**HRB** - dureza Rockwell B

**EPDM** – eteno propeno dieno monômero

**TIG** - tungsten inert gas

**AISI** – American Iron and Steel Institute

**AD** –

**HV** – Hardeness Vickers

**RPM** - rotações por minuto

**g** - grama

**t** - largura

**r** - raio

**D** - diâmetro

**b** - largura

**$\alpha$**  - profundidade da cavidade

**$\theta$**  - ângulo

**Sen** - seno

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a avaliação comparativa do comportamento ao desgaste adesivo das ligas metálicas Stellite 6 e Colmonoy 56, aplicadas como revestimento resistente ao desgaste em diferentes combinações nos pares de corpos-de-prova ensaiados em laboratório segundo a norma técnica ASTM G-77. Procurou-se assim simular a condição mais crítica de operação, a qual um mancal dianteiro de deslizamento instalado internamente em uma extrusora monorosca está submetido, ou seja, contato metal-metal sem lubrificação. Uma vez que os resultados obtidos em laboratório indicaram o par com melhor desempenho em resposta às solicitações de desgaste adesivo, foram então, revestidas as superfícies das peças de um mancal de deslizamento e instaladas em uma extrusora monorosca para execução do teste de campo em condições normais de operação.

A liga Colmonoy 56 utilizada em conjunto com a liga Stellite 6 mostrou ter uma vida útil maior ao desgaste por deslizamento do que o par de ligas Stellite 6 / Stellite 6. Os resultados indicaram ainda que quando o mecanismo predominante de desgaste por deslizamento é o adesivo, a compatibilidade metalúrgica entre as ligas metálicas que se atritam é um fator que influencia fortemente a resistência ao desgaste das superfícies em contato. Assim sendo, o par Colmonoy 56 / Stellite 6 apresentou uma menor compatibilidade metalúrgica (menor solubilidade mútua) melhorando o deslizamento devido a menor adesão entre as ligas. Outro fator que pôde ser constatado como de influência para a diminuição da taxa de desgaste foi à presença de alta concentração de cristais de boretos de cromo, que possuem dureza semelhante à do diamante, e também a presença de outros constituintes duros como carbonetos de cromo distribuídos na microestrutura do Colmonoy 56. Nos testes de campo, foi confirmado um significativo aumento da durabilidade do mancal em operação substituindo o par tribológico Stellite 6 / Stellite 6 pelo par Colmonoy 56 / Stellite 6.

## ABSTRACT

This work shows a comparative evaluation of the adhesive wear behavior of metallic alloys Stellite 6 and Colmonoy 56 applied as a wear resistant coating in different combinations in pairs of specimens tested in the laboratory according to technical standard ASTM G-77. We attempted to simulate then the most critical operating condition to which a sliding front bearing installed internally in a single screw extruder is subjected, i.e., metal to metal contact without lubrication. Since the results obtained in the laboratory indicated the pair with the best performance in terms of response to adhesive wear were then coated surfaces of the parts of a sliding front bearing and after they were installed in a single screw extruder for run the field test in normal operation.

The alloy Colmonoy 56 used in conjunction with alloy Stellite 6 proved to have a longer life than the pair of alloy Stellite 6 / Stellite 6 to sliding wear. The results also indicated that when the predominant mechanism of sliding wear is the adhesive, the metallurgical compatibility between the metal alloys that are rubbing each other is a factor that strongly influences the wear resistance of the surfaces in contact. Thus, the pair Colmonoy 56 / Stellite 6 demonstrated a lower metallurgical compatibility (mutual solubility smaller), improving the sliding between the alloys due to the lower adhesion between the alloy. Another factor found to influence to decrease the wear rate was the presence of high concentrations of crystals of borides of chromium, which have similar hardness to diamond and also the presence of other hard constituents, such as chromium carbides distributed in the microstructure of the Colmonoy 56. In field tests, it was confirmed a significant increase in the durability of the bearing under normal operation replacing the tribological pair Stellite 6 / Stellite 6 by tribological pair Colmonoy 56 / Stellite 6.

# 1. INTRODUÇÃO

O termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo-esfregar) e Λογος (Logos-estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório. O termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” [Jost, 1990]. Jost foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos de tribologia. As estimativas de reduções de gastos apresentados no relatório de Jost são de que mediante o uso do conhecimento existente podem-se reduzir as perdas por desgaste em 20%. Pode também ser definidos como a ciência que se preocupa com o projeto, atrito, lubrificação e desgaste de superfícies em contato e que se movimentam relativamente uma em relação à outra [AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995].

A força conhecida como atrito poder ser definida como a resistência encontrada por um corpo quando em movimento sobre outro corpo. Esta definição abrange duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. Distinguir o atrito por deslizamento do atrito por rolamento é útil, mas os dois não são mutualmente excludentes, e mesmo o movimento de rolamento aparentemente puro quase sempre envolve algum deslizamento.

A terceira lei de atrito afirma que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento. No início do movimento obtém-se um valor do coeficiente de atrito ( $\mu$  estático) que é maior do que o valor que se estabelece e permanece constante após um determinado tempo de deslizamento ( $\mu$  dinâmico).

De acordo com o modelo de Bouden e Tabor, a força de atrito total é composta por duas componentes, isto é, pela força de deformação, necessária para causar a penetração das asperezas da superfície mais dura na mais macia, e pela força de adesão desenvolvida nas áreas reais de contato entre as duas superfícies (formação de “junções” de asperezas). Um tratamento matemático para estimar a magnitude da força de atrito total resulta na obtenção de valores bem menores do que aqueles observados na prática. Assim, assume-se que outros efeitos devem estar agindo no sistema. Dois efeitos principais podem ser apresentados, isto é, o efeito do encruamento e do “crescimento de junção”. Com o encruamento dos materiais durante o processo de desgaste, formam-se junções de asperezas com maior tensão de cisalhamento, causando aumento da componente da força de atrito total relativa à adesão. Contudo, ainda que o encruamento possa ter uma importante influência sobre a adesão, considera-se que o crescimento da junção seja mais relevante. Para situações encontradas na

prática, a maior parte do contato que ocorre entre metais é um contato que envolve deformação plástica ou simplesmente denominada de contato plástico. Assim, a combinação do carregamento externo e a força de atrito gerada pelo movimento relativo das duas superfícies levam ao aumento da área de contato plástico ou “crescimento da junção”. Este efeito causa aumento da componente de atrito devido à adesão [HUTHINGS, 1996].

Os comentários acima dizem respeito às superfícies livres de filmes ou em deslizamento em vácuo. Para estas situações, uma forte adesão é gerada e um grande desgaste é observado. Com pequena quantidade ou ausência de contaminantes ou filmes superficiais, o crescimento da junção só é limitado pela ductilidade do material. Contudo, em situações normais de operação, os óxidos, gases adsorvidos e contaminantes em geral fazem com que ocorra a diminuição da força de atrito total desenvolvida. Estes filmes que se localizam entre as junções de asperezas reduzem a resistência ao cisalhamento, de forma que a componente de atrito por adesão é diminuída. A presença destes filmes superficiais também limita o crescimento da junção. Estes efeitos resultantes da presença de filmes superficiais justificam a utilização de lubrificantes.

Sempre que superfícies se movem uma em relação à outra o desgaste ocorrerá com danos em uma ou ambas as superfícies, geralmente envolvendo progressiva perda de material. O desgaste tem sido classificado segundo diferentes critérios. Do ponto de vista do fenômeno, a abordagem é baseada na descrição macroscópica da aparência das superfícies desgastadas, por exemplo: *scuffing (galling), rubbing e fretting*. A utilidade desse sistema de classificação é limitada porque não é focado no mecanismo do desgaste, dessa forma conta quase sempre com soluções empíricas para problemas de desgaste. Outra forma de categorizar o desgaste é considerar o mecanismo fundamental atuante. Infelizmente este enfoque é complicado pelo fato que mais de um mecanismo pode estar atuando ao mesmo tempo e pela falta suficiente de informação. Um enfoque um tanto diferente descreve o mecanismo de desgaste por deslizamento baseando se na forma e tamanho das partículas geradas. Enquanto a terminologia de desgaste não está ajustada e as definições básicas não estão padronizadas, nesse momento é largamente aceito que existem quatro tipos básicos de desgaste: adesivo, abrasivo, erosivo e cavitação. A teoria de delaminação incorpora elementos de adesão e abrasão. Em adição, existem outros tipos de desgaste que, embora não considerados como principais, são algumas vezes tratados em separado. Estão incluídos nestes, a fadiga na superfície, *fretting* e cavitação erosão. Frequentemente, mais de um mecanismo estão atuando simultaneamente, e é difícil separar os efeitos de um em relação ao outro [AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995].

Tradicionalmente também são aceitos quatro modos de desgaste: Adesivo, abrasivo, fadiga e corrosivo [Kato, 2001].

No caso de extrusoras, podemos citar os seguintes fatores que promovem algum desses tipos de desgastes: contato metal-metal entre rosca e barril devido ao desalinhamento ou excentricidade da rosca e/ou barril, superfícies incompatíveis entre rosca/barril, produto corrosivo e abrasivo e operação com parâmetros de processo acima dos limites de projeto.



## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para a construção do conhecimento na Ciência dos Materiais, mais especificamente na área de materiais metálicos resistentes ao desgaste, através dos resultados comparativos obtidos em laboratório do comportamento ao desgaste das ligas Stellite 6 e Colmonoy 56, visando a utilização desses como revestimentos de mancais de deslizamento utilizados em extrusoras de polímeros, propiciando uma maior durabilidade em relação ao desgaste e por consequência obter maior disponibilidade de máquina e menores custos de manutenções.

### 2.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Testar e definir inicial através de ensaios em laboratório a melhor opção de par de materiais resistentes ao desgaste, testando as ligas Colmonoy 56 e Stellite 6 em diferentes combinações de revestimentos nas peças de testes que constitui o experimento: peça fixa(bloco de teste) e peça móvel(anel de teste). Através da determinação da melhor opção (melhor par) conduzir para a aplicação desses revestimentos no conjunto mancal a ser testado na extrusora mono rosca em operação (teste de campo) para validação ou não dos resultados obtidos experimentalmente.
- Determinar e validar a metodologia de teste adotada no experimento desse trabalho objetivando manter a aderência relativa com a aplicação prática.
- Mostrar pela equação de cálculo de volume de desgaste os parâmetros que afetam a taxa de desgaste e o embasamento teórico que justifica a melhor opção para a aplicação prática.

## 3. Revisão Bibliográfica

### 3.1. Contato entre Superfícies

Quando dois planos paralelos determinados são levemente aproximados, inicialmente o contato ocorrerá somente em poucos pontos. À medida que a carga normal atuando nesses planos é aumentada, as superfícies se aproximarão cada vez mais e mais áreas salientes ou asperezas entre as duas superfícies entrarão em contato. Desde que somente essas asperezas propiciarem o contato entre as superfícies, elas serão as responsáveis por suportar a carga normal e por gerar qualquer força de atrito que possa atuar entre elas [HUTHINGS, 1996].

#### 3.1.1. Deformação de Uma Única Asperiza

Em estudos dos perfis de superfícies foram revelados que as asperezas são menos agudas que se imaginava; raramente tem um ângulo maior que  $10^\circ$  e normalmente são bastante superficiais. Para o estudo do comportamento de uma simples aspereza é conveniente modelar elas como uma perfeita e suave protuberância de formato esférico, cônico ou piramidal.

##### Deformação Elástica:

A fim de simplificar as situações reais, em que duas superfícies rugosas entram em contato, estuda-se o contato entre uma única aspereza ideal (formato esférica e perfeitamente lisa) e um plano. Outra simplificação é feita quando se estabelece que a situação seja estática, isto é, não existirão forças tangenciais devido ao movimento de uma superfície em relação à outra. Estas simplificações e as equações formuladas caracterizam o contato Hertziano.

Quando uma esfera de um material elástico é pressionada contra um plano, conforme mostrado na Figura 3.1, sob um carregamento normal  $w$ , o contato será estabelecido sob um círculo de raio  $a$ , definido pela equação de Hertz [1881]:

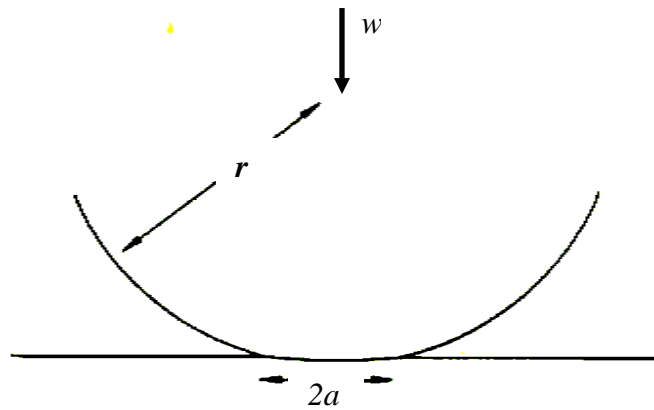


Figura 3.1 - Deformação elástica de uma esfera de raio  $r$ , pressionada contra uma superfície plana por uma carga  $w$ . [Hutchings, 1996].

O raio do círculo de contato é determinado por a:

$$a = \left( \frac{3wr}{4E} \right)^{1/3} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde  $r$  é o raio da esfera e  $E$  é o módulo elástico, o qual depende do módulo de elasticidade (módulo de Young)  $E_1$  e  $E_2$  e dos coeficientes de Poisson  $\nu_1$  e  $\nu_2$  dos materiais da esfera e do plano, da seguinte forma:

$$\frac{1}{E} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad \text{Equação 3.2}$$

A área de contato entre esfera e o plano,  $\pi a^2$ , é então determinada por:

$$\pi a^2 \approx 0.83\pi \left( \frac{wr}{E} \right)^{2/3} \quad \text{Equação 3.3}$$

Para este caso, onde a deformação é puramente elástica, a área de contato é, portanto proporcional a  $w^{2/3}$ . A pressão média (tensão normal)  $P_{média}$  atuando sobre área de contato é  $w/\pi a^2$ , dessa forma varia com  $w^{1/3}$ . Conforme visualizado na Figura 3.2 esta tensão não é uniforme ao longo da área circular de contato, mas apresenta um máximo no centro e cai à zero nas extremidades,. A máxima tensão, no centro do círculo de contato, é 3/2 vezes a pressão média.

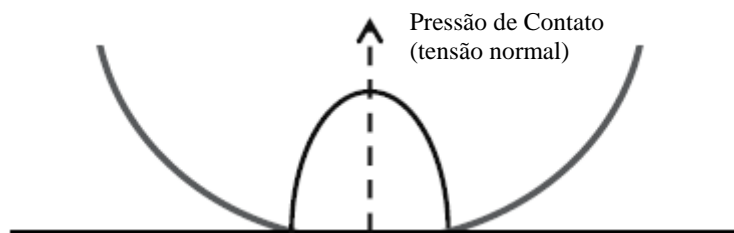


Figura 3.2 - Distribuição da tensão normal (pressão de contato) em uma esfera carregada elasticamente em relação a um plano. [Hutchings, 1996].

### Deformação Plástica:

Quando o carregamento normal entre a esfera e o plano é aumentado, um dos componentes em contato pode entrar em deformação plástica. Esta situação pode ser simplificada considerando-se dois casos: no primeiro caso a esfera é considerada rígida e o escoamento plástico ocorre no plano, no segundo caso o plano não deforma e o escoamento plástico ocorre somente na esfera.

As análises de Hertz em relação ao campo de tensões elásticas, desenvolvidas devido à penetração de um indentador esférico em uma superfície plana, indicam que a máxima tensão de cisalhamento, abaixo do indentador, ocorre a uma profundidade de, aproximadamente,  $0,47a$ , onde  $a$  é o raio do círculo de contato. O escoamento plástico primeiramente ocorrerá neste ponto quando os critérios de escoamento são satisfeitos; se o critério de Tresca é aplicável, isto ocorrerá na máxima tensão de cisalhamento de  $Y/2$ , onde  $Y$  é a tensão uniaxial de escoamento do material. Para um material com coeficiente de Poisson de 0,3, a tensão de cisalhamento a uma profundidade de  $0,47a$  é  $0,47$  vezes a pressão média de contato. Portanto, a deformação plástica inicia na pressão de contato média equivalente a  $1,1 Y$ .

À medida que o carregamento normal é incrementado, o volume de escoamento plástico aumenta até, eventualmente, atingir a superfície. Pode ser demonstrado teoricamente através da análise por elementos finitos que isto ocorrerá em um metal com cargas de 50 a 100 vezes a carga de início do escoamento plástico, neste caso a área de contato é ainda extremamente pequena, com um raio tipicamente menor que 1% do raio da esfera. A pressão média sobre a área de contato atinge neste estágio em torno de  $3Y$  e remanesce próximo do mesmo valor para os aumentos subsequentes de carga. A independência da pressão média de contato em relação ao carregamento uma vez que a deformação plástica total tenha sido atingida, e a constante de proporcionalidade entre esta pressão e a tensão de escoamento do material sendo indentado, fornece as bases para o teste de dureza.

Para o caso de uma esfera macia pressionada contra um plano rígido, onde o escoamento ocorrerá na esfera ao invés do plano, similar resultado é obtido. Considerando que a extensão da deformação não é tão grande, restrições plásticas novamente aumentarão a pressão média de contato em torno de três vezes a tensão de escoamento uniaxial da esfera.

Podemos, portanto esperar que quando uma aspereza pressionada sobre uma superfície, qualquer que seja o formato, não importa muito qual componente escoará, a pressão média sobre a área de contato será sempre na ordem de três vezes a tensão uniaxial de escoamento do material mais macio. Mais importante, a área de contato deverá ser diretamente proporcional à carga.

### **3.1.2. Teoria Simplificada do Contato de Múltiplas Asperezas**

Podemos utilizar os conceitos acima comentados para um tratamento básico do contato entre duas superfícies rugosas. Se fizermos uma suposição simplificada que a superfície rugosa consiste de um conjunto de asperezas esféricas de raio e altura constante, e que cada uma deforma independentemente das outras, então podemos aplicar imediatamente os conceitos anteriores.

Cada aspereza suportará a mesma fração da carga total normal, e cada uma contribuirá com a mesma fração da área total de contato. Assumindo a contribuição de todas as asperezas em relação à área integral de contato, nós podemos mostrar que a área total real  $A$  estará relacionada com a carga total  $W$  da mesma forma que as áreas individuais de contato de cada aspereza  $\pi a^2$  estão relacionadas com a carga suportada por cada aspereza,  $w$ . Para o caso do contato puramente elástico:

$$A \propto W^{2/3} \qquad \text{Equação 3.4}$$

Para o caso do comportamento perfeitamente plástico das asperezas:

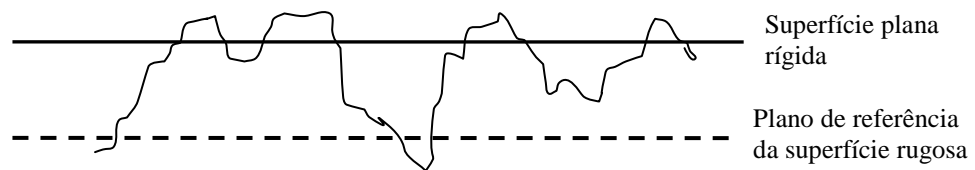
$$A \propto W \qquad \text{Equação 3.5}$$

### **3.1.3. Teoria Estatística do Contato de Múltiplas Asperezas**

Entretanto as superfícies reais não são compostas de asperezas uniformes que possuem os mesmos raios ou alturas; essas dimensões das irregularidades das superfícies possuem uma distribuição estatística. Quando ocorre o aumento da carga sobre uma superfície real, não é

somente a área de contato de cada aspereza individual que aumentará, mas também mais asperezas entraram em contato e estas terão que suportar uma fração da carga [HUTHINGS, 1996].

Uma das primeiras teorias estatística em relação ao contato de uma superfície rugosa foi apresentada por Greenwood e Williamson em 1966. No modelo apresentado é assumido que todas as asperezas em contato têm uma superfície esférica de mesmo raio  $r$ , e que deformarão elasticamente sobre carregamento conforme a equação de Hertz. A Figura 3.3 ilustra o contato de uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida assumida no modelo.



*Figura 3.3 - Modelo de contato entre uma superfície rugosa e uma superfície plana rígida. [Hutchings, 1996].*

Considerando que a altura de uma aspereza individual acima do plano de referencia é  $z$  e se a separação entre o plano de referência e a superfície plana,  $d$ , é menor que  $z$ , então a aspereza será comprimida elasticamente e suportará uma carga  $w$ , que pode ser deduzida pela teoria de Hertz:

$$w = \frac{4}{3} Er^{1/2} (z - d)^{3/2} \quad \text{Equação 3.6}$$

A altura das asperezas é estaticamente distribuída. A probabilidade que uma particular aspereza tenha uma altura entre  $z$  e  $z + dz$  será  $\varphi(z)dz$  onde  $\varphi(z)$  é uma função de densidade probabilidade que descreve a distribuição das alturas das asperezas.

A probabilidade que uma aspereza tenha contato com o plano da superfície oposta é igual à probabilidade que sua altura seja maior do que a separação dos planos,  $d$ :

$$prob(z > d) = \int_d^{\infty} \varphi(z) dz$$

Equação 3.7

Se existe um número total de  $N$  asperezas na superfície, então o número esperado de contatos,  $n$ , será dado por:

$$n = N \int_d^{\infty} \varphi(z) dz$$

Equação 3.8

A carga total,  $W$ , atuando sobre todas as asperezas será:

$$W = \frac{4}{3} NEr^{1/2} \int_d^{\infty} (z - d)^{3/2} \varphi(z) dz$$

Equação 3.9

Considerando uma distribuição estatística normal da altura das asperezas (normalmente, considera-se a altura da aspereza como o fator mais importante na morfologia), assume-se que a área real de contato não é mais exatamente proporcional à carga aplicada. Assim, outros fatores devem ser considerados, que levem em consideração algumas propriedades dos materiais envolvidos. A proporção de asperezas, nas quais o escoamento plástico ocorre, depende do índice de plasticidade ( $\psi$ ), definido por:

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

Equação 3.10

Onde  $E$  é definido na equação 3.2,  $H$  é a dureza da superfície e  $\sigma^*$  é o desvio padrão das distribuições das alturas das asperezas. A quantidade  $(\sigma^*/r)^{1/2}$  é, aproximadamente, igual à média das inclinações das asperezas ( $r$  é igual à largura das asperezas. Tanto  $\sigma^*$  quanto  $r$  descrevem a morfologia das asperezas).

A princípio, a proporção de asperezas em contato plástico é determinada pelos valores da tensão normal e do índice de plasticidade, mas na prática este último domina o comportamento. Para valores de  $\psi$  menores do que 0,6, o escoamento plástico das asperezas

só ocorreria a altíssimas pressões de contato, enquanto que valores maiores que um, a asperezas se deformariam plasticamente, mesmo para carregamentos muito leves. Para superfícies metálicas, produzidas por processos manuais de engenharia,  $\psi$  cai na faixa de 0,1 a 100 e, como pode ser visto na Figura 3.4, somente para superfícies muito bem polidas as asperezas permanecem em contato elástico. Para cerâmicas e polímeros, contudo, o contato elástico é muito mais provável de ocorrer do que plástico, uma vez que o valor  $E/H$  é, tipicamente, um décimo do valor encontrado para metais, levando a redução proporcional do valor do índice de plasticidade.

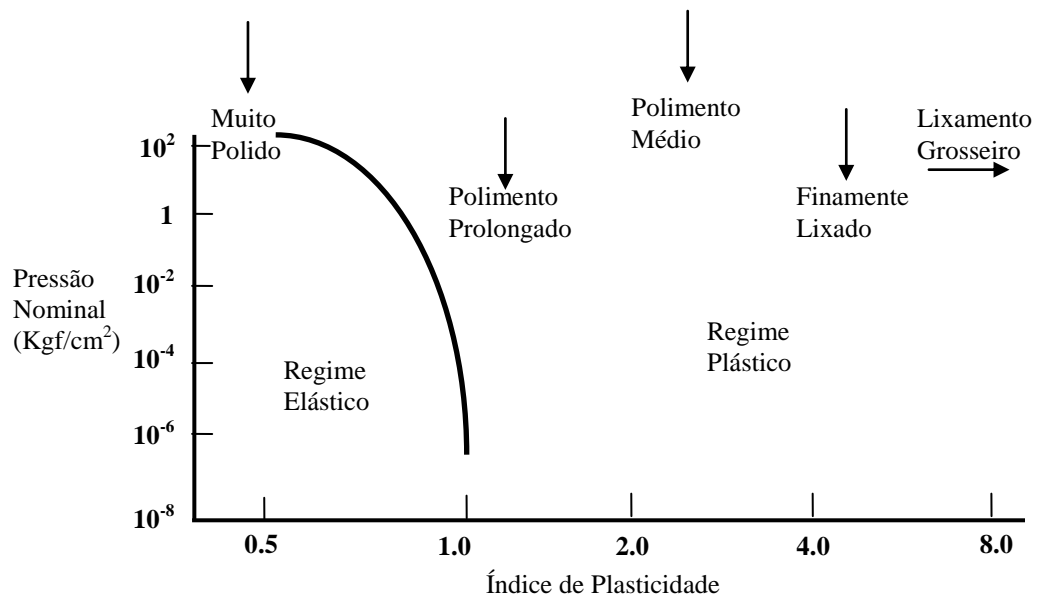


Figura 3.4 - Índice de plasticidade versus tensão de contato em função do grau de acabamento superficial. [Hutchings, 1996].

As teorias de contato entre superfícies rugosas e observações experimentais sugerem que, para muitos casos práticos de contatos entre metais, a maior parte do contato entre asperezas será plástica. A carga suportada por cada aspereza é diretamente proporcional a sua área de contato e a área real total de contato para toda a superfície será proporcional à carga normal, sendo menos dependente de uma detalhada distribuição estatística de alturas das asperezas (acabamento superficial).

Para materiais cerâmicos e polímeros, que apresentam baixos valores da razão  $E/H$ , o contato é muito mais provável de ser elástico, de forma que a tendência do material entrar em escoamento plástico ou não, depende muito mais de certas propriedades como módulo de elasticidade, dureza e rugosidade do que propriamente da carga aplicada.



Quando se considera que a máxima tensão de cisalhamento se localiza em um ponto abaixo do indentador, de  $0,47a$ , onde  $a$  é o raio do círculo de contato estabelecido, leva-se em consideração a condição ideal de contato Hertziano. Contudo, em situações reais, este ponto de máxima tensão de cisalhamento se deslocará em função da rugosidade superficial, ou melhor, em função da força de atrito gerada (coeficiente de atrito). Conforme visto na Figura 3.5 quanto maior é o atrito, mais próxima da superfície se localizará o ponto de máxima tensão cisalhante. Além disso, observa-se que ocorre o deslocamento das curvas para a direção do movimento (direita), o que acontece também devido à ação da força de atrito.

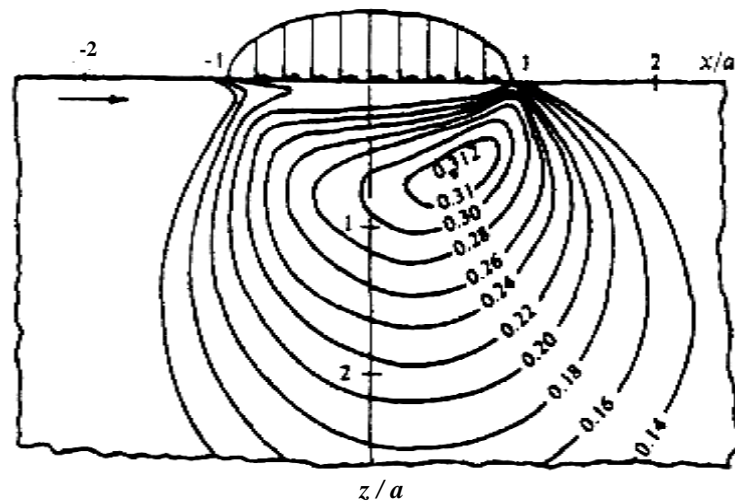


Figura 3.5 - Distribuição de máximas tensões de cisalhamento sub-superficiais para o caso da presença de atrito. [Mao; Sun e Bell, 1994].

Assim, com o deslocamento das curvas de máxima tensão cisalhante em direção à superfície, todas as tensões desenvolvidas pelo carregamento normal e força de atrito serão impostas na superfície levando a um desgaste severo.

Deve-se esclarecer que a rugosidade superficial é diferente do coeficiente de Atrito. Se forem considerados materiais iguais e mesmas condições de ensaio, o coeficiente de atrito é proporcional à rugosidade superficial. Contudo, se dois materiais diferentes forem comparados, o coeficiente de atrito depende, principalmente, das características superficiais de cada material considerado [KWIETNIEWSKI, 2000].

### 3.1.4. Atrito

A força conhecida como atrito poder ser definida como a resistência encontrada por um corpo quando em movimento sobre outro corpo. Esta definição abrangente abarca duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento. Distinguir o atrito por deslizamento do atrito por rolamento é útil, mas os dois não são mutuamente excludentes, e mesmo o movimento de rolamento aparentemente puro quase sempre envolve algum deslizamento.

Tanto no deslizamento como no rolamento ideal, como ilustrado na Figura 3.6, a força tangencial  $F$  é necessária para mover o corpo que esta acima da face estacionária. A razão entre a força de atrito e a carga normal  $W$  é conhecida como o coeficiente de atrito, e é normalmente representado pelo símbolo  $\mu$ :

$$\mu = \frac{F}{W} \quad \text{Equação 3.11}$$

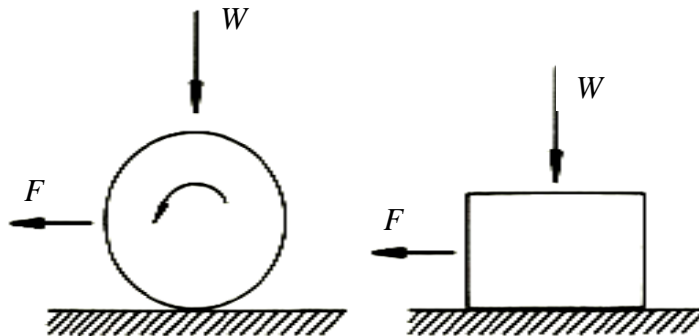


Figura 3.6 - Desenvolvimento de atrito quando um corpo experimenta movimento em relação a outro corpo. [Hutchings, 1996].

A magnitude da força de atrito é convenientemente descrita pelo valor do coeficiente de atrito, o qual pode varia dentro de um extenso range: a partir de 0,001 (levíssimo carregamento em rolamentos) até valores maiores que 10 (metais limpos deslizando entre si no vácuo). Para os materiais mais comuns deslizando ao ar o valor de  $\mu$  está numa faixa mais estreita de 0,1 a 1.

Sob algumas condições de deslizamento,  $\mu$  para um determinado par de materiais e na existência de condições (ou ausência) fixas de lubrificação pode ser quase constante. Esta

observação leva para a formulação de duas leis empíricas para o atrito por deslizamento. As leis de atrito podem ser enumeradas como segue [HUTHINGS, 1996]:

(1) A força de atrito é proporcional ao carregamento normal conforme indica a Equação 3.11.

(2) A força de atrito é independente da área aparente de contato.

A estas duas é adicionada a terceira lei, frequentemente atribuída a Coulomb [1785]:

(3) A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

De acordo com a primeira lei, a força de atrito é proporcional à carga aplicada, mas o coeficiente de atrito é independente do carregamento normal.

Contudo, de acordo com a segunda lei do atrito, tanto o atrito desenvolvido como o  $\mu$  são independentes da área de contato aparente. O contato real que se estabelece entre duas superfícies só ocorre em pontos ou asperezas das superfícies, de forma que esta área real de contato é (ou poderá ser) apenas uma fração da área de contato nominal ou aparente. É este contato entre as asperezas que irá determinar as características do atrito desenvolvido.

A terceira lei de atrito afirma que a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento. No início do movimento obtém-se um valor do coeficiente de atrito ( $\mu$  estático) que é maior do que o valor que se estabelece e permanece constante após um determinado tempo de deslizamento ( $\mu$  dinâmico).

De acordo com o modelo de Bouden e Tabor, citado por Hutchings, a força de atrito total é composta por duas componentes, isto é, pela força de deformação, necessária para causar a penetração das asperezas mais duras nas asperezas mais macia e pela força de adesão desenvolvida nas áreas reais de contato entre as duas superfícies (formação de “junções” de asperezas).

Para alguns materiais a componente da adesão é mais importante. O que ocorre é que, se as duas superfícies em contato estiverem livres de óxidos, gases adsorvidos ou contaminantes e sob um carregamento externo, um contato íntimo pode se desenvolver, de forma que as forças de adesão podem ser mais fortes do que as forças coesivas do material de menor resistência, levando a uma considerável transferência de material da superfície mais fraca para a mais resistente.

O tratamento matemático para estimar a magnitude da força de atrito total resulta na obtenção de valores bem menores do que aqueles observados na prática. Assim, assume-se que outros efeitos devem estar agindo no sistema. Dois efeitos principais podem ser citados: o efeito do encruamento e do crescimento de junções. Considerando que a área total de contato  $A$  como sendo a soma das áreas das seções transversais de todas as junções de asperezas e assumindo-se que todas estas junções formadas tem a mesma resistência ao cisalhamento  $s$ , então a força de atrito devido à adesão é dada por:

$$F_{ADESÃO} = A \times s \quad \text{Equação 3.12}$$

Com o encruamento dos materiais durante o processo de desgaste, formam-se junções de asperezas com maior tensão de cisalhamento, causando aumento da componente da força de atrito total relativa à adesão, ver Equação 3.12. Contudo, ainda que o encruamento possa ter uma importante influência sobre a adesão, considera-se que o crescimento da junção seja mais relevante.

#### **3.1.4.1. O Atrito dos Metais**

Para situações encontradas na prática, a maior parte do contato que ocorre entre metais é um contato que envolve deformação plástica ou simplesmente denominada de contato plástico. Assim, a combinação do carregamento externo e a força de atrito gerada pelo movimento relativo das duas superfícies levam ao aumento da área de contato plástico  $A$  ou “crescimento da junção”. Este efeito, com base na Equação 3.12, causa aumento da componente do atrito devido à adesão.

Os comentários acima dizem respeito às superfícies livres de filmes ou em deslizamento em vácuo. Para estas situações, uma forte adesão é gerada e um grande desgaste é observado. Com pequena quantidade ou ausência de contaminantes ou filmes superficiais, o crescimento da junção só é limitado pela ductilidade do material. Contudo, em situações normais de operação, os óxidos, gases adsorvidos e contaminantes em geral fazem com que ocorra a diminuição da força de atrito total desenvolvida. Estes filmes que se localizam entre as junções de asperezas reduzem a resistência ao cisalhamento  $s$  destas junções, de forma que a componente de atrito por adesão é diminuída. A presença destes filmes superficiais também limita o crescimento da junção. Os efeitos resultantes da presença de filmes superficiais justificam a utilização de lubrificantes.

Pode-se citar o ouro que exibe um alto valor do coeficiente de atrito. Este metal não forma óxidos, e ainda que gases adsorvidos possam estar presentes, as junções de asperezas tendem a ser fortes. O ouro também é dúctil, fazendo com que ocorra um considerável crescimento de junção. Ambos os fatores contribuem para o alto atrito observado quando o ouro desliza sobre ele mesmo.

Todos os outros metais apresentam certo grau de oxidação, formando filmes de óxidos da ordem de 1 a 10nm de espessura. Estes filmes são de extrema importância no comportamento ao atrito, visto que o atrito entre óxidos ou entre óxidos e superfícies metálicas nuas é quase sempre menor do que o atrito entre duas superfícies metálicas. Na Figura 3.7 é mostrado o efeito do oxigênio na fricção em deslizamento de ferro puro sobre ele mesmo. Em vácuo, é alto o coeficiente de atrito e um severo desgaste é observado. Com o aumento da pressão parcial de oxigênio, ocorre a queda do coeficiente de atrito até se estabilizar a pressão atmosférica.

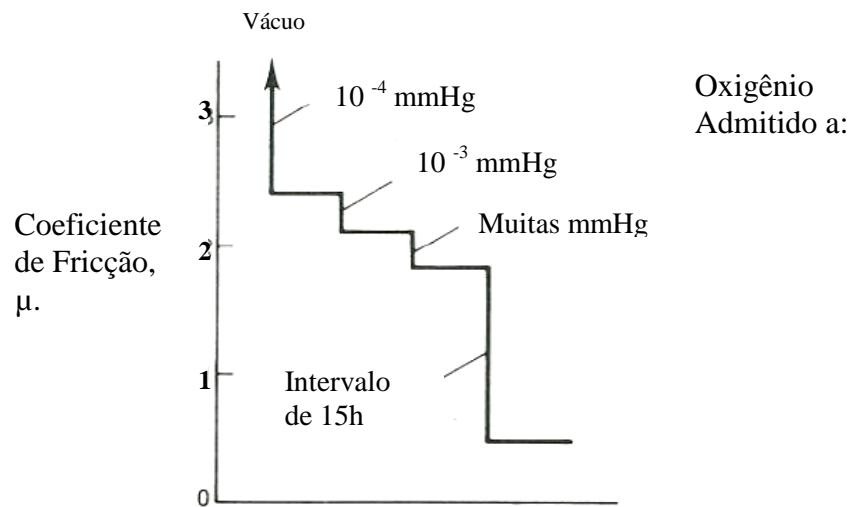


Figura 3.7 - Efeito da pressão de oxigênio no coeficiente de atrito desenvolvido no ferro puro. [Hutchings, 1996].

Contudo, o efeito da presença de um filme de óxido no atrito desenvolvido pode ser radicalmente alterado se ocorrer à penetração ou ruptura desta camada de óxido. A Figura 3.8 ilustra este efeito para o caso do cobre. Para baixos carregamentos normais, o filme de óxido, efetivamente, separa as duas superfícies, prevenindo ou reduzindo o contato metálico. Nesta situação a resistência elétrica da interface é alta e é baixo o coeficiente de atrito em

deslizamento (a medida da resistência elétrica da interface das superfícies em contato é uma outra forma de avaliar o atrito. Alta resistência elétrica indica o contato entre óxidos ou entre óxidos e superfícies metálicas). Quando a carga normal é aumentada, a transição ocorre para um alto valor de  $\mu$ , a resistência elétrica cai acentuadamente (contato metálico) e um severo desgaste é observado.

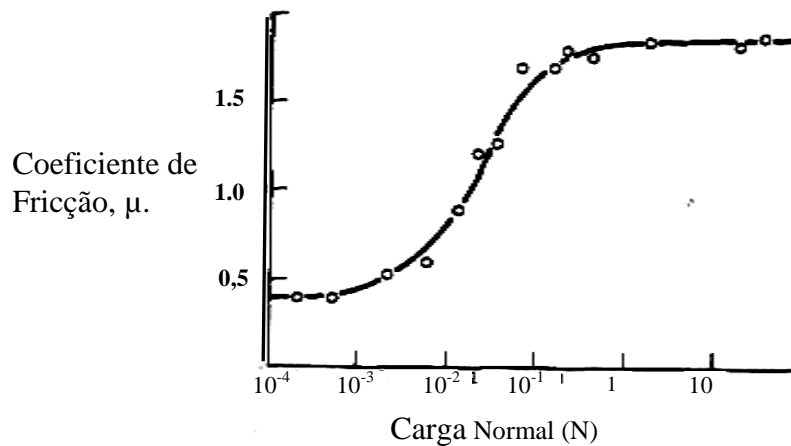


Figura 3.8 – Efeito da presença de um filme de óxido no atrito desenvolvido no cobre em função da carga aplicada. [Hutchings, 1996].

Para metais muito macios e dúcteis, tais como o estanho e o índio, o contato metálico ocorre mesmo para muito baixos carregamentos, de forma que o coeficiente de atrito é alto e não muda marcadamente com o aumento da carga. Nesta situação, ainda que existam filmes de óxidos na superfície, estes são penetrados facilmente, uma vez que o substrato macio não oferece resistência mecânica (suporte à camada de óxido).

Assim, pode-se dizer que o atrito de metais puros em deslizamento entre si ao ar, com superfícies não lubrificadas, é frequentemente determinado pela presença de óxidos na superfície. Se o filme de óxido não é penetrado durante o deslizamento, o efeito ou prejuízo à superfície é pequeno e o próprio óxido determina o coeficiente de atrito. Quando ocorre a ruptura do filme de óxido, um alto atrito é desenvolvido e severo será o desgaste.

A presença de filmes de óxidos também é importante no atrito de metais dissimilares ou ligas. Geralmente o coeficiente de atrito para uma liga metálica tende a ser menor do que aquele desenvolvido para os metais puros. Contudo, algumas vezes, podem-se observar efeitos adversos de constituintes minoritários no comportamento em atrito da liga. Por exemplo, o alumínio em aços tende a segregar (ou difundir) para a superfície e, em vácuo,

tende a aumentar o coeficiente de atrito. A oxidação da superfície, contudo, promove a formação de óxido de alumínio, o qual reduz o atrito. Outro exemplo é o ferro fundido cinzento, que por apresentar carbono na forma de grafite reduz o atrito quando em deslizamento contra ele mesmo ou contra outros materiais.

Quando a temperatura do metal em deslizamento é aumentada, vários efeitos podem ocorrer, tais como mudanças nas propriedades mecânicas, aumento da taxa de oxidação e possibilidade de transformações de fases. Todos estes fatores influenciarão no comportamento ao atrito.

A Figura 3.9 apresenta medidas de  $\mu$  realizadas em ultra alto vácuo (eliminação do efeito de filmes de superficiais) para metais de três estruturas cristalinas deslizando sobre eles mesmos em função da temperatura. Fica evidente o efeito da temperatura no comportamento em deformação plástica e a consequente influência sobre o atrito. Para ambos os grupo de metais, cúbicos de face centrada e cúbica de corpo centrado ocorrem transições no atrito. Nos metais cúbicos de face centrada, estas transições estão associadas a marcante mudança na taxa de encruamento (a qual é maior em baixas temperaturas), enquanto que para os metais cúbicos de corpo centrado as transições coincidem com a transição dúctil/frágil.

Os metais hexagonais de empacotamento fechado não apresentam mudanças no comportamento do atrito com a temperatura (para esta faixa de temperatura avaliada). Contudo, existe uma clara correlação entre a ductilidade de metais individuais e os seus valores de  $\mu$ . O titânio e o zircônio, por exemplo, por serem muito dúcteis, apresentam maior atrito do que o berílio e o cobalto que apresentam baixa ductilidade devida limitada número de sistemas de escorregamento operantes a baixas temperaturas. Em geral, quanto mais dúctil é o material maior será o atrito desenvolvido.

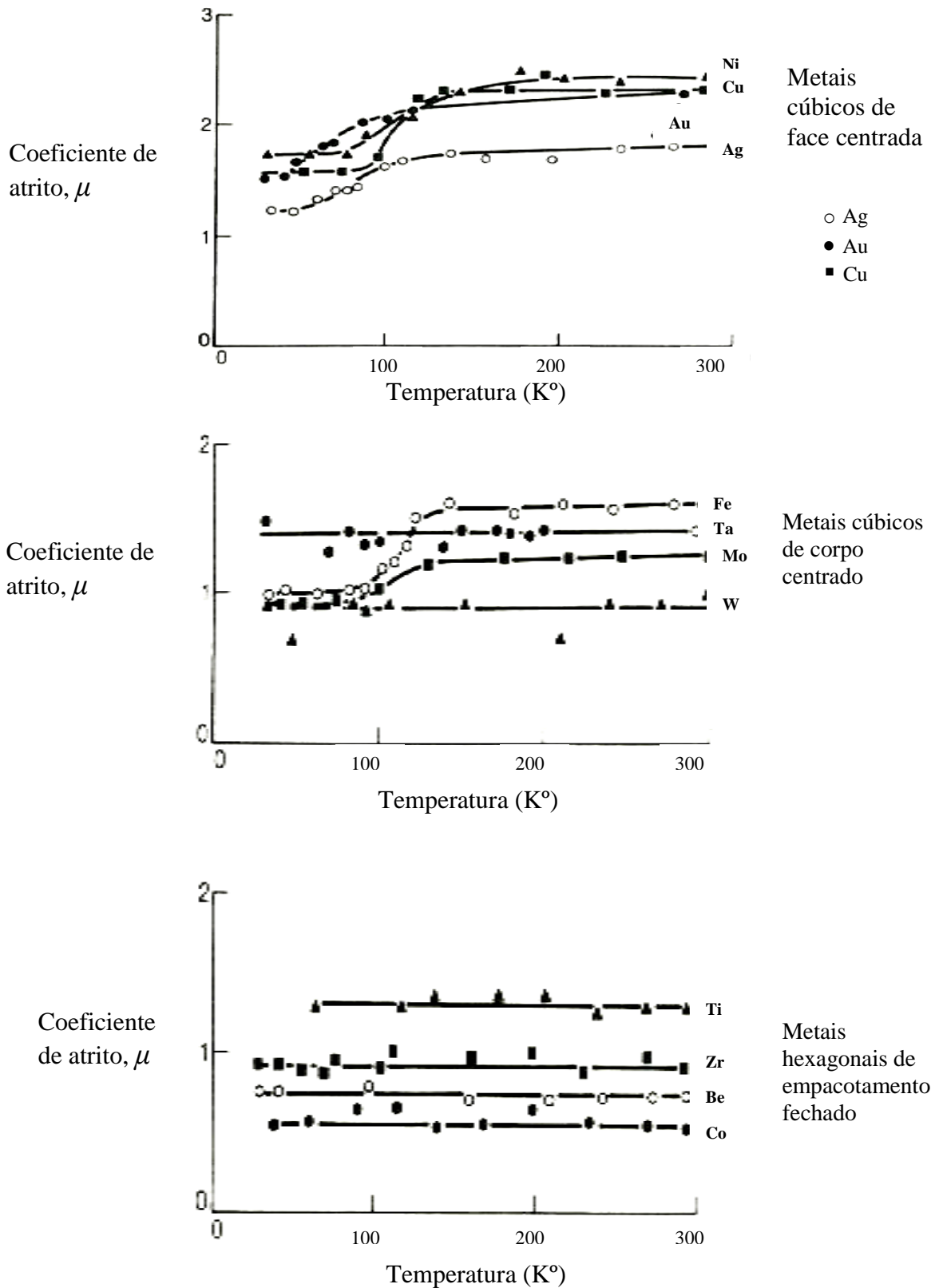


Figura 3.9 – Efeito da temperatura sobre o atrito de três grupos de estruturas cristalinas. [Hutchings, 1996].



Transformações de fase e a conseqüente influência nas propriedades mecânicas dos materiais podem resultar em grandes mudanças no atrito. Talvez o efeito mais evidente seja o efeito da fusão do material. Quando o material se aproxima de seu ponto fusão, ocorre aumento de ductilidade e adesão nos pontos de contato (asperezas), levando a um pronunciado aumento do atrito. Quando uma das superfícies em deslizamento funde, contudo, a força de atrito cai para um valor determinado pelas forças de viscosidade na camada líquida. Este feito é observado em deslizamento de metais à alta velocidade. O calor de atrito aumenta a temperatura na interface até o ponto de fusão e o deslizamento ocorre em condições de efetiva lubrificação hidrodinâmica (as superfícies em deslizamento são separadas por um filme relativamente fino de lubrificante fluído e a carga normal é suportada pela pressão dentro desse filme, a qual é gerada hidrodinamicamente).

Transformações de estado sólido também influenciam no atrito. Na Figura 3.10 é apresentada a variação do atrito do cobalto com a temperatura. O cobalto exibe uma transformação a 417°C de uma estrutura hexagonal de empacotamento fechado de limitada ductilidade para cúbica de face centrada, a qual é dúctil. Com o aumento de temperatura local pelo atrito, observa-se a alteração do coeficiente de atrito.

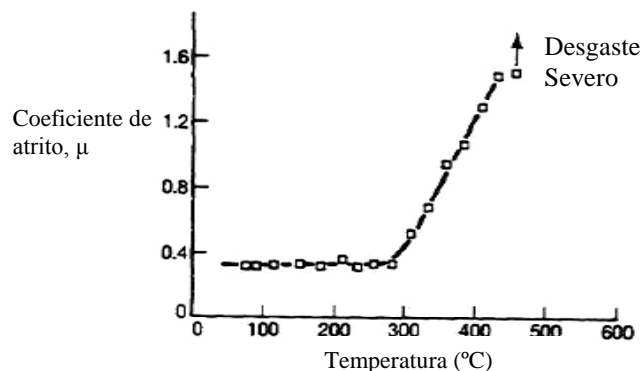


Figura 3.10- Efeito da transformação em estado sólido do cobalto sob as características de atrito. [Hutchings, 1996].

### 3.1.5. Tipos de Desgastes

Desgaste pode ser definido de modo geral como o dano de uma superfície sólida causado pela remoção ou deslocamento de material por ação mecânica de um sólido, líquido ou gás. Uma gradual deterioração está frequentemente relacionada, e a suposição que o desgaste é inteiramente mecânico não deve ser aceita porque o fenômeno de corrosão química pode estar associado.

Desgaste tem sido categorizado em diferentes caminhos. Do ponto de vista do fenômeno, a abordagem é baseada na descrição macroscópica da aparência das superfícies desgastadas, por exemplo: *scuffing*, *rubbing* e *fretting*. A utilidade desse sistema é limitada porque não é focado no mecanismo do desgaste, dessa forma conta quase sempre com soluções empíricas para problemas de desgaste.

Outra forma de categorizar o desgaste é considerar o mecanismo fundamental atuante. Infelizmente este enfoque é complicado pelo fato que mais de um mecanismo pode estar atuando ao mesmo tempo e pela falta suficiente de informação. Um enfoque um tanto diferente descreve o mecanismo de desgaste por deslizamento baseando-se na forma e tamanho das partículas geradas.

Enquanto a terminologia de desgaste não está ajustada e as definições básicas não estão padronizadas, nesse momento é largamente aceito que existem três tipos básicos de desgaste: adesivo, abrasivo e erosivo. A teoria de delaminação incorpora elementos de adesão e abrasão. Em adição, existem outros tipos de desgaste que, embora não considerados como principais, são algumas vezes tratados em separado. Estão incluídos nestes, a fadiga na superfície, *fretting* e cavitação erosão. Frequentemente, mais de um mecanismo estão atuando simultaneamente, e é difícil separar os efeitos de um em relação ao outro [AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995].

Tradicionalmente são aceitos quatro modos de desgaste que estão representados na Figura 3.11.

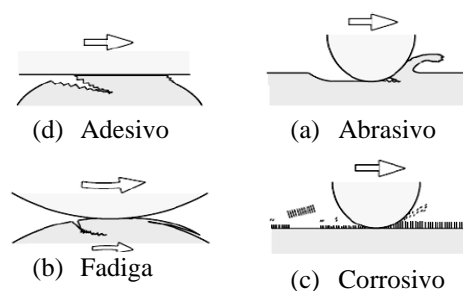


Figura 3.11 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste. [Kato, 2001].

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando a geração de um terceiro corpo e a transferência completa de material. No desgaste abrasivo ocorre a remoção do material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da natureza

dos dois materiais em contato. Quando o desgaste é ocasionado pelo número alto de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga. Finalmente, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reações devidas às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como triboquímicas e produzem uma camada entre as superfícies que é removida depois.

No caso de extrusoras podemos citar os seguintes fatores para ocorrer algum tipo de desgaste:

- a) Contato metal-metal entre rosca e barril devido ao desalinhamento ou excentricidade da rosca e/ou barril.
- b) Superfícies incompatíveis entre rosca/barril.
- c) Produto corrosivo e abrasivo.
- d) Operando com variáveis de processo acima dos limites de projeto.

#### **3.1.5.1. Desgaste Abrasivo**

Este tipo de desgaste ocorre quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais macia provocando uma serie de ranhuras sobre ela [RABINOWICKZ, 1965].

É causado pelo deslocamento de material de uma superfície sólida devida partículas duras ou protuberâncias deslizando ao longo da superfície. A Organização para Econômica Cooperação e Desenvolvimento OECD dividiu abrasão em abrasão por atrito e abrasão erosão. Abrasão por atrito ou simplesmente abrasão pode ocorrer devido à existência de partículas soltas capturadas entre duas superfícies solidas em movimento relativo ou devido a partículas aderidas em uma das superfícies. Pode ser também devido à existência de protuberâncias duras ou asperezas em uma superfície que esta atritando sobre outra superfície. A fonte de partículas pode ser externa ou fragmentos do próprio desgaste (podendo ser originada no desgaste adesivo ou abrasivo). Partículas contidas dentro de um fluido em movimento incidindo quase paralelo a uma superfície sólida é discutido no tópico erosão.

Geralmente uma partícula abrasiva ou protuberância movimentando-se através de uma superfície e que submetida a uma carga penetra na superfície, produzirá ranhuras (fluxo plástico para os lados da ranhura) sem direta remoção de material. O material que escoado

para os lados da ranhura pode fraturar no primeiro passe de uma partícula abrasiva ou depois de repetidas deformações causada por mais de uma partícula.

Uma expressão comum para a taxa de volume do desgaste abrasivo por unidade de comprimento de deslizamento,  $V_{ab}$ , é:

$$V_{ab} = \frac{dQ}{dl} \quad \text{Equação 3.14}$$

Onde  $Q$  é o volume removido pela abrasão, e  $l$  é a distância do deslizamento. Devido o volume  $Q$  ser em função da profundidade da penetração da partícula:

$$V_{ab} \propto \frac{W}{H} \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde  $W$  é a carga, e  $H$  a dureza da superfície sendo arranhada. Uma expressão alternativa para  $V$  considera o volume de desgaste por unidade de área por unidade da distancia de deslizamento:

$$V_{ab} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{\sigma}{H} \quad \text{Equação 3.16}$$

Onde  $k_1$  é a probabilidade de formação de fragmentos de desgaste,  $k_2$  é a proporção média de volume da ranhura removido quando fragmentos são formados,  $k_3$  é uma constante que depende da forma da partícula ou protuberância,  $\sigma$  é a carga aplicada por unidade de área, e  $H$  é a dureza da superfície sendo arranhada. As equações 3.14, 3.15 e 3.16 assume que as partículas abrasivas são mais duras que a superfície.

Extenso encruamento ocorre em torno das ranhuras provocadas pelo desgaste abrasivo na maioria dos metais.

Abrasão é o mais frequente tipo de desgaste encontrado na indústria, correspondendo em torno de 50% dos eventos. O desgaste adesivo ocupa a segunda posição no ranking dos principais motivos geradores desgaste com 15% dos eventos [CASSINA, 1992].

### 3.1.5.2. Desgaste Adesivo

Desgaste adesivo tem sido identificado com um variado grau de precisão, pelos termos de *scoring*, *galling*, *seizing* e *scuffing*. Foi definido pela Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) como o desgaste pela transferência de material de uma

superfície para outra durante o movimento relativo e devido a um processo de soldagem na fase sólida; partículas que são removidas de uma superfície são permanentemente ou temporariamente anexadas à outra superfície.

Superfícies sólidas são raramente lisas, pelo contrario são formadas por micro ou macroscópicas asperezas de variadas formas. Quando duas dessas superfícies são colocadas em contato sob a ação de uma carga normal, asperezas entram em contato e deformação elástica ou plástica ocorre até que a área real de contato seja suficiente para manter a carga normal. Uma ligação pode então ocorrer entre as duas superfícies, que por sua vez é mais forte que a intrínseca resistência do material mais fraco em contato. Quando o movimento relativo entre as duas superfícies ocorre, o material mais fraco falha, então o material é transferido para a superfície de contato. Em interações subsequentes, este material transferido pode ser novamente transferido para superfície original ou pode ser totalmente separada como partícula oriunda do desgaste com morfologia irregular. O modelo de desgaste proposto por Holm e Archad é bastante simples, e nele se destacam as principais variáveis envolvidas nos no desgaste por deslizamento e abrasivo. A equação conhecida como equação de Archad é:

$$V_{ad} = \frac{kSL}{3H} \quad \text{ou} \quad V_{ad} = \frac{KSL}{H} \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde  $V$  é o volume de desgaste,  $S$  é a distancia do deslizamento,  $L$  é a carga,  $H$  é a dureza do material mais macio, e  $k$  é o fator de probabilidade que uma dada área de contato irá fraturar no material mais fraco.

O termo desgaste adesivo é algumas vezes usado para descrever desgaste por deslizamento, mas seu uso pode ser equivocado. Ainda que a adesão exerça uma importante função no desgaste por deslizamento, este é somente um dos vários processos físicos e químicos que podem ocorrer. Por exemplo, em deslizamento também podem ocorrer outros mecanismos de desgaste como o desgaste por oxidação, em que um aumento de temperatura local, provocado pelo atrito, pode levar ao desgaste de uma das partes em contato ou de ambas [KWIETNIEWSKI, 2000]. Portanto devemos utilizar o termo desgaste por deslizamento como um termo geral. As palavras *scuffing*, *scoring* e *galling* são frequentemente associadas com severo desgaste por deslizamento, mas são mal definidas, e o uso delas varia entre os dois lados do atlântico. *Scuffing*, no UK, refere-se a um dano localizado na superfície com soldagem no estado sólido entre as superfícies deslizantes. O termo é frequentemente usado para descrever a interrupção da lubrificação, a elevadas velocidades de deslizamentos. Nos US, o termo *scoring* é usado algumas vezes como um

sinônimo de *scuffing* conforme descrito acima, e ambos os termos podem também implicar em aranhões por partículas abrasivas. *Galling* representa uma forma mais severa de *scuffing*, devido à soldagem local, e esta associada a danos bruto da superfície. Esta palavra está frequentemente se referindo a danos resultantes do deslizamento não lubrificado a baixa velocidade, caracterizado pela rugosidade severa nas superfícies e deslocamento de fragmentos grandes de material. *Galling* pode ocorrer num sistema lubrificado, quando o filme lubrificante é interrompido, e pode ser seguido pela *seizure* (agarramento) das superfícies e conseqüente falha bruta do sistema de escorregamento [HUTHINGS, 1996].

Adesão, ou *galling*, ocorre a partir do contato metal-metal em equipamentos de processos como, por exemplo, o contato entre a rosca e o barril de uma extrusora. As superfícies dos metais em contato sujeitas as temperaturas extremas, frequentemente e momentaneamente soldam-se e trincam sob o movimento de separação, depositando partículas de metal no material sendo processado pelo equipamento [COLMONOY, 1991].

Um fator importante que afeta a adesão é a compatibilidade metalúrgica dos materiais em contato. A compatibilidade metalúrgica entre dois metais é definida como a alta solubilidade mútua ou a formação de compostos intermetálicos. A compatibilidade metalúrgica nesse caso está relacionada com a aderência mútua, a qual age no sentido de evitar o deslizamento, tornando-os incompatíveis em termos de amenizar o atrito. São definidas duas condições para a incompatibilidade metalúrgica, significando que os metais podem, então, deslizar um sobre o outro com intensidade de arrancamento de material relativamente baixa [NORTON, 2004]:

a) Os metais devem ser insolúveis um no outro, com nenhum dos materiais sendo dissolvido no outro nem formando uma liga com ele.

b) Ao menos um dos materiais deve ser do subgrupo B, isto é, os elementos à direita da coluna Ni-Pd-Pt na tabela periódica.

Rabinowicz [1980] propôs um diagrama de compatibilidade para pares de metais puros, conforme Figura 3.12 abaixo.

As combinações indicadas como completamente insolúveis indicam solubilidade mútua desprezível, e também duas fases distintas coexistindo no estado líquido; estes geralmente formam pares compatíveis em relação à tribologia. Pares de metais idênticos são completamente solúveis mutualmente e indicam baixa compatibilidade em relação às propriedades tribológicas. Em geral, pares de metais em movimento de deslizamento com alta

solubilidade mútua indicam baixa compatibilidade tribológica e altos valores de  $K$  (Coeficiente de desgaste); baixa solubilidade mútua leva a boa compatibilidade e é necessário para baixas taxas de desgastes.

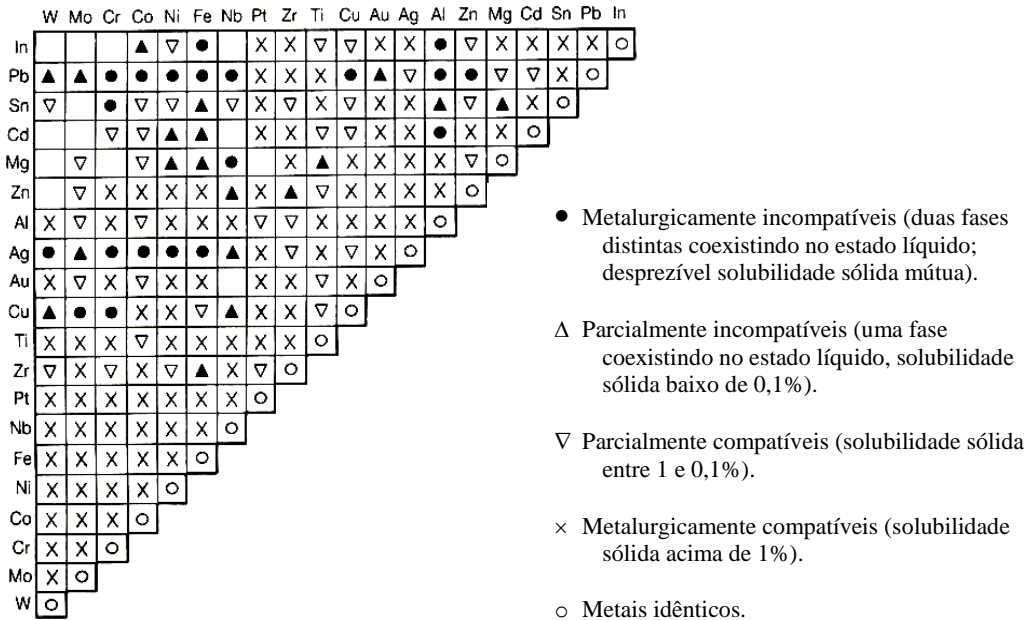


Figura 3.12- Diagrama de compatibilidade para pares de metais baseado em diagramas de fase binários proposto por Rabinowicz. [Hutchings, 1996].

Metais idênticos e metalurgicamente compatíveis não devem ser usados em situações com deslizamento e sem lubrificação.

A adesão das asperezas só pode ocorrer se o material estiver limpo e livre de contaminantes. Os contaminantes podem ser na forma de óxidos, óleos da pele humana impregnados no manuseio, umidade atmosférica, etc. Os contaminantes nesse caso, também incluem materiais deliberadamente introduzidos na interface como revestimentos ou lubrificantes. Uma das funções principais de um lubrificante é evitar essas adesões e, com isso reduzir o atrito e os danos à superfície. Um filme de lubrificante efetivo isola os dois materiais e pode evitar a adesão, mesmo entre materiais idênticos.

### 3.1.5.3. Delaminação

A teoria foi desenvolvida para descrever o desgaste de superfícies em contato de deslizamento baseado na delaminação da superfície. A teoria é fortemente vinculada ao comportamento do atrito e postula uma sequência de eventos que acarreta a perda de material

na forma de finas laminas. Inicialmente, o contato entre duas superfícies ocorre nas asperezas que irão presumidamente deformar e/ou fraturar facilmente, escoando para a superfície de forma relativamente suave. Como resultado da tração na superfície, a deformação plástica da camada da superfície acarreta a geração de trincas subsuperficiais. Estas trincas são nucleadas abaixo da superfície devido ao estado tri-axial de tensões compressivas na superfície que previne a nucleação de trincas. As trincas são normalmente nucleadas depois de repetidos carregamentos. Elas podem iniciar em segundas fases ou em particulares, se presente; a nucleação em um material homogêneo não é muito entendida ainda. As trincas são propagadas por uma distância paralela a superfície antes de eventualmente se estenderem até ela e liberarem fragmentos.

A profundidade da nucleação e distancia de propagação é uma função das propriedades do material, assim como das características do atrito e do carregamento da superfície. O controle de nucleação e taxa de propagação depende de varias características dos materiais. Pode se esperar controlar a nucleação de trincas em materiais que deformam plasticamente a baixos níveis de tensão ou que tenha taxa rápidas de propagação de trincas. É interessante observar que novas asperezas podem surgir como resultado das áreas de delaminação.

Delaminação é normalmente causada quando a carga limite (resistência) da superfície de revestimento duro é muito maior do que a do metal base. Em elevadas cargas, o metal base pode vir a fraturar, causando trincas, as quais progredirão para superfície, causando pontos frágeis no revestimento. Desgaste por delaminação pode também ser resultante do impróprio pré-aquecimento e/ou temperaturas de interpases durante o processo de aplicação do revestimento duro, ou ainda pela retenção de escória ou óxidos entre os passes do revestimento [COLMONOY 1991].

#### **3.1.5.4. Fadiga Superficial**

Quando duas superfícies estão em contato através de rolamento puro, ou quando ocorre o rolamento em combinação com uma pequena porção de deslizamento, um mecanismo de falha de superfície entra em cena, chamado fadiga superficial. Rolamentos de esferas ou de cilindros trabalham com contato de rolamento puro, com 1% de deslizamento somente. Dentes de engrenagem possuem um deslizamento significativo no contato e isso altera significativamente o estado de tensões. Os Cilindros de laminação podem funcionar com ou sem deslizamento.



Considerando o caso de uma esfera rolando em linha reta sobre uma superfície plana sem deslizamento e com carregamento normal constante, se a carga for tal que o material é solicitado abaixo do ponto de escoamento, a deformação na região de contato será elástica e a superfície retornará a sua geometria curva após passar pelo contato. O mesmo ponto na esfera entrará novamente em contato com a superfície plana a cada revolução sucessiva, As tensões resultantes na região de contato são denominadas tensões de contato ou tensões de Hertz. As tensões de contato nesse pequeno volume da esfera são repetidas na frequência de rotação, isso, com o tempo, levarão á fadiga superficial [Norton 2004].

As tensões principais no centro do contato são todos de compressão e não de tração. A tensão normal de compressão é máxima na superfície e a de tensão de cisalhamento é máxima abaixo da superfície. Acredita-se que devido às tensões cíclicas, esta tensão de cisalhamento pode levar a uma falha por fadiga do material. É importante lembrar que falhas por fadiga são iniciadas por tensões de cisalhamento e se propagam devido a tensões de tração. Esta teoria é reforçada pela probabilidade de existir abaixo da superfície uma trinca (ou se formar) que logo se propaga devido ao carregamento cíclico, podendo chegar à superfície lascando-a e fazendo surgir pequenas porções de partículas macroscópicas com a correspondente formação de crateras (*pitting*). Quando o processo de formação de crateras se inicia, o acabamento da superfície é comprometido e rapidamente se transforma em falha por lascamento (*spalling*), gerando porções maiores de perdas de material da superfície. As partículas que são removidas tendem a ser grandes e as trincas de fadiga superficial são sempre inclinadas em relação à superfície, formando com ela um ângulo agudo e aprofundando-se na direção do movimento do rolamento da superfície oposta.

### **3.1.6. Efeito da Lubrificação no Desgaste entre Superfícies**

Um importante meio de reduzir o desgaste é a lubrificação. A lubrificação não somente reduz o consumo de energia necessário para superar o atrito, mas também protege as superfícies em contato de deslizamento e rolamento do desgaste excessivo. Entretanto, mesmo com lubrificação, ocorrerá ainda desgaste.

O desgaste de superfícies com lubrificação é geralmente moderado e gera pequeníssimas partículas de tamanho de 1 a 2  $\mu\text{m}$ . Sob esta condição o desgaste predominante é abrasivo ou delaminação.

As características de uma superfície lubrificada que desgastou são diferentes daquela superfície que desgastou na ausência de lubrificante. Examinando superfícies submetidas ao deslizamento, através de potente microscópio eletrônico foi revelado que, quando um lubrificante esta presente, o desgaste ocorrerá por deformação das superfícies das asperezas mais elevadas, ao invés de *galling e tearing*, predominante no desgaste na ausência de lubrificante. As rugosidades mais elevadas entram em contato primeiramente e são submetidas a elevadas tensões de contato, a qual provocará o escoamento plástico. Quando o topo das rugosidades deforma, ocorre a formação de finas línguas de material extrudado, que, quebrará subsequentemente, formando partículas finas. Dessa forma a superfície é gradualmente aplainada ou alisada à medida que mais rugosidades entram em contato.

Adesão metálica e solda fria caracterizam o processo de desgaste na ausência de um lubrificante, porém, condições de desgaste não lubrificadas são difíceis de estabelecer devido, na maioria das situações práticas, existe algum tipo de lubrificante em qualquer superfície submetida a deslizamento ou rolamento. A natural formação de óxidos sobre as superfícies da maioria dos metais, devido à atmosfera e contaminantes, fornece uma variedade enorme de moléculas orgânicas e inorgânicas adsorvidas. Com os contaminantes sobre a superfície ocorre uma proteção, da mesma forma quando utilizado lubrificantes. Somente quando as superfícies metálicas são mantidas em um ambiente de ultra alto vácuo e são realmente limpas, como por exemplo, por feixe eletrônico ou arco elétrico, elas serão verdadeiramente não lubrificadas. Nesta condição, a solda fria das superfícies ocorrerá imediatamente ao contato.

Os filmes de contaminantes sobre as superfícies podem ser penetrados submetidos à alta tensão de contato, resultando em solda fria das asperezas em contato. Se a junção da aspereza é mais forte do que o mais fracos dos dois metais em contato, o movimento de deslizamento irá causar cisalhamento sub-superficial da junção, e uma partícula maior que a junção poderá ser arrancada da superfície.

O aumento de carregamento (carga normal) acentua diretamente as tensões desenvolvidas, aumentando o prejuízo mecânico (desgaste). O contato entre metais é predominantemente plástico. A carga normal também define a magnitude e a posição da máxima tensão de cisalhamento desenvolvida pela componente da força de atrito, causada pelo movimento de deslizamento. Contudo, esta posição de máxima tensão cisalhante é função do coeficiente de atrito gerado na superfície. Para valores de  $\mu$  menores que 0,3 a máxima tensão de cisalhamento localiza-se abaixo da superfície e um pequeno desgaste é

observado. Esta condição é típica para um sistema lubrificado ou sistema que apresenta uma camada de óxido protetora. Para valores de  $\mu$  maiores do que 0,3, a máxima tensão de cisalhamento é observada junto à superfície, levando a grandes deformações plásticas e acentuado desgaste.

Em um sistema lubrificado por fluído, a razão  $\lambda$  que é definida como sendo a razão entre a espessura do filme de lubrificante e a média quadrática da altura das asperezas, determina o regime de lubrificação, Figura 13.13. Em condições de total lubrificação hidrodinâmica, isto é,  $\lambda > 3$ , as asperezas das superfícies opostas não entram em contato e o desgaste é reduzido. Se  $\lambda$  cai para aproximadamente 3, o regime é de parcial lubrificação hidrodinâmica. Se  $\lambda$  cair para valores menores do que 1, somente a presença de lubrificação de contorno evitaria que a taxa de desgaste atingisse a situação de não lubrificação (EHL: elastomer hydrodynamic lubrication), [Kostman, 1968; Rabinowicz, 1995]. Lubrificação de contorno existe quando ocorre a adsorção molecular de filmes nas superfícies. Forças repulsivas entre filmes, então, carregam grande parte da carga, prevenindo o contato entre as asperezas.

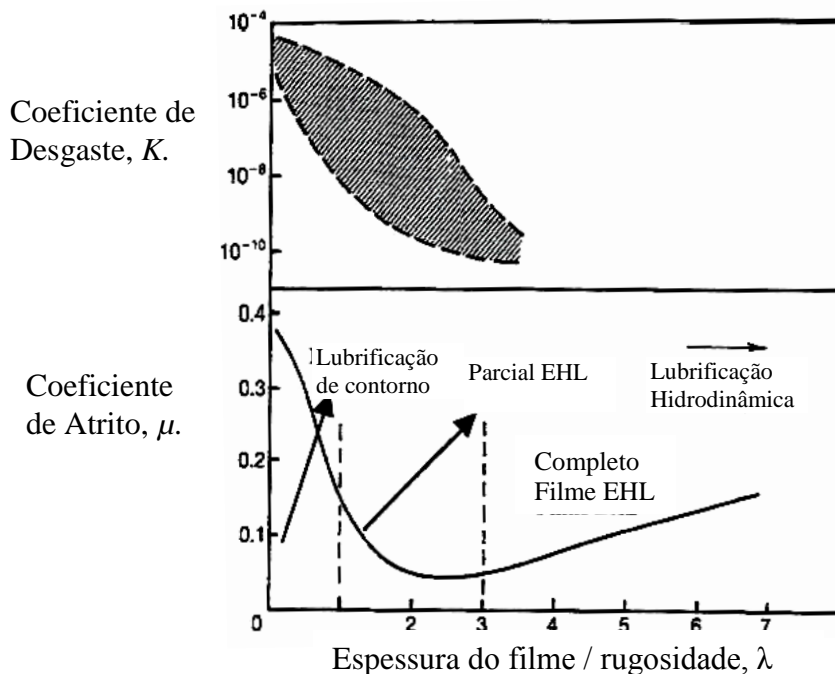


Figura 3.13- Regime de lubrificação desenvolvida em função da razão  $\lambda$ . [Hutchings, 1996].

### 3.2. Extrusoras

Extrusoras são máquinas constituídas de um conjunto de rosca(s), cilindro e matriz. Existem diferentes modelos e modos de operação, por exemplo, simples ou de múltiplos

parafusos, contínua ou descontínua. O estudo do comportamento tribológico das ligas metálicas aplicadas como revestimentos de mancais de deslizamento tem grande importância atualmente para aplicações em máquinas que necessitam atingir elevada continuidade operacional e baixo custo de manutenção. As extrusoras de polímeros, em particular as extrusoras de elastômeros que provocaram este estudo, estão nesta lista de máquinas importantes que podem cooperar com essa missão através de um aumento de desempenho em operação através da redução do desgaste de seus componentes.

### 3.2.1. Extrusora Monorosca

O princípio básico de operação da extrusora de rosca única é muito simples. O material é alimentado por gravidade através de um funil. Geralmente, o polímero fica armazenado em um silo e então flui por gravidade no funil da extrusora. À medida que o polímero cai na rosca, é transportado em direção à matriz, devido à força de atrito que age sobre ele. O polímero é então aquecido, tanto por geração de calor devido ao atrito, quanto por aquecimento das camisas por resistência elétrica ou um fluido aquecido, que pode ser vapor ou óleo aquecido.

A extrusora monorosca descrita na Figura 13.14, equipamento conhecido como secador, é utilizada para redução de umidade contida em um determinado elastômero através do processo de extrusão. Ela é constituída basicamente por três zonas: alimentação, transporte e compressão. Este trabalho está relacionado ao desgaste do mancal frontal desse equipamento.

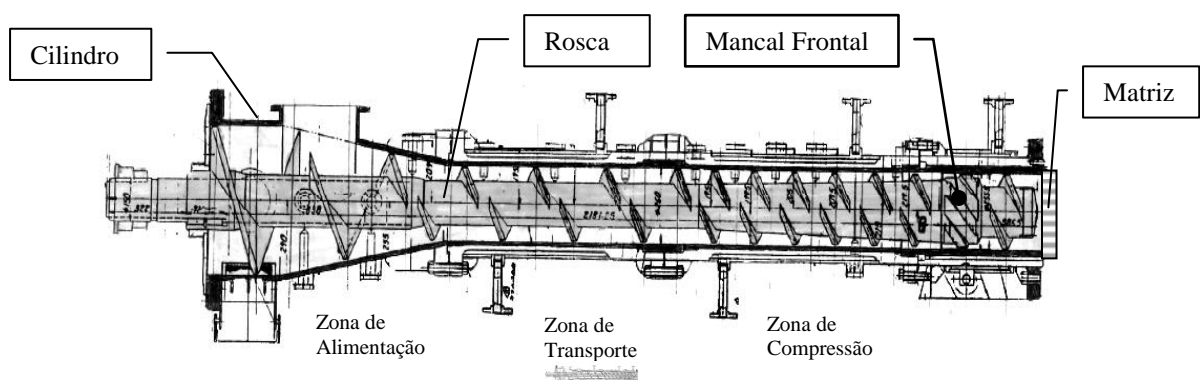
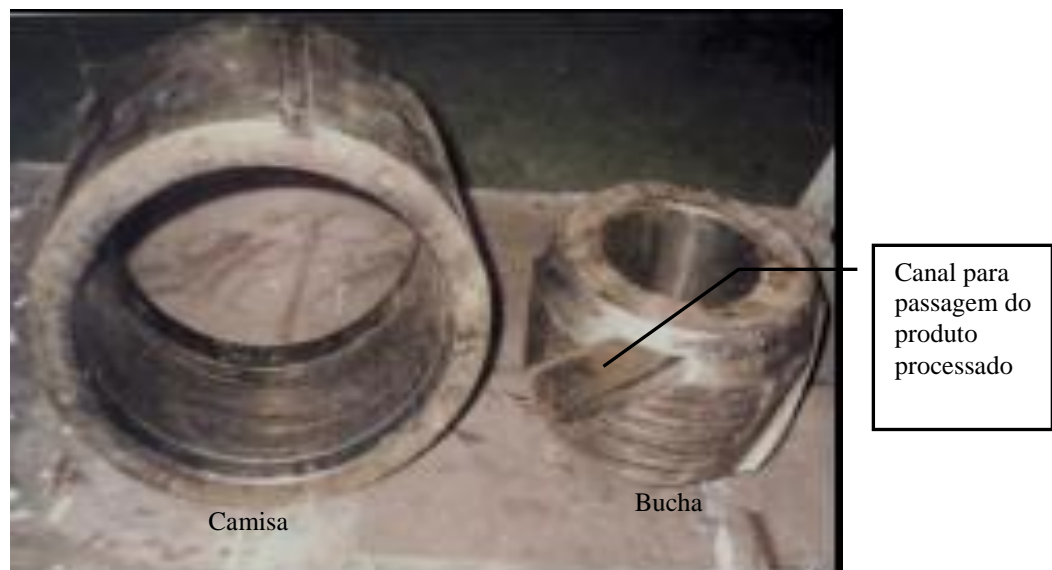


Figura 3.14 - Extrusora monorosca para elastômeros com mancal frontal de deslizamento. [Fonte: Manual Japan Stell Work – JSW, extrusora instalada na Lanxess RS-Brasil].

### 3.2.2. Mancal Frontal Coeficiente de desgaste

Normalmente, a centralização da rosca dentro dos cilindros ocorre quando os cilindros estão cheios do produto sendo processado. Quando os cilindros não estão cheios de produto, existe o risco eminente de ocorrer o contato da rosca com a superfície interna dos cilindros, conseqüentemente ocorrerá o desgaste desses componentes. Isso pode ocorrer principalmente nos procedimentos de partida e parada da máquina e em descuidos operacionais. Para estas máquinas pode ser previsto o emprego de materiais resistentes ao desgaste, aplicados sobre a crista das hélices da rosca e nas superfícies internas das camisas ou a utilização de um mancal frontal conforme Figura 3.15 que tem como função fixar a rosca mantendo-a centralizada, dessa forma evitando o contato das hélices da rosca com a superfície interna dos cilindros. Outro fato importante a ser mencionado é que a lubrificação da interface desses mancais de deslizamento é realizada pelo próprio produto sendo trabalhado dentro da máquina. Então, não operar com a máquina vazia é também um fator importante para durabilidade desses mancais.



*Figuras 3.15 - Componentes do mancal frontal da extrusora mono rosca, camisa e bucha (peças com desgaste). [Fonte: Mancal da extrusora JSW instalada na Lanxess RS-Brasil].*

### 3.2.3. Desgastes em Extrusoras

Em extrusoras ou injetoras, o desgaste adesivo é o principal modo de desgaste quando a resina sendo processada não é abrasiva ou é pouca abrasiva. A rosca entra em contato com a camisa interna (linear) que reveste o barril ou, no caso do mancal frontal, a bucha em contato

com a camisa, a todo o momento resultam em micro soldagem dos metais entre as superfícies e consequente perda de material. Os fatores que podem contribuir para esse tipo de desgaste incluem: linearidade da rosca e barril, alinhamento do motor-barril-alimentação e rosca, projeto da rosca de alimentação, o não aquecimento uniforme do barril, suporte do barril impróprio, componentes adiante da extrusora não apoiados (como os *dies*) e pressão elevada no cabeçote (parte frontal). Em geral existe a ideia errada que roscas que tiveram a superfícies endurecidas ou revestidas com algum revestimento duro quando entrarem em contato com o material mais macio da camisa interna (linear) ocorrerá então o desgaste prematuro do linear. Na realidade, o desgaste adesivo está diretamente associado à habilidade ou tendência dos materiais que estão em contato de estabelecer micro soldagem um com o outro. Um fator a ser considerado no desgaste é o quanto estes materiais resistem à abrasão a partir do momento da fratura das micros soldagens [EXTREME COATINGS, 2007].

#### **3.2.4. Análise do Desgaste do Mancal Frontal**

A análise metalográfica, Figura 3.16 e Figura 3.17, permitiu identificar um forte desgaste adesivo em superfícies dos componentes do mancal. Apesar de esse ser o mecanismo predominante de desgaste foi notado também em menor escala o desgaste abrasivo, provavelmente devido a partículas desprendidas pelo desgaste adesivo. Como comentado, esses mecanismos de desgaste seriam atenuados pela presença de um filme adequado, uniforme e constante entre as superfícies para lubrificação. No caso do mancal em questão seria o próprio elastômero extrudado. No entanto, infelizmente por questões das próprias condições operacionais isso não é possível, devido a inúmeras paradas e repartidas a que o equipamento está submetido durante as campanhas de produção para transição de grade e ajustes operacionais. Nessas situações transitórias, o contato metal-metal é intenso devido à máquina girar vazia ou com pouco produto. O desalinhamento da rosca dentro das camisas e pressão elevada na parte frontal da extrusora são também fatores agravantes. A questão diante desse quadro é então encontrar o par de metais para os revestimentos dos componentes do mancal que resistam mais tempo a estas condições operacionais desfavoráveis, sem esquecer-se do custo-benefício favorável.

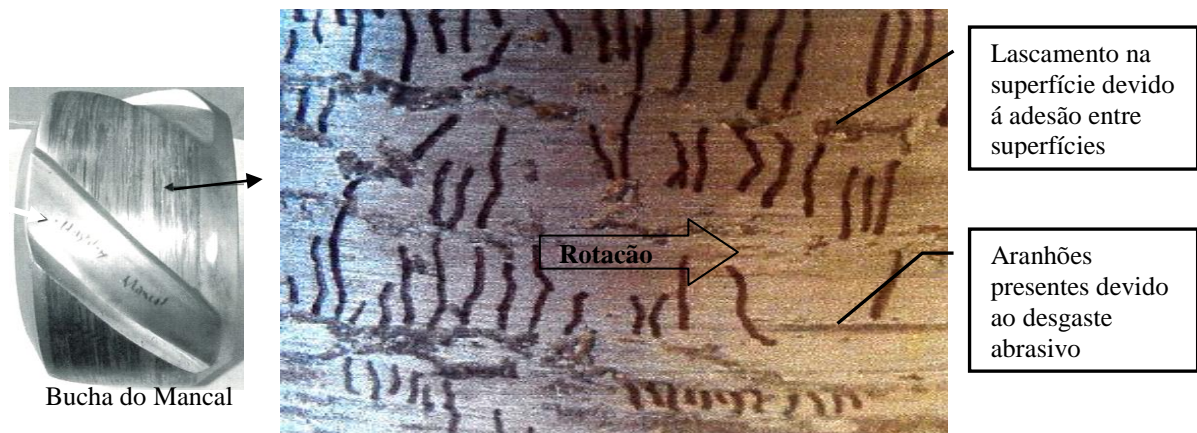


Figura 3.16 - Trincas perpendiculares ao sentido de rotação e lascamentos na superfície revestida com Stellite 6 da bucha do mancal. A posição das trincas foi reforçada com caneta para melhor visualização.

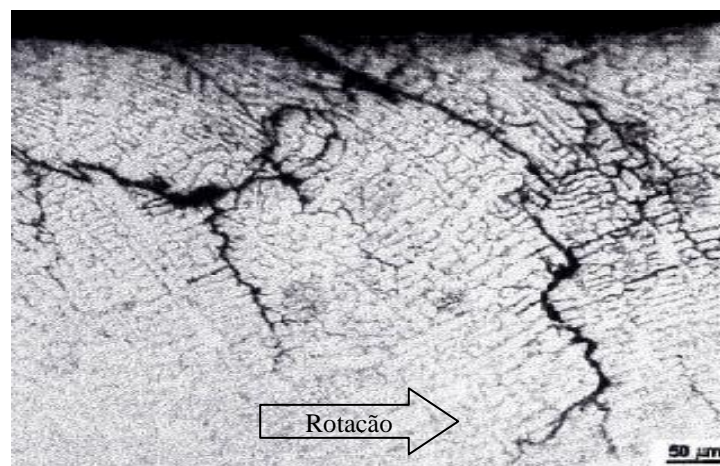
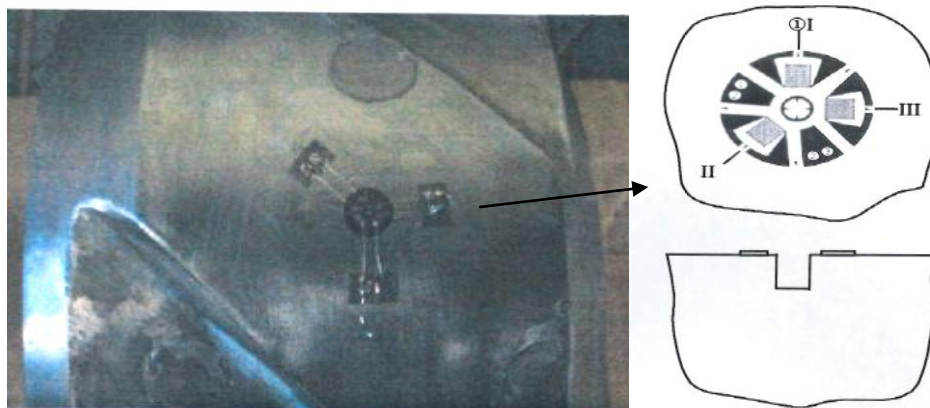


Figura 3.17 - Trincas perpendiculares ao sentido de rotação na superfície do revestimento de Stellite 6. Trincas iniciando em regiões com encruamento superficial. Aumento 200x.

Após a análise metalográfica comentada acima, para complemento da investigação, foi efetuada uma análise de tensões residuais na superfície do revestimento da bucha do conjunto mancal para verificar o tipo e magnitude das tensões remanescentes devido ao processo de soldagem e se estas teriam alguma contribuição no aparecimento das trincas transversais mostradas na Figura 3.16. O método utilizado para a medição das tensões residuais foi o Método do Furo normalizado pela Norma ASTM E837/95. Este método envolve a remoção localizada de material tensionado e medição do alívio de deformação no material adjacente ao furo. O método do furo requer a usinagem de um pequeno furo, normalmente com diâmetro



entre 1 a 4 mm com profundidade igual ao diâmetro. A medição foi realizada com roseta especial composta de três extensômetros de resistência elétrica (ERE), modelo KFG-1.5-120-D28-11 da HBM, conforme mostrado na Figura 3.18. As superfícies dos corpos de prova foram preparadas conforme procedimentos padrões de lixamento, colagem e soldagem de extensômetros. Neste método, as tensões residuais existentes no material antes da usinagem do furo podem ser calculadas a partir dos valores das deformações aliviadas que foram medidas. O método da integral foi o tratamento matemático empregado para obter os valores de tensões residuais. O equipamento utilizado foi o RS-200 da MicroMeasurements<sup>MR</sup> e um condicionador de sinais tipo UPM – 100 (Multipoint Measuring Unit) da HBM que capta os sinais elétricos emitidos pelos extensômetros que são convertidos em deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ), neste caso, alívio de deformação. A Figura 3.19 apresenta uma vista do equipamento. No gráfico indicado na Figura 3.20 é evidenciado que as tensões residuais medidas são compressivas, sendo máxima na superfície e nula em torno 1 mm de profundidade. Dessa forma não foi confirmada a existência de tensões residuais de tração que possam ter contribuído para o aparecimento das trincas transversais notadas na Figura 3.16.



*Figura 3.18 – Detalhe da peça instrumentada para medição das tensões residuais na superfície do revestimento (esquerda). Desenho esquemático mostrando uma roseta com um furo usinado em seu centro (direita). [LAMEF-Laboratório de Metalurgia Física-UFRGS].*





Figura 3.19 – Equipamento utilizado para aquisição dos dados medidos de alívio de deformação da superfície ensaiada. Unidade eletrônica de medição modelo UPM-100 da HBM. [LAMEF-Laboratório de Metalurgia Física-UFRGS].

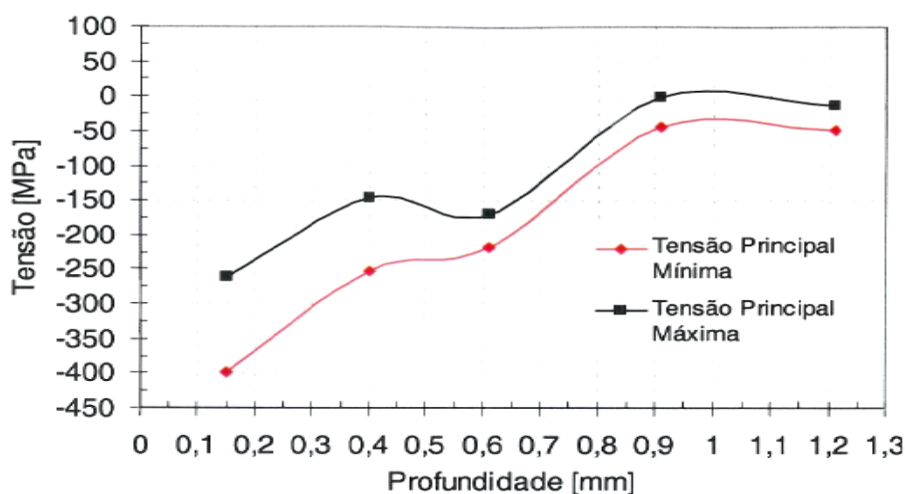


Figura 3.20 - Gráfico das tensões residuais principais ao longo da profundidade do revestimento da bucha do mancal.

### 3.3. Revestimentos Contra Desgastes

Vários tipos de revestimento resistentes ao desgaste estão disponíveis para serem aplicados nas superfícies das hélices de roscas de extrusoras ou nas superfícies dos mancais de deslizamento. A Tab. (1) indica algumas características de alguns desses revestimentos.

*Tabela 3.1 - Revestimentos para aplicação como camada resistente ao desgaste em hélices de roscas de extrusoras e mancais de deslizamentos [Fonte: murex technik ag].*

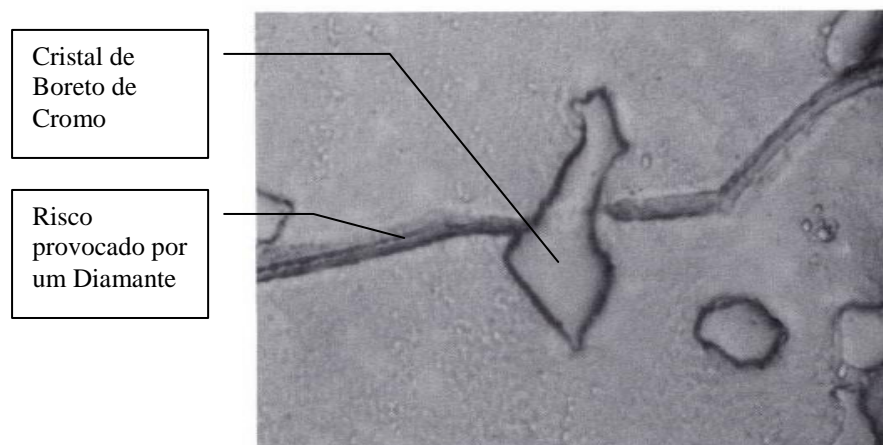
<b>Revestimentos duros</b>	<b>Base da liga</b>	<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Resistência ao desgaste</b>	<b>Resistência a corrosão</b>
Stellite 6	Cobalto	38-42	2,0-2,5	..	...
Stellite 12	Cobalto	43-49	2,0-2,5	...	...
Colmonoy 56	Níquel	52-56	2,0-2,5	....	....
Carbeto de tungstênio	Níquel	56-60	1,0-2,0	.....	.....

**Stellite 6** – A estrutura do revestimento de Stellite 6 consiste em uma matriz austenítica com base de cobalto e com incorporação de carbonetos de tungstênio. Stellite 6 tem um bom compromisso entre tenacidade e dureza. É apropriado quando especialmente um baixo número de trincas no revestimento é mais importante do que a proteção ao desgaste. Essas ligas podem ser utilizadas em materiais sob a forma forjada, sinterizada (metalurgia do pó) ou servir como revestimentos resistentes ao desgaste para peças pouco resistentes, aplicados por soldagem ou plasma. A excepcional resistência ao desgaste é devido principalmente a fase de carbonetos dispersos na matriz CoCr [DELORO STELLITE, 2008]. O Stellite 6 é uma das mais utilizadas ligas para os revestimentos resistentes ao desgaste. Além da inerente resistência ao desgaste esta liga possui boa resistência ao impacto, ao choque térmico, à corrosão, à erosão, à cavitação, ao calor e à oxidação. Retém níveis razoáveis de dureza até 500°C (930°F). Embora as ligas de cobalto resistentes ao desgaste possuam alguma resistência à corrosão em meios aquosos, elas são limitadas devido à precipitação de carbonetos no contorno dos grãos, pela ausência de alguns elementos vitais na matriz após a precipitação e, no caso de materiais fundidos e da soldagem de revestimentos sobre superfícies do material, ocorre à segregação química da microestrutura.

**Stellite 12** - É semelhante ao Stellite 6, porém a quantidade de Cr-W é maior do que o de Stellite 6, portanto o Stellite 12 é mais duro e oferece uma melhor proteção ao desgaste.

**Colmonoy 56** - O revestimento de Colmonoy 56 consiste em uma matriz austenítica com base de níquel e com incorporação de boretos de cromo, que são extremamente rígidos. Colmonoy 56 não só oferece uma melhor resistência ao desgaste do que Stellite 6 e 12, mas também uma excelente proteção contra a corrosão, uma vez que contém níquel, em vez de cobalto como material de base. Contém 10% de cristais de Boreto de Cromo (dureza de 4100

Vickers), utilizado para recobrir superfícies de componentes de equipamentos e dessa forma aumentar a resistência ao desgaste, calor, corrosão e *Galling* [COLMONOY 1987]. A Figura 3.21 apresenta uma micrografia da superfície deste revestimento após ser riscada por um diamante.



*Figura 3.21 - Micrografia mostrando o risco provocado por um diamante que se movimentou da esquerda para direita sobre a superfície de um Colmonoy 56. Note que o cristal de Boreto de Cromo ao centro não sofreu o mesmo dano. [COLMONOY, 1987]. Aumento 200x.*

**Carbeto de tungstênio** - O revestimento de carbeto de tungstênio consiste de uma matriz austenítica com base de níquel, com até 60% de carbonetos de tungstênio incorporados na estrutura. Tem excelentes propriedades relativas ao desgaste, e à corrosão. Por causa da dureza muito elevada do revestimento, é impossível atingir uma superfície livre de trincas.

Dois questões importantes a serem consideradas na seleção do tipo de revestimento duro a ser utilizado são: gerações de trincas na superfície (quanto mais duros esses revestimentos, maior é o número de trincas) e a compatibilidade entre revestimentos de ambas as superfícies em contato.

### 3.4. Métodos de Testes de Desgaste

Diferentes arranjos experimentais são utilizados para estudar o desgaste por deslizamento. Investigações são conduzidas em laboratório para examinar os mecanismos causadores de desgastes ou para simulações de situações reais e obter dados úteis sobre taxas de desgastes e coeficientes de atrito. Para ambos os casos o controle e medição de todas as variáveis que podem influenciar o desgaste são muito importante. É de vital importância notar

que a taxa de desgaste e o atrito são dependentes das condições de deslizamento; pequenas mudanças nas condições podem levar a mudanças radicais no mecanismo de desgaste dominante e por consequência na taxa de desgaste.

A Figura 3.22 apresenta arranjos geométricos empregados em vários tipos de testes. A palavra tribômetro, foi utilizada pela primeira vez em 1774 em um instrumento cuja intenção era de medir atrito.

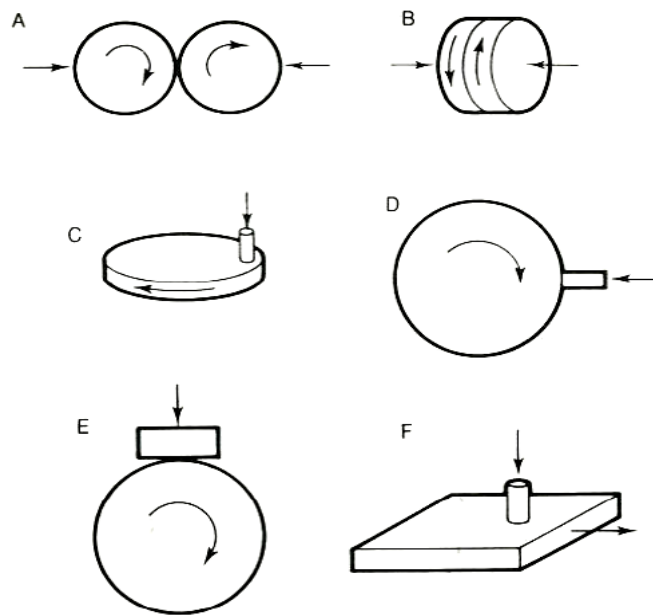
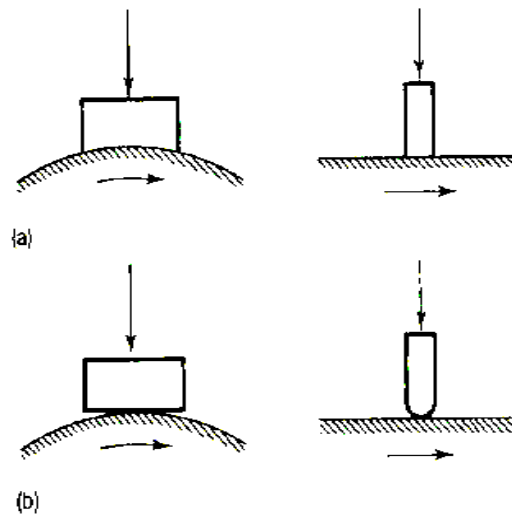


Figura 3.22 -. Diversos tipos de arranjos experimentais para a avaliação do desgaste por deslizamento. [Hutchings, 1996].

Estes testes podem ser divididos em dois grupos, isto é, aqueles em que as superfícies em escorregamento são dispostas simetricamente, onde o desgaste de dois espécimes de materiais idênticos deveria ser igual (A e B), e aqueles mais comuns, em que o sistema é inerentemente assimétrico e o desgaste experimentado serão diferentes para as duas partes envolvidas (C, D, E F).

Os arranjos assimétricos mais comuns empregados são o pino pressionando o disco em sua face plana ou em sua borda (Figura 3.20 C e D), o bloco pressionando o disco (Figura 3.20 E) ou o pino pressionando uma placa plana (Figura 3.20 F). O contato dos espécimes pode ocorrer através de uma área de contato mais extensa (pino com superfície de contato plana sobre um a superfície plana do disco) ou somente em um ponto ou linha (superfície de contato do pino arredondada sobre um disco, ou um bloco plano sobre um disco). Detalhes

desses contatos não concentrados e concentrados são mostrados na Figura 3.23. Um dos componentes do par, geralmente o pino ou o bloco é a amostra tratada e é o componente no qual o desgaste é avaliado, enquanto que o outro, o disco, é chamado de “counterface” (superfície oposta de contato).



*Figuras 3.23 - Geometria dos contatos não concentrados (a) e concentrados(b). [Hutchings, 1996].*

Vários testes de desgastes por deslizamento são normalizados. Podemos citar como exemplo o bloco pressionando o disco (ASTM G77) e o pino pressionando o disco (ASTM G99).

Basicamente, a taxa de desgaste depende da distância deslizada e da pressão nominal imposta (carga nominal dividida pela área nominal de contato). Contudo, o desgaste também depende da velocidade de deslizamento e do tempo de teste de uma forma independente. A velocidade de deslizamento afeta a taxa de dissipação de energia de atrito e, portanto, a temperatura de interface. Assim, com certeza, não se pode assumir que um teste de desgaste produza os mesmos resultados do que outro em que a metade do tempo de teste foi empregada a uma velocidade duas vezes maior.

Além das principais variáveis, como carregamento normal, área de contato, velocidade de deslizamento e tempo de teste, diversos outros fatores devem ser considerados e monitorados. Entre estes, pode-se citar a temperatura do teste, condições de lubrificação (ou não lubrificação), composição atmosférica etc.

Geralmente as taxas de desgastes são obtidas por medidas de perda de massa das amostras testadas. Uma das formas mais comumente utilizada é a pesagem periódica dos corpos de prova ao longo do tempo total de teste. Adicionalmente informações relevantes podem ser obtidas pelo monitoramento do coeficiente de atrito, que é obtido por medida da força de fricção. Entre outros pontos, o monitoramento do coeficiente de atrito pode indicar uma mudança no mecanismo de desgaste (leve para severo), ruptura do filme de lubrificação etc.

#### **4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

A realização dos testes de desgaste por deslizamento seguiu a norma técnica ASTM G-77. Este método de teste cobre os procedimentos de laboratório para determinar a resistência dos materiais submetidos ao movimento de deslizamento. É utilizada uma máquina de teste de desgaste que experimenta um anel atritando sobre um bloco (sistema assimétrico) para classificar os pares de materiais utilizados de acordo com seu comportamento em diferentes condições. O bloco de teste é pressionado contra o anel de teste que gira a uma determinada velocidade e a um determinado número de rotações. Este sistema é definido como assimétrico porque as superfícies do bloco e do anel que estão em contato de deslizamento terão taxas de desgaste quase sempre diferentes, mesmo que os materiais sejam iguais. Os resultados são reportados na forma de perda de volume ( $\text{mm}^3$ ) para ambas as peças. Materiais com maior resistência ao desgaste terão menor perda de volume. Para realização do ensaio acelerado de desgaste foi construído um equipamento chamado Tribômetro. Equipamento destinado a testar e avaliar o comportamento ao desgaste de diferentes materiais. Constituído basicamente de um sistema com pesos e alavanca para a aplicação da carga que irá pressionar o bloco de teste instalado na vertical sobre o anel de teste que gira através de um sistema de polias, correia e motor. A carga aplicada é monitorada via sensor de carga. A Figura 4.1 apresenta foto do equipamento utilizado para os ensaios de desgaste de deslizamento.

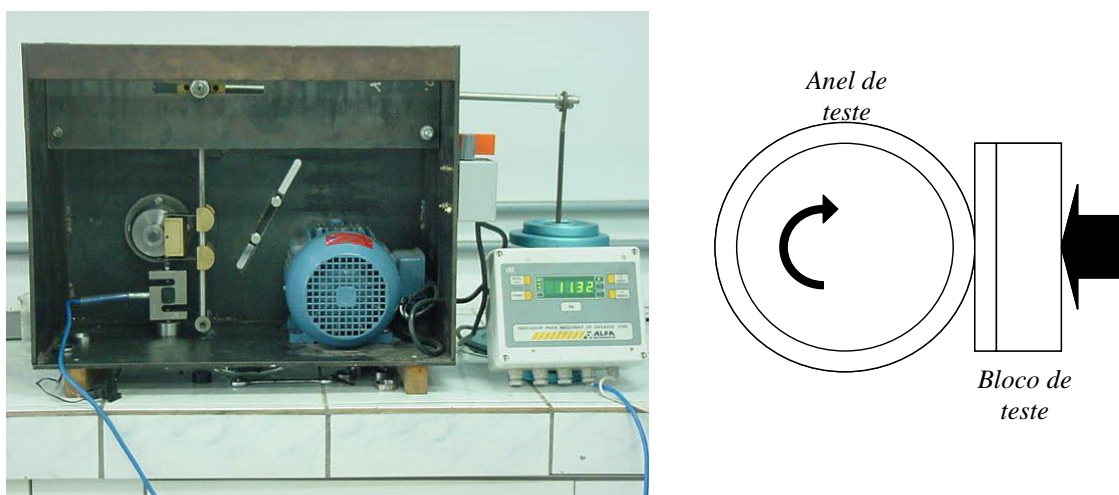


Figura 4.1 - Tribômetro utilizado nos ensaios de desgaste (esquerda). Desenho esquemático do ensaio (direita). [LACER-Laboratório de Materiais Cerâmicos-UFRGS].

#### 4.1. Materiais

Foram utilizadas as ligas comerciais COLMONOY 56 (base níquel, cromo, ferro) e STELLITE 6 (base cobalto, cromo, tungstênio) aplicados pelo processo de solda TIG-Tungsten Inert Gas sobre o metal base de aço inoxidável austenítico com baixo carbono especificação AISI 316L. A Tabela 4.1 apresenta algumas características das ligas investigadas.

Tabela 4.1 - Composição química e dureza das ligas estudadas. [Metal Handbook, 1977; CABOT Stellite, 1975; Wall Colmonoy, 2000].

Material	Composição Química Nominal (%)										Dureza	Fonte
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Co	W	Fe	B		
AISI 316L	0,03	2,0	1,0	16 a 18	10 a 14	2 a 3	---	---	restante	---	76 RB	Metals Handbook 1977
Stellite 6	1,2	≤1,0	≤1,5	29	≤ 3,0	≤1,5	restante	4,5	≤ 3,0	≤ 2	42 RC	CABOT-Stellite 1975
Colmonoy 56	0,9	---	3,8	18	restante	---	---	---	4,4	1,9	50-55 RC	Wall Colmonoy 2000

No experimento foram empregadas às especificações dos materiais a serem utilizados no mancal de deslizamento frontal de uma extrusora monorosca que trabalha com borracha sintética (EPDM). O mancal é formado pelo conjunto camisa que reveste o barril (cilindro) e

pela bucha que reveste a rosca. Ambas as peças são fabricadas em aço inoxidável austenítico com baixo carbono especificação AISI 316L (metal base) devido principalmente ao ambiente agressivo interno existente na extrusora, com PH ácido e temperaturas elevadas (em torno de 300°). A estrutura metalúrgica desse material também favorece o depósito da solda por não provocar significativas mudanças na estrutura metalúrgica do metal base durante o processo de soldagem. O baixo carbono contido nesta liga evita durante a soldagem a formação de carbonetos complexos de cromo e deposição no contorno dos grãos da estrutura metalúrgica (sensitização) na faixa de temperatura entre 450°C e 850°C, a qual se ocorrer, pode provocar corrosão intergranular nos componentes (Telles 1986). O metal base das peças do mancal é revestido com uma camada dura de no mínimo 3 mm de espessura de Colmonoy 56 e/ou Stellite pelo procedimento de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) para retardar ao máximo o desgaste das peças e aumentar a disponibilidade da máquina para produção. A solda pelo processo TIG minimiza a formação de porosidades e sobreaquecimento do metal base. A deposição com solda oxiacetileno quando utilizada propiciará uma menor diluição do metal base no depósito, porém tende a gerar mais porosidade.

No experimento foram testadas diferentes combinações de revestimentos para verificar qual tem a melhor resistência ao desgaste.

## **4.2. Métodos**

Fazendo analogia entre os corpos-de-prova utilizados nos testes na forma de anéis e blocos de desgaste com as peças que constituem o conjunto do mancal frontal da extrusora monorosca, o anel de desgaste simulou a função da bucha que reveste a rosca (peça que gira) e o bloco de desgaste simulou a função da camisa que revestem os cilindros da extrusora (peça estática).

As dimensões dos blocos de desgaste mediam 2.5" x 1" x 1". Sobre a superfície de 2" x 1", foi aplicado um revestimento correspondente a dois passes de solda ,perfazendo cerca de 5 mm de espessura.Os anéis mediam 35 mm de diâmetro por 8,74 mm de largura. Sobre a superfície externa do anel foi aplicado um revestimento correspondendo a um passe ,perfazendo cerca de 2 mm de espessura. Ambas peças após a usinagem final apresentavam superfícies polidas e limpas antes de serem testadas.



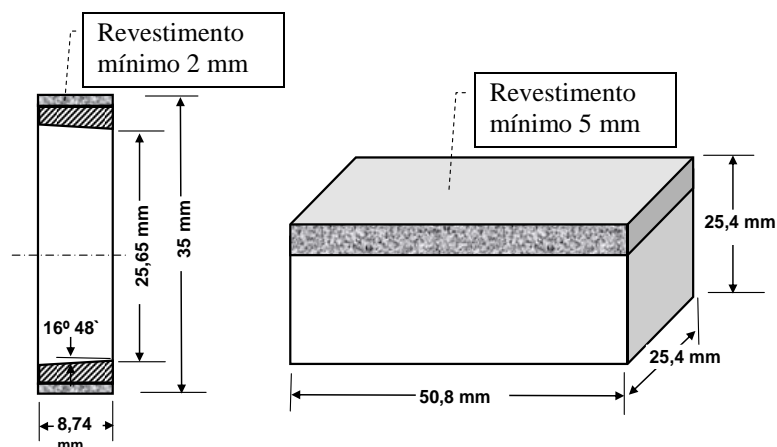


Figura 4.2 - Dimensões dos corpos-de prova (Bloco e anel de desgaste).

#### 4.2.1. Deposição da Camada de Stellite 6 pelo processo TIG

As superfícies dos corpos de provas antes de serem revestidas foram limpas e mantidas livres de ferrugem, sujeira, graxa e outros contaminantes, os quais poderiam provocar trincas, porosidades e inclusões nos depósito de solda. Foram pré-aquecidas e pós-aquecidas utilizando chama oxiacetilênica ( $O_2 \times C_3H_6$ ,  $O_2 \times C_2H_2$ ,  $C_3H_8 \times Ar$ ) conforme gráfico abaixo. O revestimento de solda foi realizado através da utilização de varetas não revestidas e retificadas de 5 mm de diâmetro, tendo como meta atingir aproximadamente a dureza de 42 Rockwell C. Com a utilização de vareta revestida teríamos uma dureza inferior de 37 Rockwell C. Foi utilizado corrente de 240 A DC e velocidade de soldagem de 100 a 140 mm/s com ângulo da vareta de  $80^\circ \pm 10^\circ$  na posição plana. O resfriamento pós-soldagem foi controlado utilizando manta de tecido térmico para evitar o surgimento de trincas.

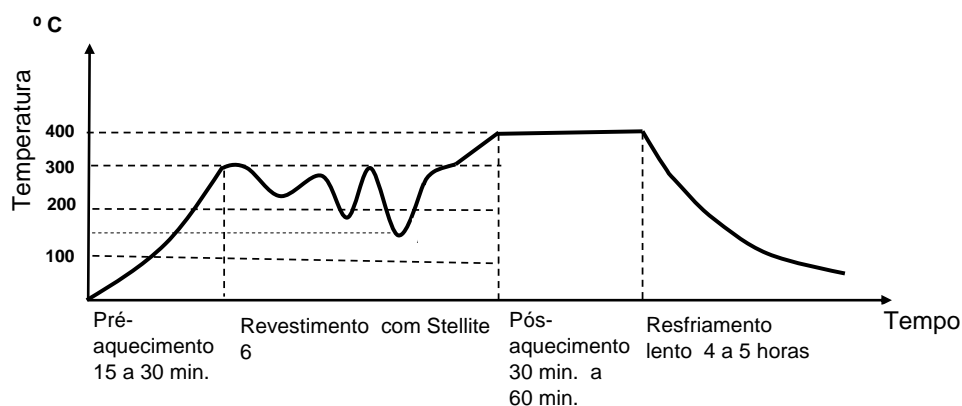


Figura 4.3 - Perfil utilizado do controle de temperatura da peça de 316L (metal base) revestida com Stellite 6. [Procedimento fornecido pela JSW-Japão Stell Work].

#### 4.2.2. Deposição da Camada de Colmonoy 56 pelo processo TIG

As superfícies dos corpos de provas antes de serem revestidas foram limpas da mesma forma que para a aplicação do Stellite 6. Devido ao elevado coeficiente de expansão térmica do aço autêntico utilizado AISI 316L o pré-aquecimento das peças na faixa de 600° F(315° C) a 700° F (370° C) foi realizado para evitar o surgimento de trincas. Foi utilizado o gás de proteção argônio puro e seco com ponto de orvalho de -40° F e eletrodos de tungstênio com 1% de óxido de tório na soldagem para evitar a contaminação e surgimento de porosidades na poça de fusão.

O revestimento de solda foi realizado através da utilização de varetas não revestidas, tendo como meta atingir a dureza de 55 Rockwell C. O resfriamento pós-soldagem foi controlado utilizando manta de tecido térmico para evitar o surgimento de trincas.

#### 4.2.3. Avaliação dos Revestimentos das Camadas Depositadas

Foram analisadas duas amostras de aço AISI 316L, revestidas com cordões de solda para aumentar a resistência ao desgaste, sendo uma amostra revestida com Stellite 6 e outra com Colmonoy 56.

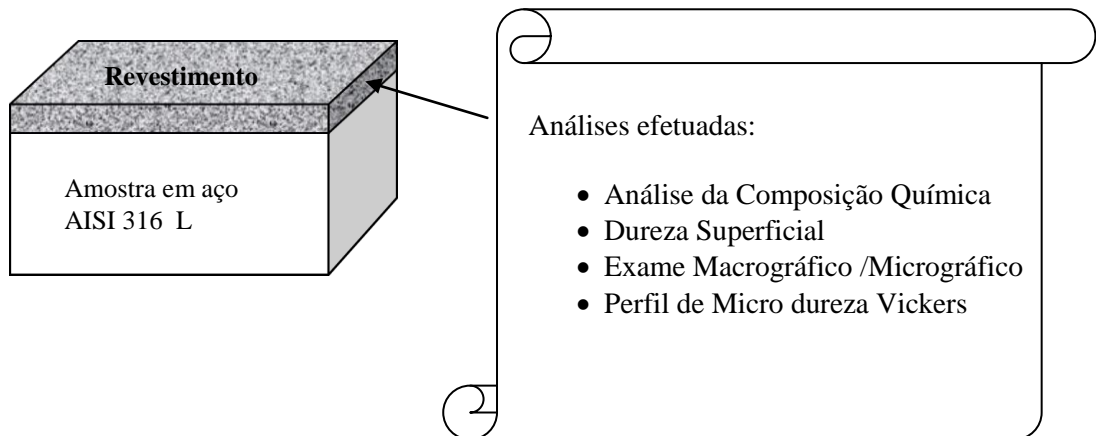


Figura 4.4 - Esquema demonstrando os tipos de análises submetidas amostras dos corpos de provas ensaiados. .

### **Análise da Composição Química:**

*Tabela 4.2 – Composição química dos materiais dos revestimentos dos corpos de prova.*

ELEMENTO	STELLITE 6	COLMONOY 56
COBALTO (Co)	Diferença	---
CROMO (Cr)	29	12,5
TUNGSTÊNIO (W)	4,5	---
MOLIBDÊNIO (Mo)	1,5 máx.	---
CARBONO ( C )	1,2	0,7
FERRO (Fe)	3,0 máx.	4,5
NÍQUEL (Ni)	3,0 máx.	Diferença
SILÍCIO (Si)	1,5 máx.	4
MANGANÊS (Mn)	1,0 máx.	---
BORO (B)		2 a 8

O método usado foi a análise através de Espectrometria de Emissão Ótica, utilizando-se um espectrômetro marca Spectro, modelo Spectrolab.

### **Determinação da Dureza Superficial:**

Foram realizadas seis determinações de dureza Rockwell C na superfície de cada revestimento, com os seguintes resultados:

*Tabela 4.3 – Dureza Rockwell C dos materiais dos revestimentos dos corpos de prova.*

Camada	Camada Dureza Rockwell C						Média
	Valores encontrados						
STELLITE 6	47	46	47	47,5	46	48,5	47
COLMONOY 56	57	55	55,5	53	53,5	56,5	55

### **Exames Macrográficos:**

Foram feitos exames macrográficos depois de seccionadas as amostras com os revestimentos. Nos exames visuais das macrografias não foram constatados defeitos que pudessem reprovar o procedimento de solda adotado com referência a:

- Ocorrência de inclusões não metálicas;
- Ocorrência de porosidades;
- Falta de fusão;
- Falta de penetração.

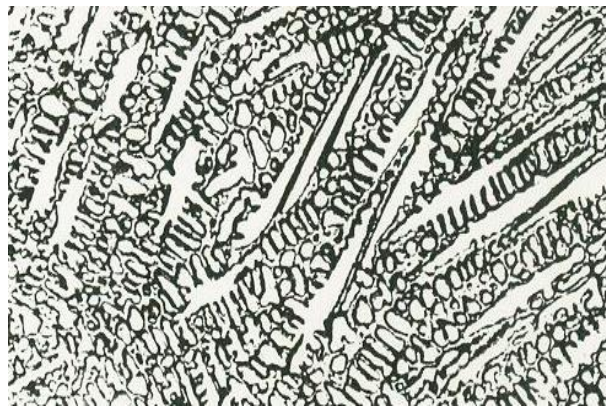
As espessuras dos revestimentos foram:

Stellite: Máxima: 5,8mm – Mínima: 3,7mm – Média: 4,6mm

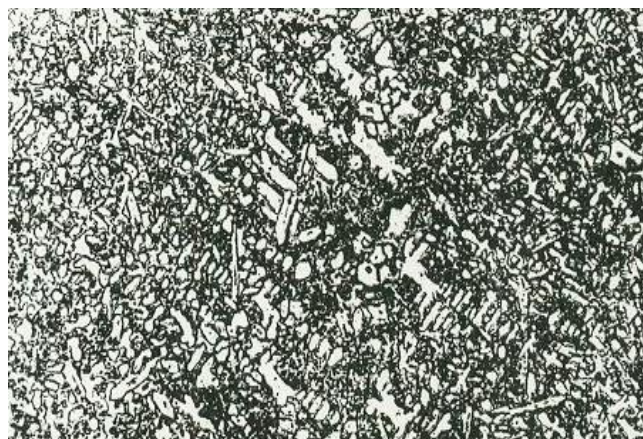
Colmonoy: Máxima: 5,6mm – Mínima: 3,9mm – Média: 4,4mm

### **Exames Micrográficos:**

Os exames micrográficos foram realizados em secções transversais das duas amostras, sendo os resultados descritos nos itens apresentados a seguir. O reativo utilizado para o ataque das amostras foi composto de água, ácido nítrico e ácido clorídrico na relação 1:1:1.



*Figura 4.5 - Aspecto micrográfico do revestimento de Stellite 6. Observam-se os carbonetos de cobalto e a matriz de austenita com grande quantidade de carbonetos. Aumento 200x.*



*Figura 4.6 - Aspecto micrográfico do revestimento de Colmonoy 56. Observam-se a microestrutura composta de martensita e carbonetos de boro, bem mais finos que os que foram encontrados no revestimento de Stellite 6.. Aumento 200x.*

### Perfil de Micro dureza Vickers HV<sub>0,3</sub>:

Foram feitos perfis de micro durezas Vickers com carga de 0,3kgf (HV<sub>0,3</sub>) nos dois revestimentos. A distância entre cada impressão foi 1 mm e os resultados obtidos constam na tabela apresentada abaixo:

Tabela 4.4 – Perfil de Micro dureza Vickers HV<sub>0,3</sub> dos revestimento dos corpos de provas.

Distância da superfície do revestimento (mm)	Camada			
	STELLITE		COLMONOY	
	Valores encontrados	Média	Valores encontrados	Média
1	526,8 – 530,0	528,4	478,5 – 597,9	538,2
2	536,4 – 523,5	530,0	523,5 – 567,9	545,7
3	377,4 – 371,4	374,4	438,9 – 614,1	526,5
4	434,1 – 408,6	421,4	546,6 – 564,3	555,5
5	186,6 – 201,8	194,2	208,1 – 167,1	187,6
6	164,2 – 174,2	169,2	174,2 – 183,9	179,1
7	183,2 – 170,6	176,9	195,0 – 173,0	184,0
8	159,2 – 160,8	160,0	170,6 – 178,0	174,3
9	174,9 – 167,1	171,0	179,3 – 162,0	170,7

#### 4.2.4. Medição do Desgaste

Foram realizados dois diferentes ensaios: ensaio de desgaste do Bloco de desgaste e ensaio de desgaste do Bloco e Anel de desgastes.

A Tabela 4.5 mostra os parâmetros de ensaios utilizados nos testes de laboratório.

Tabela 4.5 – Parâmetros de ensaios de desgaste utilizados nos testes de laboratório.

		Parâmetros de Ensaio	
		Ensaio do Bloco de Desgaste	Ensaio do Bloco & Anel de Desgaste
Força aplicada (N):		220	85
Refrigeração:		Ar comprimido	Não
Tempo de Ensaio (minutos):		80	30
Rotação (rpm)		230	150
<b>Revestimentos</b>			
1ª série	Anel teste	Stellite 6	Stellite 6
	Bloco teste	Stellite 6 / Colmonoy 56	Stellite 6
2ª série	Anel teste	Colmonoy 56	Colmonoy 56
	Bloco teste	Stellite 6 / Colmonoy 56	Stellite 6

#### 4.2.5. Desgaste do Bloco de desgaste

O desgaste do bloco de desgaste foi avaliado pela aplicação de uma força de aproximadamente 220N sobre o anel de teste (carga utilizada de 10 kg na extremidade da alavanca). Durante o ensaio, foi acoplado ao equipamento um sistema de refrigeração com ar comprimido a fim de dissipar o calor gerado durante o teste. O tempo de ensaio foi de aproximadamente 80 minutos, equivalentes a 18.200 rotações a 230 RPM.

A primeira série de teste foi realizada com discos revestidos com Stellite 6 contra corpos-de-prova revestidos com Colmonoy 56 e Stellite 6. Cada bloco foi desgastado duas vezes, a primeira com o disco novo (polido) e a segunda vez com o disco já desgastado. A segunda série de ensaios foi realizada com discos de testes revestidos com Colmonoy 56 contra corpos-de-prova de prova revestidos com Stellite 6 e Colmonoy 56. Da mesma forma que na primeira série, cada bloco foi desgastado duas vezes, a primeira com o disco novo (polido) e a segunda vez com o disco já desgastado.

O desgaste nos blocos de teste foi medido através do cálculo do volume da cavidade deixada pelo disco sobre o revestimento. Este cálculo foi feito de acordo com o método descrito na norma ASTM G-77. A Figura 4.4 apresenta esquematicamente o desgaste medido na peça ensaiada e sua relação com a fórmula utilizada para quantificá-lo (volume de material desgastado).

t = largura do bloco, mm  
r = raio do anel, mm  
D = 2r = diâmetro do anel, mm  
b = largura média da cavidade, mm  
 $\alpha$  = profundidade da cavidade, mm  
 $\theta$  = ângulo contato em radianos

Largura da Cavidade =  $b = D \sin \theta/2$   
Volume da cavidade =  $D^2t /8 (\theta - \sin \theta)$   
Onde  $\theta = 2 \sin^{-1} b/D$   
Volume da cavidade =  $D^2t /8 [2 \sin^{-1} b/D - \sin (2 \sin^{-1} b/D)]$

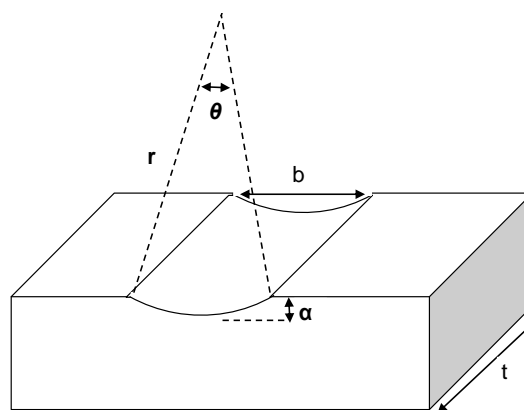


Figura 4.7 - Esquema do desgaste medido na peça ensaiada e sua relação com a fórmula utilizada para quantificá-lo (volume de material desgastado). [ASTM G77, 2010].

#### **4.2.6. Desgaste do Bloco e Anel de desgaste**

Nesse ensaio foram reduzidas as magnitudes dos valores dos parâmetros utilizados no ensaio anterior para ser possível quantificar o desgaste do anel que possui uma camada de revestimento dura mais fina que o revestimento do bloco.

Foi utilizada força de aproximadamente 85N sobre o anel de teste. Rotação adotada de 150 RPM e não foi utilizada lubrificação. O tempo de ensaio foi de 30 minutos. Foram feitos dois ensaios com cada par de materiais.

O desgaste dos anéis foi determinado através da perda de massa dos mesmos, pesada com uma precisão de 0,001g. A variação de massa era então convertida em perda de volume através da densidade do material. O desgaste dos blocos foi determinado através da largura da marca deixada pelo anel no bloco, a exemplo do ensaio anterior. Uma tabela que acompanha a norma ASTM G 77-97 traduz esta largura em perda volumétrica.

A primeira série de teste foi realizada com discos revestidos com Stellite 6 contra corpos-de-prova (blocos) revestidos com Stellite 6. A segunda série de ensaios foi realizada com discos de testes revestidos com Colmonoy 56 contra corpos-de-prova (blocos) revestidos com Stellite 6.

#### **4.2.7. Teste de Campo**

Foi colocada em teste de campo em condições normais de operação a nova proposta para o revestimento do mancal, sendo a camisa (peça estática) fixada no cilindro da extrusora revestida com Stellite 6 e a bucha (peça móvel) fixada na rosca revestida com Colmonoy 56. Foi seguido o mesmo procedimento de soldagem aplicado para os corpos de provas. Para a obtenção de uma melhor conclusão comparativa foi obtido da peça revestida com Colmonoy 56, antes de colocar em teste, a dureza superficial Rockwell C o perfil de micro dureza com carga de 0,2 kgf numa seção transversal a partir da superfície do revestimento. Foi realizado ensaio micrográfico da camada após o material ter sido atacado com reativo composto de ácido nítrico, ácido clorídrico e água, na relação de 1:1:1. Quando foram atingidas 5340 horas de operação a máquina parou para desmontagem da parte frontal da extrusora para acesso ao mancal interno, inspeção e análise do desgaste do conjunto mancal (Figura 4.7). O desgaste do conjunto mancal foi aferido através da medição do diâmetro externo da bucha e diâmetro interno da camisa. Para medição do diâmetro externo da bucha foi utilizado um paquímetro e para medição do diâmetro interno da camisa foi utilizado um micrômetro interno tubular. A



precisão considerada nas medições foi de 0,01 mm. Foram feitas leituras em três posições ao longo das peças, parte central e em ambas as extremidades, e também a cada 45° na camisa e 90° na bucha do conjunto mancal (Figura 4.8). Com as leituras foram obtidas a média do desgaste de ambas as peças em relação dimensões originais (antes das peças entrarem em operação). O desgaste tolerado para o mancal para evitar o contato da rosca com os cilindros da extrusora é de 3,5 mm no raio, considerando a soma do desgaste de ambas as peças.

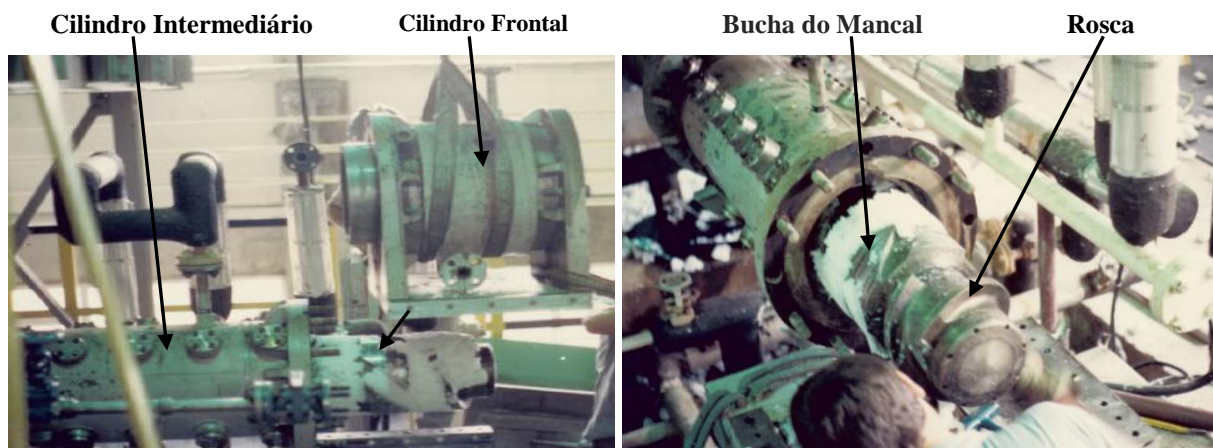


Figura 4.8 - Desmontagem da parte frontal da extrusora monorosca para acesso ao conjunto mancal para inspeção.

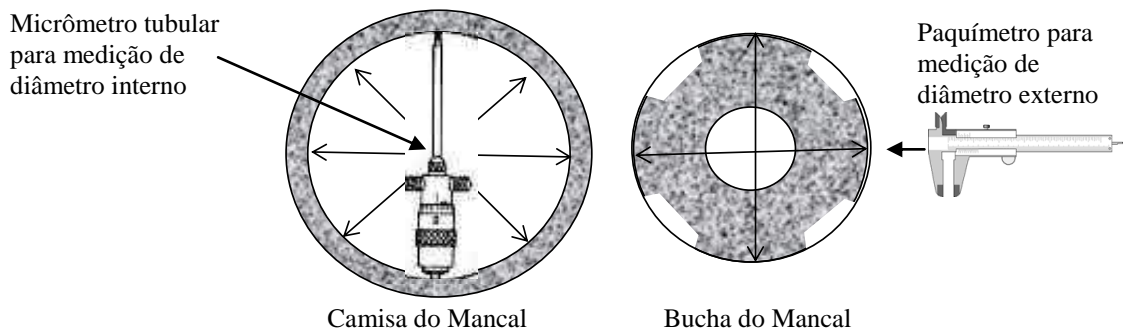


Figura 4.9 – Esquema de medição do desgaste dos componentes do conjunto mancal da extrusora.

Tabela 4.6 - Valores das durezas Rockwell medidos na superfície do revestimento e na superfície do metal base do mancal testado.

Metal	Escala dureza	Valores encontrados						Média
Colmonoy 56	Rockwell C	51	51	51	52	51	51	51
Metal Base (316 L)	Rockwell B	74	75	75	73	75	76	74,5



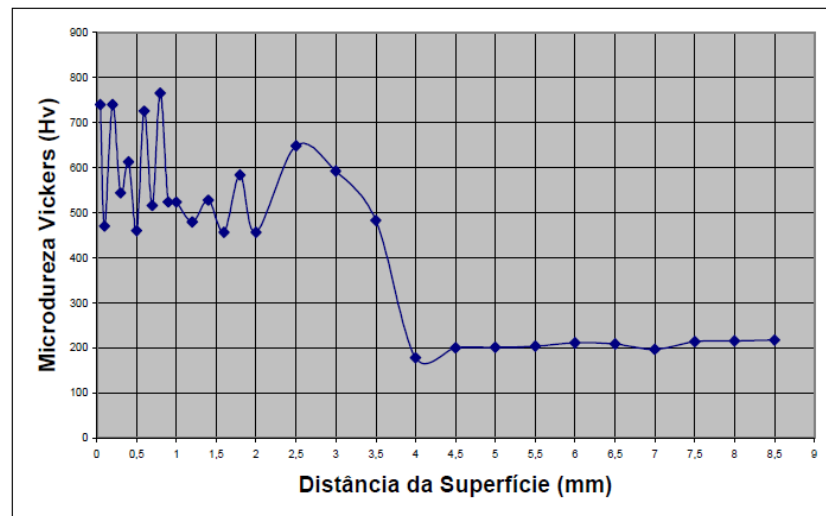


Figura 4.10 -. Gráfico do perfil de microdureza Vickers HV<sub>0,2</sub> da camada de Colmonoy 56.

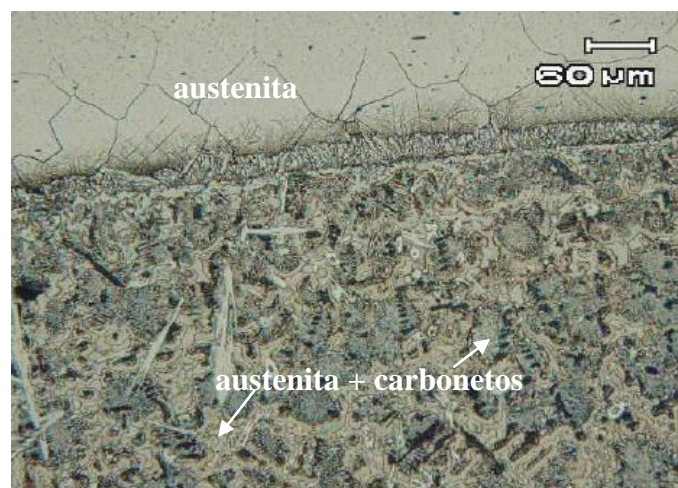


Figura 4.11 - Aspecto micrográfico da interface entre solda de Colmonoy 56 e metal-base. No metal base a microestrutura é de austenita, enquanto no revestimento é austenita e carbonetos. Aumento 200x.

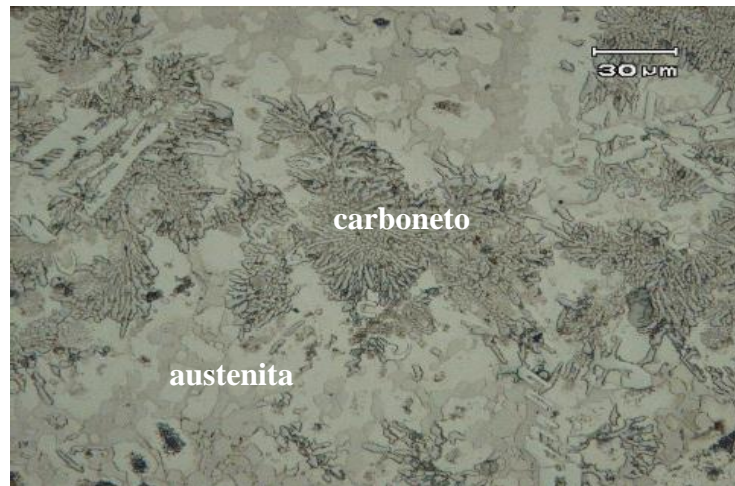


Figura 4.12 - Aspecto micrográfico do revestimento de Colmonoy 56. Matriz de austenita com grande quantidade de carbonetos. 200x.

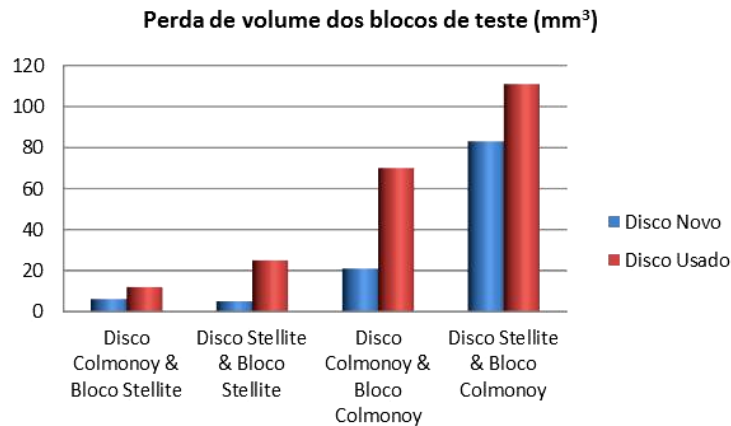
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Desgaste do Bloco de Desgaste

A Tabela 5.1 apresenta os valores dos volumes removidos calculados segundo a equação mostrada na Figura 4.4. Na mesma tabela, também foram registradas as velocidades de rotações de cada teste e os respectivos tempos de duração. Para cada par disco-bloco, há duas linhas, a primeira correspondendo ao desgaste sofrido pelo corpo-de-prova com o disco novo e a segunda linha, o desgaste sofrido pelo corpo-de-prova com o disco sendo usado por uma segunda vez. Os mesmos resultados são apresentados comparativamente na forma de um histograma na Figura 5.1.

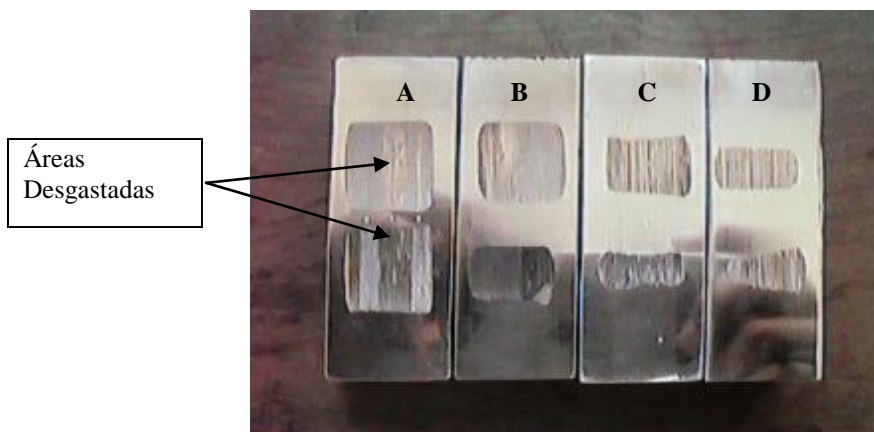
Tabela 5.1 - Valores dos volumes removidos nos testes de desgaste calculados segundo a equação mostrada na Figura 4.4.

	Tempo de ensaio (minutos)	Velocidade de rotação (RPM)	Medida do desgaste (mm)	Volume desgastado (mm <sup>3</sup> )	Material do Disco e Bloco de teste
1 <sup>º</sup> vez	79	225	7,5	5	Disco Stellite 6 & Bloco stellite 6
2 <sup>º</sup> vez	79	225	12,9	25	
1 <sup>º</sup> vez	82	215	19	83	Disco Stellite 6 & Bloco Colmonoy 56
2 <sup>º</sup> vez	82	215	21	111	
1 <sup>º</sup> vez	80	220	8	6,1	Disco Colmonoy 56 & Bloco Stellite 6
2 <sup>º</sup> vez	82	215	10	12	
1 <sup>º</sup> vez	79	220	12	21	Disco Colmonoy 56 & Bloco Colmonoy 56
2 <sup>º</sup> vez	80	220	18	70	



*Figura 5.1 - Comparação entre os desgastes obtidos nos blocos de testes quando utilizado diferentes pares de metais (disco & bloco).*

O Stellite 6, quando desgastado pelo disco de Colmonoy 56, apresentou um desgaste menor do que quando desgastado com um disco do mesmo material (Stellite 6). No par disco em Stellite 6 e bloco em Colmonoy 56 ao, o desgaste sofrido pelo Colmonoy 56 é muito maior. Ambos os revestimentos apresentaram um desgaste superior no segundo teste, o que era esperado, pois os discos de desgaste já haviam perdido seu polimento inicial, tornando-se mais rugosos e mais agressivos aos revestimentos.



*Figura 5.2 - Corpos de prova após o ensaio de desgaste. A marca superior foi realizada com o disco de desgaste sendo utilizado pela primeira vez e a marca inferior foi deixada pelo disco no segundo teste. O corpo de prova A tem o revestimento de Colmonoy 56 e desgastado pelo disco de Stellite 6. O corpo-de-prova B tem revestimento de Colmonoy 56 e foi desgastado pelo disco de Colmonoy 56. O corpo-de-prova C tem o revestimento de Stellite 6 e foi desgastado pelo disco de Stellite 6. O corpo-de-prova D tem o revestimento de Stellite 6 e foi desgastado pelo disco de Colmonoy 56.*

## 5.2. Desgaste do Bloco e Anel de Desgaste

O resultado desse ensaio foi plotado no gráfico da Figura 5.3. Neste teste foram ensaiados os dois melhores pares tribológicos para resistência ao desgaste adesivo indicado no teste anterior.

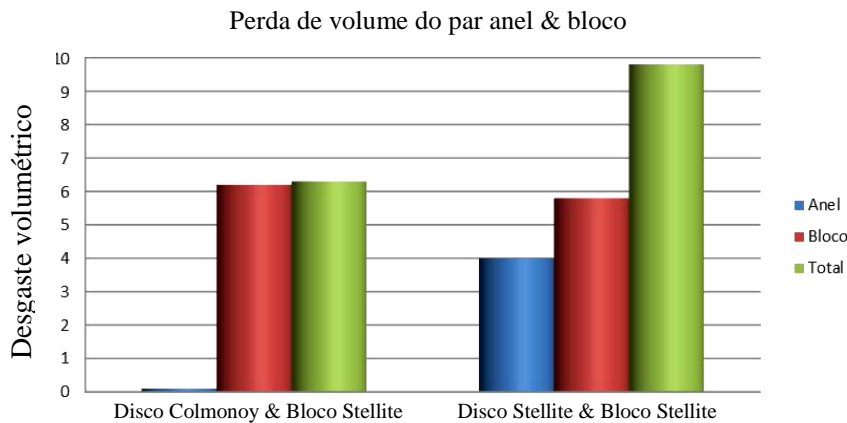


Figura 5.3 - Comparação entre os desgastes obtidos pelos pares blocos & disco.

Revestimento	Microdureza Vickers 300g
Stellite	432 $\sigma$ 20
Colmonoy	619 $\sigma$ 34

Analisando o desgaste tanto do anel como do bloco de desgaste pode-se constatar que o menor desgaste total foi apresentado pelo par Stellite 6 (bloco) / Colmonoy 56 (anel), o que já era esperado e comentado na literatura: materiais dissimilar tem uma menor tendência a apresentar desgaste adesivo (micro soldagem). No gráfico é notado também que quem influenciou na redução do desgaste do par que obteve melhor desempenho foi o anel de teste, peça revestida com Colmonoy 56.

O desgaste por deslizamento adesivo foi o tipo de desgaste ao qual foi submetida às peças no procedimento experimental, sendo causado pelo escorregamento entre duas superfícies metálicas sem a presença intencional de abrasivos. O volume de material desgastado é calculado por:

Onde:

$$V = \frac{KSL}{H}$$

$V$  = Volume do material desgastado;  
 $S$  = Distância percorrida no deslizamento;  
 $K$  = Coeficiente de desgaste;  
 $H$  = Dureza do material menos duro;  
 $L$  = Carga aplicada;

Comparando os pares testados a luz dessa equação podemos verificar que para uma mesma condição de carregamento (carga) e distância percorrida nos deslizamento, o volume de material desgastado deverá ser menor para dureza mais alta, que é o caso do Colmonoy 56 se comparado ao Stellite 6, porém existem outras propriedades dos materiais que não são tão evidentes como a dureza e que afetam na taxa de desgaste: A liga Colmonoy 56 utilizada para revestir o disco de desgaste, além de ter dureza superior a liga de Stellite 6 devido principalmente à existência de cristais de boretos de cromo que possuem dureza semelhante ao diamante, possuem também uma alta concentração desses cristais e outros constituintes duros como carbonetos de cromo distribuídos na microestrutura. Materiais que aderem fortemente são mais suscetíveis a danos por *galling*. A literatura comenta que a combinação de metais idênticos ou metalurgicamente compatíveis, onde ocorre a alta solubilidade mútua ou a formação de compostos intermetálicos, deveriam ser evitadas para aplicações com deslizamento não lubrificadas, como no desgaste adesivo. Esses materiais não trabalham (deslizam) bem um sobre o outro. A aderência mútua age no sentido de evitar o deslizamento e elevar a intensidade do desgaste (Norton 2004). Considerando esta abordagem, o resultado obtido está coerente, o par de ligas metálicas similares Stellite 6 – Stellite 6 desgastou bem mais que o par de ligas não similares Colmonoy 56 – Stellite 6. Se forem considerados os elementos que constituem as duas ligas de maneira isolada e como metal puro (Co, Ni, Cr, W) constata-se que estes são considerados metalurgicamente compatíveis entre si segundo diagrama de compatibilidade para pares de metais baseado em diagramas de fases binários. Metais com estrutura cristalina hexagonal possuem maior restrição ao escorregamento dos planos cristalinos do que os metais com estruturas cristalinas cúbicas, indicando uma menor tendência a *galling* por causa da menor ductilidade. Todos estes fatores estão ocultos no coeficiente de desgaste “K”, assim como o nível de lubrificação e contaminação entre as superfícies.

A dureza sozinha é um indicador pobre para definir a resistência ao desgaste adesivo, principalmente resistência a *galling*. Em materiais com durezas similares, aqueles que possuem maior concentração de carbonetos, nitretos e/ou outros precipitados duros e frágeis como cristais de boreto de cromo, possuem maior resistência ao desgaste (Hutchings, 1996).

### **5.3. Teste de Campo**

Após 5340 horas de operação foi constatado um desgaste total de 2,2 mm relativo à soma dos desgastes individuais de cada peça em relação ao raio. Considerando que o valor definido para troca das peças é quando esse desgaste atingir 3,5 mm, o mancal teria ainda uma sobrevida de operação. Calculando uma tendência considerando um comportamento linear durante o desgaste e utilizando esses dados considerando o método de quadrados mínimos chegamos a 8495 horas de operação para chegar a um desgaste total de 3,5 mm, dessa forma a vida remanescente do conjunto mancal seria de aproximadamente 3155 horas além das horas já operadas. A média histórica de durabilidade da proposta anterior, onde ambas as peças, camisa e bucha são revestidas com Stellite 6, é 3000 horas, considerando as variações dos parâmetros operacionais como vazão, pressão, temperatura, número de trocas de grades e as características dos diferentes produtos produzidos.

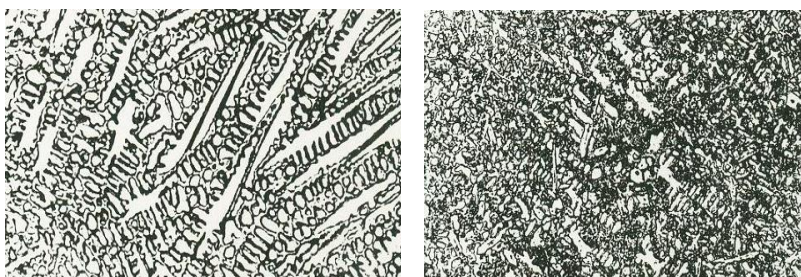
Analisando os resultados das medições de durezas superficiais e perfil de microdurezas das camadas de Colmonoy depositadas sobre o bloco de teste e sobre a bucha (peça móvel) do mancal testado em operação notamos algumas diferenças nas leituras, embora ambas estivessem dentro da faixa de especificação. A dureza superficial especificada para o depósito de solda fica na faixa de 50-55 Rockwell C. Conforme Tabela 4.3, no bloco de teste foi obtida uma medição média com valor igual o limite superior (55 HRC), e conforme Tabela 5.2 na superfície da bucha do mancal foi obtido um valor médio próximo do limite inferior (51 HRC). No perfil de microdureza da bucha do mancal pode ser observada uma variação entre 450 HV e 750 HV, enquanto no bloco de teste foi observada uma variação entre 526,5 HV e 538 HV. A causa mais provável dessa maior variação de microdureza na superfície da bucha do mancal está relacionada provavelmente a microestrutura apresentada pela camada. Observa-se que existe uma grande quantidade de carbonetos grosseiros com alta dureza dispersos numa matriz de austenita com baixa dureza. Conforme a impressão de microdureza for feita em área com mais carbonetos ou austenita, ocorre à variação para mais ou para menos. No bloco de teste essa variação foi menor, os carbonetos eram em maior quantidade e menores, o que deve ter influenciado para uma dispersão diferente dos valores de microdurezas e, dessa forma, influencia para a obtenção uma melhor resistência ao desgaste.

## 6. CONCLUSÕES

O teste realizado no laboratório procurou simular as condições básicas e de forma relativa às condições operacionais de campo, porém, foi apenas uma aproximação das reais condições operacionais, visto que parâmetros como velocidade, tempo, carga e meio ambiente são diferentes da realidade. Como estes parâmetros de teste aplicados no laboratório foram aplicados de forma igual para as diferentes combinações de materiais testados o resultado relativo indicou o par de metais que teve melhor desempenho no teste de deslizamento, balizando a decisão para a execução do teste de campo.

No teste de campo foi confirmado o aumento da durabilidade do mancal em operação substituindo o par tribológico Stellite 6 / Stellite 6 pelo par Colmonoy 56 / Stellite 6.

A Figura 5.3 mostra que quem impactou na redução da taxa de desgaste foi o anel de desgaste equivalente a bucha do conjunto mancal, peça revestida com Colmonoy 56 que antes era revestida com Stellite 6. Através do ensaio micrográfico da superfície de uma das peças do mancal desgastado da extrusora foi notado que o mecanismo predominante era o desgaste adesivo. Quando o mecanismo predominante de desgaste por deslizamento é o adesivo, a compatibilidade entre as ligas metálicas que se atritam é um fator que influenciará fortemente na durabilidade ao desgaste das superfícies em contato, assim sendo, usando o par Colmonoy 56 / Stellite 6 diminuímos essa compatibilidade (alta solubilidade mútua) prejudicial. Outro fator que influencia também na diminuição da taxa de desgaste é que o Colmonoy 56 possui cristais de boretos de cromo que possuem dureza semelhante ao diamante e possuem uma alta concentração desses cristais e outros constituintes duros como carbonetos de cromo distribuídos na microestrutura. Conforme análise da microestrutura dos revestimentos dos blocos de teste os carbonetos eram em maior quantidade e menores no revestimento de Colmonoy 56, o que deve ter influenciado para a obtenção de uma melhor resistência ao desgaste desse revestimento.





*Figura 6.1 - Aspecto micrográfico do revestimento de Stellite 6 (esquerda) e Colmonoy 56(direita).. Observam-se a microestrutura composta de carbonetos menores e em maiores quantidades no revestimento de Colmonoy 56 do que no de Stellite 6.. Aumento 200x.*

## **7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Os resultados obtidos neste trabalho permitem sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

-Investigar as modificações nas taxas de desgastes de pares de metais resistentes ao desgaste devido à influência das modificações na rede cristalina da microestrutura dos revestimentos ocorridas pela elevação da temperatura na interface de contato sem lubrificação;

-Investigar os fenômenos e causas que motivam as mudanças no mecanismo de desgaste de pares tribológicos quando invertemos os materiais do revestimento das peças fixa e móvel do mancal;

-Investigar a influência da concentração e distribuição de constituintes duros (carbonetos) na microestrutura de revestimentos duros para aumento da resistência ao desgaste e procedimentos de controle para obtenção da concentração próxima da ideal.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JOST, H.P., 1990, Tribology-origin and future, wear, V136, p. 1-17.

KATO, K.Adachi, 2001, Wear Mechanisms, Modern Tribology Handbook, Ed.CRC Press LLC Vol.2, Cap. 22.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1995, ASM HANDBOOK Vol. 11.Failure Analysis and Prevention, glossary of terms, p.11, 145.

HUTCHINGS, I.M., 1996, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, p.2-19.

KWIETNIEWSKI, Carlos Eduardo Fortis, 2000, A Utilização do Níquel para Melhoria do Comportamento Tribológico de Ligas de Titânio. Dissertação. PPGEM: UFRGS, p 11-13.

ASTM Standard G-77-05, 2010: Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test.

COLMONOY, 1987: The presence of chromium borides in nickel-base hard-surfacing alloys. Technical data sheet, CB-1A.

COLMONOY, 1987: A Nickel-Base Hard-Surfacing Alloy Containing 10% Chromium Boride Crystals. Technical data sheet, No. Ni-1.2B.

COLMONOY, 1991: Hard Surfacing Alloys for Rubber and Plastic Processing. Form PLS 6917.5.

DELORO STELLIE, 2008: Stellite 6 Alloy. Technical data sheet, DS01-21708(S R0808).

NORTON, Robert L., 2004, Projeto de Máquinas. Uma abordagem integrada. 2º ed. Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, p. 405-408. 2004.

EXTREME COATINGS, 2007, Adhesive Wear Test ASTM G77. Surface Engineering & Alloy Company.St. Petersburg, FL 33714.

RABINOWICK, E, 1965, Friction and Wear of Materials. New York, John Wiley & Sons, p.244.

CASSINA, J.C., 1992, Low-Stress Sliding Abrasion Resistance of Cobalt-based Surfacing Deposits Welded with Different Processes.

MAO, K.; SUN, Y. e BELL,1994, Contact mechanics of engineering surfaces: State of the art.Surface Engineering, vol.10, 4, pp.297-306.

HENSEN, F, 1988, Plastic Extrusion Technology .Oxford University Press.p.513-525.

COLMONOY, 1999,Alloy Selector Chart, Technical Data Sheet, Tech-1H.

COLMONOY, 1975: Hard-Facing Products,F-30,472B 6917.5.