

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

LEANDRO ANSELMO DA SILVA

**SUBSTITUIÇÃO DE ANÉIS DE VEDAÇÃO DE PTFE POR ANÉIS DE
BRONZE (CuAl) COM ADIÇÃO DE Sn SUPERFICIAL**

VOLTA REDONDA

2016

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE Mestrado Profissional em Materiais**

**SUBSTITUIÇÃO DE ANÉIS DE VEDAÇÃO DE PTFE POR ANÉIS DE
BRONZE (CuAl) COM ADIÇÃO DE Sn SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação do prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais, linha de pesquisa de materiais metálicos.

Aluno:

Leandro Anselmo da Silva

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

VOLTA REDONDA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

S586s Silva, Leandro Anselmo da.
Substituição de anéis de vedação de PTFE por anéis de bronze (CuAl) com adição de Sn superficial. / Leandro Anselmo da Silva - Volta Redonda: UniFOA, 2016.

98 p. : Il

Orientador(a): Profº Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2016

1. Materiais - dissertação. 2. PTFE. 3. Anéis de bronze. 4. Adição de Sn. I. Palmeira, Alexandre Alvarenga. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Leandro Anselmo da Silva

SUBSTITUIÇÃO DE ANEIS DE VEDAÇÃO DE PTFE POR ANÉIS
DE BRONZE CuAl COM ADIÇÃO DE Sn SUPERFICIAL

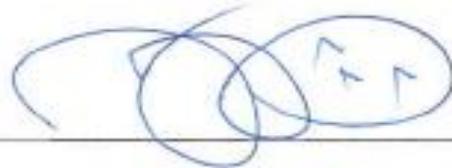
Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira



Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe



Prof. Dr. Dener Martins dos Santos

O que as suas mãos tiverem que fazer, que o façam com toda a sua força, pois na sepultura, não há atividade nem planejamento, não há conhecimento nem sabedoria.

Eclesiastes 9:10

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus por estar presente em minha vida, nos dias mais difíceis como nos dias alegres, principalmente por colocar pessoas importantes na minha vida nesse momento.

Agradeço ao Professor Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira que tem sido não só um orientador mais amigo. Agradeço a minha mãe Hélia Maria da Silva, pela ajuda, orações e por sempre me motivar na busca de novos conhecimentos.

Ao meu eterno amor Jucineide Tavares Mariano pela dedicação e compreensão. Aos meus irmãos, sobrinhos que tem entendido minhas ausências em ocasiões especiais. Externo meus agradecimentos a todos envolvidos diretamente e indiretamente, no andamento desse projeto que apenas se inicia.

SILVA, L. A. da, **SUBSTITUIÇÃO DE ANÉIS DE VEDAÇÃO DE PTFE POR ANÉIS DE BRONZE (CuAl) COM ADIÇÃO DE Sn SUPERFICIAL**. 2016. 98f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

RESUMO

O presente trabalho concentra os estudos na substituição do anel politetrafluoretileno (PTFE), polímero amplamente utilizado na indústria em inúmeras aplicações tribológicas, onde pode-se destacar sua utilização em mancais de deslizamento, anéis vedações e etc.. Apesar de muitas características positivas apresentadas por esse material o mesmo pode falhar e perder suas propriedades em altas temperaturas e pressões. Em contrapartida o bronze tratado termoquimicamente com estanho, oferece característica positiva para superar as temperaturas e pressões requeridas pelo sistema de vedação, além de oferecer baixo coeficiente de atrito. O anel de bronze recebeu estanho em sua superfície, através do processo de difusão. O tratamento foi realizado nos períodos de três, quatro e cinco horas na temperatura de 150°C. Após o tratamento foi verificado que o anel de cinco horas absorveu maior teor de estanho na superfície e obteve um excelente desempenho no sistema de vedação. A revisão bibliográfica abordou características dos materiais supracitados para entendimento dos parâmetros que influenciam. Foram realizados, ensaios de dureza, acompanhamento do comportamento das pressões e temperaturas dos materiais em operação, análise de MO, MEV e EDX.

Palavras-chave: PTFE, Bronze, Adição de Sn.

SILVA, L. A. da, **SUBSTITUIÇÃO DE ANÉIS DE VEDAÇÃO DE PTFE POR ANÉIS DE BRONZE (CuAl) COM ADIÇÃO DE Sn SUPERFICIAL**. 2016. 98f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

ABSTRACT

This paper focuses studies on replacing the ring polytetrafluoroethylene (PTFE), a polymer widely used in industry in many tribological applications, which can highlight their use in plain bearings, rings and seals etc .. Although many positive features presented by this material it may fail and lose their properties at high temperatures and pressures. Conversely bronze thermochemical treated with tin, offers positive characteristic to overcome the temperatures and pressures required by the sealing system, and provides low friction coefficient. The brass ring received tin on its surface, through the process of diffusion. The treatment was carried out in periods of three, four and five hours at the 150 ° C temperature. After the treatment was found that five hours ring absorbed higher tin content on the surface and obtained an excellent sealing performance in the system. The literature review addressed characteristics of the foregoing materials to understand the influencing parameters. They were carried out hardness tests, monitoring the behavior of the pressures and temperatures of the materials in operation, OM analysis, SEM and EDX.

Keywords: PTFE, Bronze, Sn Addition.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	BOMBAS.....	20
2.1.1.	Classificação dos Tipos de Bombas.....	20
2.1.2.	Bombas Alternativas de Êmbolo	22
2.1.3.	Sistema de Vedação e seus Componentes	23
2.2	POLÍMEROS.....	28
2.2.1.	Propriedades Mecânicas dos Polímeros	29
2.2.2.	Estrutura do PTFE.....	33
2.2.3.	Característica Tribologica do PTFE.....	35
2.2.4.	Energia Superficial	38
2.2.5.	Condição PV	38
2.3	METAIS.....	40
2.3.1.	Ligas Metálicas.....	43
2.4	TRIBOLOGIA	49
2.4.1	Contato Mecânico.....	49
2.4.2	Atrito	50
2.4.3	Atrito em Polímeros	51
2.5	MECANISMO DE DIFUSÃO	52
2.5.1	Difusão por Lacunas.....	53
2.5.2	Difusão Intersticial	54
2.5.3	Energia de Ativação.....	56
2.5.4	Difusão em Estado não Estacionário.....	57
2.5.5	Processo de Difusão Sn-Cu.....	58
2.5.6	Fases Intermetálicas.....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS	63

3.1	IDENTIFICAÇÃO DO EFEITO DE FALHA.....	64
3.1.1	Coleta de Temperatura e Pressão.....	65
3.1.2	Materiais.....	66
3.1.3	Preparação das Amostras.....	66
3.1.4	Metalografia.....	68
3.2	DUREZA.....	69
3.3	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	69
3.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA (MEV).....	70
3.5	ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDX).....	70
4	RESULTADOS.....	72
4.1	JUSTIFICATIVA PARA ESCOLHA DO BRONZE.....	72
4.2	OCORRÊNCIA DAS FALHAS.....	74
4.3	COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA X PRESSÃO.....	75
4.4	DUREZA.....	79
4.5	MICROSCOPIA.....	80
4.6	TEOR DO ESTANHO NOS SETORES DOS ANEIS.....	83
4.7	CUSTO E PRODUTIVIDADE.....	85
5	CONCLUSÃO.....	87
6	INDICAÇÕES FUTURAS.....	88
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	89

LISTA DE SIGLAS

AISI: American iron and steel institute

API: American Petroleum Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

CuAl: Bronze Alumínio

D_0 : Coeficientes de difusão

DSC: Differential Scanning Calorimetry

EDX: Espectroscopia por dispersão de energia

FN: Força Normal

FT: Força Tangencial

M^2/S : Metro quadrado por segundo

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

MO: Microscopia Óptica

NBR ISO: International Organization for Standardization

P: Pressão

PE: Polietileno

PSI: Pounds per Square Inch

PTFE: Politetrafluoretileno

Qd: Energia de ativação

SAE: Society of Automotive Engineer

SAP: Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung

Sn: Estanho

Tan: Tangente

TMEF: Tempo médio entre Falhas

V: Velocidade

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos Materiais.....	43
Tabela 2: Características do Sn e Cu.....	59
Tabela 3: Propriedades do Bronze.....	66
Tabela 4: Propriedades do pó de Estanho.	66
Tabela 5: Propriedades do PTFE.....	73
Tabela 6: Vida útil dos componentes API-674.....	75
Tabela 7: Concentração do estanho nas amostras.....	84
Tabela 8: Produtividade e custo de manutenção.	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Cargas e propriedades do PTFE.....	34
Quadro 2: Divisão dos materiais metálicos.....	42
Quadro 3: Classificação das ligas de cobre.....	46

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula (1). Equação da Lei do Atrito.....	49
Fórmula (2) Equação da Lei de Fick.....	57
Fórmula (3) Equação Simplificada da Lei de Fick.....	57
Fórmula (4) Equação de Arrhenius	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: PTFE em falha.	19
Figura 2: Subdivisão dos tipos de bombas.....	21
Figura 3: Princípio de Funcionamento da Bomba Alternativa de Pistão.	22
Figura 4: Bomba Alternativa de Embolo	23
Figura 5: Anéis e gaxetas.....	25
Figura 6: Materiais metálicos utilizados em vedações.....	27
Figura 7: Materiais poliméricos utilizados em vedações.....	28
Figura 8: Cadeias poliméricas.	30
Figura 9: Gráfico de Fluência.	32
Figura 10: Estrutura do PTFE.....	33
Figura 11: Filme transferido do PTFE para o contra-corpo.	36
Figura 12: Desgaste por fusão em polímeros.....	38
Figura 13: Aumento de temperatura no contato.	40
Figura 14: Quadro 4 – Ligas de Bronze.....	47
Figura 15: Contato mecânico entre as superfícies.	50
Figura 16: Ampliação da Região de Contato.....	51
Figura 17: Asperidade dura deslizando sobre superfície polimérica.	52
Figura 18: Difusão por lacuna e intersticial.....	54
Figura 19: Mecanismo intersticial.	55
Figura 20: Diferença de concentração.....	56
Figura 21: Gradiente de concentração.	57
Figura 22: Formação de intermetálicos.	60
Figura 23: Diagrama de Fases Sn-Cu.....	61
Figura 24: Fluxograma do processamento e caracterização das amostras.	64
Figura 25: Identificação dos setores das amostras.	67
Figura 26: Amostra dividida em setores.	67
Figura 27: Retirada da amostra do forno.....	68
Figura 28: Amostras após ataque com Cloreto Férrico a 5%.	69
Figura 29: – Microscópio óptico.....	70
Figura 30: EDX.....	71

Figura 31: Parte Afetada da Bomba.	74
Figura 32: Temperaturas e Pressões Coletadas do PTFE - 2013.....	75
Figura 33: Filme transferido do PTFE para o contra-corpo.	76
Figura 34: Desgaste por fusão em polímeros.....	76
Figura 35: PTFE deformado.	77
Figura 36: Temperaturas e Pressões Coletadas do PTFE x bronze 2014.	78
Figura 37: Temperaturas e Pressões Coletadas do bronze 2015.	79
Figura 38: Dureza Rockwell.	80
Figura 39: Imagens do Anel 1 Setor 2.....	81
Figura 40: Imagens do Anel 2 Setor 2.....	82
Figura 41: Imagens do Anel 3 Setor 2.....	83
Figura 42: Teor de estanho nos setores.....	84
Figura 43: Processo de difusão.....	85

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Bomba Alternativa em cortes.	95
Anexo II – Quadro de Difusão Cu e Sn na temperatura de 25°C e 150°C	96
Anexo III – Histórico de intervenções no Sistema SAP	97
Anexo IV – Tela do PI, monitoramento da pressão e temperatura.....	98

1 INTRODUÇÃO

A indisponibilidade de um equipamento pode trazer vários prejuízos para uma unidade de Produção, dependendo da sua função no processo. Atualmente os problemas em equipamentos são gerados pelo fato de se exigir altos desempenhos nas estruturas e componentes mecânicos, conseqüentemente os mesmos podem apresentar falhas que podem trazer conseqüências para a unidade de produção. A falha de materiais é quase sempre um evento indesejável por várias razões; tais como exposições de vidas humanas em risco, perdas econômicas e a interferência com a disponibilidade de produtos e serviços.

É responsabilidade da engenharia antecipar-se e planejar-se para possível falha e na eventualidade da ocorrência da falha, buscar medidas para neutralizar incidentes futuros [1]. Muitas vezes, um defeito ou falha em materiais consiste na seleção inadequada do mesmo. Tal seleção consiste em analisar vários critérios antes de definir o material, por isso antes da aplicação do mesmo devemos caracterizar principalmente as condições de serviço, uma vez que essas irão ditar as propriedades que o material deve possuir.

O PTFE (politetrafluoretileno) é considerado um polímero de engenharia com alta resistência química e baixo coeficiente de atrito. Pois apresenta baixa resistência ao deslizamento, o que leva a falha dos componentes desenvolvidos com esse material [2]. Na Figura 1, a seguir é apresentada a falha do anel com PTFE.



Figura 1: PTFE em falha.
Fonte: (AUTOR, 2013)

Pelo exposto, foi selecionado o bronze com adição de estanho cujas características citadas atendem a condição de operação do sistema de vedação.

O bronze apresenta propriedades favoráveis para aplicação como resistência à corrosão, resistência ao desgaste, elevada estabilidade térmica, características importantes para o componente que atua em um sistema de vedação [1,3].

O comportamento mecânico do bronze possui uma série de características que distingue dos polímeros. O estudo a seguir tem como objetivo:

- Investigar o desempenho dos anéis de bronze;
- Verificar o comportamento do mesmo em temperaturas e pressão de trabalho quando em funcionamento;
- Analisar sua estrutura após o tratamento termoquímico com adição Sn.

O bronze foi tratado termoquimicamente com estanho (Sn) sob uma temperatura de 150°C e após inserido como parte integrante do sistema de vedação de uma bomba alternativa de deslocamento positivo.

A fim de caracterizar o novo material, serão utilizadas análise de pressão e temperatura, análise de dureza, microscopia óptica, eletrônica, espectroscopia por dispersão de energia e por fim uso de metodologias de seleção de materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão explorados conceitos teóricos que fundamentam o atual estudo. Inicialmente serão abordados conhecimentos básicos de uma bomba de deslocamento positivo e os componentes de seu sistema de vedação. Na sequência será apresentada uma revisão sobre polímeros, comportamento do PTFE, ligas não ferrosas, tribologia e mecanismo de difusão do bronze.

2.1 BOMBAS

Atualmente as bombas hidráulicas são necessárias em uma série de atividades em nosso cotidiano, como nas instalações prediais, industriais, agricultura, equipamentos de operações de saneamento.

As bombas hidráulicas possuem função inversa das turbinas, pois transformam a energia mecânica em energia potencial, através de um motor que pode vir a ser manual, elétrico, eólico, etc.. Diferentemente das bombas, as turbinas hidráulicas transformam a energia potencial de uma queda hidráulica em energia mecânica, a qual pode ser convertida posteriormente em energia elétrica através de um gerador.

As bombas são máquinas hidráulicas que conferem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para outro obedecendo às condições de processo [4].

2.1.1. Classificação dos Tipos de Bombas

As bombas industriais podem ser classificadas pela sua aplicação ou pela forma com que a energia é cedida ao fluido [4]. Basicamente, existem 2 grandes

grupos de bombas. As turbobombas são aquelas que impelem energia ao fluido através do movimento rotativo do impelidor, órgão responsável pela transferência de energia cinética ao fluido. O segundo grupo de bombas são as volumétricas, ou de deslocamento positivo.

Basicamente, a energia é transmitida ao fluido sob forma de pressão, pois o órgão impulsionador da máquina “empurra” o fluido contra uma pressão mais elevada imposta pelo sistema. A Figura 2 mostra as diferenças entre os órgãos mecânicos principais das turbobombas e das bombas de deslocamento positivo. Entretanto, os dois grandes grupos citados podem ser subdivididos em diversos outros tipos [4].

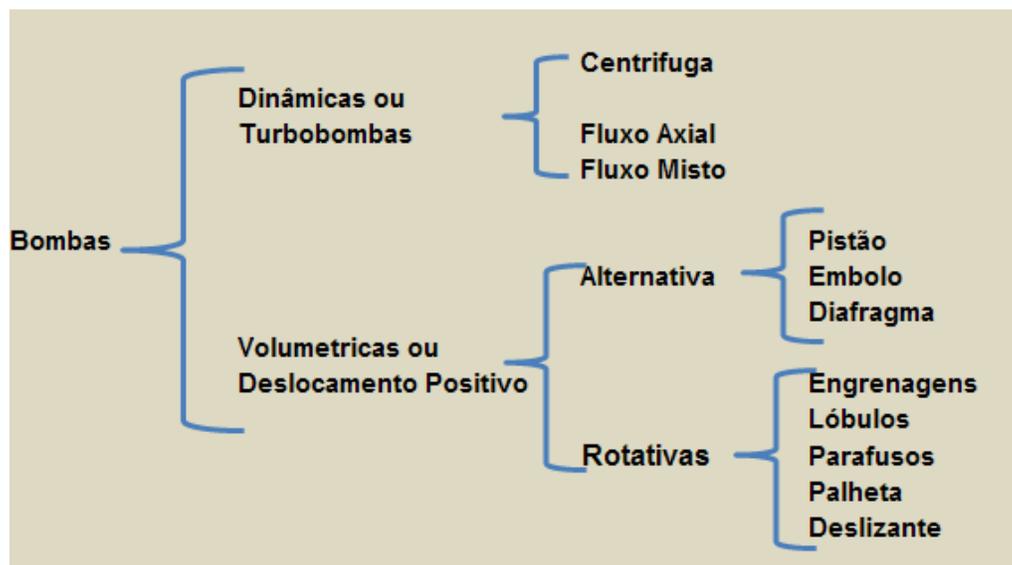


Figura 2: Subdivisão dos tipos de bombas.
Fonte: (MATOS; FALCO, 1998)

As faixas de aplicação dos dois grandes tipos de bombas citados são bastante diferentes. As turbobombas, em especial as bombas centrífugas possuem um vasto campo de aplicação, variando desde baixas vazões e pressões até altas vazões e pressões. Já as bombas volumétricas são mais adequadas para pressões elevadas e baixas vazões, também conhecida como bombas de deslocamento positivo, são equipamentos mecânicos utilizados para o transporte de um líquido, de um ponto de menor energia para outro de maior energia [5].

Nas bombas alternativas, a ação de bombeamento é feita através do movimento alternativo do pistão, êmbolo ou diafragma [3]. Como a bomba alternativa é uma máquina que transfere ao fluido bombeado a energia mecânica recebida de seu propulsor, sem passar pelo estágio intermediário da energia cinética, como ocorre nas bombas centrífugas. Por isso, pressões elevadas podem ser conseguidas com baixa velocidade do fluido bombeado.

O movimento de admissão produz uma de pressão no interior do cilindro, em função da aceleração do fluido e das perdas de carga na válvula, com isso a válvula de admissão (1) se abre, permitindo o enchimento do cilindro pelo líquido que se encontra a uma pressão maior. Durante esse movimento, a válvula de descarga (2) permanece fechada pela diferença de pressão. No curso do movimento de descarga, o elemento bombeador (pistão ou êmbolo) empurra o líquido para fora do cilindro através da válvula de descarga (2), enquanto a válvula de admissão (1) mantém-se fechada. É importante ressaltar que as válvulas de admissão e descarga são atuadas pela diferença de pressão, entre a linha de processo e o interior da bomba [5]. A Figura 3, a seguir, retrata o princípio de funcionamento da bomba.

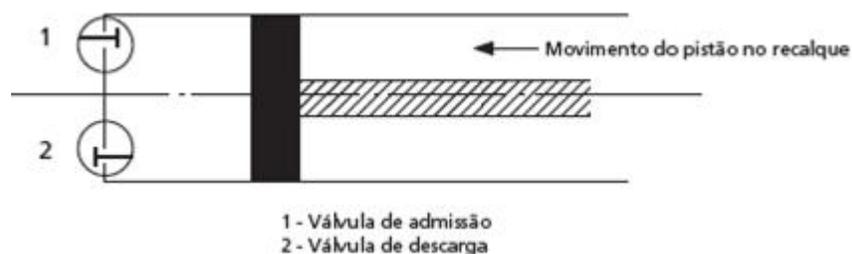


Figura 3: Princípio de Funcionamento da Bomba Alternativa de Pistão.
Fonte: (JUNIOR; SANTOS, 1998)

2.1.2. Bombas Alternativas de Êmbolo

A diferença fundamental entre um pistão e um êmbolo está na relação entre o comprimento e a área da seção transversal do elemento bombeador. No êmbolo, esta relação é maior que a do pistão. Entretanto, os pistões são dotados

de ranhuras para instalação de elementos de vedação. A Figura 4, a seguir, exhibe a bomba alternativa de êmbolo.

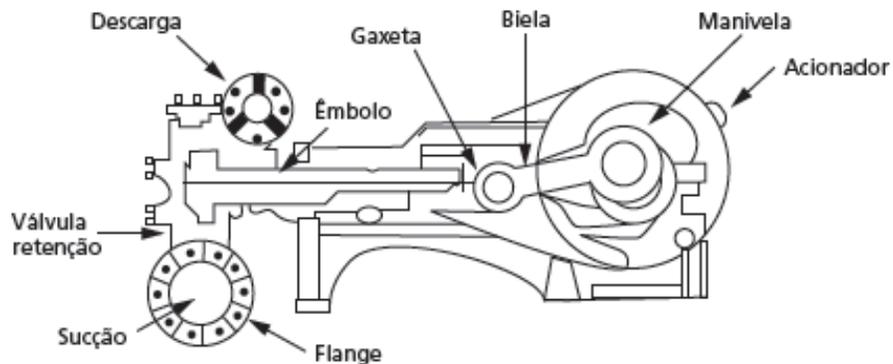


Figura 4: Bomba Alternativa de Embolo
Fonte: (JUNIOR; SANTOS, 1998)

Com exceção do elemento bombeador, as bombas alternativas de pistão e de êmbolo compartilham dos componentes virabrequins e biela, peças fundamentais da bomba, responsáveis em transformar o movimento rotativo do acionador em movimento alternativo para a cruzeta. Um virabrequim poderá ter tantas bielas quantos forem os números de cilindros que compõem a bomba.

A cruzeta é o elemento de ligação entre a biela e a haste. Os cilindros constituem a parte mais volumosa das bombas alternativas, onde o pistão ou êmbolo está alojado e executa o seu movimento alternativo. As válvulas são responsáveis por permitir a entrada e a descarga de líquido conforme o curso da haste e o diferencial de pressão entre a linha de processo e o interior da bomba.

A função da caixa de vedação é manter vazamentos mínimos ou em alguns casos, estanqueidade entre o líquido de processo e a atmosfera [5]. A gaxeta é o tipo de elemento de vedação mais usual nestes tipos de bombas.

2.1.3. Sistema de Vedação e seus Componentes

O *stuffing box* ou caixa de gaxetas tem à função principal de fazer a

vedação na haste do pistão ou êmbolo, que descreve um movimento retilíneo alternativo [3]. Ele é composto de sobreposta, de bucha de estrangulamento e de anel lanterna. A sobreposta é mantida fixa, apertando-se as gaxetas através de parafusos ou de uma rosca na parte externa da sobreposta e na parte interna. O *suffing box*, visto ser este componente crítico das bombas alternativas, pois requer constante manutenção. É bom observar que apenas as bombas alternativas de duplo efeito e de êmbolo contêm o *suffing box*, pois nas bombas de simples efeito de pistão não há necessidade de fazer vedação na haste do pistão [3]. Para melhor entendimento na é apresentado no Anexo I o desenho em corte da bomba a alternativa com seus respectivos acessórios.

a) ÊMBOLO

O êmbolo é similar aos pistões da bomba alternativa e possui poucos componentes. Ele é uma barra maciça que alternativamente recalca o fluido do interior. Devido ao êmbolo só necessitar de vedação no *suffing box*, os componentes, como camisa de cilindro, pistão, inserto, anéis de vedação do pistão, sistema cônico ou paralelo da haste para a fixação do pistão e porca autotravante de fixação do pistão não são necessários.

Os êmbolos podem ser construídos em aço inoxidável ou material cerâmico, dependendo da abrasividade e corrosividade do fluido bombeado [3].

b) GAXETA

Gaxetas são elementos mecânicos utilizados para vedar a passagem de um fluxo de fluido de um local para outro, de forma total ou parcial [5]. Os materiais usados na fabricação de gaxetas são: algodão, juta, asbesto (amianto), náilon, teflon, borracha, alumínio, latão e cobre. A esses materiais são aglutinados outros, tais como: óleo, sebo, graxa, silicone, grafite, mica.

A função desses outros materiais que são aglutinados às gaxetas é torná-las auto lubrificadas. As gaxetas são fabricadas em forma de cordas para serem recortadas ou em anéis já prontos para a montagem. A Figura 5 exhibe as gaxetas

em forma de corda, anéis e algumas de suas aplicações.

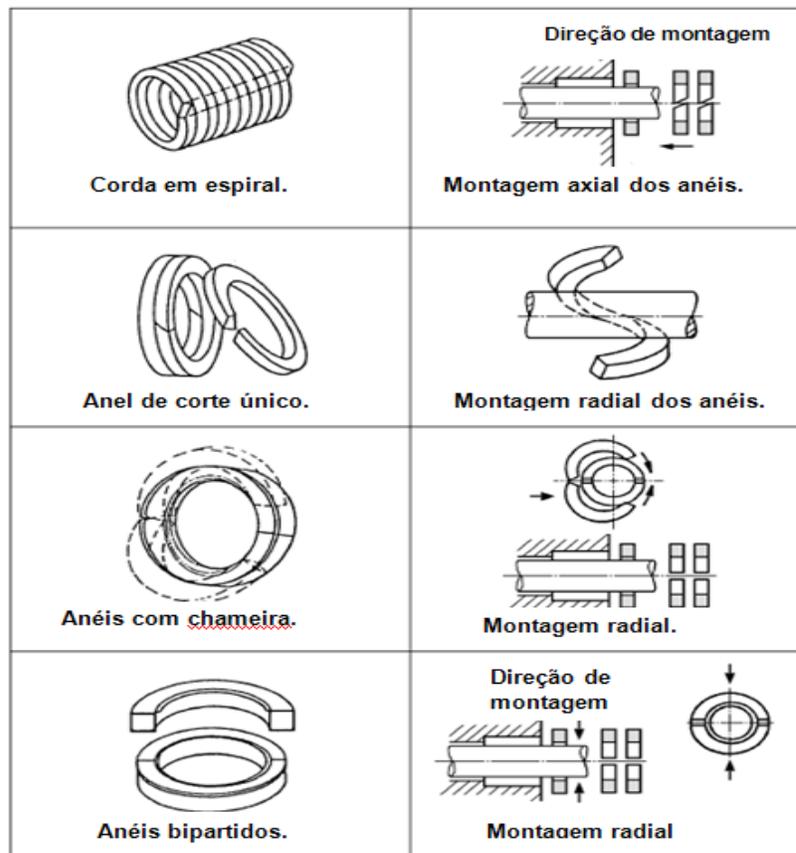


Figura 5: Anéis e gaxetas.
Fonte: (FERRAZ, 2008)

c) ANÉIS DE VEDAÇÃO

A indústria que fabrica vedações tem utilizado o termo plástico para designar as vedações feitas em materiais de fácil moldagem, independentemente do tipo de material de que elas sejam feitas, embora vários tipos de vedações tenham sido feitos de material plástico.

Os materiais tipicamente utilizados como elementos de vedação são as juntas de borracha, papelão, anéis poliméricos e metálicos

Estes produtos são fornecidos em várias formas, para que possam ser inseridos ou passado no *suffing box* para fixar as gaxetas e a facilitar a instalação dos anéis moldados [3].

Alguns engaxetamentos de seção quadrada são compostos de dois ou mais tipos de anéis de vedação, por exemplo, uma mistura de um ou mais tipos anéis duros e macios. Os anéis macios promovem uma melhor lubrificação interna, proporcionando melhor desempenho de todos os anéis de vedação [3].

Os anéis de vedação mais duros funcionam como suporte para anéis mais macios. O conjunto consiste em dois anéis centrais macios de estanho, torcido e moldado com grafite e óleo, dois anéis intermediários de linho trançado e impregnado com parafina, dois anéis externos de plástico fenólico mais duro [3].

O mais importante deste conjunto de vedação é o anel central que prontamente se deforma contra a superfície da haste ou embolo, devido ao seu alto grau de deformação, deve ser apoiado nas duas extremidades por um anel mais duro com folga bastante reduzida. Em outras combinações, os anéis do conjunto de vedação contêm arruelas de virgem entre anéis traçados de asbesto, anéis trançados de PTFE intercalados com anéis duros de PTFE [3].

d) VEDAÇÕES METÁLICAS

Elementos de vedação conforme já mencionado, são peças que impedem a passagem de fluidos de um ambiente para outro e evitam que esse ambiente seja poluído. É o impedimento mecânico ao fluxo de massa através de uma região denominada fronteira. Para obter a vedação é necessário ocupar o espaço livre entre as duas superfícies em contato de forma que não exista caminho para o escoamento.

As vedações metálicas são caracterizadas por serem utilizadas na maioria das vezes sistemas de altas pressões, ou ambientes corrosivos. Sendo indicados para cabeçotes de válvula, trocadores de calor, prensa hidráulica, compressores e flanges de encaixe. Outra característica é a necessidade de acabamento superficial melhor do que o necessário em vedações elastoméricas. Para se estabelecer uma vedação metálica alguns parâmetros são necessários e fundamentais para um bom desempenho como: acabamento superficial, tolerância

dimensional, tolerância de forma, elasticidade das partes em contato e fluido que se deseja vedar.

A contribuição do acabamento superficial para a vedação está associada à compactação e eliminação dos espaços vazios através dos quais o fluido pode passar, quando esses espaços são eliminados tem-se a vedação [7].

Para melhor entendimento dos tópicos relacionado a vedação, será apresentado nas Figuras 6 e 7 alguns materiais utilizados em sistemas de vedações.

Denominação	ASTM/UNS	Aplicações	Características
Bronze SAE 65 Bz 12 Bz 14 CuSn	C90700 C90800 C91000	Engrenagens, buchas, mancais, coroas, guias deslizantes, anéis de pistão.	Dureza tenaz com boa resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga superficial. Permite trabalhar com cargas específicas elevadas. Importante estarem bem lubrificadas.
Bronze SAE 62 SAE 620 SAE 622 CuSnZn	C90500 C90300 C92200	Anéis de vedação, válvulas, sede de hastes, flanges e conexões, carcaça e rotores de bombas, peças resistentes à pressão e à temperatura.	Resistente à corrosão e à água do mar. Permite trabalhar com cargas específicas médias.
Bronze SAE 40 SAE 660 CuSnPbZn	C83600 C93200	Peças pequenas como mancais, buchas, anéis, material hidráulico e guarnições, elementos de acoplamento.	Boas propriedades de anti-tribo e resistências médias. Utilizar em peças que requerem velocidade e pressão superficial moderada.
Bronze SAE 68-A SAE 68-B SAE CA-624 SAE CA-630 SAE CA-954 SAE CA-955 CuAl	C95200 C95300 C62400 C63000 C95400 C95500	Mancais deslizantes com cargas e choques extremamente altos, coroas altamente solicitadas, buchas, engrenagens, assento e sede de válvulas, guias, pinhões, anéis, sapatas, peças para agitadores e ferramentas anti-faiscantes.	Excelentes propriedades mecânicas. Resistente a vibrações, desgaste, corrosão e cavitação. Tratáveis termicamente, exigem boa lubrificação.

Figura 6: Materiais metálicos utilizados em vedações.
Fonte: (SHOCKMETAIS, 2015)

Denominação	ASTM/UNS	Aplicações	Características
Neoprene	01418: CR	Muito usado na indústria de refrigeração.	Possui propriedades muito desejáveis na indústria de vedação, como resistência moderada aos óleos de petróleo, ozônio, ao oxigênio e à luz solar; sua deformação por compressão apresenta baixos índices, ou seja, boa resiliência e ótima resistência química. Temperatura: -40°C até 100°C
Poliétileno		Tanques, dutos para gases, corpo de válvulas, anéis, placas.	Tem como principais características a atoxidade, alta resistência a produtos químicos mesmo em temperaturas elevadas, baixa resistência mecânica, elevada tenacidade, boa resistência ao desgaste, excelente isolante elétrico, resistência ao calor até 95°C.
Fluorocarbono-Viton	01418: F.K.M.	É a borracha de maior aplicação em vedações com temperatura elevadas de trabalho	Combinação de uma alta resistência a temperatura e uma destacada resistência química. Os compostos fluorocarbono se aproximam do ideal para materiais destinados à vedação Temperatura: Composto Padrão -25°C até 200°C.
PTFE	01418	É utilizado em vedações, onde as temperaturas de trabalho são elevadas.	Alta durabilidade; Grande estabilidade térmica; Inércia aos produtos químicos; ação isolante; Excepcionais propriedades de deslizamento; Impermeabilidade a gases. Temperatura: -200°C até 260°C
Chevron	-	É usado principalmente para a fabricação de jogos de gaxetas ou para gaxetas individuais, mas sempre voltado a altas pressões.	Especialmente trançado, é impregnado com borracha; as mais comuns são as nitrílicas dissolvidas. Temperatura: -40°C até 100°C.
Celeron	-	Utilizado em Buchas, anéis, mancais, guias.	O tecido de algodão garante maior resistência mecânica. Resiste a óleos, graxas, água do mar, corrosão e mudanças bruscas de temperatura. É um material isolante de baixa tensão e de fácil usinagem. Temperatura em trabalho contínuo a 130°C com picos no máximo de 150°C.

Figura 7: Materiais poliméricos utilizados em vedações.
Fonte: (ADAPTADO DE VEDABRÁS, 2015)

2.2 POLÍMEROS

Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos, dentre os vários polímeros naturais podemos citar a celulose (plantas), caseína (proteína do leite), látex natural e seda. São exemplos de polímeros sintéticos o pvc, o nylon e acrílico [10]. Os polímeros são compostos químicos de elevada massa molecular relativa, estes contêm os mesmos elementos nas mesmas proporções relativas, mas em maior quantidade absoluta.

A palavra polímeros é originária do grego que significa: poli (muitos) e meros (partes). São macromoléculas formadas por moléculas pequenas (monômeros) que se ligam por meio de uma reação denominada polimerização, realizada mediante reações químicas. Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação

covalente, os polímeros podem-se dividir em três grandes classes: plásticos, borrachas e fibras [11].

2.2.1. Propriedades Mecânicas dos Polímeros

Possivelmente, os maiores números de diferentes materiais poliméricos caem dentro da classificação de plásticos: polietileno, polipropileno, cloreto de polivinila, poliestireno e os fluorcarbonos, epóxis, fenólicos e poliésteres podem ser todos eles classificados como plásticos.

Eles possuem uma larga variedade de combinações de propriedades, alguns plásticos são muito rígidos e frágeis; outros são flexíveis, exibindo deformações tanto elásticas quanto plásticas quando tensionados e às vezes experimentando considerável deformação antes da fratura. Polímeros que caem dentro desta classificação podem ter qualquer grau de cristalinidade e todas as estruturas e configurações moleculares (linear, ramificada, cruzada) [10].

Em muitas aplicações de engenharia, os materiais poliméricos competem favoravelmente com outros materiais em relação ao custo. Por outro lado, é a combinação do custo do material com o custo de fabricação do produto final que determina a utilização de materiais poliméricos. Tais materiais ganham vantagem na resistência à corrosão, na sua leveza, tenacidade, durabilidade, e no custo global de produção.

Um material polimérico pode ser considerado como constituído por várias partes ligadas quimicamente entre si, conforme Figura 8, a seguir, de modo a formar um sólido [12].



Figura 8: Cadeias poliméricas.
Fonte: (CANEVAROLO, 2006)

Os polímeros exibem dois tipos de morfologia no estado sólido: amorfo e semicristalino. Em um polímero amorfo, as moléculas estão orientadas aleatoriamente e estão entrelaçadas. Os polímeros amorfos são, geralmente, transparentes. Nos polímeros semicristalinos, as moléculas exibem um empacotamento regular, ordenado, em determinadas regiões. Devido as fortes interações intermoleculares, os polímeros semicristalinos são mais duros e resistentes; como as regiões cristalinas espalham a luz, estes polímeros são mais opacos [13].

Nos polímeros muitos aspectos necessitam ser observados, mas provavelmente o mais importante é que ao contrário do que ocorre com os metais as propriedades mecânicas dos polímeros são dependentes do tempo. Além disto, os efeitos do nível de tensão, da temperatura do material, e da estrutura, também têm influência [13]. A seguir serão abordadas algumas características em polímeros.

a) Comportamento térmico dos polímeros

As principais e mais importantes características dos polímeros são as mecânicas. Os polímeros podem ser divididos em termoplásticos, termofixo e elastômeros [10].

Termoplásticos: Plásticos com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Quando estes são retirados, o polímero solidifica-se em um produto com formas definidas. Esta alteração é uma transformação física, reversível. Quando o polímero é semicristalino, o

amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina [11]. São fusíveis, solúveis, recicláveis. Exemplos: polietileno (PE), poliestireno, poliamida (Náilon).

Termofixo: Plástico que amolece uma vez com o aquecimento sofre o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido. Posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado físico, ou seja, não amolece mais, tornando-se infusível e insolúvel. Exemplos: baquelite, resina epóxi [11].

Elastômero: Quando submetidas à tensão, os elastômeros se deformam, mas voltam ao estado inicial quando a tensão é removida. São amorfos ou com baixa cristalinidade, possuindo cadeias moleculares naturalmente espiraladas e dobradas; apresentam altas deformações elásticas, resultantes da combinação de alta mobilidade local de trechos de cadeia (baixa energia de interação intermolecular) e baixa mobilidade total das cadeias (ligações covalentes cruzadas entre cadeias ou reticuladas).

A maioria das características de materiais viscoelásticos é a de exibir deformação dependente do tempo, quando sujeitos a cargas constantes que é o caso da fluência. Os materiais viscoelásticos também possuem a capacidade de se reconstituírem quando a tensão suportada pelo mesmo é removida, fazendo com que ocorra uma reconstituição do material [1].

b) Fluência

A fluência é um fenômeno de deformação progressiva, lenta, sob ação de uma carga constante aplicada durante longo período de tempo, ou seja, é a deformação do material durante o tempo devido à aplicação de uma tensão contínua [1]. Os polímeros apresentam deformação por fluência, sendo esta afetada por três fatores: tensão, tempo e temperatura, conforme Figura 9, a seguir.

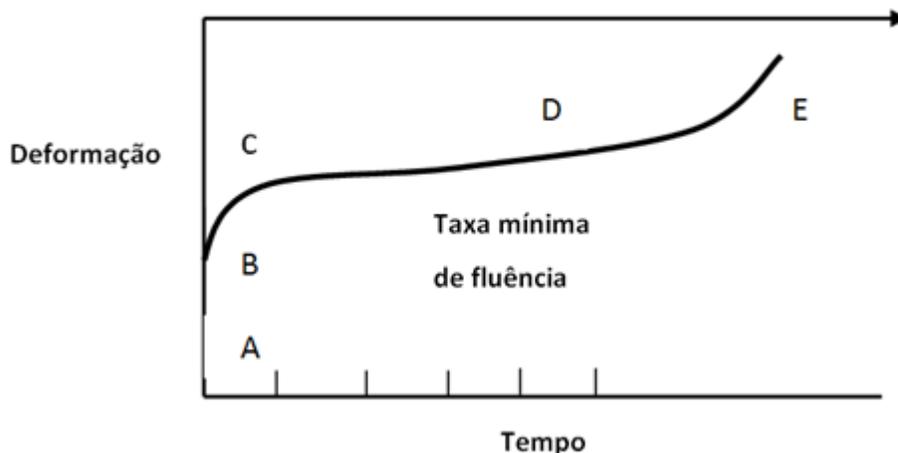


Figura 9: Gráfico de Fluência.
Fonte: (CHANDA, 1987)

É possível visualizar na Figura 9 que existe quase que instantaneamente uma deformação elástica seguindo uma dependência com o tempo, que ocorre em três estágios: primeiramente uma fluência transitória BC, logo após um estado constante de fluência CD e finalmente um estágio de aumento acelerado do mecanismo de fluência. Os polímeros de maneira geral possuem altas taxas de fluência a baixas tensões e temperaturas.

É importante ressaltar que o material não pode se deformar de forma contínua e em algum momento vai ocorrer a fratura, que devido à fluência é chamada de fratura de fluência [14].

c) Fratura

A principal causa de fratura nos polímeros é por ação prolongada e constante de tensões levando à fluência. Dois tipos de fraturas podem ser observados; a fratura frágil e a fratura dúctil. Na fratura frágil é potencialmente mais perigosa que a fratura dúctil, pois a mesma ocorre sem a observância de deformação no material.

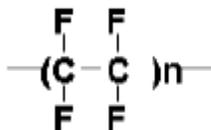
Na fratura dúctil, grandes deformações não recuperáveis ocorrem antes da ruptura real. Nos materiais poliméricos os dois tipos de fratura podem ser

observados dependendo de variáveis como: taxa de deformação, tensões aplicadas, temperatura e condições de operação [14].

Conforme mencionado, existem várias deficiências encontradas nos polímeros que inviabiliza sua aplicação em determinadas situações, diante disso, o capítulo a seguir irá tratar do PTFE, cujo polímero superar algumas características dos polímeros convencionais.

2.2.2. Estrutura do PTFE

O PTFE é um polímero criado pela polimerização das moléculas de tetrafluoroetileno (CF₂=CF₂), conforme apresentado na Figura 10, a seguir. É o plástico que melhor resiste ao calor e à corrosão por agentes químicos; por isso, apesar de ser caro, ele é muito utilizado em encanamentos, válvulas, registros, painéis domésticas, próteses, isolamentos elétricos, antenas parabólicas, revestimentos para equipamentos químicos, fita de vedação de encanamento, utensílios para a cozinha, canos, revestimentos à prova d'água, filmes e mancais.



Politetrafluoretileno (PTFE)

Figura 10: Estrutura do PTFE.
Fonte: (USBERCO; SALVADOR, 2002)

Na realidade, a ligação "C-F" é uma das mais fortes uniões encontradas entre os polímeros [16].

A estrutura do PTFE é extremamente diferente em relação aos outros polímeros. O átomo de flúor é muito maior que o átomo de hidrogênio e como resultado, a cadeia não é tão longa, possuindo um formato espiralado com os átomos de flúor empacotados firmemente ao redor das ligações de C-C centrais. Os átomos de flúor fornecem uma capa protetora para as ligações C-C mais

fracas e resultam na resistência química excepcional do PTFE.

A inércia química do PTFE é excelente devido a sua estrutura química, porém as alterações na estrutura podem ocorrer durante o processamento, ou por fusão, gerando perda das propriedades em alta temperatura. Entretanto, o PTFE tem algumas limitações, possui baixa resistência mecânica e baixa resistência abrasiva [17].

Com a utilização de outros materiais o PTFE melhora sua resistência ao desgaste enquanto que seu coeficiente de atrito é somente ligeiramente aumentado [17]. No Quadro 1, a seguir, são apresentadas as cargas, ou seja, materiais que podem ser adicionadas no PTFE para melhorar suas características.

CARGAS	PROPRIEDADES OBTIDAS
Fibra de Vidro	Resistência à compressão Resistência ao desgaste Ótima resistência química
Carbono	Resistência à compressão Resistência ao desgaste Boa condutibilidade térmica
Grafite	Boa condutibilidade térmica Boas produtividades de deslizamento Baixo coeficiente de atrito
Bronze	Resistência à compressão Resistência ao desgaste Baixo escoamento a frio Ótima resistência química

Quadro 1 – Cargas e propriedades do PTFE.
Fonte: (POLIFLUOR IND. E COM. DE PLASTICOS, 2015)

No capítulo, a seguir, será tratado algumas deficiências do PTFE em relação à temperatura e o atrito.

2.2.3. Característica Tribologica do PTFE

O PTFE possui baixo coeficiente de atrito e alta estabilidade térmica, com isso é muito utilizado em aplicações em mancais e selos. Portanto o material apresenta baixa resistência ao desgaste por deslizamento, chegando a falhar prematuramente [2]. A seguir serão destacadas algumas características do polímero em relação ao desgaste, quando em contato com superfície de um contra corpo. O Conhecimento dos mecanismos de desgaste é importante para manter a disponibilidade e reduzir custos de manutenção de qualquer sistema tribológico [18].

O atrito gerado pelo movimento entre partes móveis é a maior causa de desgaste e dissipação de energia. Na tribologia possuem uma série de mecanismos de desgaste como: desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste por fadiga, desgaste por fusão, entre outros [19].

a) Desgaste Adesivo:

O desgaste adesivo é originado quando a superfície do contra corpo é relativamente mais lisa, e o mecanismo de desgaste está associado à transferência de material para o contra corpo devido à adesão, conforme exposto na Figura 11, a seguir Quando um polímero desliza contra superfície mais dura, resultará no desgaste do material através do desprendimento de camadas que serão transferidas para o contra corpo, nesse momento os segmentos de cadeia do material são desprendidos sem serem quebrados [19].

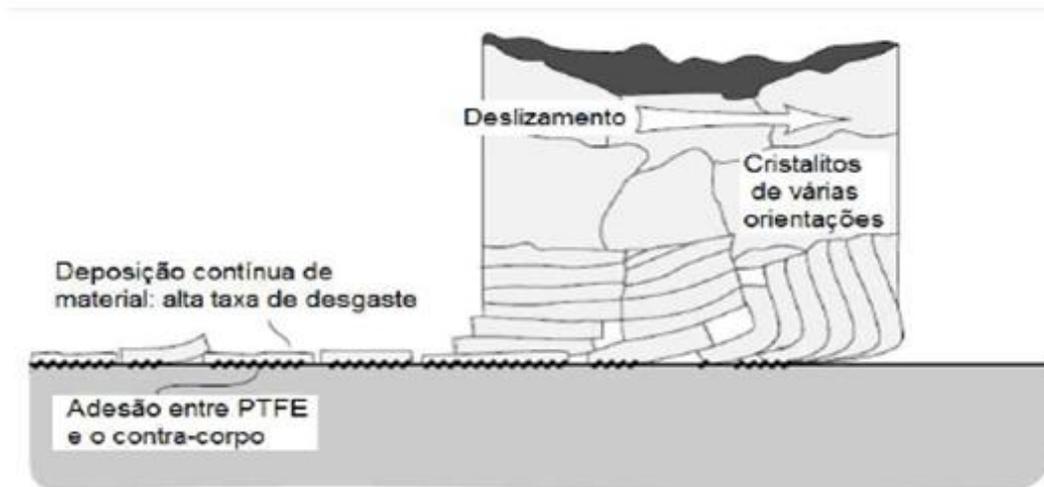


Figura 11: Filme transferido do PTFE para o contra-corpo.
 Fonte: (ADAPTADO DE STACHOVIÁK; BATCHELOR, 2001)

Portanto a união entre polímero e contra corpo é mais forte que as ligações dentro do próprio polímero, com isso ocorre a transferência de fragmento, ou seja, com a continuidade do deslizamento há um aumento da camada transferida a qual eventualmente se desprende. A taxa de desgaste torna-se baixa quando o filme é aderido pelo contra corpo [20].

O retorno para a condição de transferência normal ocorre com aumento da rugosidade ou aumento de velocidade, sendo assim a camada transferida pode ser estabilizada através do aumento da adesão entre a camada e o contra corpo. Portanto a mistura de outros materiais específicos podem fazer esta função sem significativa mudança no coeficiente de atrito.

b) Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo ocorre pela ação de partículas duras pressionando sobre a superfície em deslizamento. A abrasão é geralmente causada por partículas que estão juntas em alguma superfície oposta, ou por partículas que estão deslizando entre duas superfícies [21]. A perda de material por abrasão pode ser classificada como microcorte, microsulcamento, microlascamento e microfadiga de baixo ciclo [22].

c) Desgaste por fadiga

A fadiga pode é causada por formação de trincas no polímero, devido ao carregamento cíclico da superfície sólida do material. Ela pode ocorrer microscopicamente devido ao contato repetido das asperezas de uma superfície sólida em movimento [22]. Este tipo de mecanismo também acontece quando polímeros mais duros deslizam sobre contra corpos com superfícies lisas. Desgaste por fadiga acontece através da formação de trincas associada com a deformação elástica. O dano é acumulativo e se desenvolve para determinada condição com uma série de ciclos de contato. Partículas desprendidas são removidas por crescimento e interseção das trincas [23].

d) Desgaste por fusão

O contato dos materiais em altas velocidades propicia o aumento da temperatura, causando vários efeitos nos materiais, principalmente quando os valores estão próximos à temperatura de transição vítrea [24].

O desgaste por fusão ocorre devido à baixa condutividade térmica e baixo ponto de fusão dos materiais poliméricos, os mesmos estão suscetíveis durante o processo de deslizamento a alcançar temperaturas no contato suficientes para causar amolecimento e até fusão do material, como apresenta a Figura 12, a seguir. Esse evento está relacionado diretamente com a temperatura do contato e a severidade da condição imposta no deslizamento, sendo a última dependente de parâmetros como pressão de contato e velocidade de deslizamento.

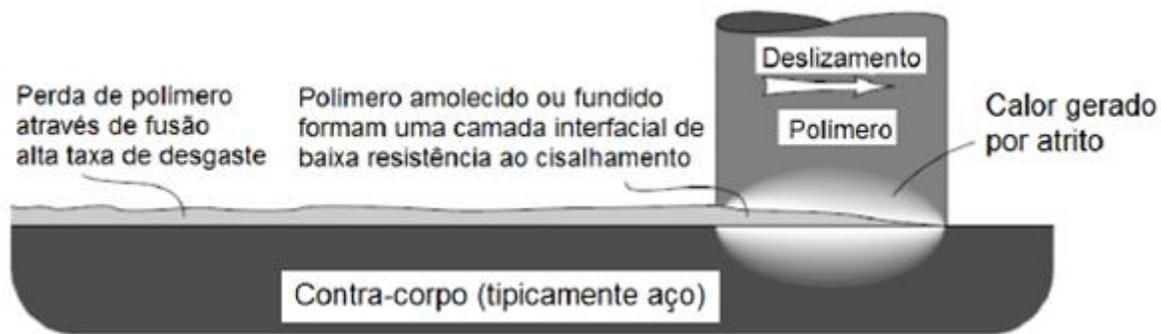


Figura 12: Desgaste por fusão em polímeros.
 Fonte: (ADAPTADO DE STACHOVIÁK; BATCHELOR, 2001)

2.2.4. Energia Superficial

A energia superficial de um polímero é baixa, devido às longas cadeias de carbono onde cada átomo está ligado através de ligações covalentes, ao número máximo de vizinhos, formando uma macromolécula as quais são unidas entre si por ligações secundárias fracas. Devido essa condição os átomos da superfície polimérica, fazem partes destas macromoléculas, apresentam um estado energético baixo, pois possuem, de modo geral, a máxima quantidade de ligações interatômicas, o que resulta em uma energia superficial reduzida [1]. No entanto o PTFE possui uma das menores energias superficiais, e ainda características que permitem a transferência de filmes como a sua estrutura molecular com cadeias lineares, pois esses filmes formados são fracamente aderidos ao contra corpo, o que ajuda na instabilidade devido à fácil remoção destes no contato [18].

2.2.5. Condição PV

O limite Pv é utilizado para expressar a transição severa de um componente polimérico a uma aplicação, isso significa o produto da pressão de contato, "p", pela velocidade de deslizamento, "v". O produto PV juntamente com coeficiente de atrito, constitui a energia de entrada na interface de deslizamento, sendo assim é intuitivo concluir que quanto maior o valor destas variáveis, mais severo será a

condição tribológica.

Se energia de entrada não for removida a uma taxa suficiente, a temperatura na interface se eleva até ocorrer fusão, carbonização ou um desgaste crítico [25]. O aumento da velocidade não tem relação com aumento de pressão de contato, cada uma dessas variáveis exerce influência específica sobre o comportamento dos polímeros [26]. A condição PV é um parâmetro muito importante para a análise do desgaste, para polímeros que tem baixa condutibilidade térmica e baixo ponto de fusão [24].

O atrito do polímero é influenciado por dois mecanismos, deformação e aderência. Durante o deslizamento polímero-metal a deformação envolve dissipação de energia em volta da zona de contato. Na aderência também acontece o mesmo processo, originando na quebra de ligações poliméricas e consequentemente ligação do polímero com a superfície oposta. [23].

O calor gerado pelo atrito resulta em amolecimento do polímero ou fusão, conforme exposto na Figura 13, a seguir:

1º-Estagio: Nível baixo de temperatura de fusão, com alguns picos de temperaturas elevadas conhecida como flash;

2º-Estagio: Ocorrência de picos de temperatura flash, com pontos de fusão em pequenas áreas do material;

3º-Estagio: Maior parte da temperatura de contato limitada pela temperatura de fusão do polímero, com provável fusão da superfície.

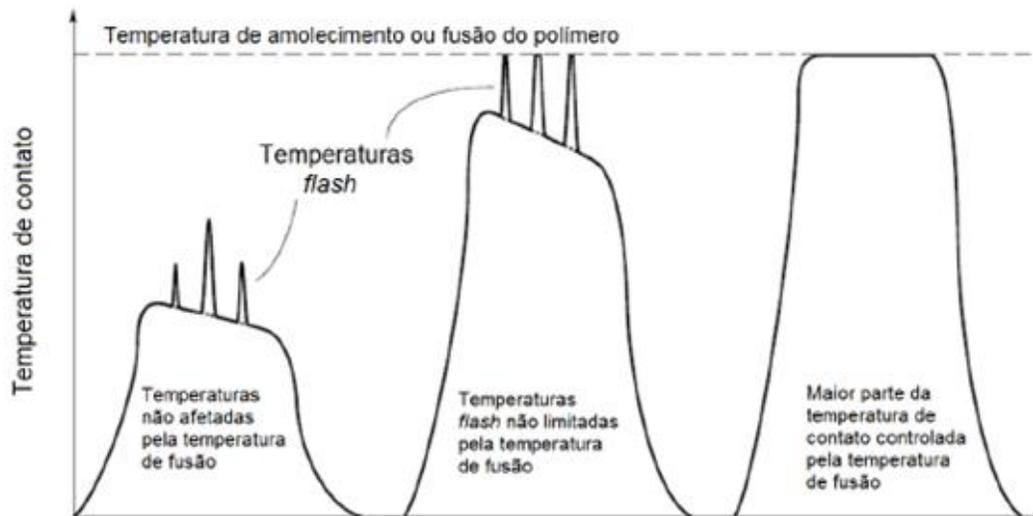


Figura 13: Aumento de temperatura no contato.
 Fonte: (ADAPTADO DE STACHOVIK; BATCHELOR, 2001)

Sendo assim altas velocidades, não há tempo suficiente para dissipação de calor, assim, pode-se considerar o contato como adiabático, ou seja, sem troca de calor com o meio externo, o que leva a um aumento rápido da temperatura na interface, normalmente, resultando na fusão do material polimérico [23].

2.3 METAIS

O conhecimento das propriedades dos materiais é importante para a indústria em geral, estas propriedades se referem ao comportamento do material em diversas situações e em níveis de solicitação do normal ao crítico. Quando escolhemos ou podemos dizer especificamos um material levamos em consideração vários fatores, por exemplo: baratos, práticos, leves, resistentes e duráveis.

Inúmeros fatores podem ser citados uns mais gerais outros mais restritos ao emprego dado para o material. Os produtos são feitos de materiais que conseguem atender não só, as exigências de mercado, mas também às exigências técnicas de adequação ao processo.

Os materiais metálicos consistem normalmente em combinações de elementos metálicos. Eles possuem um grande número de elétrons não localizados; isto é, esses elétrons não estão ligados a qualquer átomo em particular. Muitas das propriedades dos metais são atribuídas diretamente a esses elétrons.

Os metais são condutores de eletricidade e calor extremamente bons, e não são transparentes a luz visível; sua superfície metálica polida possui uma aparência brilhosa, além disso, os metais são muito resistentes, ao mesmo tempo em que são deformáveis também são responsáveis pelo seu amplo uso em aplicações estruturais [1].

Os metais possuem uma estrutura cristalina, na qual os átomos se dispõem de um modo ordenado. São relativamente resistentes e dúcteis à temperatura ambiente, e muitos mantêm uma boa resistência mecânica mesmo a temperaturas elevadas [27].

A grande parte dos metais é combinada com outros metais ou não metais de modo a proporcionar maior resistência mecânica, maior resistência à corrosão ou outras propriedades desejadas.

Um dos requisitos para a utilização de uma liga metálica é sua resistência a degradação em ambientes hostis [1]. Em virtude de sua composição, são às vezes agrupadas em 2 classes: ferrosas e não-ferrosas. As Ligas ferrosas, são aquelas em que o ferro é o principal constituinte, incluem aços e ferros fundidos, as ligas não ferrosas são todas as ligas que não sejam baseadas em ferro como cobre, zinco, alumínio [27]. Estas ligas e suas características são tratadas na segunda porção deste capítulo. O quadro 2 exhibe a divisão dos materiais metálicos.

Metálicos	Ferrosos	Aços e suas ligas (Ferro - Silício, Ferro-Níquel, Ferro Cobalto). Ferros fundidos: Branco, Cinzento, Nodular.
	Não ferrosos	Cobre Alumínio Chumbo Estanho Zinco Níquel Magnésio Titânio

Quadro 2 – Divisão dos materiais metálicos.
Fonte: (PALMEIRA, 2015)

As propriedades mecânicas são de relevante importância na maioria das aplicações para as quais se destinam os materiais. Algumas propriedades mecânicas importantes são o módulo de elasticidade, a dureza, a ductilidade e a rigidez [27]. A seguir são listadas algumas propriedades dos metais e suas ligas [29]:

Resistência mecânica: é a resistência à ação de determinados tipos de esforços, como a tração e a compressão.

Resiliência: é a maior ou menor reação do material às solicitações dinâmicas, isto é, a propriedade do material resistir a esforços externos dinâmicos (choques, pancadas, etc.) sem sofrer ruptura.

Elasticidade: é a capacidade que um material tem ao se deformar, quando submetido a um esforço e de retornar a forma original quando o esforço termina.

Dureza: é a resistência do material à penetração, deformação plástica permanente, ao desgaste mecânico.

O valor de uma propriedade varia mesmo entre os materiais de uma mesma

classe, contudo é possível observar certo grau de correlação entre as classes de materiais e as propriedades na Tabela 1, a seguir.

Propriedade	Unidade	Metais	Cerâmicas	Polímeros	Compósitos*
Densidade	Mg**/m ³	1-5	1-5	1-2	1,5-2,0
Mód. De Young	GPa	50-200	10-1000	0,01-10	10-200
Res. À tração	MPa	50-2000	1-800	5-100	100-1000

Tabela 1: Propriedades dos Materiais.
Fonte: (ASHBY;JONES, 2007)

2.3.1. Ligas Metálicas

Pode-se encontrar um material que tenha um conjunto ideal de propriedades, mas seja extremamente caro. Uma escolha perfeita de material é quando o mesmo possui as propriedades requeridas para o projeto e custo baixo de fabricação [1].

A grande parte dos metais engenharia é combinada com outros metais ou não-metais de modo a proporcionar maior resistência mecânica, maior resistência à corrosão ou outras propriedades desejadas. Uma liga metálica é uma mistura de dois ou mais metais ou de um metal e um não metal [27].

A seguir serão abordados algumas a características dos materiais não ferrosos.

a) COBRE

Os metais não ferrosos ocupam uma posição de destaque na indústria e representam um campo muito importante nos setores mecânicos, de transporte e elétricos. Podendo ser utilizado no estado puro, contudo sua importância crescente deve-se ao constante desenvolvimento de suas ligas, com características especiais que tornam insubstituíveis em determinadas aplicações [31].

O cobre é um metal com característica física, marrom-vermelho, que apresenta ponto de fusão correspondente a 1.083°C e densidade correspondente a $8,96 \text{ g/cm}^3$ a 20°C sendo um bom condutor de calor e eletricidade. O cobre ainda apresenta uma excelente deformabilidade, boa resistência à corrosão: exposto à ação do ar, ele fica esverdeado. Apresenta resistência mecânica e característica a fadiga satisfatória, além de boa usinabilidade. As ligas de cobre apresentam diversas propriedades superiores, incluindo uma resistência em ambientes marinho e em outros ambientes corrosivo [31].

As classificações dos principais tipos de cobre são: cobre eletrolítico tenaz, cobre refinado a fogo tenaz, cobre desoxidado com fósforo, de baixo teor e alto teor, cobre isento de oxigênio, cobre refundido. Esse cobre é fornecido em forma de placas, chapas, tiras, barras, arames e fios, tubos ou perfis conformados por forjamento. Conforme suas propriedades mecânicas variam dentro dos seguintes limites: [31].

Limites de escoamento-5 a 35 kgf/mm^2

Limite de resistência à tração -22 a 45 kgf/mm^2

Alogamento-48 a 6%

Dureza Brinell-45 a 105

Modulo de elasticidade 12.000 a 13.500 kgf/mm^2

As Ligas cobre-alumínio contem alumínio de 5 a 10% em média, podendo ainda apresentar níquel até 7% manganês ferro até 6% e eventualmente arsênio até 0,4%.

A de maior resistência mecânica é a que contém em média 10% podendo apresentar de alumínio, com 5% de ferro e 5% de níquel. Seu limite de escoamento de resistência à tração varia de 75 a 80 kgf/mm^2 , seu limite de escoamento de 42 a 50 kgf/mm^2 , seu alongamento de 15 a 12% e sua dureza Brinell 180 a 215, podendo ser tempera e revenida. Todas as ligas cobre-alumínio

possuem geralmente resistência à corrosão e suas aplicações são as seguintes: tubos de condensadores, evaporadores e trocadores de calor, tubos para água do mar, assentos de válvulas, hastes, hélice navais, mancais, buchas e peças resistentes à corrosão e outros componentes.

Os tratamentos térmicos usualmente empregados no cobre e suas ligas são os seguintes homogeneização, recozimento, alívio de tensões, solubilização e endurecimento por precipitação [31].

O cobre apesar de ser um dos materiais mais antigos ele possui características importantes como: elevada condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão, moderada resistência mecânica e facilidade de serem submetidos aos diversos processos de fabricação [32].

Os cobsres ligados são aqueles que contêm uma porcentagem menor que 3% de algum elemento adicionado para melhorar alguma das características do cobre como a usinabilidade, resistência mecânica e outras, conservando a alta condutibilidade elétrica e térmica do cobre. Geralmente os elementos utilizados são estanho, cádmio, ferro, telúrio, zircônio, cromo e berílio. Existem também outras ligas de cobre importantes como: os latões (zinco), bronzes (estanho), cuproaluminios (alumínio), cuproníqueis (níquel), cuprosilícios (silício) e alpacas (níquel-zinco) [33]. A norma NBR-7554/82 está dividida em ligas trabalhadas e ligas fundidas. As ligas são representadas por caracteres alfanuméricos que variam de C100 a C799, enquanto as fundidas variam de C800 a C900. A letra C significa que o material base é o cobre e o segundo algarismo indica a classe conforme Quadro 3, a seguir:

C2XX	Cu-Zn (Latões)
C3XX	Cu-Zn-Pb (Latões com chumbo)
C4XX	Cu-Zn-Sn (Latões com estanho)
C5XX	Cu-Sn- ou Cu-Sn-Pb (Bronzes com chumbo)
C6XX	Cu-Al ou Cu-Si
C7XX	Cu-Ni ou Cu-Ni-Zn (Alpacas)
C81XX	Com elevado teor de Cu
C84XX	Cu-Sn-Zn (Bronzes com zinco)
C90XX e C91XX	Cu-Sn-Zn (Bronze com elevado teor de Zn)
C947X e C949X	Cu-Sn-Ni

Quadro 3 – Classificação das ligas de cobre.
Fonte: (SILVA, 2006)

b) BRONZE

A escolha de um bronze para uma dada aplicação engloba não só a consideração das propriedades e características a ser exigida, como também a devida atenção ao seu custo, não se deve escolher uma liga de alto custo, para aplicações em que bronzes mais baratos seja suficiente.

De uma maneira geral, os bronzes são ligas de elevado preço e por essa razão só são empregados quando houver necessidade das características que lhe são próprias. Os bronzes são ligas excelentes sob o ponto de vista de resistência à fadiga por isso são empregadas nos casos em que prevalecem tensões cíclicas ou alternadas [31]. O bronze ao alumínio é usado em bombas, válvulas, rotores, onde sua resistência mecânica e à abrasão são necessárias com confiabilidade em longo prazo [1]. Na figura 14, a seguir, são exibidas as principais ligas de bronze.

Especific. Equivalentes			Composição Química										Características			
SAE	ASTM-B	UNS	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Sb	Ni	P	Al	Mn	Resist Kg/mm ²	Along	Esc Kg/mm ²	Dureza HB
40	584	C 83600	85	5	5	5							21	20	10	70
41	584	C 85400	67	1	3	29							20	20	8	50
43	584	C 86500	58			39	1				1	1	45	20	17	100
62	584	C 90500	88	10		2							25	20	12	90
63			86	10	2		4			1			24	10	12	88
64	584	C 93700	80	10	10								21	15	8	75
65	427	C 90700	87,8	11	0,5	0,5				0,2			24	10	13	90
66	584	C 93500	85	5	9	1							19	15	8	70
67	584	C 93800	78	7	15								18	12	10	65
68-A	148	C 95200	88				3				9		45	20	17	130
68-B	148	C 95300	89				1				10		45	20	17	150
68-C	148	C 95400	85				4				11		51	12	20	170
68-D	148	C 95500	81				4		4		11		62	6	27	200
430-A	584	C 86200	63			27	3				4	3	62	18	30	150
430-B	584	C 86300	61			27	3				6	3	75	12	41	200
620	584	C 90300	88	8		4							32	20	17	92
622	584	C 92200	87,5	6	1,5	4			1				23	24	11	70
621	584	C 92300	87	8	1	4							25	18	11	80
640			85,2	11	1,5	0,5	0,3		1,5				25	10	13	80
660	584	C 93200	83	7	7	3							30	25	16	80
CA-954	148	C 95800	81,3				4		4,5		9	12	40	12	14	150
CA-955	148	C 95900	81				4,5				13	15	48	6	20	170
BZ-5	139-A	C 51000	95	5									35	57	15	75

Figura 14: Quadro 4 – Ligas de Bronze.

Fonte: (NEUBERT TABELA DE LIGAS DE BRONZE, 2015)

Conforme Figura 14 do Quadro 4, listado anteriormente o bronze de alumínio apresenta até 14% de alumínio (Al), que constitui o principal elemento de liga. A elevada resistência à corrosão sob tensão, em virtude da presença de uma película refratária de óxido, possibilita uma ampla gama de aplicações na engenharia, principalmente quando diz respeito à indústria naval e aeronáutica. O ferro (Fe) utilizado na liga é responsável pelo aumento da resistência mecânica.

O bronze de alumínio tem grande capacidade de manter suas características em temperaturas altas, e baixas sem perder a ductilidade. Essa liga possui baixo coeficiente de fricção contra aço e boa resistência a corrosão, choque e a fadiga.

A adição de cobre resulta em grande aumento para as qualidades de anti-fricção da liga, melhora sensivelmente a usinabilidade e facilitam o processo de fundição. Os bronzes desta classe têm hoje inteira aceitação como bronzes padrão para mancais, guias e assentos de válvulas [1,31].

c) ESTANHO

O estanho possui a distribuição atômica 2-8-18-18-4 com peso atômico 118,69. O metal é altamente dúctil, de aparência branco-prateada é atacado por ácidos fortes [36]. O ponto de fusão é 232°C e seu peso específico 7,3 g/cm³ e sua forma cristalina é tetragonal. O material é dúctil, possui baixa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão.

É empregado na forma de folhas, chapas e fios estanhados e como elemento básico de certas ligas, como algumas para mancais e soldas, ou como elemento secundário de ligas importantes, como bronzes. [31]. As ligas de estanho mais comuns são o bronze (estanho e cobre), a solda (estanho e chumbo), e estanho, chumbo e antimônio (metal patente).

Na eletrônica o estanho é usado para unir componentes eletrônicos a placas de circuito impresso ou fios. Dependendo do ponto de fusão as soldas são comumente classificadas como macias ou duras, nas soldas macias, é adicionado o bismuto na liga estanho e chumbo, as soldas duras são composta ligas de prata, cobre e zinco (solda prateada) ou cobre e zinco [37].

O estanho é um metal utilizado em centenas de processos industriais, em especial na galvanoplastia e na formação de ligas como o bronze e as soldas. É utilizado na fabricação de folhas de flandres, em cobertura protetora para dutos de cobre e para fabricação embalagem em produto alimentício [31].

O estanho protege o aço contra corrosão e age como lubrificante quando o aço passa entre superfícies. As folhas-de-flandres podem ser usadas para recobrir fios de cobre e para confecção de contatos elétricos [37]. Do Estanho obtêm-se facilidade fases intermetálicas (ligas de dois ou mais metais) duras e frágeis. As ligas mais utilizadas são cobre e estanho em proporções variadas.

O bronze de estanho tem maior resistência mecânica que o latão e melhor resistência à corrosão, entretanto, possui preço mais elevado que a liga cobre zinco. A adição de estanho ao cobre a liga pode influenciar diretamente em suas

características como: aumento do limite elástico, aumento dureza e aumento de ductilidade.

2.4 TRIBOLOGIA

A tribologia é a ciência e tecnologia de interação das superfícies em movimento e compreende o estudo dos fenômenos de atrito, desgaste, erosão, lubrificação [31]. Propriedades tribológicas são decisivas no desempenho de máquinas e dispositivos submetidos a trabalho mecânico. A grande importância da tribologia na indústria é a de estimar o tempo de vida de máquinas ou componentes de sistemas de produção a fim de evitar falhas mecânicas geradas pelo atrito e pelo desgaste, impedindo assim quedas na produção, no faturamento de empresas ou até mesmo acidentes que coloquem em risco a vida de pessoas [38].

2.4.1 Contato Mecânico

O contato mecânico acontece quando duas superfícies planas são colocadas juntas conforme Figura 15, a seguir, o contato ocorre em toda superfície, devido a rugosidade que ocorre em poucos pontos. As regiões em contato são referidas as junções, é a soma das junções é denominada a área real de contato. Com aumento da carga normal ocorre aproximação das superfícies e um grande número das asperezas entra em contato [39].

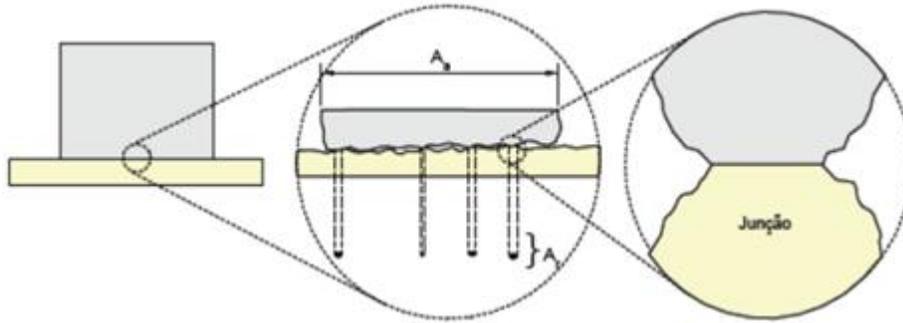


Figura 15: Contato mecânico entre as superfícies.
Fonte: (BHUSHAN apud SANTANA, 2009)

2.4.2 Atrito

O atrito é um processo de dissipação de calor e transferência de massa termodinamicamente irreversível, pode ser definido como a força resistiva que um corpo encontra ao se mover sobre outro [31].

A primeira lei do atrito estabelece que a força tangencial F_T necessária para iniciar ou sustentar um movimento relativo entre dois corpos é proporcional à força normal F_N que pressiona as superfícies em contato [38].

$$F_T = \mu F_N \quad (1)$$

onde:

F_T - Força de Atrito

F_N - Força normal

μ - coeficiente de atrito para um dado par de materiais.

O coeficiente de atrito é dito estático quando a força aplicada F_T deve iniciar o movimento, e pode ser maior que o coeficiente de atrito dinâmico, medido quando a força mantém o movimento entre os corpos. Quando o corpo desliza em uma superfície com inclinação θ , é fácil demonstrar que: $\mu = \tan \theta$.

A segunda lei estabelece que a força de atrito F_T independe da área de contato, assim, a força para deslizar um paralelepípedo será a mesma para qualquer de suas faces, desde que igualmente polidas. Na terceira lei estabelece que o atrito seja independente da velocidade de deslizamento; porém, isso implica que a força aplicada para iniciar o movimento será a mesma necessária para mantê-lo [38]. A Figura 16, a seguir, mostra que a superfície por mais polida que seja, ela não é plana a nível microscópico, apresenta asperezas que se tocam intimamente no contato entre corpos, de forma que a área real de contato A_r se restringe a poucos pontos, sendo muito menor que a área aparente de contato A_a .

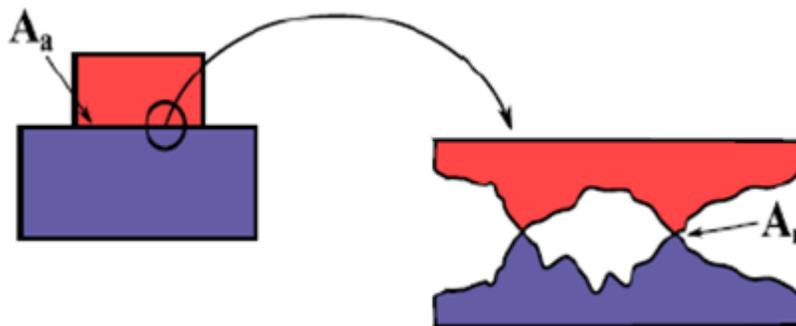


Figura 16: Ampliação da Região de Contato.
Fonte: (BHUSHAN;GUPTA, 1991)

2.4.3 Atrito em Polímeros

Comparando com materiais cerâmicos e com metais, os polímeros de engenharia, utilizados em aplicações tribológicas, exibem menores coeficiente de atrito, normalmente entre 0,1 e 0,5 tanto para deslizamento sobre materiais poliméricos quanto deslizando contra outros tipos de materiais. O contato entre polímeros, ou entre polímeros e metais, é predominantemente elástico, com exceção de superfícies com alta rugosidade [39]. Outro fator que diferencia o comportamento tribológico dos polímeros é que suas propriedades mecânicas são dependentes do tempo, da temperatura e da taxa de deformação [41].

Os polímeros também são caracterizados pelo mecanismo de deformação e

adesão [42]. Os mecanismos atuam em regiões distintas, as quais são através da representação de uma aspereza dura deslizando contra a superfície de um material polimérico. Os mecanismos de deformação e adesão são relacionados, com a zona coesiva e a zona interfacial. Conforme mostrado na Figura 17 a seguir, a deformação envolve dissipação de energia em grande volume em torno da área de contato e a adesão é originada a partir da interface entre o material deslizando e o contra corpo. O deslizamento pode provocar ruptura das junções temporariamente [43]. A existência de um contra corpo liso pode acarretar em desgaste por adesão, envolvendo apenas as deformações em camadas superficiais dos polímeros, conseqüentemente a retirada de camadas finas do material polimérico [39].



Figura 17: Aspereza dura deslizando sobre superfície polimérica.
Fonte: (HUTCHINGS apud SANTANA, 2009)

2.5 MECANISMO DE DIFUSÃO

Difusão é o transporte de matéria no estado sólido, induzido por agitação térmica, ou seja, é o fluxo de átomos, íons de outra espécie química em um material, provocado pela temperatura e pelo gradiente de concentração, portanto o mecanismo é marcado pelo movimento de uma região de alta concentração para outra de baixa concentração [44].

Muitas reações e processos industriais importantes no tratamento de materiais dependem do transporte de massa de uma espécie sólida, líquida ou gasosa (a nível microscópico) em outra fase sólida. A difusão pode ser demonstrada com a união de diferentes metais em contato íntimo [1].

Contudo, as vibrações térmicas que ocorrem nos sólidos permitem o movimento de alguns átomos. Nos metais e ligas metálicas, a difusão dos átomos é particularmente importante, a maior parte das reações no estado sólido envolve movimentos atômicos. Como exemplos de reações no estado sólido, temos a precipitação de uma segunda fase a partir de uma solução.

O mecanismo da difusão pode ser compreendido como a migração dos átomos de um sítio de rede para outro sítio da rede. De fato os átomos nos sólidos estão em constante movimento, assim para que um átomo sofra movimento de translação duas condições devem ser satisfeitas: [1].

a- Deverá haver um sítio adjacente vago;

b- O átomo deve ter suficiente energia (vibracional) para romper sua ligação com a rede e poder causar alguma distorção;

Numa temperatura específica alguma pequena fração do número total de átomos são capazes de realizar o movimento difusivo, em virtude das magnitudes das energias de vibração [1].

2.5.1 Difusão por Lacunas

Na Difusão por vacância ou lacunas, um átomo hospedeiro ou substitucional se desloca de uma posição normal da rede cristalina para um sítio vago, ou lacuna, adjacente. O mecanismo envolve a troca de um átomo a partir de uma posição normal da rede para um adjacente sítio de rede vazio ou lacunas, este mecanismo é apropriadamente denominado difusão através lacunas.

As movimentações dos átomos ocorrem em uma direção correspondente a um movimento das lacunas em direção em sentido oposta conforme representado na Figura 18, a seguir [1]. Nesse mecanismo ocorrem as seguintes situações:

a- A extensão segundo a qual a difusão por lacunas pode ocorrer é função da concentração de lacunas presente no metal;

b- A concentração de lacunas aumenta com a temperatura;

c- Quando átomos hospedeiros se difundem, ocorre o processo de autodifusão e quando átomos de impurezas substitucionais se difundem, ocorre o processo de interdifusão.

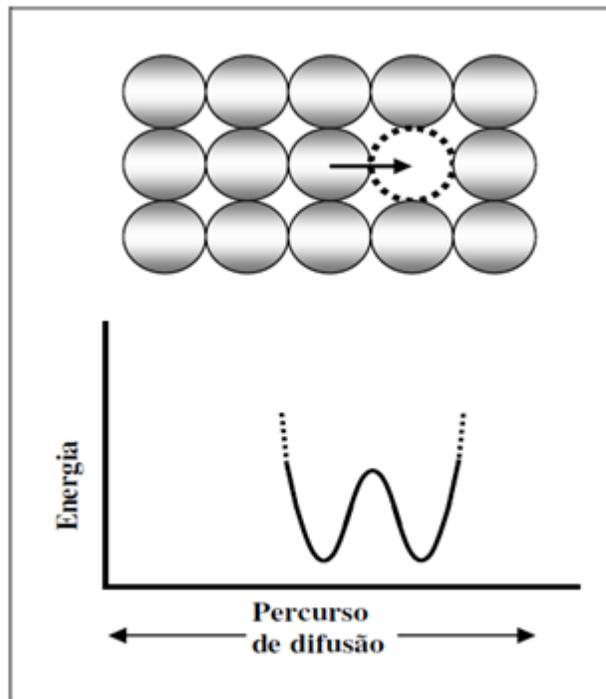


Figura 18: Difusão por lacuna e intersticial.
Fonte: (LOPES, 2014)

2.5.2 Difusão Intersticial

Na difusão intersticial os átomos se migram de uma posição intersticial para outra vizinha que esteja vazia. Os átomos hospedeiros ou de impureza

substitucional raramente formam interstícios, normalmente não se difundem através deste mecanismo [1]. Em muitas ligas metálicas, difusão intersticial ocorre muito mais rapidamente do que difusão através de vacâncias, de vez que átomos intersticiais são menores do que os átomos da rede, ou seja, a probabilidade de movimento atômico intersticial é maior do que a difusão através vacância. Na Figura 19 é exibido o exemplo do mecanismo de difusão intersticial.

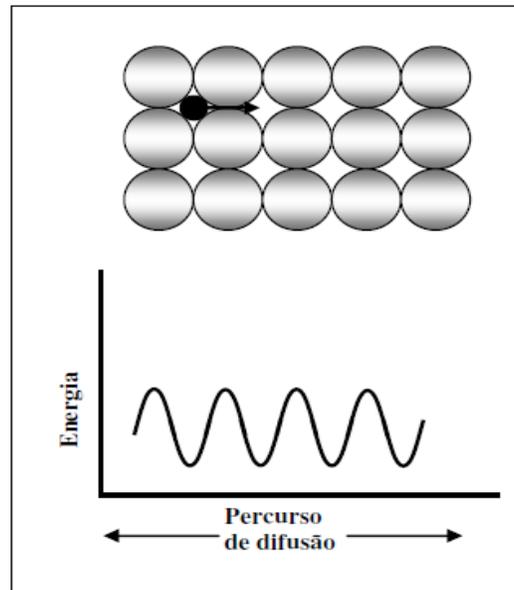


Figura 19: Mecanismo intersticial.
Fonte: (LOPES, 2014)

Para melhor entendimento do mecanismo tratado anteriormente na Figura 18 e 19, uma solução sólida pode ser substitucional (o átomo do soluto pode substituir um átomo do solvente) ou intersticial (o átomo do soluto pode ocupar uma posição intersticial entre átomos do solvente). Apenas as soluções sólidas substitucionais podem ser formadas em todas as proporções de ambos os componentes. As soluções sólidas substitucional são usualmente formadas entre dois tipos de átomos que tenham aproximadamente o mesmo tamanho, e as soluções sólidas intersticiais se formam usualmente entre átomos de tamanhos bastante diferentes.

2.5.3 Energia de Ativação

Quanto maior a energia de ativação, menor é a velocidade do processo e maior a sensibilidade da velocidade com a temperatura. Para que isso ocorra os átomos devem mudar de posições, as “barreiras de energia” devem ser superadas. Energia de ativação é a energia requerida para superar tais barreiras, somada à energia de formação do defeito [44]. Pode ser considerada como a energia necessária para produzir o movimento difusivo de mol de átomos [1].

Portanto, necessita-se de energia para retirar o átomo dos seus vizinhos originais; na difusão intersticial necessita-se de energia para forçar o átomo a um maior contato com os átomos vizinhos, conforme o mesmo se move entre eles a energia de ativação varia com diversos fatores:

- Um átomo pequeno tem uma energia de ativação menor que um átomo grande ou molécula;
- Os movimentos intersticiais requerem mais energia que os movimentos de vazios;
- São necessárias elevadas energias de ativação para a difusão em materiais fortemente ligados e de alto ponto de fusão.

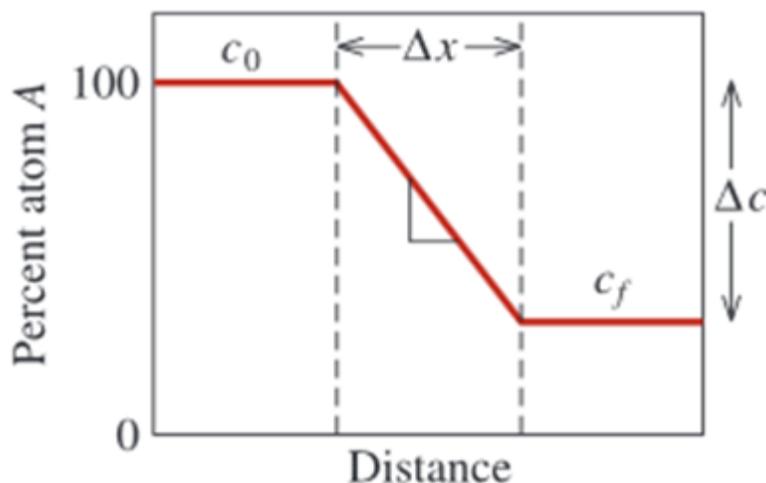


Figura 20: Diferença de concentração.
Fonte: (ASKELAND, 2008)

Na Figura 20 é demonstrado como a composição do material varia com a distância: Δc é a diferença de concentração pode ser criada quando dois materiais de diferentes composições são colocados em contato.

2.5.4 Difusão em Estado não Estacionário

A maioria das situações práticas de difusão é em estado não estacionário. Nesse estado o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em algum ponto particular num sólido variam com o tempo, resultando um acúmulo ou decréscimo (esgotamento) das espécies difusoras [1]. A Figura 21, a seguir, retrata o processo de concentração em diferentes tempos no processo de difusão.

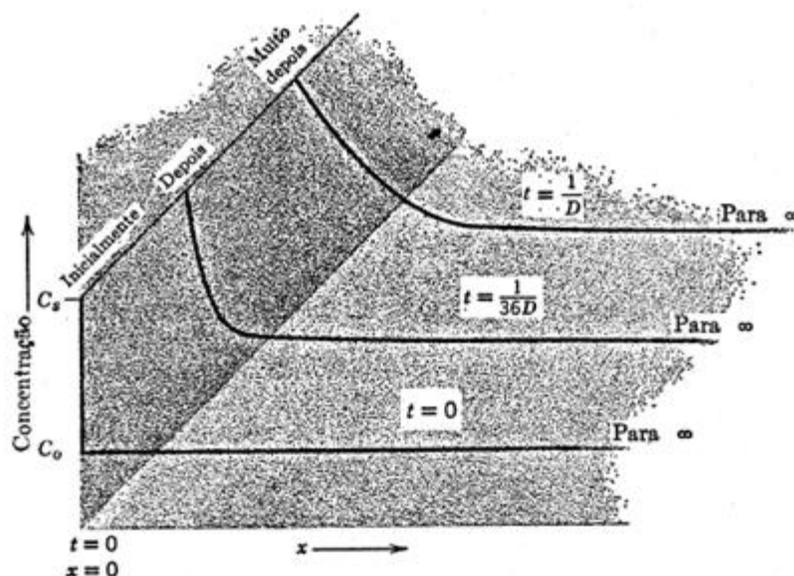


Figura 21: Gradiente de concentração.
Fonte: (PADILHA, 1997)

Obter soluções para a equação diferencial da segunda lei de Fick significa obter funções que relacionem a composição em função da distância e do tempo para uma dada temperatura. Estas soluções são obtidas a partir da fixação de condições de contorno e do conhecimento do significado físico das condições de contorno fixadas. Neste caso, uma segunda espécie se difundirá em um sólido e a concentração desta segunda espécie na interface (C_s) será mantida constante

[46].

Para descrever a difusão em estado não estacionário unidimensional, é utilizado a equação diferencial parcial conhecida por segunda lei de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Se o coeficiente de difusão não depende da composição (portanto, da posição), a segunda lei de Fick se simplifica para:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Quando são especificadas condições de contorno que correspondentes a um fenômeno físico é possível se obter soluções para segunda lei de Fick. Essas soluções são funções $C = f(x,t)$ que representam as concentrações em termos tanto da posição quanto do tempo.

2.5.5 Processo de Difusão Sn-Cu

A difusividade é encontrada na Lei de Fick e numerosas outras equações da físico-química, relacionadas com a difusão de matéria ou energia.

O processo de difusão do Sn – Cu ocorre quando os materiais são colocados em contato e aquecidos ou envelhecidos. Conforme mencionado anteriormente, uma solução sólida pode ser substitucional, ou seja, difundir por lacunas devido possuir algumas característica que facilitam uma boa solubilidade sólida como:

- diferença dos raios atômicos do solvente e do soluto maior igual a 15%;
- eletronegatividade próxima;
- solvente dissolverá maior quantidade do soluto que tiver maior valência.

Por isso que os átomos de Sn se difundem por trocar de lugar com as lacunas de no Cu, muito mais rapidamente que os átomos do próprio cobre [46]. Na Tabela 2 são listadas as características importantes que facilitam na solubilidade do Sn e Cu.

Metal	Raio Atômico (nm)	Valência mais comum	Temperatura de Fusão	Tamanho do Átomo (pm) ¹	Eletronegatividade
Cobre	0.1278	1+	1085	128	1.9
Estanho	0,1510	4+	232	140	1.8

Tabela 2: Características do Sn e Cu.
Fonte: (AUTOR, 2015)

Nesse processo de difusão surgem fases cristalinas diferentes de qualquer componente e são chamados de compostos intermetálicos. As propriedades dos compostos intermetálicos, diferem dos metais componentes, sendo muitas vezes de diferentes propriedades mecânicas [47]. A formação de intermetálico é formada na interface, a energia interfacial será relativamente baixa. Na difusão do Sn em Cu são criadas interfaces na qual possui uma fase Cu_3Sn ao lado do cobre, seguida por uma fase Cu_6Sn_5 . O estanho é esgotado através da formação de compostos intermetálicos como mostrado na Figura 22, a seguir.

¹ **Picômetro (pm)** - é uma das subdivisões do metro, usado para a medição de objectos muito pequenos, principalmente para dimensões atômicas.

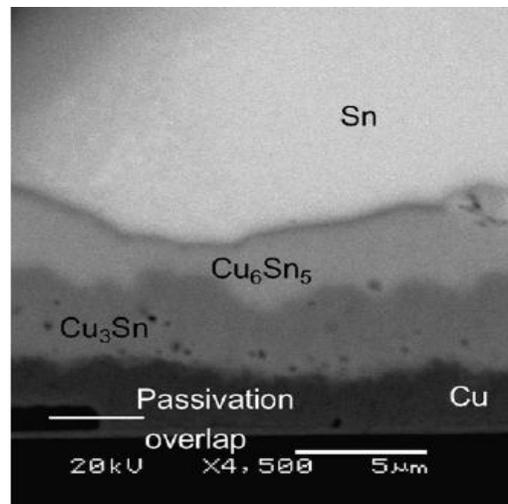


Figura 22: Formação de intermetálicos.
Fonte: (LABIE, 2007)

2.5.6 Fases Intermetálicas

No entanto, uma fase intermetálica é um composto químico homogêneo que consiste em dois ou mais metais, conforme apresentado na Figura 23. Em contraste com ligas, eles demonstram estruturas de treliça que diferem dos metais vizinhos no diagrama de fases. Isto é devido à mistura de diferentes tipos de ligações químicas.

A composição de uma fase intermetálica é fixada de acordo com uma relação conjunto de mistura, vínculo intermetálico no sentido mais estreito com estequiométrica, ou seja, atômica determinada composição fixa ou que varia dentro de uma ampla gama de homogeneidade em torno da composição estequiométrica. A largura de fase, também conhecido como o intervalo de homogeneidade, especifica a gama dentro da qual a razão de volume dos vários metais pode variar dentro da fase intermetálica [49].

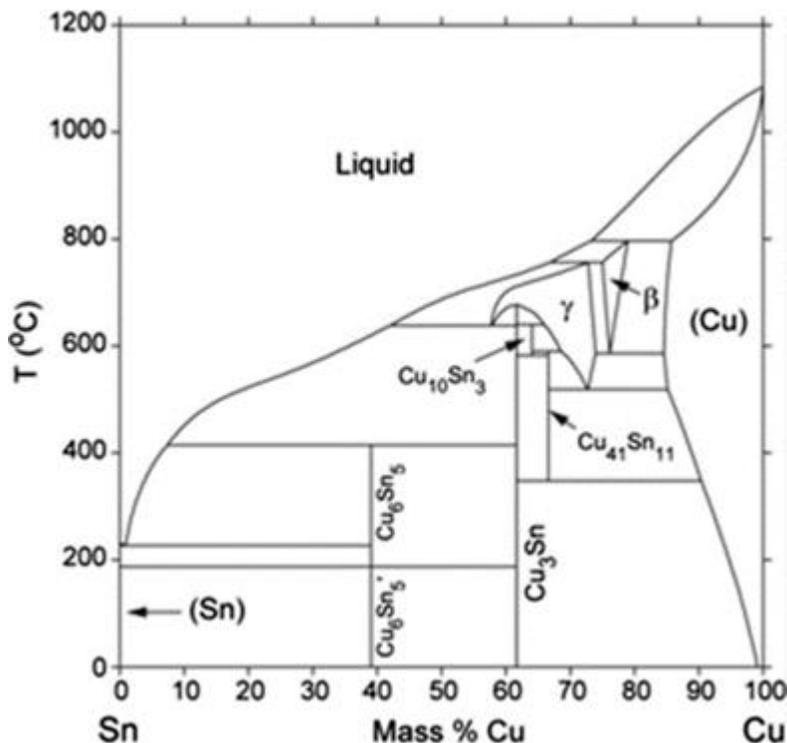


Figura 23: Diagrama de Fases Sn-Cu.
Fonte: (NIST, 2015)

O coeficiente de difusão é um valor que representa a facilidade de cada soluto em particular se move em um solvente determinado. É uma proporcionalidade constante entre o fluxo molar devido à difusão molecular e a gradiente de concentração. Quanto maior a difusividade, mais rápido a substância ou material se difunde na outra. A difusão tem um grande efeito sobre o comportamento de crescimento das fases intermetálicas e caminhos de difusão em sistemas multi-componentes [51].

A energia de ativação pode ser considerada como aquela energia necessária para produzir o movimento difusivo de um mol de átomos. Uma energia de ativação elevada resulta em um coeficiente de difusão relativamente pequeno.

No Anexo II contém informações dos valores de D_0 e Q_d para sistemas de difusão, ou seja, coeficientes de difusão e energia de ativação da difusão Sn em Cu na temperatura de 150°C. Os coeficientes de difusão podem ser expressos

como uma função da temperatura na seguinte relação de Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (4)$$

em que D é o coeficiente de difusão, D_0 é a difusividade intrínseca do material, Q é a energia de activação para a difusão, R é a constante dos gases e T é a temperatura.

A temperatura e coeficiente de difusão são importantes no processo, pois requer tempo, a unidade do fluxo é representada por $\text{átomos}/\text{cm}^2.\text{s}$.

Para gerar uma distribuição de concentração mais uniforme, períodos mais longos serão necessários, mesmo em altas temperaturas. Nos tratamentos térmicos de ligas metálicas, o controle dos processos difusivos é fundamental. Pode-se diminuir o tempo de tratamento térmico ao se utilizar temperaturas mais elevadas [44].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão descritos as características dos materiais selecionados e o tratamento termoquímico realizado com o bronze. Os materiais selecionados para estudo foram submetidos à caracterização, os quais serão mencionados, a seguir, os métodos e todo o instrumental utilizados.

Os experimentos devem ser conduzidos de forma que possam ser reproduzidos. As escolhas adequadas dos instrumentos permitirão monitorar os experimentos e a obtenção dos resultados.

O domínio da metodologia torna-se necessária para o planejamento e para análise dos dados, o pesquisador deve conhecer exatamente o que deseja estudar, como obter os dados, bem como ter uma estimativa qualitativa de como esses dados serão analisados [52].

Os ensaios de dureza, de microscopia óptica (MO) e análise de microscopia eletrônica (MEV) foram realizados nas dependências do Laboratório UNIFOA em Volta Redonda. A análise de EDX foi realizado na UFRJ, situado na Ilha do Fundão na cidade do Rio de Janeiro. O monitoramento da pressão e temperatura foi realizado em uma unidade de tratamento de gás da Petrobras localizado na Bacia de Campos.

Os procedimentos adotados nas etapas de processamento e caracterização dos materiais utilizados neste trabalho serão representados de forma esquemática na Figura 24, a seguir.

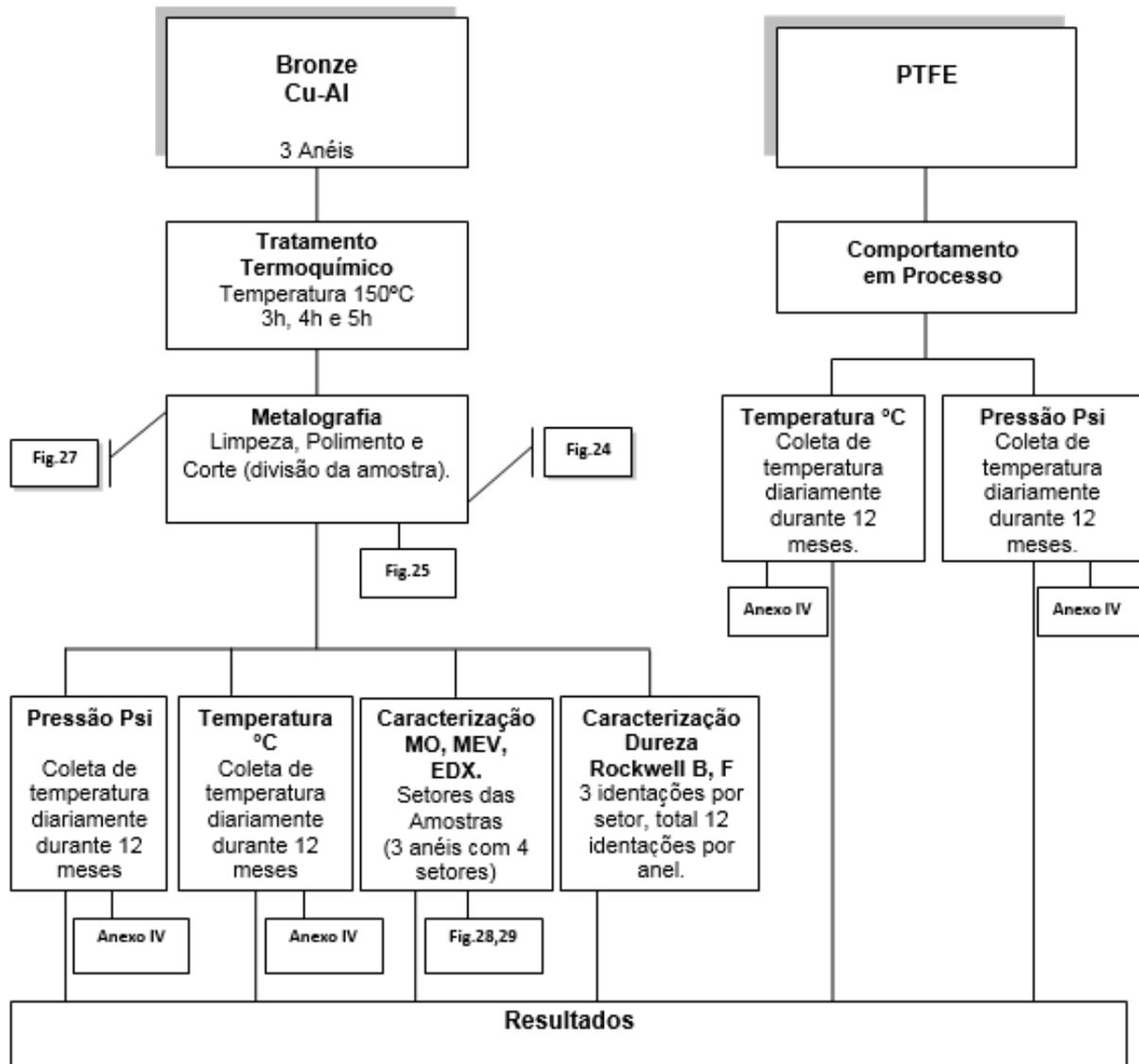


Figura 24: Fluxograma do processamento e caracterização das amostras.
Fonte: (AUTOR, 2014)

3.1 IDENTIFICAÇÃO DO EFEITO DE FALHA

A identificação da falha consiste na descrição de todas as informações necessárias para avaliação dos eventos e consequências de um modo de falha. Para a descrição dos efeitos de falha, os seguintes aspectos devem ser considerados:

Quais são os indícios de que a falha ocorreu;

De que modo a falha ameaça a segurança ou o meio ambiente;

De que forma a falha afeta a operação ou a produção.

A falha tem um comportamento típico, que pode evoluir de uma falha potencial até uma falha plena, ou seja, ela pode anunciar sem indisponibilizar o equipamento e evoluir até deixar o equipamento indisponível [53].

Para levantamento das falhas da bomba foi utilizado o sistema de informação ERP SAP R3*, o software é utilizado por grandes empresas para gerenciamento de vários segmentos, como: finanças, produção, manutenção e etc. [54]. No módulo de manutenção o sistema visa armazenar todas as informações dos equipamentos. Para coletar históricos dos equipamentos é necessária a utilização de transação do módulo de planejamento conhecida como "IW38#" para fornecer as intervenções realizadas, conforme apresenta o Anexo III.

3.1.1 Coleta de Temperatura e Pressão

Para monitoramento da temperatura e pressão dos anéis foram utilizados os transmissores integrados no próprio processo. As informações de pressão e temperatura são transmitidas e enviadas para o software de gerenciamento do processo conhecido como PI⁺. Esse sistema tem comunicação com os equipamentos da planta de processo, em tempo real e sua função é monitorar e armazenar as condições operacionais dos equipamentos. Foram coletadas informações das pressões e das temperaturas diariamente no período de 12 meses, do PTFE. O mesmo procedimento foi adotado com o bronze após a substituição. O gráfico de monitoramento da temperatura e pressão é exposto no Anexo IV.

***ERP SAP R3** - O SAP R3 é um sistema integrado, que possibilita um fluxo de informações único, contínuo e consistente por toda a empresa sob uma única base de dados.

#**IW38** - Transação para coleta de informações no sistema integrado.

⁺**P I** - *Information Processs - Software* de coleta de informações de planta de processo industrial.

3.1.2 Materiais

Para realização dos ensaios e caracterizações foram utilizados três anéis de bronze alumínio SAE-68D. As amostras foram adquiridas nas seguintes dimensões: diâmetro interno 35,4mm, diâmetro externo 46,9mm. Na Tabela 3, a seguir, são listados as principais características do material.

Composição Químicas	Propriedades Físicas	Propriedades Mecânicas	
Fe 3,0 – 5,0%	Densidade 7,50g/m ³	Limite de resistência	- 647 Mpa
Cu 78,0%	Cond Térmica 42w/cm.k	Limite de escoamento	- 284 Mpa
Mn 3,50%	Cond Elétrica 8,50%	Alongamento	- 6%
Ni 3,0 – 5,5%	Expansão Térmica 1,62 – 10-5	Dureza	- 170 Brinell
Al 10,0 – 11,5%		Coefficiente Paison	- 0,34

Tabela 3: Propriedades do Bronze.
Fonte: (LUNAMETAIS, 2014)

Também foram utilizados 500g de pó de estanho com granulometria 98-100 para realização do processo de difusão conforme descrito na Tabela 4.

Classificação	Desnsidade	Análise granulométrica mesh %			
TIN	g/cm ³	100	150	325	-325
C-99	3,65+/-0,35	0,1 máx.	0,1 máx.	pd	98-100

Tabela 4: Propriedades do pó de Estanho.
Fonte: (TIM QUIMICA, 2014)

3.1.3 Preparação das Amostras

Antes da realização do processo de difusão, as amostras foram preparadas na seguinte ordem:

1º Identificação das amostras. Os anéis foram divididos em quatro setores, com três posições sendo, (a) borda externa, (b) centro, (c) borda interna, (d) e (e) corte transversal. Para identificação das amostras foram seguidos o modelo conforme Figura 25, a seguir.

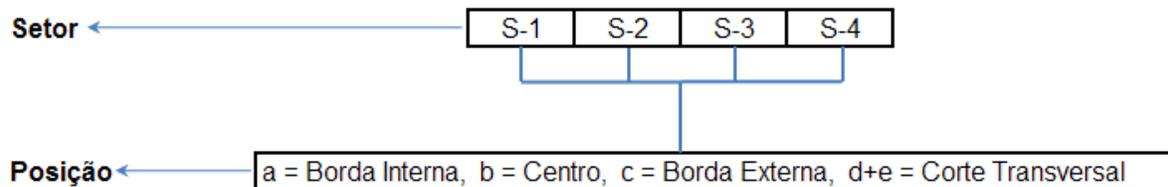


Figura 25: Identificação dos setores das amostras.

Fonte: (AUTOR, 2014)

A técnica de marcação ajuda mapear cada área da amostra conforme Figura 26, a seguir. O primeiro dígito é composto da letra “S” indicando o setor mais o número da partição e o segundo dígito identifica a posição do setor em relação a análise, Ex: S-2.a.

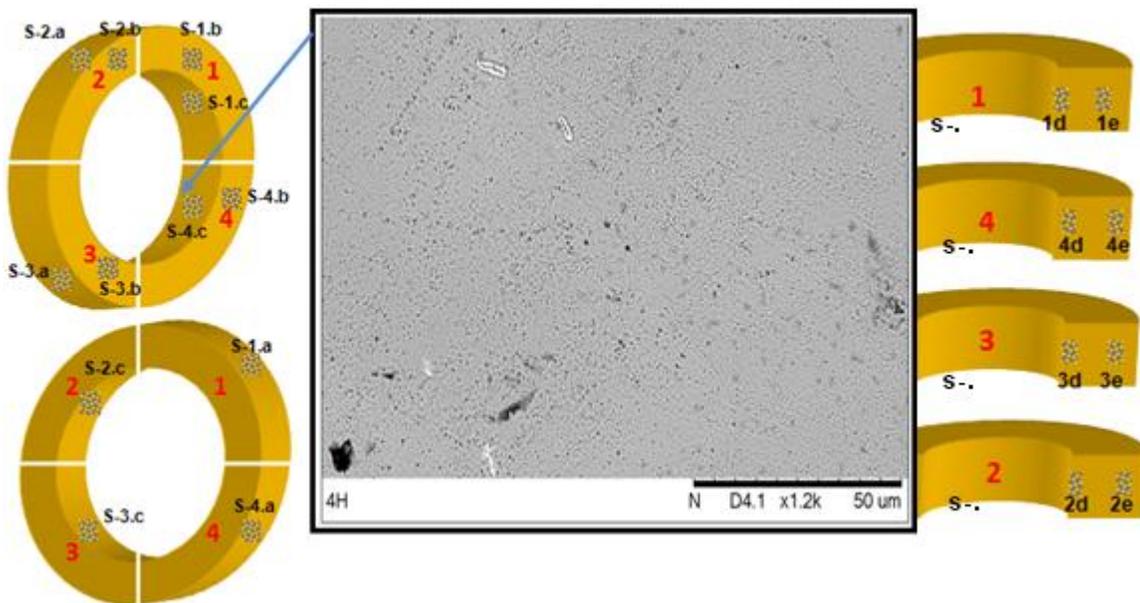


Figura 26: Amostra dividida em setores.

Fonte: (AUTOR, 2014)

2º Aplicação de pasta de enxofre. Foi aplicado pasta nos anéis de bronze para retirar a película de óxido do material e ajudar na aderência do estanho;

3º Imersão dos anéis no estanho. As amostras foram colocadas em recipientes e receberam camadas de estanho na parte inferior e superior;

4º Tratamento termoquímico. Para o tratamento termoquímico, foi utilizado um forno elétrico da marca Mufla Quimis, o qual foi ligado uma hora antes do início de inserção das amostras para homogeneização da temperatura. Após atingido a temperatura de 150°C, foram introduzidas todas as amostras no forno;

5º Retirada e Limpeza. A primeira amostra foi retirada do forno em 3 horas, a segunda em 4 horas e a terceira e última em 5 horas de tratamento, conforme Figura 27, a seguir. Depois de 12 horas de resfriamento as amostras foram retiradas dos recipientes e removido o excesso de pó de estanho.



Figura 27: Retirada da amostra do forno.
Fonte: (AUTOR, 2014)

3.1.4 Metalografia

Para revelar e definir os vários componentes de uma microestrutura as amostras foram submetidas ao lixamento com lixas de carbeto de silício à base de água com granulométrica 220, 320, 400, 600, 1000, 1200 e 1500, polidas com solução aquosa de alumina de 1 micron e atacadas com cloreto férrico à 5%.

Cada ataque teve a duração de 10 segundos e depois as amostras foram lavadas com água fria e álcool e após foram secadas com ar quente, ficando com aparência conforme Figura 28, a seguir.



Figura 28: Amostra após ataque com Cloreto Férrico a 5%.
Fonte: (AUTOR, 2014)

3.2 DUREZA

As amostras foram submetidas ao ensaio de Dureza Rockwell B e F conforme recomendado pela norma NBR ISO 6508-1 de 2015, na execução do ensaio foi aplicado uma pré carga de 10kg e uma carga de 100Kg para o anel 1, para os anéis 2 e 3 foi utilizado uma carga de 60kg. O equipamento utilizado no ensaio foi de marca Pantec, modelo rasn-rs com penetrador aço temperado de Φ 1/16.

Visando obter resultados estatisticamente confiáveis, foram realizados 12 identificações por anel.

3.3 MICROSCOPIA ÓPTICA

Em uma primeira análise, a técnica de microscopia óptica foi utilizada, para obtenção das imagens da microestrutura das amostras de bronze, tais como

morfologia e quantidade de precipitados. O microscópio óptico utilizado foi da marca Opton, conforme Figura 29, a seguir.



Figura 29: – Microscópio óptico.
Fonte: (AUTOR, 2014)

3.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica que permite a geração de imagens de alta resolução da topografia de superfícies e determinação de variações especiais de composição química, por meio de análise química quantitativa [57]. As análises por microscopia eletrônica de varredura foram realizadas em um aparelho da marca Hitachi modelo TM 3000. O equipamento dispõe de detectores de elétrons secundários (SE) e elétrons retroespalhados (BSE), de Analisador de Raios X por dispersão de Energia (EDS).

3.5 ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDX)

O EDX é um equipamento importante na caracterização dos materiais, permitindo identificar e quantificar o teor dos elementos que compõe a amostra. O equipamento é uma ferramenta do microscópio eletrônico de varredura.

Para análise de EDX os anéis foram cortados por uma máquina de corte refrigerada à água. As análises foram efetuadas sob vácuo em 2 setores de cada anel, por 320 segundos, totalizando 6 amostras. O equipamento utilizado foi o EDX-720 (Shimadzu) conforme Figura 30, que permite realizar análises quantitativas e qualitativas desde o elemento sódio até o urânio.



Figura 30: EDX.
Fonte: (AUTOR, 2015)

4 RESULTADOS

Nesse capítulo serão abordados os resultados das caracterizações dos anéis de bronze após o tratamento termoquímico. Será apresentada a justificativa para escolha do bronze, o histórico de falha e em seguida comparações das temperaturas e pressões dos anéis de PTFE e de bronze. Também serão apresentados os resultados de dureza, as análises de MEV e EDX. E para finalizar o fator econômico proporcionado pelo o anel de bronze.

4.1 JUSTIFICATIVA PARA ESCOLHA DO BRONZE

Normalmente os polímeros em baixas velocidades de deslizamento, desgastam por abrasão devido à sujeira ou à rugosidade da superfície do eixo, outro fator de desvantagens do material é sua baixa condutividade térmica [19,23]. Se polímeros são usados em altas velocidades, as superfícies podem fundir. Existem três soluções para problemas térmicos: Primeira é operar com baixa pressão de contato e baixa velocidade; Segunda é colocar um filme de metal no polímero para aumentar a taxa de fluxo de calor; Terceira é selecionar um material que atenda aos requisitos solicitados por uma aplicação. Conforme mencionado no item 2.2.5, o material polimérico em contato provoca aumento da temperatura causando desgaste por fusão devido à baixa condutividade térmica e podendo agravar sua situação quando o mesmo opera em situações adversas onde as aplicações exigem altas temperaturas e altas pressões [24]. Será apresentado na figura 32 no item 4.3, o cenário que o PTFE não suportava, uma pressão e temperatura média respectivamente de 115°C e 3019 psi. Com base nessas informações a Tabela 5, a seguir, lista a pressão e temperatura dos resultados de ensaio obtido por Bento, conforme a norma ASTM D 695 que retrata deformação do PTFE à 23°C com cargas de 500 psi, 1000 psi e 2000 psi [58].

Propriedade	Método de Teste	Unidade	PTFE Modificado	PTFE Convencional	
Resistência a Tração na Ruptura	ASTM D 4894	psi	4500	4500	
Alongamento na Ruptura	ASTM D 4894	%	450	375	
Deformação sobre carga (creep) 23°C	ASTM D 695	%	500 psi	0.2	0.7
1000 psi			0.4	1.0	
2000 psi			3.2	8.2	
Deformação sobre carga (creep) - DMA	ASTM D 695	%	1000 psi a 25°C	5.3	6.7
500 psi a 100°C			5.4	8.5	
200 psi a 200°C			3.6	6.4	
Vazios	FTIR	%	Moldagem por Compressão: 0 a 0.5	Moldagem por Compressão: 0 a 1.5 Extrusão RAM: 1.0 a 5.0	

Tabela 5: Propriedades do PTFE.
Fonte: (BENTO, 2011)

O bronze como já mencionado no item 2.3.1, ele é utilizado principalmente em mancais deslizantes com cargas, resistente a tensões cíclicas ou alternadas, apresentam resistência a desgastes, resistência à corrosão e são tratáveis termicamente [31]. O material é comumente usado em sistemas de vedação, pois o mesmo promove auxílio fundamental na vedação atua no interior da caixa de vedação como suporte para que as gaxetas não deformem sobre altas pressões, evitando que elas sejam extrudadas e o estanho colabora nessa integração com a lubrificação do material [3].

Pelo exposto, o motivo pela escolha do bronze é devido ao fato do material resistir às características exigidas pelo cenário atual do sistema de vedação da bomba alternativa.

4.2 OCORRÊNCIA DAS FALHAS

Conforme Figura 31, a seguir, a parte mais afetada foi os anéis de PTFE do sistema de vedação da bomba, totalizando 16 falhas. Sendo que 9 falhas foram registradas no ano de 2013 e 7 falhas registradas no ano de 2014. Essas falhas ocorreram aos longos dos 12 meses de cada ano mencionado anteriormente.

A indisponibilidade da bomba, ocasionada pelo sistema de vedação gerou um custo para a unidade de produção de R\$757.226,19. O referido custo global foi coletado do sistema SAP R3, o custo detalhado não foi possível coletar, devido não disponível a todos os usuários do sistema.

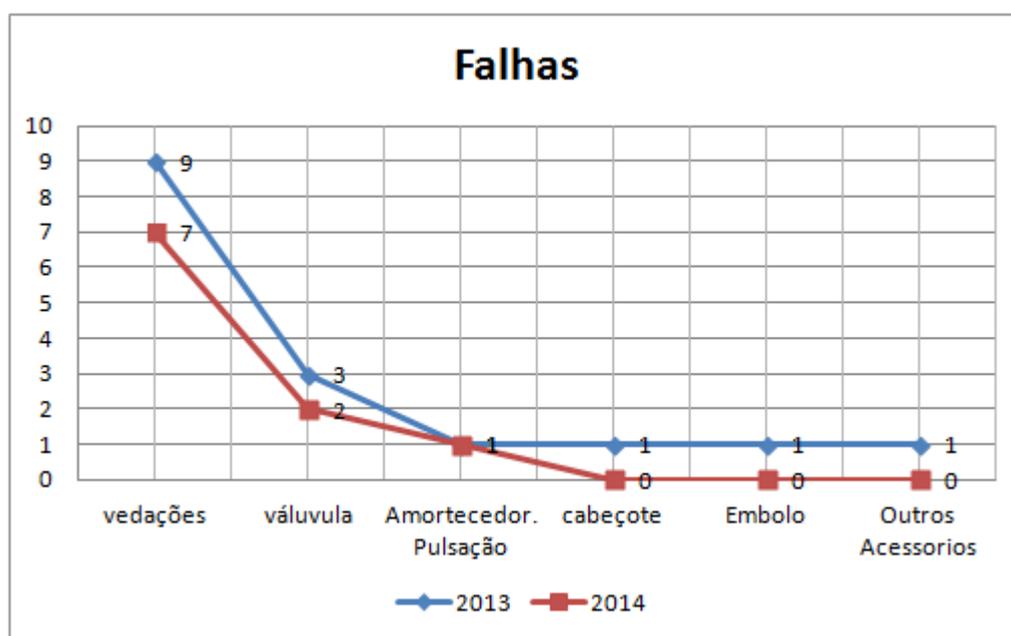


Figura 31: Parte Afetada da Bomba.
Fonte: (AUTOR, 2013)

Com base nas falhas ocorrida no sistema de vedação da bomba nos anos de 2013 e 2014, observou-se que a durabilidade do sistema de vedação está abaixo do estipulado pela norma API-674, listada na Tabela 6, a seguir, que define o tempo de vida útil dos anéis e gaxetas entre 4 e 12 meses para substituição, ao contrario do ocorrido na realidade pelo sistema de vedação, que promoveu uma média de 3 substituições a cada 4 meses em 2013 e 2 substituições a cada 4 meses em 2014. Essas informações coletadas deixa evidente a necessidade de melhoria no sistema de vedação da bomba.

Itens	Vida útil (meses)
Gaxetas/Anéis	4 a 12
Válvulas	9 a 24
Válvulas de assento	9 a 24
Êmbolos	12 a 36

Tabela 6: Vida útil dos componentes API-674.
Fonte: (AUTOR, 2013)

4.3 COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA X PRESSÃO

A Figura 32 aponta o acompanhamento das temperaturas e pressões sobre o polímero ao longo de 12 meses, deixando evidente que a temperatura média atingida foi de 115°C e a pressão média foi de 3.019 psi.

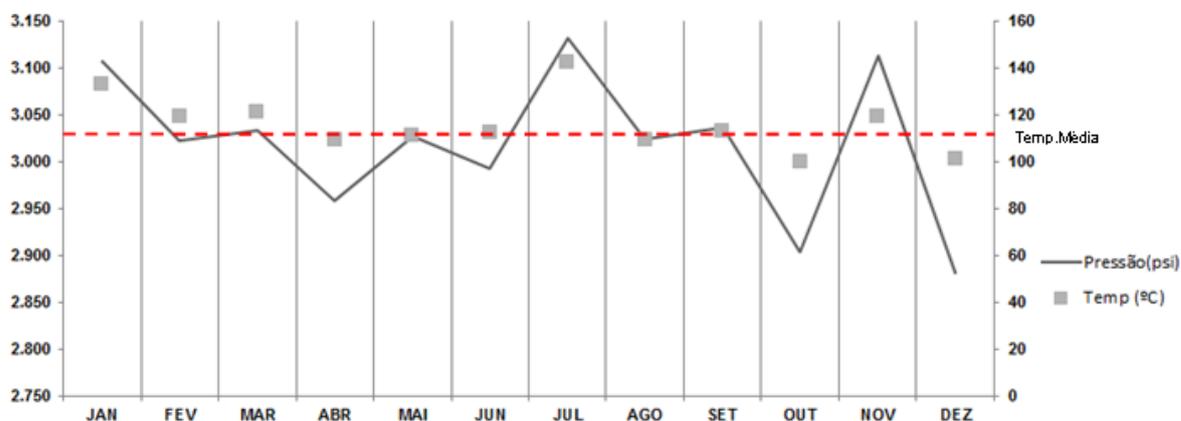


Figura 32: Temperaturas e Pressões Coletadas do PTFE - 2013.
Fonte: (AUTOR, 2013)

Com base no exposto anteriormente na figura 32 a variação da temperatura e pressão obtida no sistema de vedação comprometeu a integridade do PTFE, levando a deformação do material. Conforme abordado no item 4.1 por Bento [57] em seu estudo “Comportamento da Resina Base na Formulação de Compósitos de Politetrafluoretileno com Bronze”, o autor lista o método de teste ASTM D 695, realizado com o polímero e deixa claro que o PTFE sob uma temperatura de 23°C e carga de 500 à 2.000 psi sofre deformação.

Outro fator que também contribuiu para falha do PTFE foi o contato direto com o pistão da bomba que é um contra corpo liso de aço. Conforme mencionado no item 2.4.3, o deslizamento nesse tipo de material provoca desgaste por adesão que provoca deformação em camadas superficiais do polímero, provocando retiradas de camadas finas do material [39]. O desgaste do material é ocorrido por desprendimento de camadas conforme exibido na Figura 33, a seguir.

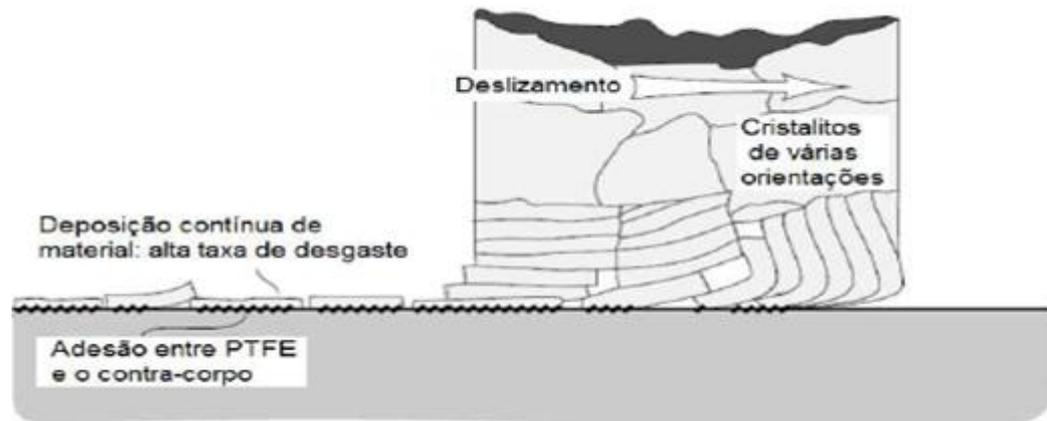


Figura 33: Filme transferido do PTFE para o contra-corpo.
Fonte: (ADAPTADO DE STACHOVIK; BATCHELOR, 2001)

A situação do material agrava-se com aumento da pressão e com aumento da temperatura. Esses fatores são cruciais no comportamento do PTFE, pois o aumento da pressão no interior da caixa de vedação proporciona um aumento de temperatura, conseqüentemente ocasionando aumento da deformação no polímero. A situação tende a crescer com a velocidade e o contato dos materiais, pois o calor gerado não consegue ser dissipado, resultando em deformação do polímero e fusão conforme descrito no item 2.2.5 e exposto na Figura 34.



Figura 34: Desgaste por fusão em polímeros.
Fonte: (ADAPTADO DE STACHOVIK; BATCHELOR, 2001)

A condição ocorrida com o polímero é conhecida como contato adiabático [23]. Uma condição que o material não consegue trocar calor com o meio externo, resultando em uma falha por fusão, conforme retratado anteriormente no item 2.2.5. A Figura 35, a seguir, exibe a real condição do polímero retirado do sistema de vedação da bomba após falha.



Figura 35: PTFE deformado.
Fonte: (AUTOR, 2013)

Na Figura 36 é exposto a transição dos materiais, onde PTFE ficou como parte integrante do sistema de vedação até agosto de 2013, nesse período foi registrado a temperatura mínima de 100°C e máxima de 116°C. As pressões também variaram entre 2.913 psi e 3.022 psi.

Em setembro de 2014 o anel de bronze tratado termoquimicamente no período de 5 horas com estanho foi instalado no sistema de vedação da bomba alternativa. A temperatura e pressão mínima ficaram em torno de 90°C e 2.813 psi, a temperatura e a pressão máxima atingiram 113°C e 3.073 psi. No mês de junho e novembro não foram registrados temperatura e pressão, pois o equipamento estava fora de operação.

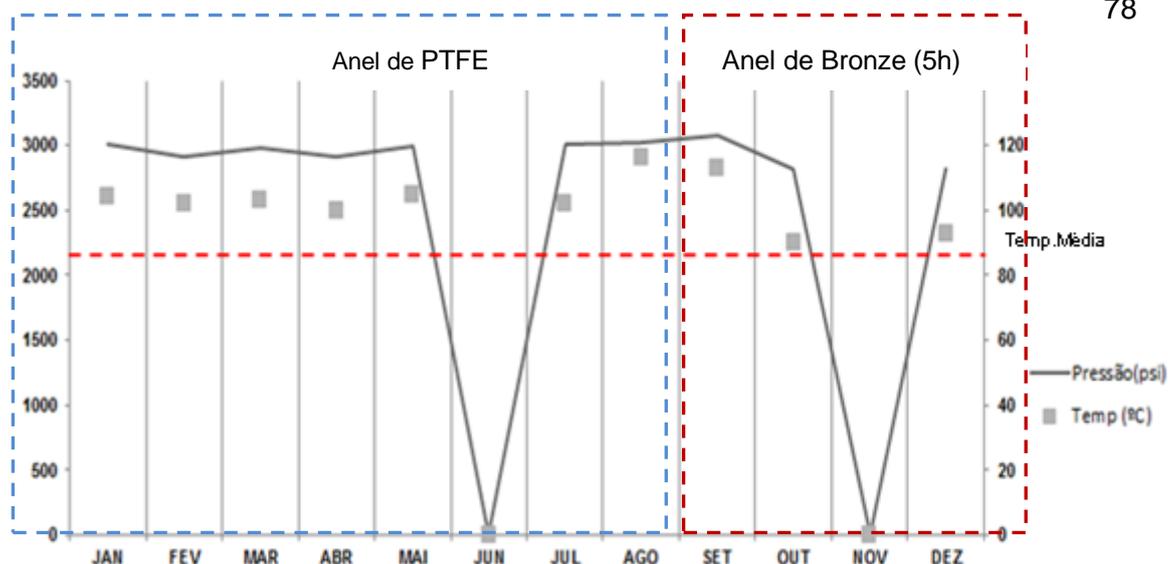


Figura 36: Temperaturas e Pressões Coletadas do PTFE x bronze 2014.
Fonte: (AUTOR, 2014)

A Figura 37, a seguir, exibe os resultados de 2015 obtidos do bronze tratado por 5 horas, destacando o monitoramento das temperaturas e pressões. A temperatura e pressão média com a instalação do anel bronze tratado foram de 94°C e 2.925 psi, diferente do apresentado pelo anel de PTFE em 2013, sua temperatura e pressão média ficaram em torno de 116°C e 3.016 psi. O bronze comportou positivamente, pois apresentou uma reação diferente do polímero, não deformou sob altas pressões e temperaturas, colaborando no processo de dissipação de calor do sistema de vedação.

Conforme mencionado no item 2.3.1 o bronze possui características favoráveis para o ambiente exigido como: boa capacidade de manter sua característica em altas e baixas temperaturas, resistente a abrasão, resistentes tensões cíclicas ou alternadas e ótimas qualidades anti-fricção [31].

Esses resultados explicam o desempenho positivo do material na redução da temperatura dentro da caixa de vedação da bomba, evitando possíveis falhas.

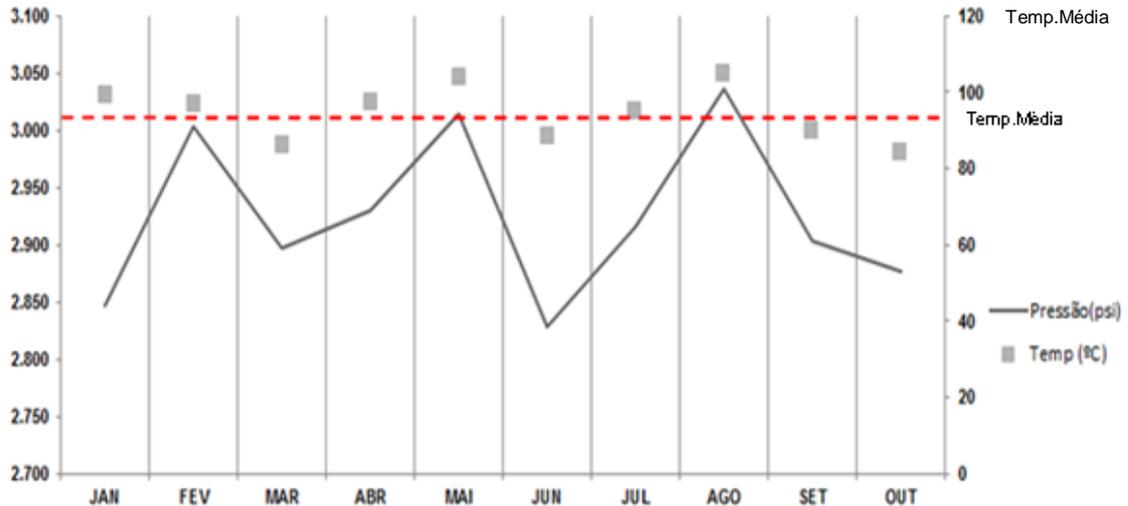
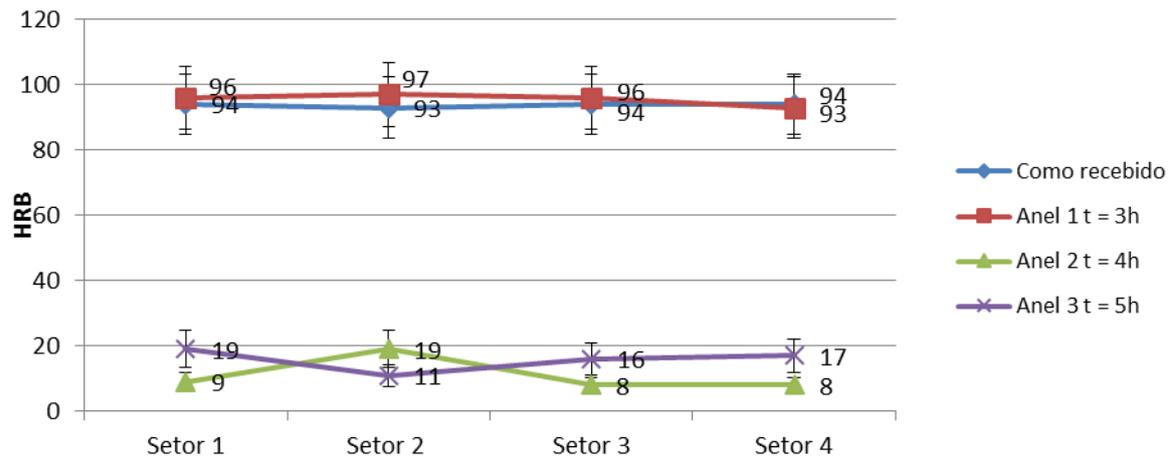


Figura 37: Temperaturas e Pressões Coletadas do bronze 2015.
 FONTE: (AUTOR, 2015)

4.4 DUREZA

Na Figura 38, a seguir, é exposto a média das durezas dos anéis de bronze. No anel 1 o período de tratamento foi de três horas, nos anéis 2 e 3 o período de tratamento foram respectivamente quatro horas e cinco horas. A dureza do anel 1 foi superior em relação aos anéis 2 e 3, essa dureza é justificada pelo curto tempo de tratamento termoquímico no anel. Observa-se que os anéis 2 e 3 ficaram aproximadamente 80% mais macios que o anel1, isso foi devido a maior concentração do estanho na superfície dos mesmos, conforme descrito a seguir.



Amostras	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4
Como recebido	94	93	94	94
Anel 1 t = 3h	96	97	96	93
Anel 2 t = 4h	9	19	8	8
Anel 3 t = 5h	19	11	16	17

Figura 38: Dureza Rockwell.
Fonte: (AUTOR, 2014)

4.5 MICROSCOPIA

As imagens obtidas por microscopia eletrônica serão apresentadas a seguir, para isso, os anéis de bronze 1, 2 e 3 foram divididos em setores para análise de suas microestruturas.

O anel 1 tratado termoquimicamente por 3 horas é representado pela figura 39 (a) e (b) que compõe a borda externa, onde é visível o surgimento de duas estruturas distintas. Observa-se que a Figura 39(c) representada pelo o centro do anel é visível o surgimento de alguns pontos isolados de estanho. A Figura 39(d) representa a borda interna do anel, onde novamente aparece o mesmo cenário das figuras iniciais, ou seja, duas estruturas distintas. Já no corte transversal representado pela imagem (e) aparece uma pequena área de migração de estanho.

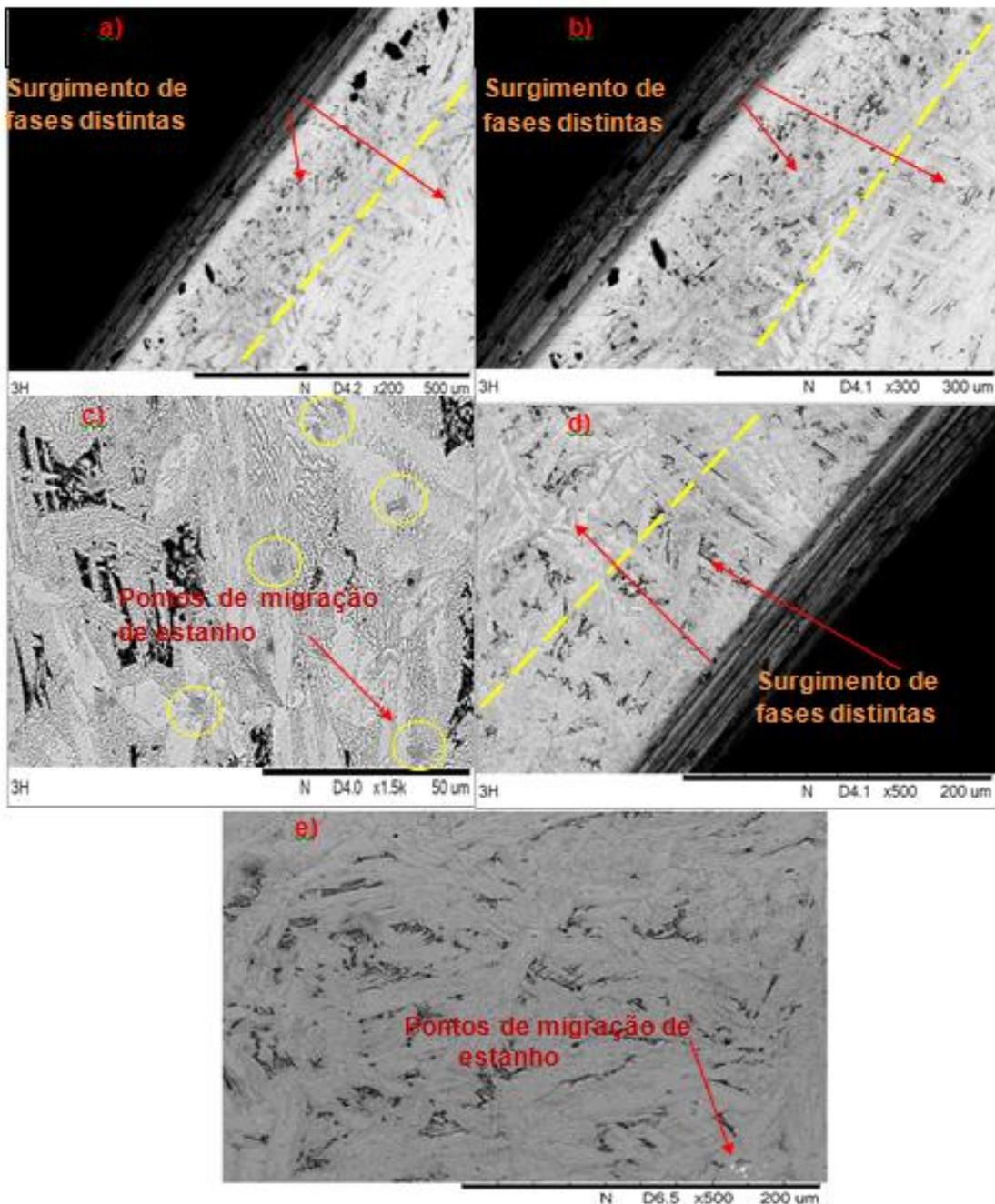


Figura 39: Imagens do Anel 1 Setor 2.
Fonte: (AUTOR, 2014)

A Figura 40 representada pela imagem (a) borda externa e imagem (b) borda interna do anel tratado termoquimicamente no período de 4 horas é possível visualizar alguns poros na estrutura do bronze com início de migração do estanho. O centro e o corte transversal do anel representado respectivamente pela imagem (c) e (d) a qual exibe pontos isolados de poros e estanho em suas estruturas.

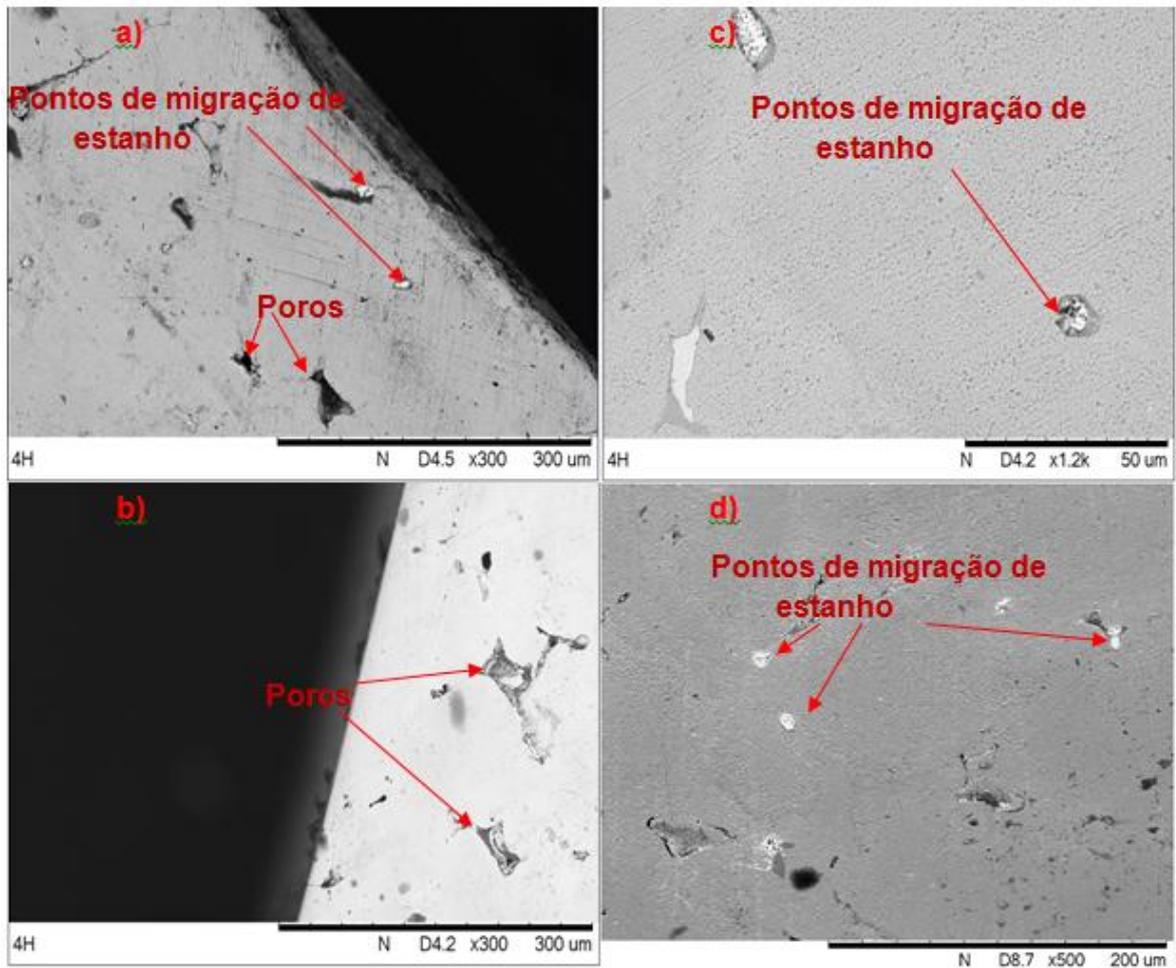


Figura 40: Imagens do Anel 2 Setor 2
Fonte: (AUTOR, 2014)

Na Figura 41 representada pelas seguintes imagens: (a) borda externa, (b) centro, (c) borda interna e (d) corte transversal do anel 3, são marcadas com diversos pontos com migração do estanho na estrutura do bronze. A grande concentração do estanho no anel foi devido ao tratamento termoquímico que foi realizado no período de 5 horas, conforme descrito pela lei de Fick no item 2.5.4.

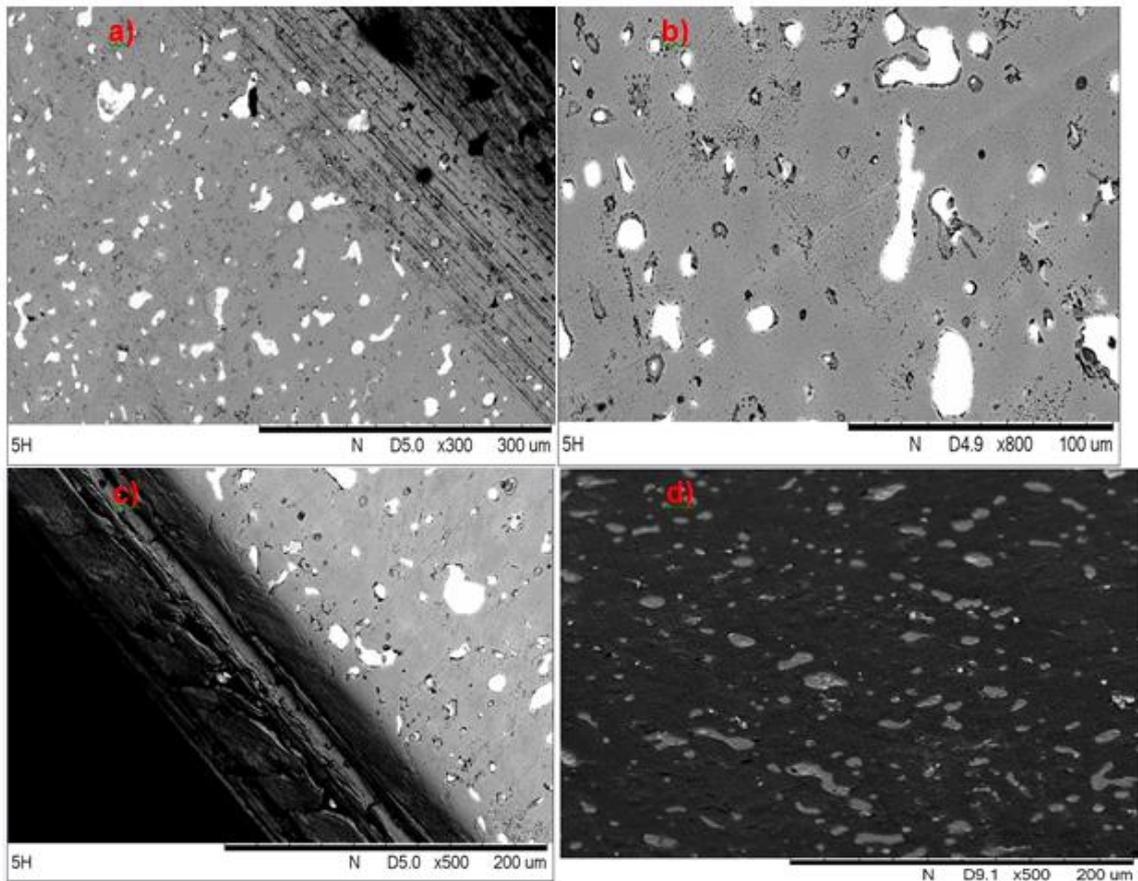
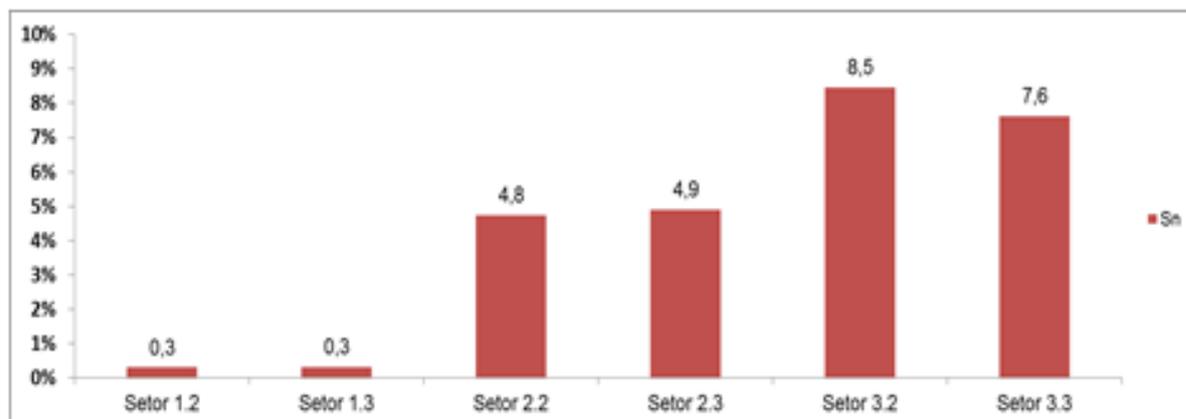


Figura 41: Imagens do Anel 3 Setor 2.
Fonte: (AUTOR, 2014)

O tratamento no período de 5 horas ajudou no gradiente de concentração do estanho na superfície do bronze conforme Lei de Fick. A distribuição do soluto é mencionado no item 2.5.6, para gerar uma distribuição uniforme ou homogênea são necessários longos períodos de temperaturas e proximidade das substancias [44]. No entanto torna-se visível que concentração do estanho no cobre do anel 3 tratado termoquimicamente no período de 5 horas foi superior que nos anéis 1 e 2.

4.6 TEOR DO ESTANHO NOS SETORES DOS ANÉIS

As amostras “anéis de bronze” são compostos dos seguintes elementos químicos: Cu (cobre), Al (alumínio), Fe (ferro), Mn (manganês) e Ni (níquel). Na Figura 42, é listada a evolução quantitativa do teor de estanho no bronze na análise de EDX, após o processo de difusão.



Anel 1 Anel 2 Anel 3
Setor 1.2 Setor 2.2 Setor 3.2
Setor 1.3 Setor 2.3 Setor 3.3

Figura 42: Teor de estanho nos setores.
Fonte: (AUTOR, 2015)

Conforme a Lei de Fick, observa-se que no período de três horas de tratamento não houve um valor de migração de estanho significativo nos setores do anel 1, apenas 0,3%. Já no período de quatro horas notou-se um aumento entre 4,8 a 4,9% de concentração do estanho nos setores do anel 2. Após cinco horas o gradiente de concentração aumentou quase o dobro nos setores do anel 3 ficando entre 7,6 à 8,5 %. A maior concentração do estanho no anel 3, foi devido ao maior tempo de tratamento, favorecendo uma grande concentração do estanho ao longo da superfície do anel. As comparações dos elementos das amostras são representadas na Tabela 7, a seguir e ficou evidente que no processo de difusão alguns elementos aumentaram e outros diminuíram completamente. O valor da amostra como recebido é mostrado na Tabela 7 como referência para ajudar na análise dos elementos tratados na difusão.

	Recebido	ANEL1 = 3H		ANEL 2 = 4H		ANEL3 = 5H	
		1.2	1.3	2.2	2.3	3.2	3.3
Cu	66,3	73,1	73,1	71,7	71,3	84,2	85,7
Al	18,7	11,8	11,0	0,4	0,0	0,7	7,6
Fe	4,5	4,6	4,6	0,0	0,9	0,0	0,0
Mn	1,7	1,7	1,7	0,0	0,0	0,0	0,1
Ni	5,6	6,0	6,1	0,7	0,6	0,6	0,6
Sn		0,3	0,3	4,8	4,9	8,5	7,6

Tabela 7: Concentração do estanho nas amostras.
Fonte: (AUTOR, 2015)

A Tabela 7 retrata o que já foi mencionado anteriormente no item 2.5.4, que o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em algum ponto particular em determinado sólido varia com o tempo, resultando um acúmulo ou decréscimo das espécies difusoras [1]. Observa-se na Tabela 7 que no período de 5 horas de tratamento ocorreram grandes transformações nos elementos químicos. O teor de estanho aumentou 57% em relação ao período de 4 horas, nesse período o cobre atinge o valor máximo em relação aos períodos anteriores 85,7% de concentração e os demais elementos como: Al, Fe, Mn, Ni diminuiram seus valores.

Na Figura 43, a seguir, retrata um exemplo do processo de difusão, o qual é marcado pela variação da composição em relação à posição em determinado material não homogêneo, favorecendo o movimento preferencial dos átomos [44].

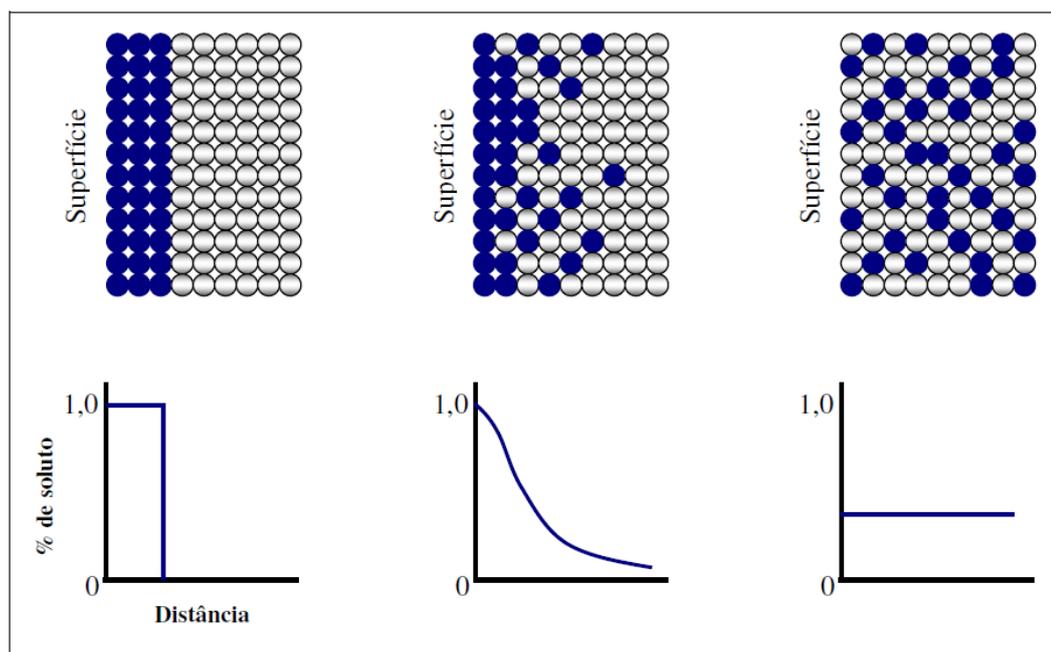


Figura 43: Processo de difusão.
Fonte: (LOPES, 2014)

4.7 CUSTO E PRODUTIVIDADE

A redução do desempenho de um equipamento traz a diminuição da qualidade e da produtividade e pode ser evitada com melhorias no processo de manutenção que garantam a eficiência do equipamento. A falta de políticas de melhorias, além da redução da capacidade do processo de uma unidade de produção, acarreta em paradas efetivas do equipamento, reduzindo a sua

disponibilidade e gerando custos adicionais [59]. Em contrapartida uma política adequada de manutenção deve manter a capacidade e a disponibilidade da máquina, evitando quebras e criando condições de uma intervenção corretiva rápida e eficaz, quando a falha ocorrer [60].

A manutenção não pode ser vista como um custo adicional dentro da organização cabe mostrar que o dinheiro aplicado em políticas de manutenção na verdade é um investimento que proporciona lucratividade a empresa.

Diante disso o fator econômico foi o ponto crucial para o processo de substituição dos anéis do sistema de vedação da bomba, pois além do aumento de disponibilidade, proporcionou redução de custo. A Tabela 8, a seguir, lista o histórico anual da bomba, exibindo um comparativo da situação antes e após a instalação do anel de bronze.

Ano	Disponibilidade(dias)	Indisponibilidade(dias)	TMEF(dias)	Falha em vedações	Custo Reais
2013	165	195	18	9	R\$ 517.258,48
2014	215	145	30	7	R\$ 239.967,71
2015	300	0	-	0	R\$ -
					R\$ 757.226,19

Tabela 8: Produtividade e custo de manutenção.
Fonte: (AUTOR, 2015).

Observa-se que no ano de 2013 quando o sistema de vedação era composto pelo PTFE, a taxa de indisponibilidade da bomba era de 195 dias, com um TMEF de 18 dias, nesse período a bomba gerou um custo de R\$ 517.258,48 referente as falhas ocorridas no sistema de vedação. Em setembro de 2014 o anel de bronze tratado com estanho por 5 horas foi instalado, nesse período é observado que houve uma redução da taxa de indisponibilidade para 145 dias com um tempo médio entre falhas de 30 dias. Nesse ano foi registrado um custo de manutenção de R\$ 239.967,71, devido a bomba ter operando com o anel de PTFE de janeiro a agosto gerando 7 falhas no sistema de vedação.

Em 2015 a bomba operou de janeiro a outubro sem registrar falhas no sistema de vedação, com isso comprova-se a eficiência do anel de bronze em relação ao anel PTFE. Os valores dos custos de manutenção da Tabela 8 foram coletados do sistema SAP R3, não sendo possível o acesso dos valores detalhados.

5 CONCLUSÃO

Após as análises realizadas concluiu-se que o presente estudo demonstrou ser eficaz para avaliar as falhas provocadas pelo anel de polímero no sistema de vedação. O anel de PTFE quando operava em pressões e temperaturas altas, sofria deformações. Essas deformações geradas pela alta temperatura proporcionavam perda de materiais quando o mesmo em contato como pistão da bomba. As perdas de material e a deformação levou polímero alcançar altos níveis temperatura, provocando a fusão do anel de PTFE.

Com a instalação do anel 3 (“5 horas de tratamento”) os resultados foram positivos, o material obteve bom desempenho durante as altas pressões e temperaturas. O anel 3 de bronze durante seu funcionamento não sofreu deformações sob altas pressões e temperaturas, devido possuir característica positiva como: boa resistência mecânica, baixo coeficiente de fricção contra aço, resistência à fadiga e dissipação de calor.

Além dessas características abordadas, o bronze passou por um processo de difusão com pó de estanho nos períodos de três, quatro e cinco horas com a temperatura 150°C. Foi observado que o anel 3 tratados termicamente no período cinco horas, teve uma maior distribuição de estanho em sua superfície. Foi comprovado no ensaio de dureza que o anel 3 ficou macio em relação ao anel 1, o qual foi tratado por três horas. A concentração do estanho na estrutura do bronze colaborou na auto lubrificação, devido o estanho também agir como lubrificante.

O anel 3 está em operação no sistema de vedação da bomba desde setembro de 2014, o ganho obtido através da substituição do polímero para o metal “bronze” até o atual momento é grande como: redução da indisponibilidade do equipamento e redução do custo de manutenção. Devido esses resultados informados do anel 3 de bronze tratado pelo processo de difusão, fica evidente a resistência do material como parte integrante do sistema de vedação da bomba.

6 INDICAÇÕES FUTURAS

Para estudos complementares sugerimos:

- Utilizar outros materiais no processo de difusão;
- Realizar investigação tribológica verificando a resposta térmica em relação à velocidade de deslizamento;
- Realizar teste de desgaste do anel de bronze tratado.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

[1]-**CALLISTER**, J. W. T. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8º ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. 705 p. ISBN 9788521615958.

[2]-**KHENDAR**, J. NEGULESCU, I; MELETIS, E. I.: Sliding wear behavior of PtfеComposites”, Wear, 2002. .

[3]-**NAPOLEÃO**, F. S. Bombas Alternativas Industriais: Teoria e Prática. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2007.

[4]-**MATOS**, E. E. de; FALCO, R. de. Bombas Industriais. Editora Interciência, Rio de Janeiro.1998.

[5]-**JUNIOR**, S. A.; SANTOS, C. A. G. Noções de Bombas. Manual Alta Competência Rio de Janeiro, 2000.

[6]- **FERRAZ**, F. Noções básicas de elementos de máquinas – PCM Programa de certificação de pessoal de manutenção – Senai / ES, 2008.

[7]-**HOLMBERG**, K.; HONKAINEN, H.; MATTHEWS, A. Tribology of thin coatings. Ceramics International, v. 26, n. 1, p. 787–795, 2000.

[8]-**SHOCKMETAIS**. Catálogo de Ligas de Bronze. Disponível em: <http://www.shockmetais.com.br/especificacoes/bronze/plig>

[9]-**VEDABRÁS**. Catálogo de Materiais para Vedação, Disponível em: http://www.vedabras.com.br/website/pt_br/extranet.produtos.php

[10]-**CDCCUSP**. Identificação de Polímeros. Disponível em: <http://www.cdcc.usp.br/exper/medio/quimica/9bpolimerosg.pdf>. Acesso em 18/05/2014.

[11]-**CANEVAROLO JÚNIOR**, S. V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2º ed., rev. e ampl. São Paulo, SP: Artliber, 2006. 280 p. ISBN 8588098105.

[12]-**MANO**, E. B.; **MENDES**. Introdução a Polímeros 2º ed. EdgardBlucher,1999.

[13]-**CRAWFORD**, R. J. Plastics engineering.Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

[14]-**CHANDA**, M.; **ROY**, S. K. Plastic Techonology Handbook, 1ª ed, New Jersey, 1987.

[15]- **USBERCO**, J; **SALVADOR**, E. Química volume único Saraiva, 5º Edição, P 619 a 627, Ed. Saraiva, São Paulo, 2002.

[16]-**BILLMEYER**, F. W. Textbook of Polymer Science, New York.NY, 1982.

[17]-**POLIFLUOR IND. E COM. DE PLASTICOS LTDA**. Pesquisa sobre Teflon.Disponível em: <http://www.polifluor.com.br/teflon.pdf>. Acesso em 07/07/2015

[18]- **Wang**, X.; **YE**, Q.; **LIU**, J.; **LIU**, X.; **ZHOU**, F. Low surface energy surfaces from self-assembly of per fluoropolymer with sticky functional groups. Journal of Colloid and Interface Science. v. 351, p. 261-266, 2010.

[19]-**STACHOVIAK**, G. W.; **BATCHELOR**, A. W. Engineering Tribology. 3. ed. EUA: Butterworth Heinemann, 2001.

[20]-**HUTCHINGS**, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

[21]-**NEALE**, M. J. The Tribology Handbook, Butterworth – Heinemann, 2º edition 1995.

[22]-**ZUM-GAHR**, K. H. Microstruture and Wear of Materials. Tribology Series, no.10 -Elsevier Science Publishers, p. 437- 447, 1987.

[23]-**HUTCHINGS**, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butterworth Heinemann, 1992.

[24]-**YAMAGUCHI**, Y. Tribology of Plastic Materials: Their Characteristics and Applications to Sliding Components. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

[25]-**BEKHET**, N. E. Tribological Behaviour of Drawn of Polypropylene, *Wear* 236(1999) 55-61.

[26]-**HOLMBERG**, K.; **HONKAINEN**, H.; **MATTHEWS**, A. Tribology of thin coatings. *Ceramics International*, 2000.

[27]-**SMITH**, W. F. Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais. 3a.ed. Lisboa:McGraw-Hill, 1998.

[28]-**PALMEIRA**, A. A. Apostila Introdução aos materiais de construção mecânica. Disponível em: <http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas>. Acesso em 23/05/2015.

[29]-**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**. Princípios de Engenharia Mecânica Disponível em http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo1/principios_parte2.pdf.

[30]- **ASHBY**, M. F.; **JONES**, D. R. H. Engenharia de Materiais: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto. Vol. 1. 3ª. ed. CAMPUS, 2007.

[31]-**CHIAVERINI**, V. Tecnologia Mecânica Editora Mc Graw Hill 2ªed ,1986.

[32]-**DEREK E.**; **TYLER**; **BLANK**, W. T. - Introduction to Copper and Copper Alloys, ASM, Metals Handbook, 10th ed, vol 2, 1990.

[33]-**BENEDETTI**, A.V. et al. Electrochemical Studies of Cu-Al alloys in sulphate solutions with different pH. *Portugalia e Electrochimica Acta*. 2003.

[34]-**SILVA**, L. C.E. Estudos do Desenvolvimento e caracterização das Ligas Cu-Ni-Pt e Cu-Ni-Sn para fins Eletro-Eletrônicox: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Associada à Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2006.

[35]-**NEUBERT**. Tabela de Ligas de Bronze. Disponível em: mecanicaneubert.com.br/conteudo/ligas_bronze.htm.

[36]- **RUSSEL**, J. B. Química Geral. vol II, 2. ed. São Paulo, Akron Books, 1997, p. 1076-1078.)

[37]-**BITTENCOURT**, A.; **CRUZ**, F. A.; **PORTNOI**, M.; **ROSSI**, N.; **SANTANA**, N. Prata, Bronze, Estanho características e aplicações na Engenharia elétrica

<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/estanho-p>. Acesso em 15/09/2015.

[38]-BHUSHAN, B.; GUPTA, B. Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments. New York: McGraw-Hill, 1991.

[39]-HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Cambridge: Butter worth Heinemann, 1992.

[40]-SANTANA, J. S. de. Avaliação tribológica dos Polimeros NBR,PTFE e PTFE Gravitado em contato com aço AISI 52100.2009,Dissertação de Mestrado - 88 pág,Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

[41]-NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. Rio de Janeiro: Bookman, 2003.

[42]-LUDEMA, K. C.; TABOR, D. The Friction and Visco-Elastic Properties of Polymeric Solids. Wear. v. 9, p. 329-348, 1966.

[43]-KREVELEN, D. W. V. Properties of polymers-Their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contribution. 3^o edition, 1997.

[44]-ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. Ciência e Engenharia dos Materiais. 1.ed. Cengage Learnig, 2008.

[45]-LOPES, B. T. J. Apostila de Difusão Atômica, Disponível em: <https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/.../epm-apostila-capitulo081>. Acesso em 23/08/2014.

[46]-PADILHA, A. F. Materiais de Engenharia: Microestrutura e Propriedades. Hemus Editora Limitada, São Paulo, 349 páginas, 1997.

[47]-MARTIN TARR ASSOCIATES LIMITED. Intermetallics. Disponível em http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0127_hjm/index.html. Acesso em 05/09/2015.

[48]-LABIE R.; RUYTHOOREN, W.; HUMBEECK, J. V. Solid state diffusion in Cu e Sn and Ni e Sn diffusion couples with flip-chip scale dimensions; Elsevier, p. 396-403, 2007.

[49]-EMSNOW. Metallurgy of the Soldering Process - Covering Phase diagrams and Intermetallic Phases- <http://www.emsnow.com/npps/story.cfm?id=49633>. Acesso em 10/10/2015.

[50]-NIST. Phase Diagrams & Computational Thermodynamics, Disponível em: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html>. Acesso em 11/10/2015.

[51]-NELE. Moelans' website, Phase Field Method, Disponível em: <http://nele.studentenweb.org/research/?subject=PFM>. Acesso em 11/10/2015.

[52]-MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments.3° ed. John Wiley and Sons, 1991.

[53]-SIQUEIRA, I. P. Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implantação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

[54]-JUNIOR, B. S.; FERREIRA, N. L. Avaliação de um sistema ERP-SAP R/3 como instrumento para gestão financeira na área de contas a pagar em uma empresa de Telecomunicações. artigo científico.

[55]-LUNAMETAIS. Composição do Bronze. Disponível em: <http://www.lunametais.com.br/fichas/bronze-sae-68d-c95500/>. Acesso em 18/10/2014.

[56]-TIM QUÍMICA. Características Física do Estanho em Pó. Disponível em: <http://www.tinquimicaesoldas.com.br/site/estanho.asp>. Acesso em 18/10/2014.

[57]-CIÊNCIAS & TECNOLOGIA. A microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura-<https://cienciasetecnologia.com/microscopio-microscopia-optica-eletronica/>.

[58]-BENTO, R. E. Estudo do comportamento da resina base na formulação de compósitos de politetrafluoretileno com bronze / Ronaldo Euzébio Bento. -Campinas, SP, 2011.

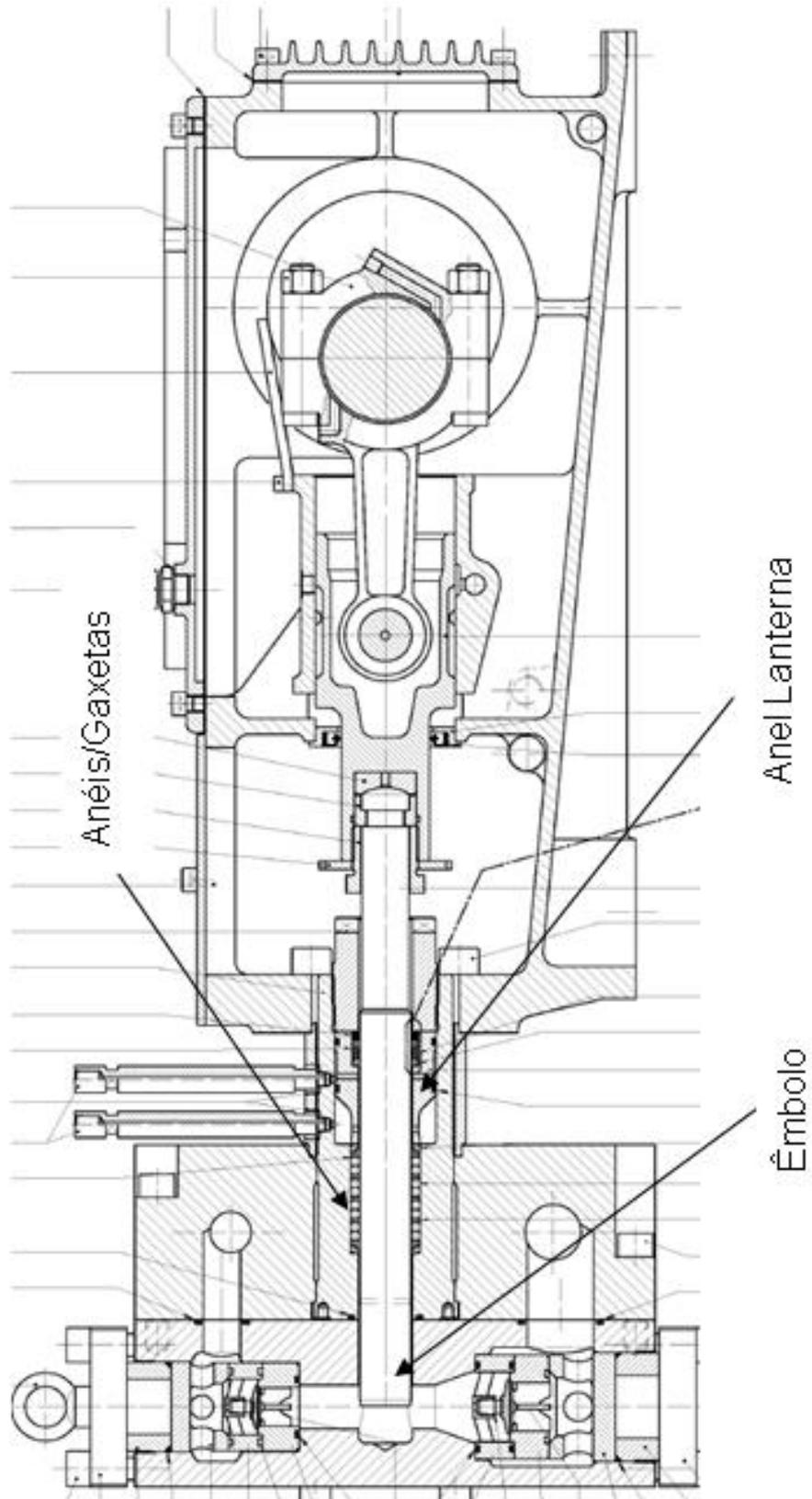
[59]. KARDEC, A.; NASCIF, J. A. Manutenção – função estratégica. 2.ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001.

[60]. **WILLIAMS**, J. H. *et al.* Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics. Londres: Chapman & Hall, 1994.

[61]-**CHAO**, B.; CHAE, H.; SEUNG, Z. X.; LU K. H.; IM J.; HO P.S. Investigation of diffusion and electromigration parameters for Cu–Sn intermetallic compounds in Pb-free solders using simulated annealing; Elsevier, p.2805-2814, 2007.

ANEXO I

Bomba Alternativa em cortes. Fonte: (AUTOR, 2015)



ANEXO II

Quadro de Difusão Cu e Sn na temperatura de 25°C e 150°C. Fonte: (CHAO et al, 2007).

Type of diffusion	D_0 (m ² /s)	Q (kJ/mol)	D (25 °C)	D (150 °C)	Condition
D_{Cu} in (Cu)	3.4×10^{-5}	195.6	2.29×10^{-39}	2.71×10^{-29}	
	$6.0-7.8 \times 10^{-5}$	211.4-213.1	9.11×10^{-42}	5.42×10^{-31}	
D_{Sn} in (Sn)	1.2×10^{-9}	43.89	2.58×10^{-17}	4.70×10^{-15}	⊥ c
	7.70×10^{-4}	107.1	1.50×10^{-22}	4.92×10^{-17}	⊥ c
	1.07×10^{-3}	105	4.85×10^{-22}	1.24×10^{-16}	⊥ c
D_{Cu} in (Sn)	2.4×10^{-7}	33.02	4.09×10^{-13}	2.05×10^{-11}	⊥ c
			$\sim 2 \times 10^{-10}$		⊥ c
D_{Sn} in (Cu)	2.95×10^{-5}	177.0	3.53×10^{-36}	4.61×10^{-27}	
	4.1×10^{-7}	129.8	7.97×10^{-30}	4.18×10^{-23}	
\tilde{D}_{Cu_3Sn}	5.48×10^{-9}	61.86	8.54×10^{-20}	1.31×10^{-16}	
	1.43×10^{-8}	70.6	6.63×10^{-21}	2.87×10^{-17}	
	3.2×10^{-6}	83.91	7.01×10^{-21}	1.47×10^{-16}	
	5.3×10^{-8}	66.1	1.50×10^{-19}	3.81×10^{-16}	Thin film
	8.08×10^{-7}	81.6	4.48×10^{-21}	7.15×10^{-17}	Single crystal
$\tilde{D}_{Cu_3Sn_3}$	1.84×10^{-9}	53.92	6.99×10^{-19}	4.19×10^{-16}	
	1.55×10^{-8}	64.8	7.40×10^{-20}	1.61×10^{-16}	
			$> 10^{-21}$		Thin film (no Cu ₃ Sn)

ANEXO III

Histórico de intervenções no Sistema SAP. Fonte: (AUTOR, 2013).

Modificar ordens PM: Lista ordens									
Dt. referência	Ordem sup.	Ordem	Texto breve	Status do sistema	Status usuário	Nota	Tp.	GenTrabRes	
02.01.2013		2010403863	XV-1233014 - REPARO DE VALVULA	ENCE CONF IMPR CAPC NOLQ	SIMP	5864571	ZM01	110INS02	
01.02.2013		2008810402	LG-1233002A - bóia deformada	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP	5043977	ZM01	110INS02	
15.02.2013		2010150788	B-1233001B: BOMBA C/VAZAMENTO EXCESSIVO	ENCE CONF CAPC IMPA MOME MatC NOLQ	SIMP ANEX PMAU	5957060	ZM01	110MEC02	
15.03.2013		2009506034	Manutenção mecânica na válvula manual	ENCE CONF CAPC KKMP NOLQ	SIMP	5545637	ZM01	110MEC02	
15.04.2013		2010384203	REPARAR VALVULA	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP ANEX	6103034	ZM01	110INS02	
07.05.2013		2010640807	LV-1233001A - VERIFICAR/SANAR VAZAMENTO	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP ANEX PPRO	6277674	ZM01	110MEC02	
06.06.2013		2010524439	PIT-1233020 - VERIFICAR/REPARAR DISPLAY	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP ANEX	6161590	ZM01	110INS02	
15.07.2013		2009974985	VERIFICAR CALIBRAÇÃO DO LIT-1233005A	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP ANEX	5678806	ZM01	110INS02	
27.07.2013		2010722325	LV-1233001B- VERIFICAR/SANAR VAZAMENTO	ENCE CONF IMPR CAPC KKMP NOLQ	SIMP ANEX	6334047	ZM01	110INS02	
16.10.2013		2011091312	Reparar Instrumento LG-1233002A	LIB CNPA IMPR CAPC MATF MOME NOLQ	IMPD TRIA ANEX FMA T FTRP PMAU	6535199	ZM01	110INS02	

ANEXO IV

Tela do PI, monitoramento da pressão e temperatura. Fonte: (AUTOR, 2015).

