

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

Departamento de Metalurgia

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE LÍQUIDOS IÔNICOS COMO
FLUIDOS LUBRIFICANTES EM PROCESSOS DE ESTAMPAGEM

Karine Parise

Trabalho de Diplomação

Orientadora: Profa. Dra. Célia de Fraga Malfatti

Porto Alegre

2015

“Quem tem um porquê, enfrenta qualquer como”.

Viktor Frankl

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Célia de Fraga Malfatti, pela orientação, pelo conhecimento transmitido e pela amizade ao longo destes anos.

A minha coorientadora e amiga Maria Rita Ortega Vega por todo apoio, orientação e, principalmente, pela amizade ‘protônica’.

Ao Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC) pela oportunidade de aprendizado e pela amizade de todos colegas, em modo especial, a Leandro Brunholi, Leonardo Simoni e Rafael Mielczarski. A Marina Biscaro pela atenção e auxílio na realização dos experimentos. A Sandra Raquel Kunst por todos os ensinamentos e por ter me mostrado os caminhos da ciência.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) em especial, a Uilian Boff e ao Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha pelo auxílio na realização dos ensaios.

A minha amiga Bruna Girelli e ao seu Ivo Girelli pela amizade de longa data e pela companhia (regada a chimarrão e pão de queijo) durante estes anos.

Aos meus pais, Oscar Parise e Clarice P. Parise, pelo constante incentivo, pelo amor, pelos valores, pela educação que sempre puderam me proporcionar e por acreditarem desde o início que esta conquista seria possível. A minha irmã Camile pelos longos abraços e o constante amor e carinho que tanto me motivaram e me fizeram acreditar que tudo é possível. A vocês dedico esta conquista e peço desculpa pela ausência e pela saudade ao longo deste tempo.

Ao meu namorado Marcelo Bassani pelo companheirismo e cumplicidade ao longo destes nossos anos de engenharia, pela divisão da mesa durante os estudos e, principalmente, pela extrema paciência, pela motivação, pelo amor e carinho.

E por fim a Deus, responsável por todas as bênçãos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Tribologia.....	3
2.1.1 Fundamentos da Lubrificação	3
2.1.1.1 Tipos de Condição de Lubrificação.....	4
Lubrificação Hidrodinâmica (HL).....	4
Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL)	5
Lubrificação Limítrofe ou de Contorno (BL).....	6
Lubrificação Mista (ML).....	6
2.1.1.2 Características de um lubrificante ideal.....	6
2.1.2 Fundamentos do atrito.....	8
2.1.2.1 Medida do Coeficiente de Atrito ou Fricção	9
2.1.2.2 Rugosidade.....	10
2.1.3 Fundamentos do desgaste.....	12
2.1.3.1 Desgaste Adesivo.....	12
2.1.3.2 Desgaste Abrasivo	13
2.2 Líquidos Iônicos Próticos	15
2.2.1 Uso de Líquidos Iônicos como lubrificantes.....	16
2.3 Uso de lubrificantes no processo de conformação mecânica.....	16
2.3.1 Medida do coeficiente de atrito em processo de estampagem	18
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 Materiais	19
3.1.1 Caracterização do substrato utilizado.....	19

3.1.2 Fluidos Lubrificantes utilizados	20
3.2 Caracterização dos Fluidos Lubrificantes	20
3.2.1 Estabilidade Térmica.....	20
3.2.2 Ângulo de Contato	21
3.2.3 Viscosidade	22
3.2.4 Densidade	22
3.2.5 Estabilidade química	22
3.3 Ensaios Tribológicos.....	22
3.3.1 Microscopia Óptica	24
3.3.2 Perfilometria.....	24
3.4 Ensaio de Dobramento Sob Tensão	25
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Caracterização do substrato utilizado	28
4.2 Caracterização dos Fluidos Lubrificantes	28
4.2.1 Estabilidade Térmica.....	29
4.2.2 Ângulo de Contato	30
4.2.3 Viscosidade	31
4.2.4 Densidade	31
4.2.5 Estabilidade química	32
4.3 Ensaios Tribológicos.....	34
4.4 Ensaio de Dobramento Sob Tensão	40
5.0 CONCLUSÕES	46
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Geometrias de contato conforme e não-conforme. Fonte: Adaptado de (ASM Handbook – Vol. 18, 1992), citado por (Profito, 2010).....	5
Figura 2.2	Força de atrito – (a) diagrama de esforços para o movimento relativo de deslizamento e (b) gráfico da força tangencial em função do tempo para iniciar um movimento. Fonte: Adaptado de (Menezes, 2013).....	8
Figura 2.3	Gráfico de Coeficiente de atrito (μ) pelo tempo (s) para um contato entre metal-metal. Fonte: Adaptado de (Menezes, 2013), citado por (Mielczarski, 2015).	10
Figura 2.4	Diagrama esquemática da estrutura superficial. Fonte: Adaptado de (Menezes, 2013).....	11
Figura 2.5	Imagem representativa do desgaste por adesão. Fonte: Adaptado de (Gwidon, 2005).	13
Figura 2.6	Imagem ilustrando a formação de ranhuras sobre superfícies desgastadas por filmes de partículas transferidas. Fonte: Adaptado de (GWIDON et al. 2005), citado por (Mielczarski, 2015).....	13
Figura 2.7	Desgaste abrasivo por dois e três corpos. Fonte: Adaptado de (Gwidon, 2005).	14
Figura 3.1	Amostra de alumínio (AA1100) utilizada como corpo de prova.....	19
Figura 3.2	Determinação do ângulo de contato através do método de gota séssil. Fonte: Adaptado de (Yuan Y, 2013), citado por (ORTEGA, 2014).	21
Figura 3.3	Representação esquemática do sistema de ensaios tribológicos utilizando o método ball-on-plate do LAPEC-UFRGS.	23
Figura 3.4	Representação esquemática das medidas realizadas perpendicularmente à trilha desgastada.....	24
Figura 3.5	Máquina de avaliação de atrito através de ensaio DST. Fonte: Adaptado de Folle, 2012.	25
Figura 3.6	Máquina utilizada para a medida do coeficiente de atrito. Fonte: Adaptado de Folle, 2015.	26

Figura 4.1	Termograma dos fluidos utilizados como lubrificantes.....	29
Figura 4.2	Espectro FTIR dos PILs 2HEAF e 2HEAPe estudados (a) antes do ensaio de desgaste e (b) após o ensaio de desgaste.....	33
Figura 4.3	Espectro FTIR do lubrificante comercial (a) antes do ensaio de desgaste (b) após o ensaio de desgaste.....	33
Figura 4.4	Gráfico do coeficiente de atrito (COF) pela distância desgastada (m) para as amostras dos sistemas: 2HEAPe, seco, Lubrificante comercial e 2HEAF..	35
Figura 4.5	Imagem do desgaste recorrentes às trilhas e as respectivas esferas dos sistemas: (a) Seco, (b) 2HEAF, (c) 2HEAPe e (d) Lubrificante comercial.	37
Figura 4.6	Perfil das trilhas obtidas pelo ensaio de desgaste para ambos os sistemas estudados.....	39
Figura 4.7	Chapa e pino utilizados para o ensaio composto pelo líquido 2HEAF.....	40
Figura 4.8	Gráfico das forças de atuação(F1) e de contra-tensão (F2) ao longo do tempo de ensaio para o sistema compostos pelo lubrificante comercial e para o sistema composto pelo PIL 2HEAPe.....	41
Figura 4.9	Gráfico referente ao torque no para os sistema compostos pelo lubrificante comercial e para o sistema composto pelo PIL 2HEAPe.	42
Figura 4.10	Gráfico referente ao coeficiente de atrito para o lubrificante comercial sendo, os coeficientes de atrito, calculados a partir das equações reportadas pela literatura para o ensaio de DST.....	43
Figura 4.11	Gráfico referente ao coeficiente de atrito para o PIL 2HEAPe sendo, os coeficientes de atrito, calculados a partir das equações reportadas pela literatura para o ensaio de DST.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Sistema de designação para ligas de alumínio.....	3
Tabela 3.1	Reagentes precursores do cátion e do ânion utilizados na sintetização dos PILs.	20
Tabela 3.2	Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste.	24
Tabela 4.1	Composição química determinada por espectroscopia. (% em massa).	28
Tabela 4.2	Rugosidade média referente ao alumínio e o pino utilizado no ensaio DST.	28
Tabela 4.3	Ângulos de contato obtidos pelo ensaio de molhabilidade.....	30
Tabela 4.4	Viscosidade referente aos fluidos estudados neste trabalho.	31
Tabela 4.5	Densidade dos fluidos estudados no presente trabalho.....	32
Tabela 4.6	Resultados dos coeficientes de atrito obtidos através do ensaio de desgaste para os sistemas estudados.....	35
Tabela 4.7	Largura das trilhas oriundas do ensaio de desgaste.	39
Tabela 4.8	Valores médios para o torque e as forças atuantes para os sistemas constituídos dos fluidos 2HEAPe e lubrificante comercial.	43
Tabela 4.9	Coefficientes médios de atrito calculados segundo as equações propostas para os sistemas estudados.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AA	<i>Aluminum Association</i>
AILs	<i>Aprotic Ionic Liquids</i>
ASTM	<i>ASTM International</i>
BL	Lubrificação de contorno
cm	Centímetro
COF	Coeficiente de Atrito (<i>Coefficient of Friction</i>)
DST	Ensaio de Dobramento Sob Tensão
EHL	Lubrificação elastohidrodinâmica
HL	Lubrificação hidrodinâmica
Hz	Hertz
IL	<i>Ionic Liquids</i>
FT-IR	Espectoscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
kg	Quilograma
kN	Kilonewton
μ	Coeficiente de atrito
μm	Micrometro
ML	Lubrificação mista
m	Metro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
N	Newton
N.m	Newton por metro
ρ	Densidade
PILs	<i>Protic Ionic Liquids</i>
s	Segundo
TGA	Análise termogravimétrica
2HEAPe	pentanoato de 2-hidroxietilamina
2HEAF	formiato de 2-hidroxietilamina

RESUMO

Embora o uso de óleos lubrificantes influencie na eficiência e na qualidade dos processos, quando usados ou contaminados, tornam-se resíduos perigosos para a saúde humana e meio ambiente. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Refino de Óleos Minerais (SINDIRERREFINO), aproximadamente 1,4 bilhão de óleo lubrificante é consumido no Brasil, enquanto que apenas 405 milhões são coletados para reutilização. Atualmente, estudos indicam o uso de líquidos iônicos próticos (PILs) como lubrificantes alternativos devido às suas características intrínsecas quanto à lubrificação e por serem considerados biodegradáveis e ambientalmente corretos. Desta forma, o presente trabalho avaliou o uso dos líquidos iônicos próticos formiato de 2-hidroxietilamina (2HEAF) e pentanoato de 2-hidroxietilamina (2HEAPe) como fluidos lubrificantes, em um par tribológico formado por alumínio comercialmente puro e aço. Para isso, os sistemas lubrificadas com PILs, foram analisados através de ensaio de desgaste, pelo método *ball-on-plate*, utilizando uma chapa de alumínio e uma esfera de aço. Após os testes, realizaram-se microscopias ópticas que permitiram estabelecer os mecanismos de desgaste. Como parâmetros delimitadores, os líquidos foram comparados com um sistema isento de lubrificação e com outro utilizando um lubrificante comercial. A aplicação dos PILs 2HEAF e 2HEAPe como fluidos lubrificantes, em processos de estampagem, foi analisada através do ensaio de dobramento sob tensão. Os resultados mostraram uma redução do coeficiente de atrito em duas vezes para o PIL 2HEAF e, em quatro vezes para o PIL 2HEAPe, quando comparado ao sistema a seco. Em relação ao desgaste, os PILs reduziram o contato entre as asperezas atenuando a perda de material. Todavia, para o sistema em que foi utilizado o PIL 2HEAF, como fluido lubrificante, constatou-se ineficiência quando submetido ao ensaio que simula a estampagem. Enquanto que, o líquido 2HEAPe apresentou resultados próximos aos encontrados para o lubrificante comercial. A eficiência do PIL 2HEAPe, como fluido lubrificante pode estar associada à estrutura molecular e polaridade, bem como à sua alta viscosidade.

Palavras-chave: PILs. Lubrificação. Desgaste. Atrito. Estampagem.

ABSTRACT

Although the use of lubricant oils influences on the processes efficiency and quality, after their usage or contamination, lubricant oils become hazardous substances for human health and the environment. According to the National Union of re-refining of mineral oils (SINDIRERREFINO), approximately 1.4 billion lubricating oil is consumed in Brazil, while only 405 million are collected for reuse. Recent studies point out the use of protic ionic liquids (PILs) as alternative lubricants due to their intrinsic lubricity, as well as biodegradability and being environmentally friendly. From here on, this work evaluated the use of the PILs 2-hydroxyethylammonium formiate (2HEAF) and 2-hydroxyethylammonium pentanoate (2HEAPe) as lubricant fluids for commercially pure aluminum – steel contacts. Therefore, wear test using ball-on-plate method were conducted for the PIL-lubricated systems. After the tests, optical micrographs of the plate and the ball were obtained and they allowed concluding the involved wear mechanisms. For comparison purposes, a dry test and another using a commercial lubricant were carried out. The PILs were also tested as lubricant fluids for metal forming processes through bending under tension (BUT) method. Results showed the reduction of the coefficient of friction in twice for the PIL 2HEAF and four times using the PIL 2HEAPe, related to the dry, non-lubricated system. Regarding the wear, PILs diminished the contact between the each surface roughness and, thus, reduced the material loss. However, BUT test demonstrated that the PIL 2HEAF was not efficient as lubricant fluid for the studied metal forming application. On the other hand, the PIL 2HEAPe displayed results close to the ones for the commercial lubricant. The 2HEAPe efficiency as lubricant fluid can be associated to its structure, polarity and high viscosity.

Keywords: PILs, Lubrication, Wear, Friction, Mechanical forming.

1.0 INTRODUÇÃO

O controle do atrito é considerado um atributo relevante quando objetiva-se obter mecanismos com maior eficiência e consideráveis economias sendo, a lubrificação um meio eficaz de controlar o desgaste e reduzir o atrito.

No cenário industrial atual, a aplicação de óleos lubrificantes em excesso é um procedimento usual nos processos que envolvem a conformação mecânica, tais como o de estampagem. Esta é utilizada para evitar problemas relacionados ao desgaste das matrizes, assim como o surgimento de chapas “arranhadas”. Porém, com a exigência de processos de fabricação mais limpos de forma a não agredir ao meio ambiente, o uso de óleos lubrificantes tende a ser reduzido ou substituído por outro com componentes menos nocivos ao meio ambiente e ao ser humano (FERRARINI, 2014).

Os óleos lubrificantes, embora possam ser eficientes, quando usados ou contaminados tornam-se resíduos perigosos podendo acarretar em riscos para a saúde humana e o meio ambiente. Cerca de 40 milhões de toneladas de lubrificantes ou aditivos de lubrificação são produzidos anualmente, o que representa aproximadamente 8,5% em peso da produção química global. Este valor mostra a enorme importância econômica bem como o forte impacto ambiental, devido à liberação generalizada desses produtos químicos (STOLTE, 2012).

Atualmente, estudos apontam ao desenvolvimento de lubrificantes a base de líquidos iônicos, que são sais orgânicos constituídos por um ânion e um cátion e que se encontram em estado líquido a temperaturas inferiores aos 100 °C. Estes líquidos estão sendo explorados em diferentes aplicações devido ao seu amplo espectro de propriedades e por terem suas propriedades físicas determinadas de acordo com a estrutura de cada um dos íons que os compõem, o que permite serem sintetizados de acordo com as reais necessidades de cada aplicação que favorece, desse modo, o desenvolvimento de processos sustentáveis mais eficientes (ORTEGA, 2014).

Quanto à lubrificação, os líquidos iônicos se apresentam interessantes devido que, de acordo com a estrutura, podem ter altos valores de viscosidade para permitir a redução da fricção entre duas superfícies em movimento relativo. Além de apresentarem altos valores de condutividade térmica, o que permite a dissipação de aquecimento por fricção. Por outro lado, eles não emitem compostos orgânicos voláteis, pelo que são considerados ‘lubrificantes verdes’ e, ainda, podem ser biodegradáveis (BHUSHAN, 2012).

A liga AA1100 é caracterizada pela excelente resistência à corrosão, alta condutibilidade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e elevada ductilidade. Portanto, é amplamente empregada em processos que envolvem a estampagem de chapas. A classificação das ligas de alumínio é dada em função dos principais elementos de liga presentes no material e sua designação pode ser observada na Tabela 1.1 onde, os últimos dígitos indicam a pureza ou indicam a liga de alumínio (REGULY, 2013).

Tabela 1.1 Sistema de designação para ligas de alumínio.

Liga	Designação
Alumínio > 99.00%	1xxx
Cobre	2xxx
Manganês	3xxx
Silício	4xxx
Magnésio	5xxx
Magnésio e Silício	6xxx
Zinco	7xxx
Outros elementos	8xxx

O objetivo principal deste trabalho consiste em analisar o comportamento tribológico dos líquidos iônicos próticos (PILs, *Protic Ionic Liquids*) formiato de 2-hidroxietilamina (2HEAF) e pentanoato de 2-hidroxietilamina (2HEAPe) como fluidos lubrificantes sendo, os líquidos estudados, comparados a um lubrificante comercial e ao processo a seco. O efeito lubrificante dos PILs foi avaliado pelo teste de desgaste em um tribômetro com configuração *ball-on-plate* e pelo teste de ensaio de dobramento sob tensão. Os líquidos utilizados como lubrificantes foram caracterizados quanto as suas propriedades: ângulo de contato, viscosidade, densidade, estabilidade térmica e estabilidade química.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tribologia

O termo tribologia, provem do grego *tribos* (atritar) e *logos* (estudo), e foi oficialmente incorporado ao dicionário científico, na década de 1960, em um relatório, elaborado por H. Peter Jost, para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Sendo, o termo tribologia definido como a “ciência e tecnologia de interações entre superfícies em movimento relativo entre si” (DAVIM, 2012).

Em sua forma tradicional, a tribologia, é registrada desde o início da história. No período Paleolítico, a fricção de pedras e gravetos foi utilizada para a obtenção do fogo. O uso de lubrificantes para a redução do atrito e desgaste, foi evidenciado pelas civilizações sumérias e egípcias (GAHR, 1987). O estudo científico da tribologia também apresenta uma longa história. Os primeiros estudos referentes ao atrito e desgaste, foram desenvolvidos por Leonardo da Vinci no século XV (GWIDON, 2005).

Por abranger diretamente a lubrificação, o atrito e o desgaste a tribologia é reconhecida por seu caráter multidisciplinar, pois seu estudo e pesquisa são fundamentais para as aplicações industriais. É de valia deste campo a análise de problemas de grande importância econômica, tais como confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamento técnico que vão desde eletrodomésticos a, até mesmo, naves espaciais.

Estima-se que por meio da aplicação adequada dos princípios e práticas tribológicas na indústria, pode-se obter uma economia de 1,0% a 1,4% do produto nacional bruto de um país (PIB) (JOST, 1990). Desta forma, o entendimento do atrito e fenômenos de desgaste assim como, os de lubrificação são imprescindíveis.

2.1.1 Fundamentos da Lubrificação

Por mais bem polida que possa ser a superfície de um material metálico, estas sempre apresentarão asperezas. Quando um par tribológico é montado, as asperezas das superfícies

em contato são responsáveis por suportarem o carregamento externo fazendo com que a força, necessária para que ocorra o movimento relativo das superfícies, torne-se excessivamente elevada causando níveis inaceitáveis de fricção desgaste e danos superficiais (KWIETNIEWSKI, 2011) (NEALE, 1975).

O uso de um filme lubrificante é o modo mais eficiente para reduzir o desgaste e o atrito. Na prática, a lubrificação pode ser alcançada através da aplicação de lubrificantes entre pares de deslizamento, para evitar, dessa forma, o contato entre as asperezas e, conseqüentemente, promovendo a lubrificação e a redução do desgaste (LIU, 2009) (ORTEGA, 2014).

Portanto, a lubrificação tem como objetivo introduzir um filme de baixa resistência ao cisalhamento cuja finalidade condiz no enfraquecimento da resistência das junções de asperezas formadas (KWIETNIEWSKI, 2011). Essa camada de baixa resistência pode ser do tipo gasoso, líquido ou sólido a qual pode ser, geralmente, muito fina e difícil de observar. Em geral, a espessura dessa camada varia de 1-100 [μm] embora películas mais espessas também possam ser observadas (GWIDON, 2005).

Em alguns casos, o lubrificante pode não evitar completamente o contato entre as asperezas, embora consiga reduzir a severidade deste. Todavia, verifica-se situações, em que o lubrificante permite a completa separação das superfícies não havendo, dessa forma, a formação de junções de asperezas. Assim, o uso de lubrificantes sempre reduzirá a taxa de desgaste a qual, é uma função direta do tipo de lubrificação presente (NEALE, 1975).

2.1.1.1 Tipos de Condição de Lubrificação

De acordo com as condições de separação, das superfícies em movimento relativo, a lubrificação pode ser dividida em diferentes regimes: hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, de contorno e misto.

Segundo Gahr (1987), essas condições de separação são determinadas pela combinação de propriedades como, o carregamento, a velocidade de deslizamento, as propriedades do lubrificante, a geometria do par tribológico e a rugosidade das superfícies em contato. As principais características destes regimes são descritas no texto a seguir.

- Lubrificação Hidrodinâmica (HL)

A principal característica desta condição de lubrificação é a presença de uma relativamente espessa e contínua camada de fluido lubrificante entre as superfícies que evita o contato entre as asperezas. Neste modo de lubrificação, assume-se que o fluido lubrificante apresenta alta molhabilidade sobre as superfícies de deslizamento recobrimo-as adequadamente (NEALE, 1975) (MENEZES, 2013).

Sua ocorrência é preferencialmente entre superfícies geometricamente semelhantes (Figura 2.1) onde a carga suportada é pela viscosidade do lubrificante. Trevisan (2011) cita que, para que haja lubrificação hidrodinâmica, é necessária a ausência de qualquer interação das asperezas das superfícies e para tanto, a espessura do filme precisa ser pelo menos de duas a cinco vezes maior que a rugosidade das superfícies.

Gwindon (2005) reporta que o coeficiente de atrito, para a lubrificação hidrodinâmica, situa-se entre 0,01 e 0,03 o qual depende de fatores como: viscosidade, superfícies de contato, velocidade relativa, área das superfícies, espessura do filme fluido, geometria das superfícies e carga exercida sobre o filme fluido. Em consequência, dentre as propriedades físicas dos fluidos de filme lubrificante, a viscosidade é dada como a mais relevante (NEALE, 1975).

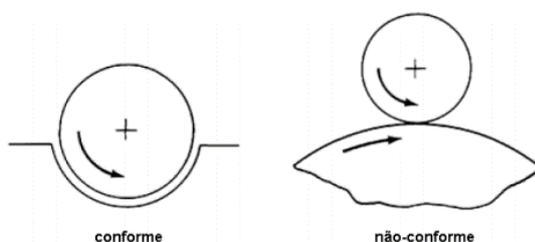


Figura 2.1 Geometrias de contato conforme e não-conforme. Fonte: Adaptado de (ASM Handbook – Vol. 18, 1992), citado por PROFITO, 2010).

- Lubrificação Elastohidrodinâmica (EHL)

A lubrificação elastohidrodinâmica é uma forma de lubrificação hidrodinâmica onde há contato das asperezas das superfícies opostas e, em consequência, deformação elástica (NEALE, 1975). O filme lubrificante é geralmente fino, apresentando uma espessura de aproximadamente 0,1 a 1 [μm]; contudo, apesar de pouco espesso, verifica-se a separação das superfícies que resulta numa significativa redução do desgaste e do atrito (GWIDON, 2005).

Este regime de lubrificação é geralmente associado a superfícies não conformais envolvendo nominalmente uma linha ou ponto de contato. O aumento pontual da viscosidade do lubrificante que, por sua vez, é aumentada devido às elevadas pressões de contato promove a formação de um filme de fluido efetivo. A tensão de contato é geralmente muito maior que a encontrada nas condições de lubrificação hidrodinâmica (NEALE, 1975).

- Lubrificação Limítrofe ou de Contorno (BL)

Este regime é caracterizado por apresentar contato físico significativo entre as superfícies que interagem mesmo havendo uma película ou monocamada lubrificante. Sob este mecanismo de lubrificação a viscosidade do lubrificante possui pouca relevância sendo de interesse as propriedades físicas e químicas do lubrificante (GWIDON, 2005).

As interações físicas e químicas do lubrificante com os corpos sólidos minimizam o desgaste e o atrito devido à formação de uma camada, muitas vezes de proporção molecular, adsorvida na superfície. Este tipo de condição de lubrificação, geralmente, ocorre em condições de alta pressão e baixa velocidade. Um bom lubrificante de contorno deve apresentar uma alta interação entre as moléculas e as superfícies deslizantes. Em uma regra geral, líquidos são bons lubrificantes quando são polares e, portanto, capazes de se aderir nas superfícies (ou serem adsorvidos) (BHUSHAN, 2012). Segundo Gwidon (2005), o coeficiente de atrito para este tipo de condição de lubrificação é na ordem de 0,03 – 0,1 o qual é 10 a 100 vezes maior que o hidrodinâmico.

- Lubrificação mista (ML)

Esse regime é governado por uma combinação de efeitos da lubrificação hidrodinâmica e da lubrificação de contorno. Nessa condição de lubrificação, o coeficiente de atrito depende fortemente do lubrificante. Tanto as propriedades físicas do fluido lubrificante como as interações químicas entre o fluido lubrificante, aditivos e as superfícies de deslizamento devem ser consideradas (NEALE, 1975). Este modo de lubrificação é o mais encontrado em engrenagens, rolamentos e em conformação de metais.

2.1.1.2 Características de um lubrificante ideal

Algumas propriedades determinam o desempenho dos lubrificantes, como a viscosidade, o carregamento e a velocidade de deslizamento. A viscosidade do lubrificante

é um fator importante, pois determina o valor de sua resistência ao cisalhamento, fundamental na lubrificação HL e EHL (MINAMI, 2009; CARRETEIRO, 2006). Contudo, fatores como a resistência à degradação do lubrificante em serviço, a corrosão das superfícies devido o fluido, e as considerações econômicas e ambientais também devem ser avaliadas.

As funções de um lubrificante são múltiplas e complexas. As principais características desejáveis de serem encontradas em um lubrificante ideal são citadas por Cetlin (2005) como:

- Manter inalteradas as condições de lubrificação hidrodinâmicas ou lubrificação limite a altas pressões e temperaturas;
- Diminuir o atrito superficial até valores compatíveis com as necessidades do processo;
- Dissipar eficazmente o calor gerado durante o processo de deformação;
- Impedir a adesão metálica entre a matriz e o metal processado;
- Reduzir a transferência de metal entre a superfície do metal e a ferramenta;
- Eliminar partículas abrasivas;
- Manter condições aceitáveis de acabamento superficial e características metalúrgicas dos produtos acabados;
- Não deixar resíduos ao ser tratado termicamente o material processado;
- Ser de fácil remoção da superfície do produto nas operações de acabamento;
- Não apresentar características tóxicas (vapores nocivos);
- Possuir condutividade elétrica aceitável para assegurar o desaparecimento de cargas elétricas estáticas produzidas pelo atrito.

E sob situações em que o lubrificante opera em condições de lubrificação de contorno ainda são acrescentados os seguintes requisitos:

- Possuir propriedades físico-químicas que permitam sua adesão à superfície do metal;
- Ter grande estabilidade química em alta temperatura;

- Possuir baixa reatividade e não interagir com outros lubrificantes ou aditivos.

2.1.2 Fundamentos do atrito

O termo atrito é usado para descrever a perda gradual de energia cinética em diversas situações onde há movimento relativo entre corpos. Define-se o atrito como “a resistência ao movimento que existe quando dois corpos sólidos, em contato, deslizam tangencialmente um em relação à superfície do outro, ou quando uma tentativa é realizada para produzir tal movimento” (MIELCZARSKI, 2015).

A força de atrito (F_a), ou força resistiva ao movimento, é uma força tangencial e atua sobre os corpos em contato. A classificação do atrito está relacionada com a ocorrência ou não do movimento relativo das superfícies. Neste caso, quando uma força (F) tangencial é aplicada, a força requerida para que haja o início do movimento é designada como força de atrito estática (F_s), enquanto que, define-se como atrito dinâmico (F_k) a força que atua sobre a interface de contato durante o deslizamento. Na Figura 2.2, verifica-se a força de atrito ao longo do tempo, onde a força para iniciar o movimento é maior que a força requerida para mantê-lo. Isto é devido ao fato da força de atrito estático ser maior ou igual que a força de atrito dinâmico.

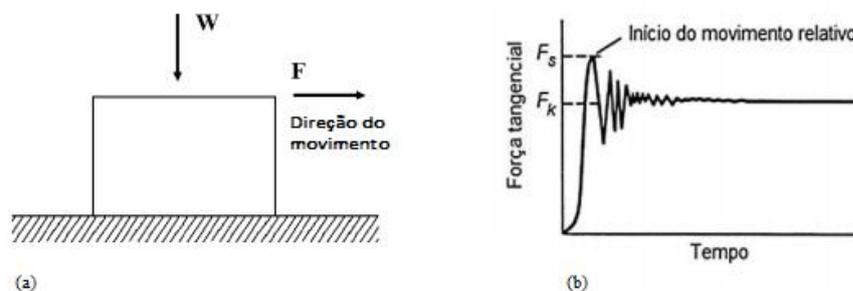


Figura 2.2 Força de atrito – (a) diagrama de esforços para o movimento relativo de deslizamento e (b) gráfico da força tangencial em função do tempo para iniciar um movimento. Fonte: Adaptado de (MENEZES, 2013).

O atrito entre sólidos é tradicionalmente governado por quatro leis empíricas fundamentais:

- O atrito estático é geralmente maior que o dinâmico;
- O atrito é independente da velocidade dos corpos em contato;

- A força total de atrito é diretamente proporcional ao carregamento externo normal aplicado;
- A força de atrito é independente da área nominal de contato.

A força de atrito surge a partir de duas fontes, isto é, a partir de uma força de adesão, desenvolvida nas áreas de contato real entre as superfícies, e uma força de deformação, necessária para causar a penetração das asperezas da superfície mais dura na mais macia (KWIETNIEWSKI, 2011). Desta forma, a força de atrito resultante (F) é considerada como uma soma da contribuição de duas componentes: $F_{adesão}$ devido a adesão existente na interface de contato das asperezas que compõem a topografia das superfícies a qual, ocorre devido às forças interatômicas de atração geradas pelos átomos presentes nesta região; e $F_{deformação}$ oriunda da deformação elástica ou plástica sendo que, para materiais de diferentes durezas, a superfície com maior dureza produzirá ranhuras ou sulcos (“groves”) na superfície de menor dureza. O efeito do atrito pode ser dividido em três mecanismos básicos relacionados à adesão, penetração e a rugosidade superficial em contato que será abordada posteriormente.

2.1.2.1 Medida do Coeficiente de Atrito ou Fricção

O atrito é frequentemente apresentado por um parâmetro quantitativo chamado de coeficiente de atrito (μ), que pode-se dividir em coeficiente estático (μ_s), considerado como a fricção entre superfícies quando não há movimento relativo entre estas, e dinâmico (μ_k), quando estão em movimento.

O coeficiente de atrito (μ) mede a magnitude da força de atrito total (F) desenvolvida entre duas superfícies em contato, sob uma determinada força de carregamento externo (W) (Figura 2.2). No entanto, evidencia-se que o coeficiente de atrito não é uma função da massa ou de volume, dependendo apenas dos materiais que constituem o par tribológico e das condições de ensaio tais como, temperatura e velocidade de deslizamento. O coeficiente de atrito pode ser estimado pela equação (1).

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

O coeficiente de atrito é um parâmetro empírico medido experimentalmente não sendo encontrado a partir de cálculos. Por depender fortemente das condições de operação e lubrificação do sistema, os valores encontrados para o coeficiente de atrito podem variar de grandezas como 0,01, encontrado em rolamentos levemente carregados e bem lubrificados,

chegando a valores extremamente elevados como 10, para metais cujas superfícies encontram-se isentas de óxidos em sistemas a vácuo. Para a maioria dos sistemas, deslizantes ao ar, o coeficiente de atrito encontra-se entre 0,1 e, para sistemas deslizantes desprovidos de qualquer forma de lubrificação, o coeficiente de atrito geralmente atinge valores entre 0,5 e 0,7 (PROFITO, 2010) (MENEZES, 2013).

Qualquer aparelho para medição de atrito deve ser capaz de fornecer movimento relativo entre duas amostras, de aplicar uma carga normal mensurável, e de medir a resistência tangencial ao movimento. A Figura 2.3 ilustra o comportamento de contato e o deslizamento entre duas superfícies, podendo-se evidenciar duas regiões distintas caracterizadas pelo coeficiente de atrito estático, calculado como o valor de atrito máximo atingido durante o período inicial de deslizamento e pelo do coeficiente de atrito estável calculado como a média da porção de estado de fricção estável.

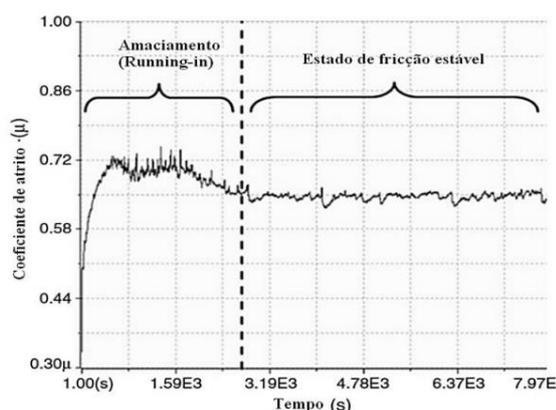


Figura 2.3 Gráfico de Coeficiente de atrito (μ) pelo tempo (s) para um contato entre metal-metal. Fonte: Adaptado de (MENEZES, 2013), citado por (MIELCZARSKI, 2015).

2.1.2.2 Rugosidade

As superfícies de sólidos apresentam características que influenciam o atrito, desgaste e lubrificação de um modo independente do material. Muitos problemas que envolvem fricção, mecanismo de contato, condução de calor e condução de corrente elétrica podem ser resolvidos a partir do entendimento da superfície dos materiais.

Fundamentalmente, a rugosidade da superfície limita o contato entre sólidos para uma fração muito pequena da área de contato nominalmente disponível. E, portanto, é um parâmetro indispensável no estudo de um processo tribológico. Imperfeições da superfície em um nível atômico são acompanhadas por desvios macroscópios de planicidade formando certa rugosidade superficial (FALCADE, 2014). A Figura 2.4 mostra o diagrama

esquemático de estrutura de superfície na qual, pode-se verificar a rugosidade, ondulações, sulcos, falhas ou defeitos que podem estar contidas nas superfícies dos sólidos.

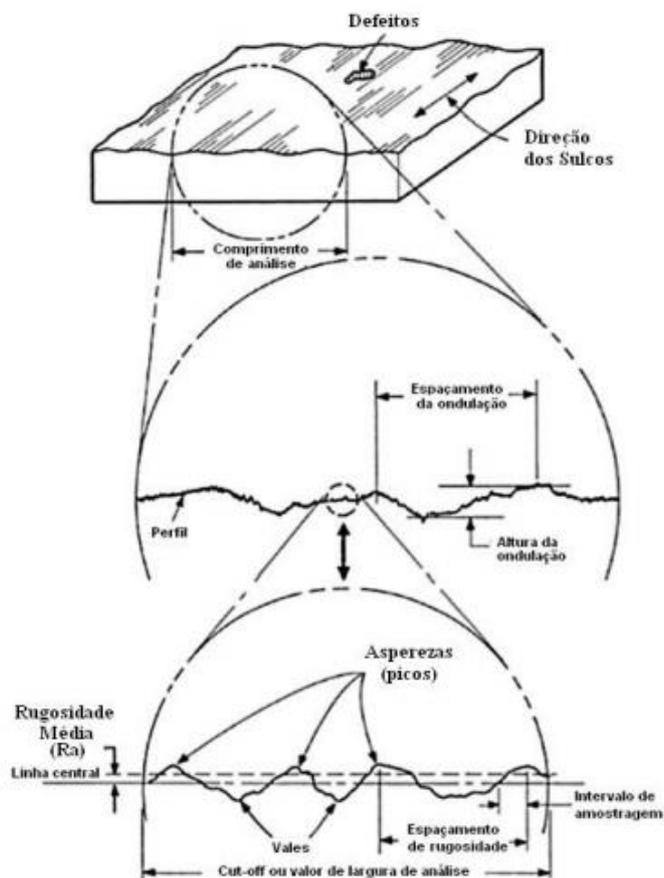


Figura 2.4 Diagrama esquemático da estrutura superficial. Fonte: Adaptado de (MENEZES, 2013).

Todas as superfícies sólidas são ásperas quando cuidadosamente estudadas sobre diferentes escalas. A rugosidade é tipicamente caracterizada por asperezas de amplitude e espaçamento variável sendo caracterizada por picos (locais de máximos) e vales (locais de mínimo) de amplitude e espaçamento variável. Através de parâmetros bem definidos, a superfície pode ser descrita pela obtenção de informações da topografia. A rugosidade superficial pode ser medida ao longo de uma única linha perfil (2D) ou ao longo de um conjunto de perfis de linha paralela (3D), como no caso de um mapa de superfície.

Característica de altura são comumente descritas por parâmetros como R_a , R_t e R_z . O R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i) dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média ao longo do comprimento de amostragem e seu valor está diretamente relacionado com a área delimitada pelo perfil de medição (ℓ_m). É o parâmetro de rugosidade mais utilizado universalmente para o controle da qualidade; contudo, isoladamente não é capaz de descrever totalmente uma superfície. Uma das

principais desvantagens deste parâmetro é que ele pode dar valores idênticos para as superfícies com características totalmente diferentes, devido a média empregada. Este problema pode ser corrigido pela aplicação de outros parâmetros como, o R_t e R_z . Onde, o R_t corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (ℓ_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). E, o R_z corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial (Z_i) (MIELCZARSKI, 2015) (FALCADE, 2014).

2.1.3 Fundamentos do desgaste

Em grande parte dos casos, o desgaste ocorre devido às interações entre as asperezas das superfícies em contato. Segundo Gwidon (2005), o desgaste é a principal causa da perda de material e de desempenho mecânico e uma forma de atenuar o seu efeito é através da lubrificação.

Durante o movimento relativo, o material de contato superficial pode ser deslocado acarretando em mudanças de suas propriedades. Este material superficial retirado pode resultar na transferência para uma superfície de acoplamento ou originar partículas de desgaste (*debris*). O desgaste, assim como o atrito, não é uma propriedade do material, é uma resposta do sistema. Dessa forma, as condições de operação podem afetar o processo de desgaste.

Em geral, dois terços de todos os processos de desgaste encontrados em situações industriais ocorrem devido aos mecanismos de desgaste adesivo e abrasivo. Em muitos casos, o desgaste é iniciado por um mecanismo e pode proceder por outros mecanismos (MENEZES, 2013).

Tradicionalmente são aceitos quatro principais mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo, erosivo e por fadiga. Neste trabalho, serão detalhados os modos de desgaste adesivo e abrasivo, por serem os fenômenos presentes no mecanismo de desgaste dos sistemas estudados.

2.1.3.1 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo é caracterizado por altas taxas de desgaste e um alto coeficiente de atrito instável. Os metais, por apresentarem ductilidade, são particularmente mais propensos a este mecanismo de desgaste (GWIDON, 2005).

Este mecanismo de desgaste é oriundo do contato das asperezas de dois corpos sólidos as quais formam ligações adesivas entre si. A adesão promove a deformação plástica na região de contato e cria descontinuidades na superfície, além de poder haver a criação de uma fissura que pode se propagar e produzir um terceiro corpo e a remoção de material da superfície. Na prática, a transferência de material é observada a partir do material de menor resistência para o de maior resistência, ficando aderida na superfície deste último, conforme pode ser observado na Figura 2.5 (BHUSHAN, 2002) (GWIDON, 2005).

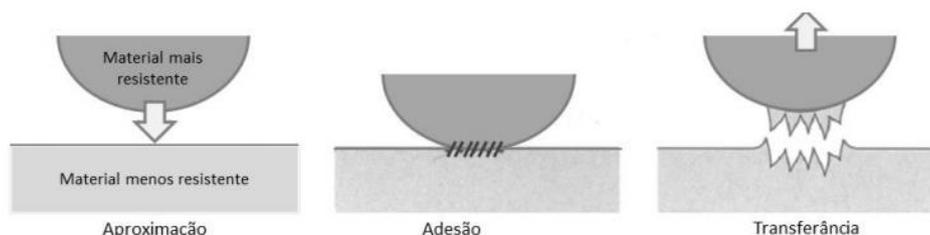


Figura 2.5 Imagem representativa do desgaste por adesão. Fonte: Adaptado de (GWIDON, 2005).

Por serem geralmente mais duras que o material de substrato, as partículas de transferência podem produzir ranhuras na superfície e seu mecanismo de interação pode ser observado na Figura 2.6.

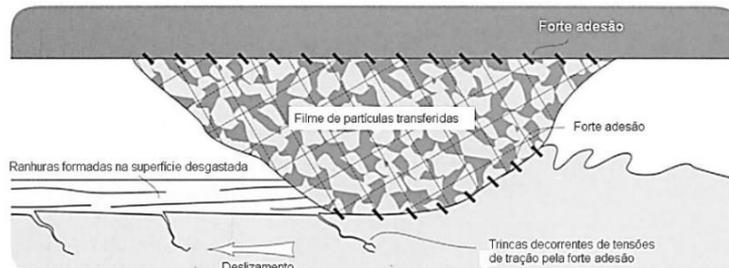


Figura 2.6 Imagem ilustrando a formação de ranhuras sobre superfícies desgastadas por filmes de partículas transferidas. Fonte: Adaptado de (GWIDON et al. 2005), citado por (MIELCZARSKI, 2015).

Muitos sólidos irão aderir ao entrarem em contato com outro sólido. A presença de contaminantes como, água, oxigênio e óleo formam camadas que intervêm na adesão entre dois sólidos. Grande parte das falhas de lubrificação em componentes metálicos que estão em contato e em deslizamento resultam em desgaste adesivo. Uma vez que se refere à função básica do lubrificante fornecer algum grau de separação entre as superfícies deslizantes. Se as superfícies deslizantes não estão separadas, a adesão e subsequente desgaste são quase inevitáveis (FALCADE, 2014).

2.1.3.1 Desgaste Abrasivo

Em termos gerais, o desgaste abrasivo é caracterizado pela perda de material devido à passagem de partículas duras pela superfície de um material com igual ou maior dureza. No caso de materiais com alta tenacidade à fratura (como os metais e ligas), por serem mais macios, sofrem desgaste abrasivo por deformação plástica, quando em contato com asperezas ou partículas duras (BHUSHAN, 2002).

No desgaste abrasivo, há a distinção entre o modo de desgaste que pode ser atribuído por dois e três corpos. No desgaste abrasivo por dois corpos, a abrasão é promovida por duras protuberâncias ou simplesmente pela diferença de dureza ou rugosidade entre as duas superfícies que se encontram em fricção. Este modo de desgaste pode ser exemplificado pela ação de uma lixa sobre uma superfície. No desgaste abrasivo por três corpos, a superfície mais dura corresponde a um terceiro corpo que, geralmente, consiste em pequenas partículas abrasivas localizadas entre as duas superfícies em contato, as quais são suficientemente duras para promover a abrasão. Estas partículas duras podem ser geradas localmente por algum mecanismo oriundo do desgaste (partículas endógenas) ou podem estar presentes na forma de contaminantes (partículas exógenas). Na maior parte dos casos, o mecanismo inicial de desgaste é o de adesão, o qual gera partículas de desgaste que ficam presas na interface e provocam o desgaste abrasivo por terceiro corpo (GWIDON, 2005) (BHUSHAN, 2002). Os modos de desgaste abrasivo de dois e três corpos são ilustrados esquematicamente na Figura 2.7.

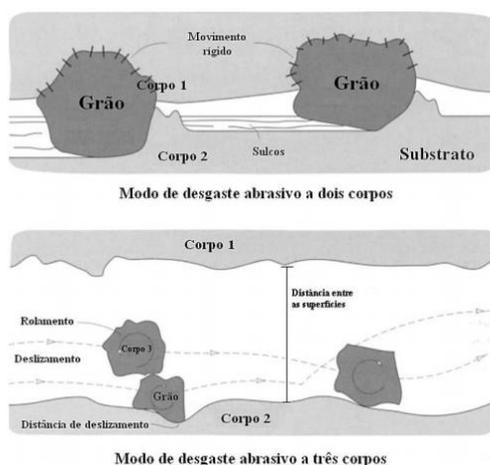


Figura 2.7 Desgaste abrasivo por dois e três corpos. Fonte: Adaptado de (GWIDON, 2005).

2.2 Líquidos Iônicos Próticos

Atribuem-se como líquidos iônicos (IL, *Ionic Liquids*) os sais compostos por um ânion e um cátion de origem orgânica que se encontram em estado líquido a temperaturas inferiores a 100 °C. Uma importante particularidade dos ILs está associada ao fato de que suas propriedades físico-químicas, tais como: temperatura de fusão, densidade, viscosidade e hidrofobicidade, podem ser alteradas conforme as necessidades específicas para um determinado processo. Isso é possível através da variação da estrutura do ânion, do cátion ou a de ambos, pois a composição dos IL determina as suas propriedades finais (AUSTEN, A. C., 2012)(ORTEGA, 2014).

Os líquidos iônicos podem ser classificados em duas famílias distintas: a dos líquidos iônicos apróticos (*Aprotic Ionic Liquids* - AILs) e a dos líquidos iônicos próticos (*Protic Ionic Liquids*- PILs). Estes últimos diferem-se por apresentarem, ao menos, um próton móvel o que permite a formação de pontes de hidrogênio. A sintetização dos PILs é dada através da neutralização de um ácido e uma base de Brønsted, onde ocorre a transferência protônica no sentido ácido – base (normalmente uma amina). Este processo é reversível se a energia que é exigida para o salto do próton é pequena; neste caso, o líquido formado tem condutividade baixa e alta pressão de vapor. Propriedades boas de um LI são conseguidas quando o próton permanece em grande parte no cátion devido à larga lacuna de energia associada à recuperação do ácido puro e base (AUSTEN, A. C., 2012) (STRACKE, 2008).

Atualmente, uma nova família de PILs que apresenta em sua estrutura cátions simples e ânions lineares, vem sendo estudada devido ao seu menor impacto ambiental. Os novos PILs são, principalmente, compostos de aminas polisubstituídas (mono, di e trietanolamina) assim como ácidos orgânicos (fórmico, acético, propiônico, butírico, isobutírico e ácido pentanóico) (PERIC, 2014).

Por apresentarem uma combinação singular de características entre, as quais incluem-se excelente condutividade elétrica, bem como condutividade térmica, baixa toxicidade e pressão de vapor desprezível, a aplicabilidade dos PILs está sendo largamente explorada em diferentes campos como em baterias, sensores, solventes eletroquímicos, entre outros (BART, 2013) (LIU, 2009). Em virtude destas características intrínsecas, recentemente, os PILs estão sendo pesquisados como possíveis lubrificantes puros ou como

aditivos aumentando, dessa forma, o número de pesquisas relacionadas ao seu comportamento tribológico (STOLTE, 2012) (LIU, 2005).

2.2.1 Uso de Líquidos Iônicos como lubrificantes

Por apresentarem características requeridas pelos lubrificantes de alto desempenho, os líquidos iônicos, desde que foram descobertos em 2001 como lubrificantes sintéticos de alta performance, estão sendo largamente estudados e pesquisados em relação ao seu desempenho tribológico (LIU, 2009) (BART, 2013).

As principais vantagens referentes ao uso de ILs como lubrificantes são reportadas por (PALACIO, et al., 2010) como sendo:

- (i) Pré-determinação das propriedades físicas e químicas, através da escolha de cátions e ânions, permite a aplicação dos IL em processos específicos;
- (ii) Estabilidade térmica e química possibilita o uso destes líquidos em condições severas;
- (iii) Baixa pressão de vapor, não sendo inflamáveis;
- (iv) A alta condutividade térmica facilita a dissipação de calor durante os processos de deslizamento;
- (v) Ausência de emissão de compostos voláteis orgânicos faz com que os líquidos iônicos sejam considerados ambientalmente corretos e classificados como lubrificantes “verdes”.

Em relação às condições de lubrificação, algumas pesquisas indicam que, no regime de lubrificação de contorno, a natureza polar dos líquidos iônicos contribui para que haja a formação de um filme com forte adsorção sobre as superfícies em atrito auxiliando assim, na redução da fricção e desgaste (LIU, 2009) (LI, 2014).

No entanto, quando se discute a aplicabilidade dos líquidos iônicos como lubrificantes algumas desvantagens devem ser abordadas como: o comportamento corrosivo, a oxidação, o alto custo de alguns ILs, e a possível toxicidade de alguns subprodutos oriundos da degradação do líquido (PALACIO, et al., 2010).

2.3 Uso de lubrificantes no processo de conformação mecânica

Grande parte dos processos de conformação mecânica envolve o contato entre duas ou

mais superfícies e um lubrificante entre eles. O atrito ocorre quando há um movimento relativo entre uma ferramenta (de conformação) e o material que está sendo deformado (SCHAEFFER, et al., 2011)

O uso de lubrificantes em processos que envolvem a conformação de chapas contribui para que haja o aumento da produtividade, diminuição dos rejeitos, desgaste da ferramenta e redução do consumo de energia. Segundo Lovell (2006), apesar de décadas de pesquisa sobre o assunto, os lubrificantes usados em operações de conformação continuam representando grandes desafios ambientais e econômicos para a indústria que derivam de fatores como:

- A conformabilidade e a superfície final satisfatórias de chapas metálicas podem ser raramente alcançadas em condições secas;
- Quase todos os lubrificantes utilizados na conformação de metais são óleos ou graxas que deixam muitos resíduos poluentes;
- Os lubrificantes, muitas vezes, põem em risco a saúde humana tanto no seu uso como na sua eliminação;
- O custo com a eliminação dos lubrificantes de conformação tem crescido exponencialmente.

O fato de não existirem restrições relacionadas ao tipo de material necessário para formar uma película lubrificante remete que qualquer substância, que reduza o atrito e o desgaste proporcionando, como consequência, um funcionamento suave e um tempo de vida satisfatório para os ferramentais, possa ser um lubrificante. Desse modo, os lubrificantes podem ser líquidos (tais como óleos minerais, ésteres sintéticos, fluidos de silicone e água), sólidos (como o grafita ou politetrafluoroetileno) ou gasosos (como o ar) (GWIDON, 2005) (HAMROCK, et al., 2004). Contudo, o tipo de material influencia diretamente na eficácia do filme.

Em virtude, geralmente, das propriedades físicas e químicas do metal, a escolha de um lubrificante, para uma determinada aplicação, requer que este último apresente propriedades específicas, como nos processos de conformação envolvendo o alumínio. Por apresentar baixa resistência e dificuldade para ser lubrificado, os lubrificantes utilizados nos processos que envolvem a conformação do alumínio devem, além de amenizar o atrito entre

peça-ferramenta, impedir o desgaste adesivo decorrente da ruptura da camada de óxido do alumínio que deixa exposto o metal adjacente (LIU, 2005).

2.3.1 Medida do coeficiente de atrito em processo de estampagem

Para um chapa metálica, o comportamento do atrito é um dos aspectos mais importantes. O atrito entre a chapa e a superfície da ferramenta direciona o fluxo da folha na ferramenta, e este influencia na distribuição das tensões e forças do componente prensado. Uma determinada rugosidade na chapa é necessária, para que a superfície possa reter lubrificante suficiente afim de que, reservatórios sejam criados para o fornecimento de óleo nas zonas de contato ao longo de todo o processo de deformação. O comportamento do atrito não é, no entanto, apenas influenciado pela topografia da superfície. Uma infinidade de parâmetros tais como, lubrificante, quantidade de lubrificante, composição química da superfície, pressão de contato, velocidade de deslizamento, entre outros, contribuem para o comportamento tribológico na interface chapa-ferramenta (GUNNARSSON et al. 1998) (SHEU, 1988).

Em processos de estampagem, o desempenho de um fluido lubrificante pode ser avaliado segundo a análise do coeficiente de atrito na interface chapa-ferramenta. Segundo Folle (2012), existem vários ensaios tecnológicos que apresentam como objetivo determinar o coeficiente de atrito na estampagem. Todavia, o ensaio mais amplamente usado é o de dobramento sob tensão (do inglês BUT, *Bending Under Tension Test*) por levar em consideração durante o ensaio, o local de maior atrito durante a estampagem.

Para Sniekers (1997), o coeficiente de atrito é normalmente obtido por experimentos, os quais precisam apresentar as seguintes características: as condições observadas no experimento devem ser similares para aquelas observadas nas condições reais de estampagem; o coeficiente de atrito deve ser determinado sem que haja o uso de um modelo matemático que leve em consideração a deformação plástica e o comportamento do material; e finalmente, o coeficiente de atrito deve ser obtido em apenas um ensaio.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização do substrato utilizado

O material utilizado para a aplicação dos fluidos lubrificantes foi o alumínio comercialmente puro classificado, segundo a *Aluminum Association* (AA), como AA1100, cuja a composição foi analisada em um espectrômetro de massa da marca Spectro encontrado no LAMEF/UFRGS. As chapas empregadas neste trabalho, como corpo de prova, foram utilizadas como recebidas. Na Figura 3.1, pode-se observar o corpo de prova de alumínio.

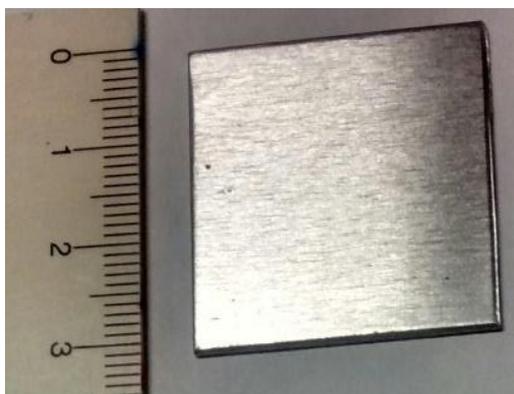


Figura 3.1 Amostra de alumínio (AA1100) utilizada como corpo de prova.

Ao longo dos ensaios de desgaste e de conformação, procurou-se manter um par tribológico formado pelo alumínio AA1100 em contato com aço. A escolha pelo uso do substrato de alumínio visa sua aplicação nos processos de conformação mecânica e a dificuldade do emprego de lubrificantes sobre este metal em processos de estampagem.

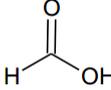
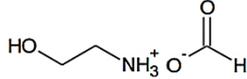
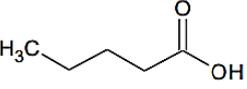
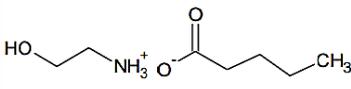
A rugosidade do alumínio foi medida através do uso de um rugosímetro e sua medida foi repetida cinco vezes. Empregou-se uma velocidade de 0,5 mm/s e Cut-Off de 0,8mm. A rugosidade do pino, utilizado no teste de ensaio de dobramento sob tensão, também foi avaliada.

3.1.2 Fluidos Lubrificantes utilizados

Neste trabalho, foram utilizados os líquidos iônicos próticos formiato de 2-hidroxiethylamina (2HEAF) e pentanoato de 2-hidroxiethylamina (2HEAPe) que foram sintetizados no Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC – UFRGS) cuja formulação, foi desenvolvida por um grupo de pesquisadores da UFBA.

Os reagentes precursores do cátion e do ânion assim como, os PILs obtidos pela síntese são apresentados na Tabela 3.1. As respectivas metodologias de síntese e caracterização estrutural podem ser verificadas em (ORTEGA, 2014).

Tabela 3.1 Reagentes precursores do cátion e do ânion utilizados na sintetização dos PILs.

Cátion	Ânion		PIL obtido	
	Nome	Estrutura	Nome	Estrutura
2 - hidroxietilamina (MEA) 	Ácido fórmico		2HEAF	
	Ácido pentanoico		2HEAPe	

Para a comparação do efeito lubrificante dos líquidos iônicos próticos, estudados neste trabalho, foi utilizado um lubrificante de uso comercial e de base mineral o qual, é amplamente empregado nos processos industriais.

3.2 Caracterização dos Fluidos Lubrificantes

3.2.1 Estabilidade Térmica

A fim de avaliar a estabilidade térmica dos fluidos lubrificantes, foi realizada uma análise por TGA. Na análise termogravimétrica (TGA), realiza-se uma quantificação contínua da massa da amostra como função da temperatura ou do tempo em atmosfera controlada. O gráfico de massa ou porcentagem de massa como função do tempo ou da temperatura denomina-se termograma ou curva de decomposição térmica. A informação fornecida pelo termograma é quantitativa e estão limitadas às reações de decomposição e oxidação, processos de vaporização, sublimação e dessorção (ORTEGA, 2014).

Para esta análise, foi utilizado um equipamento Shimadzu TGA-50 na faixa de 23°C até 400 °C, com uma taxa de aquecimento de 10°C. min⁻¹ em atmosfera de N₂, com fluxo de 50 mL. min⁻¹.

3.2.2 Ângulo de Contato

A molhabilidade é medida de forma quantitativa através do ângulo de contato θ , formado por uma gota sésil para caracterizar a molhabilidade da superfície de um sólido por um líquido. É definido como ângulo de contato, o ângulo formado entre a superfície sólida e a tangente à gota de líquido sobre a superfície na linha de contato entre o líquido, o sólido e a vizinhança da fase (geralmente vapor ou ar) medidas através do líquido (PELTZ 2013). A Figura 3.2 mostra a representação esquemática do ângulo de contato de um líquido sobre um sólido.

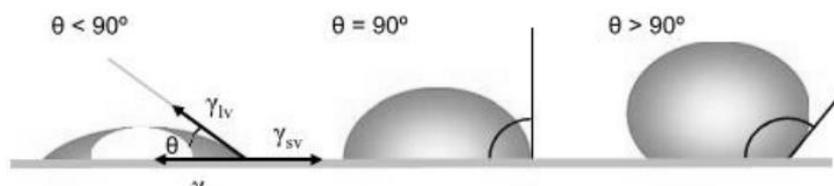


Figura 3.2 Determinação do ângulo de contato através do método de gota sésil. Fonte: Adaptado de (YUAN Y, 2013).

Estabelece-se que há uma alta molhabilidade quando o ângulo de contato entre o sólido e o líquido estiver entre 0° a 90°; o sistema se considera hidrofílico. Para ângulos superiores a 90° a molhabilidade do sólido é baixa e o sólido é considerado hidrofóbico.

O teste de molhabilidade, realizado neste presente estudo, foi feito pelo método de gota sésil utilizando um equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC/UFRGS). Foram avaliados os ângulos de contato pertinentes aos líquidos 2HEAF e 2HEAPe, e o lubrificante comercial. Neste teste, uma gota do fluido é depositada, através do equipamento, sobre a superfície do substrato metálico (AA1100) e o ângulo de contato, formado entre a gota e a superfície sólida do material, é obtido através do auxílio de uma câmera acoplada ao computador sendo, o ângulo, medido através de um software de imagem específico (PELTZ 2013).

3.2.3 Viscosidade

A viscosidade de um fluido está diretamente relacionada à resistência ao cisalhamento sendo esta, uma das principais propriedades de um lubrificante. A análise da viscosidade dos PILs estudados foi realizada no Laboratório de Catálise Molecular (LAMOCA/UFRGS) através do uso de um viscosímetro Anton Paar Stabinger Viscometer™ SVM 3000 em uma temperatura controlada de 25°C.

3.2.4 Densidade

Na prática de engenharia, a densidade também é conhecida como massa específica e como densidade absoluta. Sendo definida como a razão entre a massa (kg) pelo volume ocupado (m³), a determinada temperatura como pode ser verificada pela equação:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Para este caso, realizou-se a medição para cada fluido lubrificante em 25 °C.

3.2.5 Estabilidade química

Com o intuito de verificar a estrutura molecular dos fluidos lubrificantes, antes e após o ensaio de desgaste, os líquidos 2HEAF, 2HEAPE e o lubrificante comercial foram analisados por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR). Esta análise fornece informações importantes sobre funções químicas relacionadas a ligações altamente polares ou o momento de dipolo durante a vibração.

Para a análise, foi utilizado um equipamento Bruker Vertex 70V, do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC-UFRGS), com resolução de 4 cm⁻¹.

3.3 Ensaio Tribológicos

O tribômetro é um equipamento utilizado para realizar a medição do atrito e outras propriedades relacionadas ao desgaste, entre diferentes combinações de materiais e lubrificantes, sob condições específicas de carga, velocidade, temperatura e atmosfera. Existem diferentes configurações de tribômetros, como o *pin-on-disk* e o *ball-on-plate*, que utilizam, respectivamente o movimento rotacional e o movimento recíproco.

Em um tribômetro com configuração *ball-on-plate*, um material com alta dureza, em forma de esfera, é posicionado em uma coluna rígida perpendicular ao corpo de prova, que aplica uma força normal sobre este. O corpo de prova é posicionado em uma célula cuja base se movimenta de forma recíproca. O equipamento conta com sensores biaxiais de força para medir a força normal aplicada e a força tangencial desenvolvida pelas superfícies em contato. O coeficiente de atrito é determinado pela relação entre a força tangencial e a carga aplicada. A figura 3.3 ilustra o ensaio de desgaste com configuração *ball-on-plate* utilizado. (MIELCZARSKI, 2015) (ORTEGA, 2014).

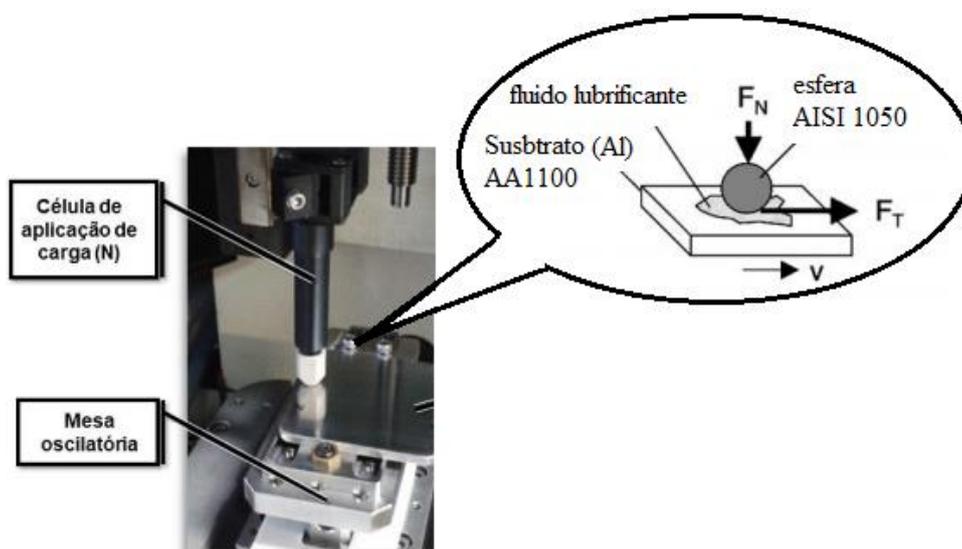


Figura 3.3 Representação esquemática do sistema de ensaios tribológicos utilizando o método *ball-on-plate* do LAPEC-UFRGS.

A avaliação da influência dos PILs na lubrificação do alumínio comercialmente puro foi realizada a partir de ensaios de desgaste, realizados no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da UFRGS (LAPEC – UFRGS). Os substratos metálicos de alumínio comercialmente puro (AA1100) foram cobertos por um filme lubrificante e submetidos a ensaios tribológicos utilizando um tribômetro UMT (*Universal Micro Tribometer*) da marca CETR – *Test Equipment Tribology*, controlado computacionalmente, em configuração *ball-on-plate*.

Para o ensaio, utilizou-se uma esfera de aço, AISI 1050 revenida, de diâmetro de 4,762 mm. Para cada ensaio de desgaste a esfera foi rotacionada garantindo, dessa forma, que o ensaio não acontecesse no mesmo lugar e, afim de evitar qualquer contaminação e sobreposição dos fluidos lubrificantes, foi estabelecido uma esfera para cada sistema estudado. Para efeitos comparativos, além do uso dos líquidos iônicos 2HEAF e 2HEAPE, foram avaliados também o sistema à seco (com ausência de lubrificação) e o sistema

utiizando um lubrificante comercial. Para todos os sistemas foram realizados no mínimo três ensaios tribológicos, com o intuito de verificar a repetitividade.

Tabela 3.2 Parâmetros utilizados nos ensaios de desgaste.

Parâmetros	Dados
Força normal aplicada	0,5 N
Frequência	1 Hz
Tempo de desgaste	30 minutos
Tamanho da trilha	2 mm
Temperatura	$22 \pm 3^{\circ}\text{C}$

Os parâmetros estabelecidos, conforme Tabela 3.2, foram escolhidos seguindo ensaios já realizados no LAPEC os quais, seguem uma linha de pesquisa sobre o assunto de desgaste.

3.3.1 Microscopia Óptica

Após os ensaios de desgaste, as trilhas formadas devido o desgaste e a esfera utilizada foram analisadas e as imagens registradas através do uso do Microscópio Óptico CX31 do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LAPEC-UFRGS). A figura 3.4 ilustra o modo como as medidas foram realizadas.



Figura 3.4 Representação das medidas realizadas na trilha desgastada.

3.3.2 Perfilometria

A topografia superficial, da trilha formada pelo ensaio de desgaste, foi obtida por perfilometria óptica a qual, leva em consideração a rugosidade da superfície desgastada

através do plano de referência da superfície que intercepta a altura de máxima da superfície. Para esta análise foi utilizado o perfilômetro óptico Bruker ContourGT-K.

3.4 Ensaio de Dobramento Sob Tensão

A análise pertinente ao uso dos PILs como fluidos lubrificantes em processos de conformação mecânica foi dada através do ensaio de dobramento sob tensão o qual, simula a estampagem de materiais metálicos. A escolha pelo processo de estampagem, entre os processos mecânicos de conformação, leva em consideração o substrato empregado neste trabalho (AA1100) bem como, a faixa de temperatura que os PILs podem ser empregados sem que ocorra a degradação dos mesmos.

O ensaio de dobramento sob tensão (DST – do inglês BUT – *Bending Under Tension Test*) é usado para simular a deformação do material no raio da matriz, onde as tensões são maiores. Segundo Ter Haar(1996), as tensões na região do raio de concordância da matriz atingem valores próximos da ordem de 100 MPa e, nestas regiões, o atrito tem maior efeito. Para a medição do coeficiente de atrito, foi utilizado uma máquina projetada pelo Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM – UFRGS) conforme pode ser vista na Figura 3.5.



Figura 3.5 Máquina de avaliação de atrito através de ensaio DST. Fonte: Adaptado de Folle, 2012.

Para o teste, uma tira de chapa de alumínio (AA1100) de dimensões 300x700x15mm, previamente recoberta com o fluido lubrificante, foi presa no equipamento através do uso de garras. Por meio do uso de cilindros hidráulicos, a tira foi deslizada sobre um pino de raio

de 0,0065m com ângulo de dobra de 90°. Em ambos os cilindros, uma célula de carga acoplada, mede a força de atuação na chapa (lado esquerdo da máquina) e a força de contra-tensão atuante na chapa (lado direito da máquina). O pino por onde passa a chapa, ver Figura 3.6, possui um sensor de torque cujo objetivo é medir o torque ao qual é submetido, quando a chapa passa por ele.

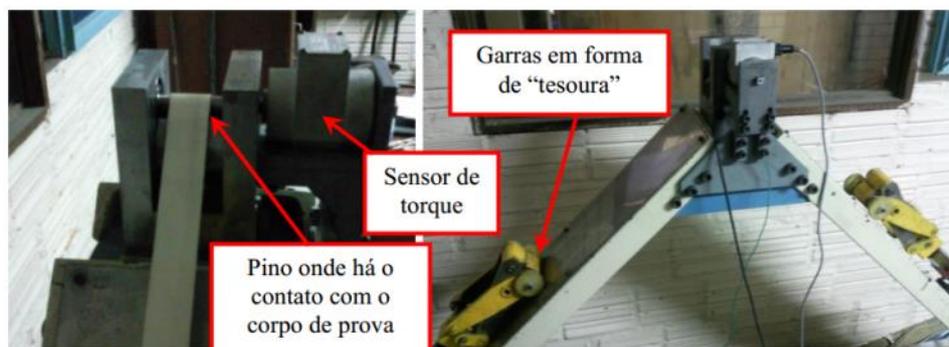


Figura 3.6 Máquina utilizada para a medida do coeficiente de atrito. Fonte: Adaptado de Folle, 2015.

O teste comparativo entre os fluidos lubrificantes foi repetido 5 vezes para cada sistema, utilizando um novo substrato metálico, para garantir a repetitividade. O fluido lubrificante foi aplicado sobre a tira de alumínio através do uso de um pincel. E a força aplicada para o ensaio foi de 1kN.

Através desta técnica, são obtidos dados relacionados ao deslocamento, forças atuantes em cada lado da chapa e o torque no pino, para cada lubrificante avaliado. A máquina pode executar o ensaio de dois modos. No primeiro, o pino por onde passa a chapa é deixado livre e, no segundo, o pino é preso. Todavia, para o presente trabalho apenas o segundo modo de atuação foi utilizado.

Diferentes representações matemáticas são apontadas pela literatura para determinar o coeficiente de atrito no ensaio de dobramento sob tensão. As equações, utilizadas neste trabalho, foram escolhidas segundo a configuração do ensaio DST e por serem estas reportadas pela literatura, para a análise da eficiência dos fluidos quanto à lubrificação envolvendo o par tribológico alumínio e aço em ensaios do tipo DST (FOLLE, 2012).

A primeira aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito é baseada nas equações para o cálculo de polias. Nesse caso, o coeficiente de atrito entre chapa-pino é dado por um logaritmo natural da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão, conforme visto na equação (2).

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (2)$$

Sendo,

F_1 = Força de atuação

F_2 = Força de contra-tensão

$\frac{2}{\pi}$ = Ângulo de 90 graus entre as forças F_1 e F_2

A segunda equação é reportada por Sniekers (1997) que, em seu trabalho, propôs como forma de eliminar fontes de erro no cálculo do coeficiente de atrito, o uso de um sensor de torque no pino preso. A aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito, pode ser evidenciado na equação (3).

$$\mu = \frac{\frac{F_0 L}{R}}{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 - \left(\frac{F_0 L}{R}\right)^2}} \quad (3)$$

Onde,

F_1 = força de atuação

F_2 = força de contra-tensão

$\frac{F_0 L}{R}$ = torque no pino preso

A terceira equação, da mesma forma que a segunda, propõe para o cálculo do coeficiente de atrito, o uso de sensor de torque no pino preso. A equação proposta por Andreasen (2006), pode ser verificada na equação (4).

$$\mu = \frac{4T}{\pi R(F_1 + F_2)} \quad (4)$$

Considerando,

T = torque no pino

R = raio do pino

F_1 = força de atuação

F_2 = força de contra-tensão

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do substrato utilizado

O substrato metálico, utilizado para a aplicação dos fluidos lubrificantes, foi analisado em um espectrômetro de massa da marca Spectro, realizado no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF – UFRGS). Obteve-se a composição química, conforme observada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Composição química determinada por espectroscopia (% em massa).

Si (%)	Fe (%)	Cu(%)	Mn(%)	Mg(%)	Zn(%)	Al(%)
0,132	0,320	0,085	0,027	0,013	0,0078	99,45

A composição química obtida encontra-se de acordo com a *Aluminum Association* que visa um teor em massa de alumínio inferior a 99,5% e uma soma relacionada a outros elementos inferior a 1%. Desta forma, o substrato metálico AA1100 está de acordo com a classificação da liga em questão.

A rugosidade da chapa de alumínio, bem como do pino referente ao ensaio de dobramento sob tensão, foi avaliada através do uso de um rugosímetro. A rugosidade obtida pode ser verificada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Rugosidade média referente ao alumínio e ao pino utilizado no ensaio DST.

Sistema	R _a (µm)
Al	0,56 ± 0,021
Pino inicial	0,08 ± 0,003

4.2 Caracterização dos Fluidos Lubrificantes

4.2.1 Estabilidade Térmica

Através da análise termogravimétrica, pode-se fazer o monitoramento da variação de massa de fluido em função da temperatura, a qual é evidenciada pelo termograma (Figura 4.1).

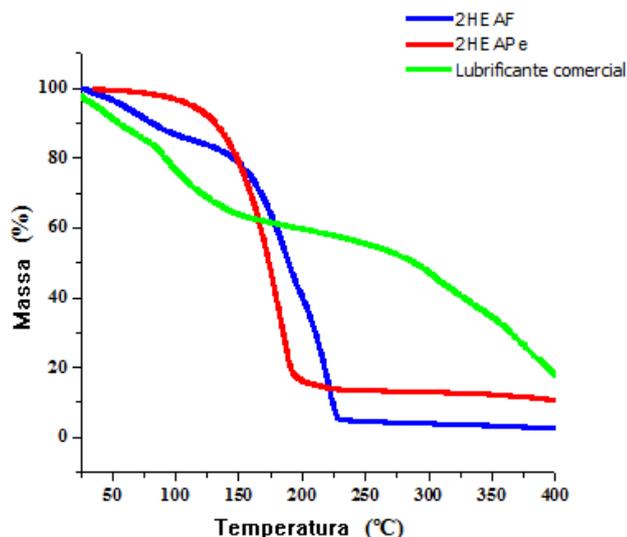


Figura 4.1 Termograma dos fluidos utilizados como lubrificantes.

Pelo termograma, verificou-se que, para temperaturas até 100°C, há perda de massa para todos os fluidos estudados. De acordo com Ortega (2014), esta perda é associada à evaporação de água. Em relação aos PILs, o teor de água encontrado foi de 13% para o 2HEAF e sua perda de massa acelerada começa em aproximadamente 110°C. Enquanto que, o teor de água encontrado no 2HEAPe foi de 3,12%, mas sua perda de massa acentuada inicia em cerca de 125°C. O fim da degradação térmica é dada próxima aos 225°C para o 2HEAF e aproximadamente 180°C para o 2HEAPe. Desta forma, o uso dos líquidos iônicos próticos, como fluidos lubrificantes, deve ocorrer em temperaturas inferiores aos 110°C para o PIL 2HEAF e 125°C para o PIL 2HEAPe. Estas temperaturas devem ser respeitadas tendo em vista que, as mesmas indicam o início da degradação dos PILs, o que pode comprometer suas propriedades quanto à lubrificação. Estudos relacionados ao uso de líquidos iônicos à base de imidazólio e hidroxilamonio também reportam este comportamento quanto à estabilidade térmica, que varia com a combinação formada pelo cátion e ânion. O início da degradação no 2HEAPe em temperaturas mais elevadas é decorrente do tamanho da cadeia do ânion ser mais extensa (BERMÚDEZ, 2013)(GARDAS, 2014).

O lubrificante comercial apresenta a maior evaporação de água e, esta perda, influi de forma significativa para a sua acentuada degradação estrutural. O teor de água encontrado

foi de 23,5%. A curva termogravimétrica referente ao fluido evidencia que, para temperaturas aproximadamente entre 100 e 295°C, há uma perda de massa, a qual pode estar relacionada à degradação dos grupos oxigenados. Para temperaturas superiores a 295°C essa perda de massa é ainda mais acentuada. A faixa de temperatura encontrada está de acordo com Cetlin (2005), que cita estas temperaturas como recorrentes da decomposição dos lubrificantes formados por óleos.

4.2.2 Ângulo de Contato

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ângulos de contato medidos no ensaio de molhabilidade dos três sistemas.

Tabela 4.3 Ângulos de contato obtidos pelo ensaio de molhabilidade.

Fluidos Lubrificantes	Ângulo de contato
2HEAF	$56^\circ \pm 0,9$
2HEAPe	$51^\circ \pm 0,5$
Lubrificante comercial	$27^\circ \pm 2,5$

Para todos os sistemas, observa-se um caráter hidrofílico devido os mesmos possuírem ângulo de contato inferior ao valor de 90°, indicando que há interação dos líquidos com a superfície do substrato. O lubrificante comercial apresenta o menor valor de ângulo de contato, mostrando-se duas vezes menor em relação aos PILs, o que denota que, para este fluido, há maior molhabilidade sobre a superfície de alumínio. Quando trata-se de lubrificação, quanto maior a molhabilidade do lubrificante sobre a superfície, melhor é o desempenho do mesmo (ESPINOSA, 2013). Os PILs tiveram maior ângulo de contato, em comparação ao lubrificante comercial, havendo menor interação com o substrato de alumínio. Este comportamento é explicado pelos diferentes comprimentos de cadeia sendo reportado pela literatura que cadeias mais compridas influem na redução do ângulo de contato e, conseqüentemente, na redução da tensão superficial do líquido. De acordo com Ortega (2014), as cadeias constituintes do lubrificante comercial correspondem a cadeias carbonadas muito compridas ou planas, que são volumosas logo, ocupam maior área havendo maior interação sobre a superfície. Enquanto que, as dos PILs, são compostas por

moléculas pequenas caracterizando o comportamento físico-químico obtido pelo ângulo de contato dos líquidos.

4.2.3 Viscosidade

A viscosidade dos lubrificantes é uma das principais propriedades que intervém diretamente na performance de lubrificação atingida no par tribológico. Os valores obtidos para a viscosidade dos fluidos são descritos na Tabela 4.4. A viscosidade dos PILs foi dada sob análise de um viscosímetro enquanto que, o lubrificante comercial, teve sua viscosidade informada pelo fornecedor.

Tabela 4.4 Viscosidade referente aos fluidos estudados neste trabalho.

Fluidos Lubrificantes	Viscosidade (mPa.s)
2HEAF	16,13 (25°C)
2HEAPe	1333,2 (25°C)
Lubrificante comercial	239,76 (40°C)

As maiores viscosidades encontradas, quando comparados os fluidos estudados, são dadas pelo PIL 2HEAPe e o lubrificante comercial. O PIL 2HEAPe apresenta a maior viscosidade e, portanto, maior capacidade de suporte de carga. A menor resistência ao cisalhamento é observada pelo PIL 2HEAF o qual, apresenta o menor valor referente à viscosidade. De acordo com Espinosa (2013), o aumento da viscosidade é atribuído ao aumento das ligações de Van der Waals entre as cadeias de hidrocarbonetos assim como, seus tamanhos e volumes. Resultados semelhantes, aos encontrados no presente estudo, são observados na literatura para estudos relacionados ao uso de ILs a base de fosfônio e imidazólio (QU, 2012) (LIU, 2005) (SHIMID, 2013).

A viscosidade, da maioria dos líquidos, diminui com o aumento da temperatura. Logo, para uma temperatura semelhante a que foi conduzida a medida da viscosidade dos PILs, o lubrificante comercial pode apresentar um pequeno aumento de sua viscosidade.

4.2.4 Densidade

A relação entre a massa e o volume dos fluidos empregados neste estudo pode ser verificada na Tabela 4.5, a qual apresenta a densidade dos mesmos.

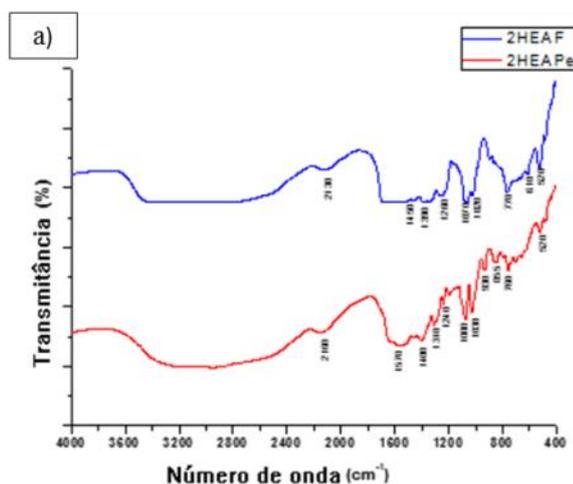
Tabela 4.5 Densidade dos fluidos estudados no presente trabalho.

Fluidos Lubrificantes	Densidade (g.cm ³)
2HEAF	1,2
2HEAPe	1,0
Lubrificante comercial	0,9

Os valores de densidade encontrados são semelhantes para ambos os fluidos. O maior valor de densidade é oriundo do PIL 2HEAF sendo que, a menor densidade é evidenciada pelo lubrificante comercial. O PIL 2HEAPe apresenta o valor de densidade intermediária aos demais. Estudos reportados pela literatura demonstram que a densidade pode estar relacionada de forma direta ao tamanho de cadeias moleculares onde, a presença de cadeias maiores de moléculas conduzem a densidades menores (GARDAS, 2014). Densidades similares são evidenciados e reportados por Schimid (2013) para diferentes líquidos iônicos.

4.2.5 Estabilidade química

Afim de evidenciar possíveis mudanças relacionadas a degradação, oriunda do carregamento mecânico, a estrutura molecular dos PILs foi avaliada segundo espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR). A Figura 4.2 (a) e (b) apresenta, o espectro obtido para os PILs antes e após o ensaio de desgaste, respectivamente. Enquanto que, na Figura 4.3 (a) e (b), observam-se respectivamente, o espectro FTIR obtido para o lubrificante comercial antes e após o ensaio de desgaste.



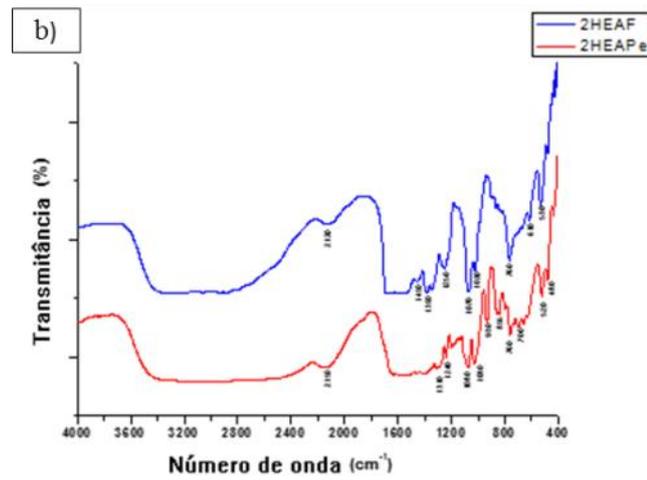


Figura 4.2 Espectro FTIR dos PILs 2HEAF e 2HEAPe estudados (a) antes do ensaio de desgaste e (b) após o ensaio de desgaste.

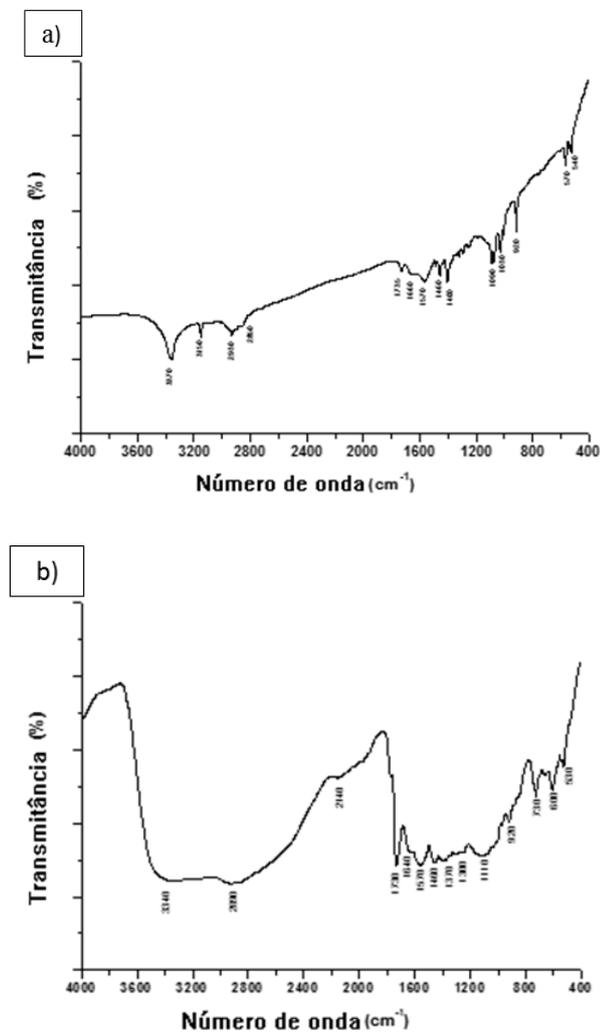


Figura 4.3 Espectro FTIR do lubrificante comercial (a) antes do ensaio de desgaste (b) após o ensaio de desgaste

De acordo com os espectros de FTIR antes e após o ensaio de desgaste, os PILs estudados não apresentaram mudanças estruturais, apresentando no espectro após o ensaio

de desgaste (Figura 4.3(b)) os mesmos picos observados antes de tal ensaio (Figura 4.3(a)) o que caracteriza, desta forma, que não houve degradação dos mesmos. Verificou-se para este espectro a presença de bandas entre 3600cm^{-1} a 2330cm^{-1} , relacionadas ao estiramento do O-H, funções carboxílicas bem como, água contida nos PILs e a bandas de estiramento N-H. A presença de um platô entre 1700cm^{-1} e 1550cm^{-1} é verificado para o PIL 2HEAF enquanto que, para o PIL 2HEAPe, este é observado entre 1650cm^{-1} e 1240cm^{-1} , correspondente às bandas de estiramento C=O, próximo a 170cm^{-1} e bandas de deformação simétrica do plano NH_2 em 1615cm^{-1} . A banda decorrente do C-O é localizada em 1250cm^{-1} e 1240cm^{-1} para o 2HEAF e 2HEAPe, respectivamente. Bandas de deformação assimétrica e simétrica fora do plano do NH_2 surgem entre 850cm^{-1} e 750cm^{-1} . Bandas de estiramento C-N encontram-se entre 1220cm^{-1} e 1020cm^{-1} (IGLESIAS, 2013).

Contudo, foram observadas importantes mudanças estruturais para o lubrificante comercial, caracterizando a degradação do mesmo após ser submetido ao ensaio de desgaste. Estas mudanças são, possivelmente, induzidas pela oxidação, representada pelo crescimento das bandas recorrentes aos grupos oxigenados, tais como OH^- (3600cm^{-1} - 2200cm^{-1}). A oxidação está associada à alta reatividade dos grupos insaturados C=C e C≡C. Em relação ao desgaste, a oxidação do fluido é decorrente, possivelmente, das condições experimentais, como a exposição ao ar atmosférico, a quantidade de água contida no lubrificante e ao aumento da temperatura localizada.

4.3 Ensaio Tribológicos

O desempenho dos fluidos, utilizados como lubrificantes, foi analisado através do ensaio de desgaste no qual, foram obtidos os coeficientes de atrito relacionados aos sistemas estudados. O sistema a seco configura o modo mais severo de fricção. A Figura 4.4 apresenta os resultados dos ensaios de desgaste, apresentados pelos gráficos do COF (coeficiente de atrito), em função da distância desgastada, comparando os diferentes sistemas. Os valores médios dos coeficientes de atrito médio obtidos também podem ser observados na Tabela 4.6.

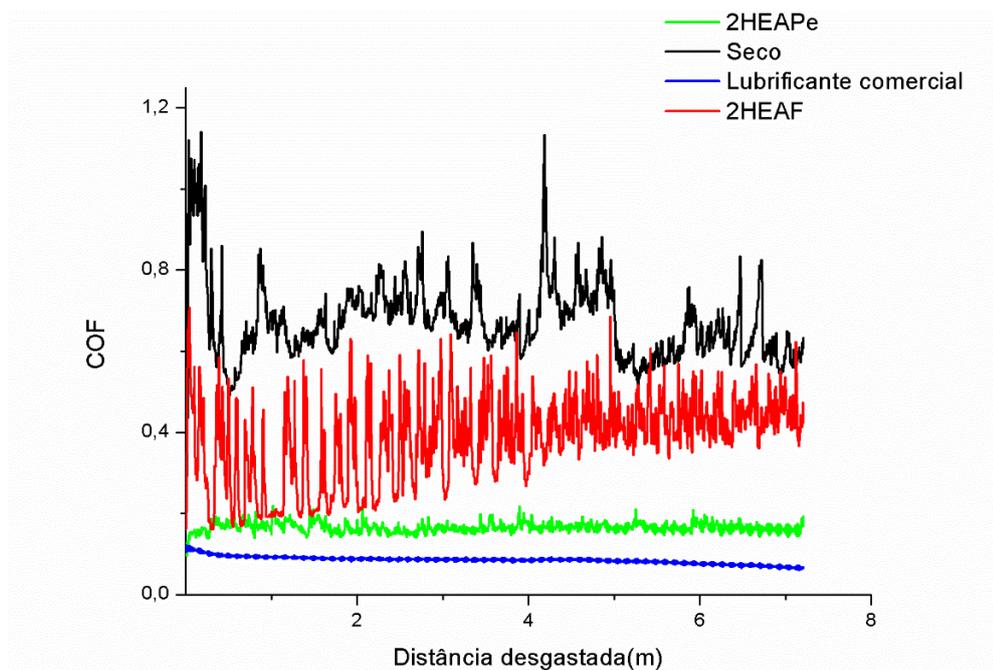


Figura 4.4 Gráfico do coeficiente de atrito (COF) pela distância desgastada (m) para as amostras dos sistemas: 2HEAPe, seco, Lubrificante comercial e 2HEAF.

Tabela 4.6 Resultados dos coeficientes de atrito obtidos através do ensaio de desgaste para os sistemas estudados.

Sistema	COF
Seco	$0,66 \pm 0,1$
2HEAF	$0,31 \pm 0,1$
2HEAPe	$0,16 \pm 0,02$
Lubrificante comercial	$0,08 \pm 0,02$

Os testes de coeficiente de atrito (COF) mostram que, para o sistema em que há a ausência de lubrificação, o coeficiente de atrito encontrado é o mais elevado, entre os sistemas estudados. Este comportamento está de acordo com a literatura, que sugere COF superior a 0,5 (PROFITO, 2010). No início, constata-se que o valor do coeficiente de atrito é mais alto estando próximo a 1,15 e, ao longo do ensaio, seu valor prevalece próximo a 0,6. De fato, esse valor mais elevado de fricção é compreendido pela maior interação entre as asperezas das superfícies, pois a remoção de partículas durante o teste promove uma redução do coeficiente de atrito, que aumenta novamente quando novas partículas são formadas e injetadas na interface de contato (FALCADE, 2014).

Para os sistemas onde há um filme lubrificante entre as superfícies em movimento relativo, observa-se que houve uma efetiva redução do atrito. A redução do atrito pelos PILs, possivelmente, é dada pela sua natureza polar a qual, favorece a adsorção de um filme nas superfícies em atrito estando, este comportamento, de acordo com a literatura (LIU, 2009). Em comparação, a estes dois sistemas, o líquido 2HEAF apresenta o pior desempenho, havendo grandes oscilações ao longo do tempo e distância percorrida, chegando a valores próximos a do sistema a seco. O COF alto e instável pode estar relacionado ao mecanismo de desgaste adesivo, conforme é reportado por (GWIDON, 2005). Alguns autores, tal como, (MENEZES, 2013), também reportam a oscilação como função da presença de um grande número de partículas abrasivas de terceiro corpo originadas do desgaste do substrato, na região de contato entre as superfícies.

As melhores performances de lubrificação do par tribológico Al-aço são dadas ao líquido 2HEAPe e ao lubrificante comercial. O PIL 2HEAPe apresenta uma redução em torno de 4 vezes do coeficiente de atrito, em relação ao sistema a seco. Enquanto que, o lubrificante comercial apresenta o melhor desempenho sendo, o coeficiente de atrito, reduzido em 8 vezes quando comparado ao desgaste a seco e, quando comparado ao PIL 2HEAPe, seu COF é aproximadamente 2 vezes menor. Pela literatura, os valores dos COF reportados para estes fluidos caracterizam um regime de lubrificação de contorno no qual, há um contato significativo entre as superfícies e a redução do desgaste e o atrito é dada pela formação de uma camada molecular adsorvida na superfície (BHUSHAN, 2002).

Após os ensaios de desgaste, as trilhas obtidas foram analisadas através de microscopia óptica. Na figura 4.5, são apresentadas as imagens obtidas das trilhas assim como, das esferas (AISI1050) utilizadas como par tribológico no teste de desgaste, comumente chamado de *ball-on-plate*. A alteração da superfície é um aspecto importante nos ensaios relacionados a desgaste e atrito.

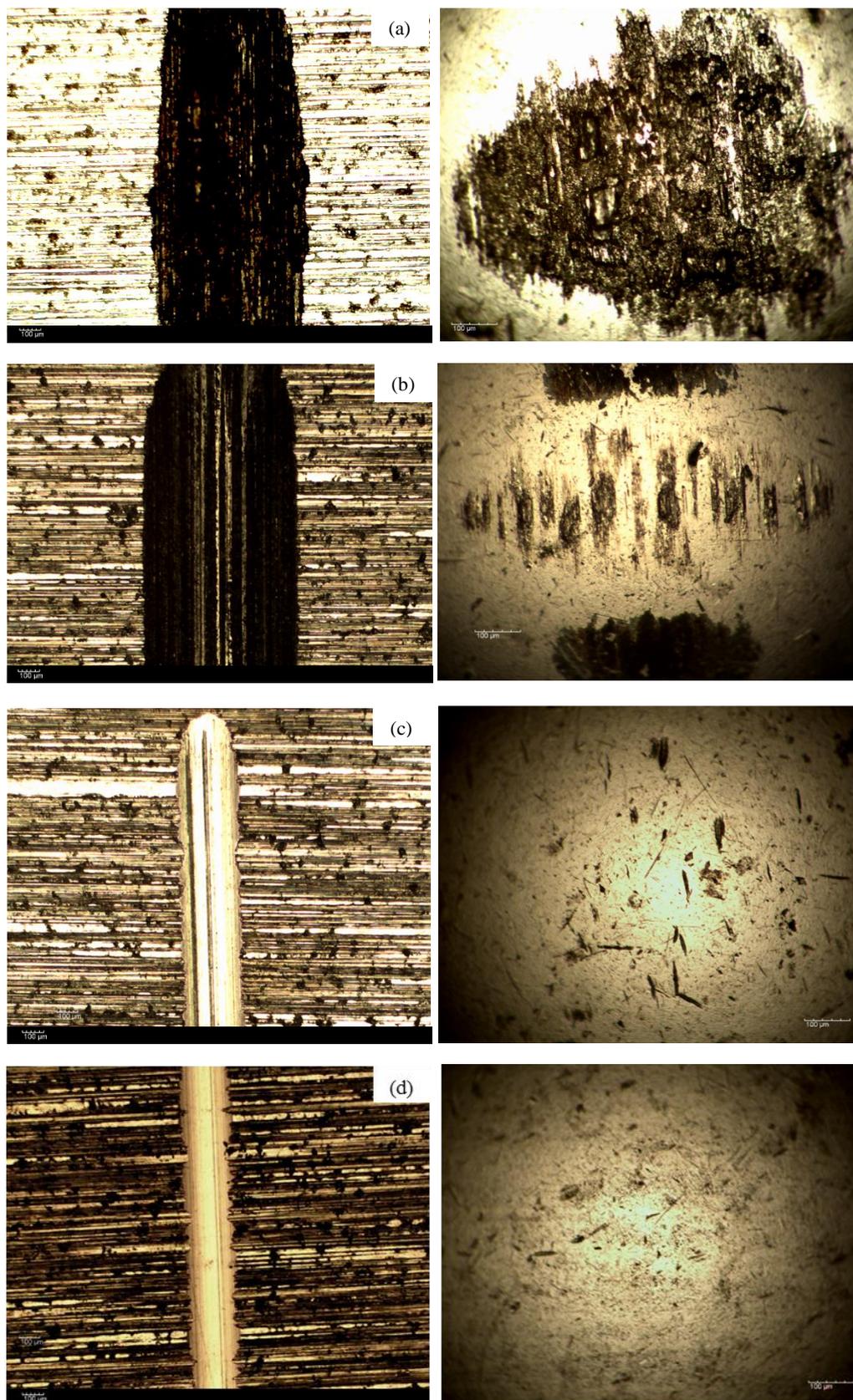


Figura 4.5 Imagem do desgaste recorrentes às trilhas e respectivas esferas dos sistemas: (a) Seco, (b) 2HEAF, (c) 2HEAPe e (d) Lubrificante comercial.

A análise das trilhas de desgaste mostra que para os sistemas Seco (Figura 4.5(a)) e 2HEAF (Figura 4.5(b)) há a presença de ranhuras tanto no interior da trilha quanto no contra

corpo, mecanismo este típico do desgaste abrasivo. É possível observar também a adesão de material no contra corpo sendo, a transferência de material, típico do mecanismo de desgaste adesivo. Consta-se ainda, nos contra corpos, a presença de grandes marcas de desgaste o que pode ter ocasionado a injeção de particulado de alta dureza na interface e contribuído para o aumento do desgaste. O mecanismo de desgaste, governado para estes sistemas, mostra-se como sendo misto. Alguns autores, tal como Bhushan (2002), atentam ao fato que, em muitos casos, o mecanismo inicial de desgaste pode ser dado de modo adesivo gerando, dessa forma, partículas de desgaste (*debris*) que ficam presas na interface o que resulta em um desgaste abrasivo de terceiro corpo. De fato, a configuração do ensaio, por ser de movimento retilíneo recíproco, favorece que os *debris* formados sejam empurrados de volta para a zona de contato, o que aumenta o número de partículas abrasivas.

Estes resultados obtidos encontram-se de acordo com a literatura, que indica que, para materiais com diferentes durezas, a superfície com maior dureza produzirá ranhuras na de menor dureza oriunda da deformação plástica (KWIETNIEWSKI, 2011) (BHUSHAN, 2002). Ainda de acordo com a literatura, a transferência de material é dada a partir do material de menor resistência para o de maior resistência, ficando aderida na superfície deste último (BHUSHAN, 2002). Desta forma, as ranhuras podem ser provenientes da superfície do aço, que possui maior dureza, sendo a transferência de material para os sistemas estudados dada pela remoção de material proveniente do substrato de alumínio ficando o mesmo aderido no contra corpo de aço.

Na Figura 4.5(c) e 4.5(d), observam-se as imagens das trilhas referentes aos sistemas 2HEAPE e ao do lubrificante comercial, respectivamente. Para ambas, verifica-se na trilha uma série de ranhuras paralelas à direção do deslizamento, indicando a presença de um mecanismo de desgaste abrasivo. A diferença de dureza ou rugosidade entre as duas superfícies que se encontram em fricção pode ter motivado o desgaste caracterizando, desta maneira, um desgaste abrasivo de segundo corpo. Este mecanismo, encontra-se de acordo com o citado por Bhushan (2002). Em relação ao contra corpo, não é possível observar partículas aderidas, provavelmente, por não haver significativa transferência de material e desgaste adesivo.

As trilhas decorrentes do ensaio de desgaste foram ainda mensuradas através do uso de um software acoplado ao microscópio óptico. As larguras são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Largura das trilhas oriundas do ensaio de desgaste.

Sistema	Largura da trilha (μm)
Seco	268,44 \pm 10,24
2HEAF	228,53 \pm 3,83
2HEAPe	104,68 \pm 5,78
Lubrificante comercial	87,41 \pm 4,22

Em comparação aos PILs, o melhor desempenho é verificado para o PIL 2HEAPe, o qual, quando inserido ao par tribológico estudado, apresenta uma redução do desgaste em torno de 50% quando comparado a largura de trilha do sistema sem lubrificante. Seu comportamento se assemelha ao obtido pelo sistema composto pelo lubrificante comercial. Segundo Liu (2009), geralmente, os lubrificantes que apresentam cadeias moleculares com maior comprimento podem reduzir o atrito e o desgaste como consequência da maior viscosidade. A formação de um filme lubrificante mais homogêneo e com maior viscosidade possibilita a menor interação entre as asperezas e o maior carregamento de carga no lubrificante. Este comportamento, também é relatado por (BERMÚDEZ, 2013).

Através da perfilometria transversal, obteve-se o perfil das trilhas, para ambos os sistemas estudados, os quais, podem ser evidenciados na Figura 4.6.

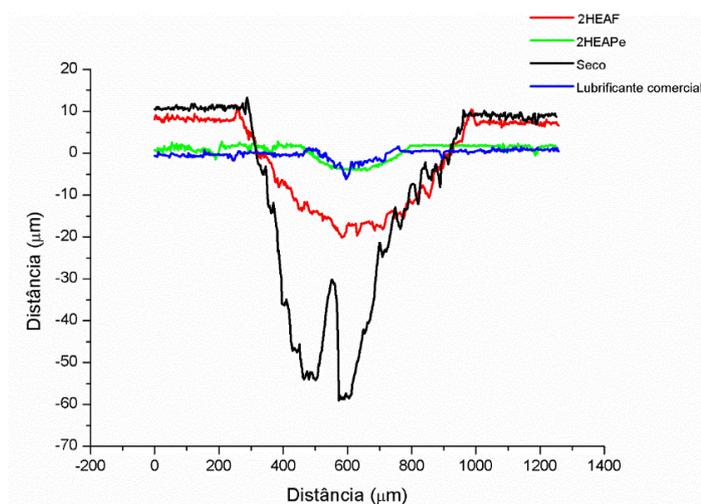


Figura 4.6 Perfil das trilhas obtidas pelo ensaio de desgaste para ambos os sistemas estudados.

Observa-se pela perfilometria transversal das trilhas que, em comparação aos sistemas em que há adição de um lubrificante, houve maior desgaste para o PIL 2HEAF. Estes resultados estão de acordo com os resultados provenientes da análise de microscopia

ótica, onde observou-se uma maior largura de trilha referente a um desgaste mais pronunciado. Evidencia-se para este sistema uma profundidade da trilha de aproximadamente $26,5\mu\text{m}$, profundidade esta, aproximadamente, 60% menor que a obtida para o sistema a seco, o qual obteve uma profundidade na ordem de $66\mu\text{m}$.

Para os sistemas 2HEAPe a profundidade de trilha é aproximadamente 92% inferior a obtida para o sistema a seco, sendo encontrado um valor de $5,3\mu\text{m}$. Profundidade semelhante ao encontrado para o sistema composto pelo lubrificante comercial, que é de aproximadamente $5,0\mu\text{m}$. O melhor desempenho, frente a lubrificação destes fluidos, favorece que haja o enfraquecimento das junções das asperezas e, conseqüentemente, haja um menor desgaste da superfície do alumínio atenuando a perda de material. Comportamento este, de acordo com o sugerido por Gwidon (2005) e (Bermúdez, 2004).

4.4 Ensaio de Dobramento Sob Tensão

Neste ensaio foram avaliados os PILs 2HEAF e 2HEAPe e o lubrificante comercial. Todavia, para o sistema composto pelo uso do líquido 2HEAF houve a ruptura da chapa não sendo possível efetuar o ensaio. A ruptura para este sistema pode ser observada na Figura 4.7 assim como, também pode ser evidenciado o pino utilizado durante o ensaio.

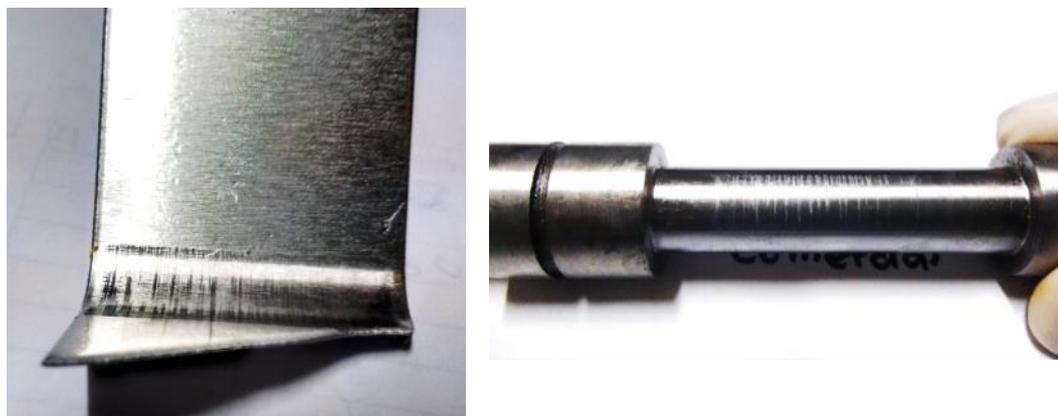


Figura 4.7 Chapa e pino utilizados no ensaio para o sistema composto pelo líquido 2HEAF.

A ruptura para este sistema foi observada para todos os ensaios efetuados com o PIL 2HEAF, constatando-se o desempenho não satisfatório deste líquido quanto a lubrificação. Entre as características citadas por (Cetlin, 2005), um lubrificante ideal deve impedir a adesão metálica, eliminar partículas abrasivas e deve manter aceitáveis as condições de acabamento superficial, características estas que, não são evidenciadas para o PIL 2HEAF.

Tanto na chapa como no pino, onde manteve-se o movimento relativo entre as superfícies opostas, verifica-se a presença de ranhuras típicas do mecanismo de desgaste abrasivo. A literatura reporta que, além de minimizar o desgaste, o lubrificante quando aplicado sobre superfícies de alumínio, deve atenuar as forças de atrito adesivo (LIU, 2005). Desta forma, as rupturas das chapas de alumínio podem estar associadas, possivelmente, com a forte adesão química, oriunda do contato das asperezas, devido às forças interatômicas de atração gerados pelos átomos presentes nesta região gerando, desta forma, o emperramento (do inglês *seizure*) devido a soldagem local na superfície. Comportamento este, reportado por (BOTH, 2011).

Pelo ensaio de dobramento sob tensão, obteve-se dados relacionados as forças atuantes (atuação e contra-tensão) e o torque no pino ao longo do tempo de ensaio para os sistemas 2HEAPe e o lubrificante comercial. O resultado das forças na interface chapa/pino, que configuram o processo industrial de estampagem no raio da matriz para o par peça/ferramenta, podem ser observadas na Figura 4.8.

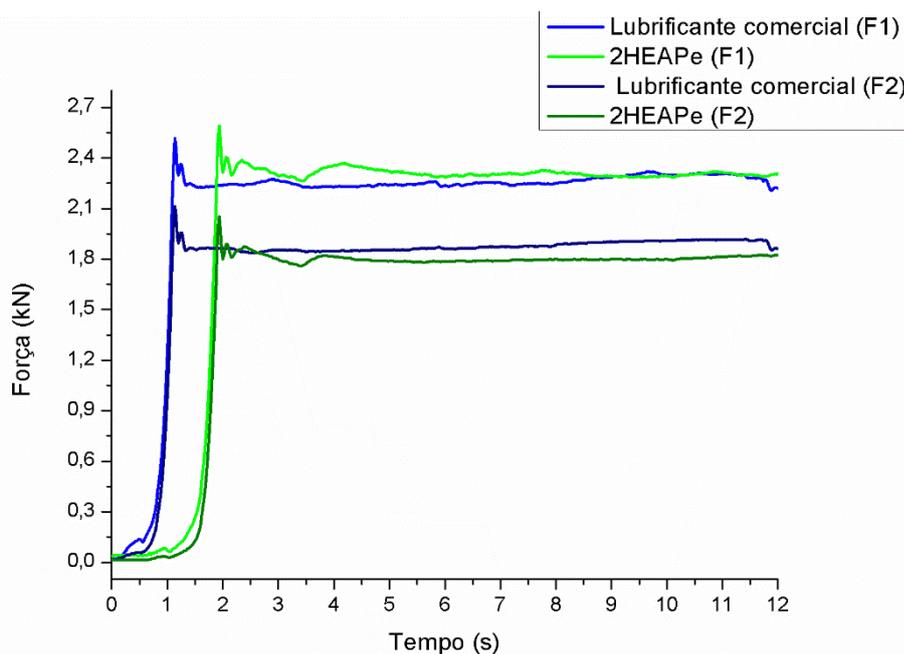


Figura 4.8 Gráfico das forças de atuação(F1) e de contra-tensão (F2) ao longo do tempo de ensaio para o sistema compostos pelo lubrificante comercial e para o sistema composto pelo PIL 2HEAPe.

O intervalo de tempo de 0 a 1s para o lubrificante comercial bem como, 0 a 1,5s para o PIL 2HEAF estão relacionados ao tempo em que o computador é acionado para a aquisição de dados e o início de tração da máquina. A partir deste intervalo a força de tração se mantêm constante durante todo o ensaio.

A força de atuação mostra-se relativamente constante ao longo do tempo de ensaio não apresentando oscilações características de microssoldagens e emperramento do material, situações estas que promovem o desprendimento de material da superfície mais dúctil e a adesão de material, conforme é reportado por Folle (2012). Este resultado sugere que há uma condição de lubrificação estável neste período. Todavia, os gráficos relacionados ao torque (Figura 4.9) demonstram uma maior variação tendo em vista que, o torque mensurado no pino é mais sensível às mudanças de atrito.

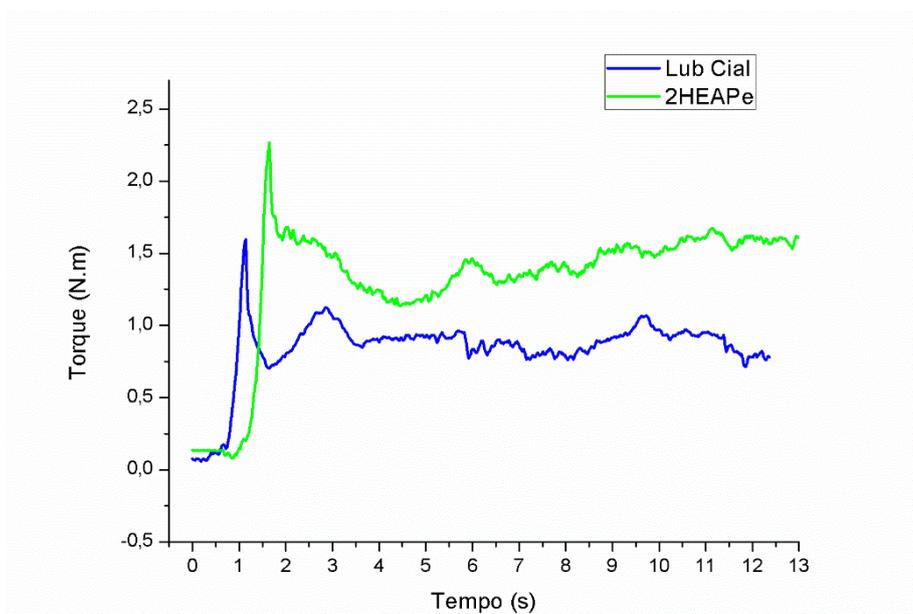


Figura 4.9 Gráfico referente ao torque no para os sistema compostos pelo lubrificante comercial e para o sistema composto pelo PIL 2HEAPe.

O torque gerado para o ensaio do alumínio comercialmente puro (AA1100) apresenta oscilações de acordo com o lubrificante utilizado, podendo-se verificar a eficiência de cada fluido usado como lubrificante. Pequenas oscilações são observadas para ambos os sistemas entretanto, o sistema composto pelo lubrificante comercial apresenta um menor valor de torque decorrente do menor atrito experimentado para este sistema. A Tabela 4.8 apresenta os valores médios encontrados para o torque e as forças atuantes relacionados aos sistemas avaliados.

Tabela 4.8 Valores médios para o torque e as forças atuantes para os sistemas constituídos dos fluidos 2HEAPe e lubrificante comercial.

Sistema	Torque (N.m)	Força atuação (kN)	Força contra-tensão (kN)
Lubrificante comercial	$1,06 \pm 0,02$	$2,23 \pm 0,15$	$1,89 \pm 0,15$
2HEAPe	$1,78 \pm 0,004$	$2,30 \pm 0,02$	$1,44 \pm 0,10$

A partir dos dados obtidos, pode-se calcular os coeficientes de atrito para os fluidos lubrificantes utilizando, para isto, as equações descritas no item 2.3.1. A Figura 4.10 reporta o gráfico dos coeficientes de atrito para o sistema em que há a adição do lubrificante comercial enquanto que, a Figura 4.11 apresenta o gráfico dos coeficientes de atrito para o sistema em que há a adição do PIL 2HEAPe como fluido lubrificante.

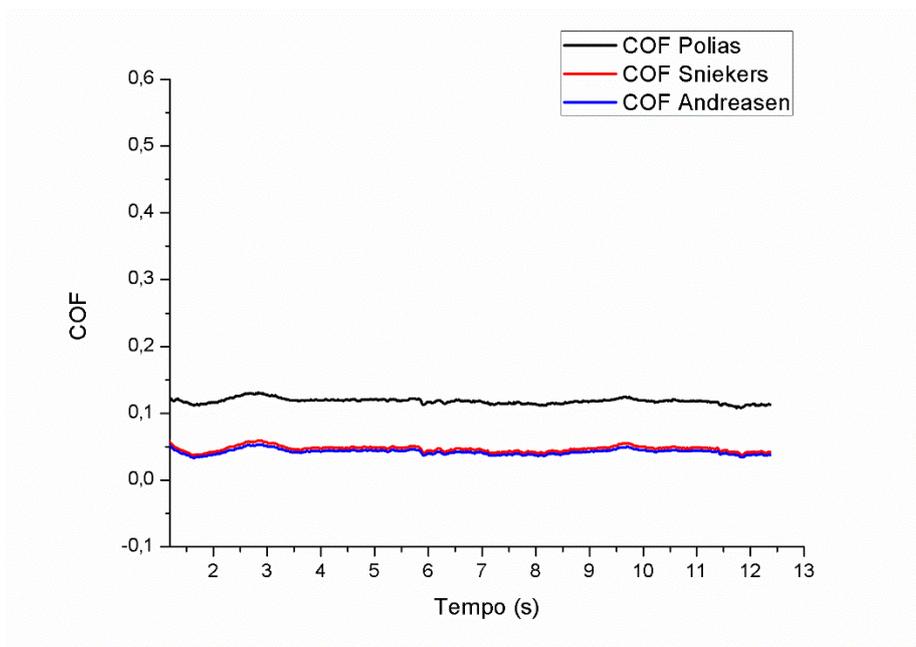


Figura 4.10 Gráfico referente ao coeficiente de atrito para o lubrificante comercial sendo, os coeficientes de atrito, calculados a partir das equações reportadas pela literatura para o ensaio de DST.

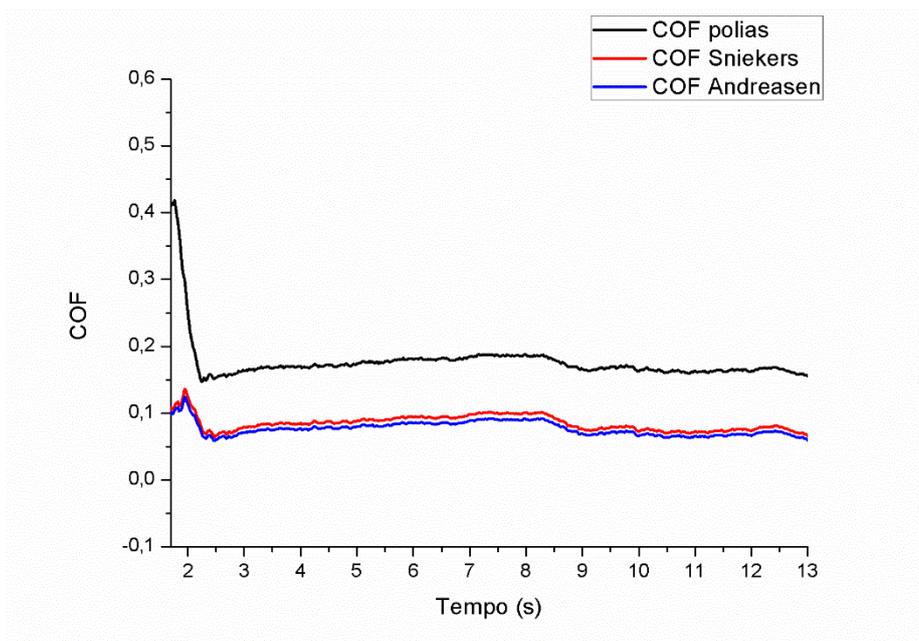


Figura 4.11 Gráfico referente ao coeficiente de atrito para o PIL 2HEAPE sendo, os coeficientes de atrito, calculados a partir das equações reportadas pela literatura para o ensaio de DST.

Os valores referentes aos coeficientes médios de atrito são apresentados na Tabela 4.9. Observa-se que para a equação baseada no cálculo de Polias o resultado encontrado para o coeficiente de atrito é superior as equações sugeridas por Sniekers (1997) e Andreasen et al. (2006). Este resultado superior é atribuído ao fato da equação considerar a força de dobramento da chapa em seu cálculo. Fator este que, segundo Sniekers (1997) deve ser desconsiderado durante o cálculo do coeficiente de atrito devido a presença de deformação plástica. As demais equações suprimem este erro e, ainda, levam em consideração parâmetros como geometria do ensaio, espessura da chapa e o raio do pino.

Tabela 4.9 Coeficientes médios de atrito calculados segundo as equações propostas para os sistemas estudados.

Sistema	Eq. Polia	Eq. Sniekers	Eq. Andreasen
Lubrificante comercial	0,13	0,045	0,049
2HEAPE	0,15	0,07	0,069

Evidencia-se que o PIL 2HEAPE obteve valores superiores do coeficiente de atrito, quando comparado aos do lubrificante comercial, no entanto, os resultados indicam uma eficiência satisfatória quanto à lubrificação para este fluido sendo constatado, em seu comportamento, as principais características desejáveis por um lubrificante citadas por Cetlin (2005). Ao longo do ensaio, o coeficiente de atrito mostra-se constante o que pode estar, possivelmente, associado a formação de filme lubrificante contínuo sobre as

superfícies em contato. Em relação ao regime de lubrificação, os valores encontrados sugerem uma condição de lubrificação governada pela lubrificação de contorno contudo, em processos que envolvem a conformação mecânica de metais, a literatura reporta que um regime misto é geralmente observado (NEALE, 1975). Segundo Gunnarsson et al. (1998), em aspectos práticos para a produção de materiais conformados, a estabilidade frente a fricção pode ser um fator mais desejável do que um baixo coeficiente de atrito.

5.0 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nos ensaios apresentados neste trabalho, podem-se chegar às seguintes conclusões:

- Comportamento Tribológico:

Foi observada uma redução significativa do desgaste, quando adicionado um filme lubrificante entre o par tribológico alumínio e aço, o que caracteriza a ação de lubrificação para os PILs. O PIL 2HEAPe apresentou uma redução do desgaste em aproximadamente 50% e, em relação ao atrito, obteve uma redução em 4 vezes do coeficiente de atrito o que reporta sua maior eficiência quanto à lubrificação. Seus resultados mostraram-se similares aos obtidos pelo uso de um lubrificante comercial.

O PIL 2HEAF, quando empregado no ensaio que simula o processo de estampagem, não apresentou desempenho satisfatório na lubrificação de chapas de alumínio comercialmente puro. Portanto, não é indicado como lubrificante em processos de estampagem que envolvem este material. Entretanto, o PIL 2HEAPe apresentou resultados similares aos encontrados para o lubrificante comercial o que o torna um fluido lubrificante promissor em processos que envolvem a estampagem de alumínio.

- Estabilidade Térmica:

A aplicação dos PILs 2HEAPe e 2HEAF limita-se a processos que envolvam temperaturas inferiores a 110°C, para o líquido 2HEAF, e 125°C para o líquido 2HEAPe. A partir destas temperaturas, observa-se a degradação o que compromete suas propriedades. Em relação aos PILs, o lubrificante comercial, apresentou maior degradação estrutural cuja oxidação, inicia de forma acelerada a partir dos 100°.

- Molhabilidade:

Ambos os PILs apresentaram comportamento hifrofílico o que favorece a interação dos fluidos com o substrato de alumínio. Além disso, observou-se que quanto maior a cadeia molecular maior molhabilidade.

- Viscosidade:

A maior viscosidade reportada pelo PIL 2HEAPe (1333,2 mPa.s) contribuiu para que o líquido obtivesse uma melhor performance frente a lubrificação. Fator este, que possibilitou o maior carregamento de carga e a menor interação entre as asperezas da superfície.

- Densidade:

Verificou-se que maiores cadeias moleculares influíram na obtenção de uma menor densidade a qual, é evidenciada para o PIL 2HEAF.

- Estabilidade Química:

Ambos os PILs, avaliados neste trabalho, apresentaram estabilidade química não apresentando degradação em suas estruturas moleculares após o uso dos fluidos, como lubrificantes, no ensaio de desgaste. Todavia, para o lubrificante comercial, observou-se uma importante mudança estrutural constatando sua degradação após o ensaio de desgaste.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento tribológico dos PILs quando em contato com superfícies de aço avaliando seu desgaste e interação com o substrato ferroso.
- Alterar os parâmetros de desgaste e verificar a influência destes quanto ao comportamento tribológico do alumínio e o regime lubrificante.
- Realizar EDS e MEV no contra-corpo para verificar se as esferas contêm significativa indicação de Al na superfície decorrente do possível desgaste por adesão do material, assim como analisar o desgaste que a esfera pode ter sofrido.
- Explorar a possibilidade de reutilização dos PILs como fluidos lubrificantes.
- Realizar o ensaio de embutimento profundo utilizando o PIL 2HEAPe como fluido lubrificante, aprimorando, desta forma, o estudo pertinente ao uso do líquido como lubrificante em processos de estampagem levando, em consideração, a conformação do alumínio comercialmente puro.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTEN, A. C. **Ionic Liquids: past, present and future.** 154, pp. 9-27, 2012.
- ANDREASEN, J. L. **Bending under tension test with direct friction measurement.** Technical University of Denmark, 2006.
- BART, C. J. **Biolubricants Science and Technology.** Woodhead Publishing, 2013.
- BERMÚDEZ, M. D. **Protic ammonium carboxylate ionic liquid lubricants of OFHC copper.** Wear. 303, pp. 495 - 509, 2013.
- BERMÚDEZ, M. D. **Friction and wear of aluminium-steel contacts lubricated with ordered fluids-neutral and ionic liquid crystals as oil additives.** Wear. 256, pp. 386-392, 2004.
- BHUSHAN, B; NOSONOVSKY, M. **Green Tribology.** Springer, 2012.
- BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio.** Dissertação para obtenção de título de mestre em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology.** New York : John Wiley & Sons, 2002.
- CARRETEIRO, R. P. **Lubrificantes e lubrificação industrial.** Interciência, 2006.
- CETLIN, P.R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais.** Artliber, 2005.
- DAVIM, J. P. **Tribology in Manufacturing Technology.** Springer, 2012.
- ESPINOSA, T. **Surface interactions, corrosion processes and lubricating performance of protic and aprotic ionic liquids with OFCH copper.** Applied Surface Science. 273, pp. 578-597, 2013.
- FALCADE, T. **Eletrodeposição sobre os filmes de carbono sobre a liga de titânio Ti6Al4V; influência do líquido iônico lactato de 2 hidroxietanolamina ao eletrólito de**

N,N-Dimetilformamida. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

FERRARINI, J. L. 2014. **Análise e determinação do coeficiente de atrito no processo de estampagem profunda**. Tese para obtenção do título de doutor em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

FOLLE, L. F. **Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem**. Tese para obtenção do título de doutor em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. Vol. 10 de Tribology series, 1987.

GARDAS, R. L. **Thermophysical properties of ammonium and hydroxylammonium protic ionic liquids**. J. Chem. Thermodynamics 72 p. 117-124, 2014.

GUNNARSSON, L. **Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test**. Journal of Machine Tools and Manufacture, p. 459-467, 1998.

GWIDON, S. **Engineering Tribology**. Third. Butterworth - Heinemann, 2005.

HAMROCK, B. J. et al. **Fundamentals of fluid lubrication**. New York : CRC, 2004.

IGLESIAS M.; **New Brønsted Ionic Liquids: Synthesis, Thermodynamics and Catalytic Activity in Aldol Condensation Reactions**. Materials Science, pp. 365-390.

JOST, H. P. **TRIBOLOGY - ORIGIN AND FUTURE**. pp. 1-17, 1990.

KWIETNIEWSKI, C. E. F. **Metalografia e tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**. 3ª edição, Porto Alegre, 2011.

LI, S. 2014. **A review of recent developments of friction modifiers for liquid lubricants (2007-present)**. Elsevier. Current Opinion in Solid State and Materials Science. 18, pp. 110-139, 2014.

LIU, W. **Effect of the functional groups in ionic liquid molecules on the friction and wear behavior of aluminum alloy in lubricated aluminum-on-steel contact**. Tribology International. 38, pp. 725-731, 2005.

LOVELL, M. **Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants.** 177, pp. 87-90, 2006.

MENEZES, P. L. **Tribology for Scientists and Engineers : From Basics to Advanced Concepts.** Springer, 2013.

MIELCZARSKI, R. G. **Estudo do Comportamento Tribológico e em Tribocorrosão do Aço Inoxidável Martensítico DIN 1.4110.** Trabalho de Diplomação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

MINAMI, I. **Ionic Liquids in Tribology.** Molecules. pp. 2286-2305, 2009.

NEALE, M. J. **Tribology Handbook.** Butterworths, 1975.

ORTEGA, M. R.V. **Comportamento quanto à corrosão e efeito lubrificante de líquidos iônicos próticos.** Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014.

PALACIO, M. et al. **A Review of Ionic Liquids for Green Molecular Lubrication in Nanotechnology.** Vol. 40, pp. 247 - 268, 2010.

PELTZ, J. S. **Efeito do processo de Shot Peening na morfologia da superfície, resistência à corrosão e resistência à oxidação do aço inoxidável ferrítico AISI 430.** Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

PERIC, B. **A comparative study of the terrestrial ecotoxicity of selected protic and aprotic ionic liquids.** Chemosphere. 108, pp. 418-425, 2014.

PROFITO, F. J. **Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas.** Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

QU, J. **Oil-miscible and non-corrosive phosphonium-based ionic liquids as candidate lubricant additives.** Wear. 289, 2012.

REGULY, A. **Metalografia e Tratamentos Térmicos dos Não Ferrosos.** 2013.

SCHAEFFER, L., FOLLE, L. F. e FERRARINI, J. L. **Determinação do coeficiente de atrito por meio de ensaio de dobramento sob tensão.** Corte & Conformação de metais. Julho, 2011.

SHEU, S. 1988. **Real area of contact and boundary friction in metal forming.** Department of Mechanical Engineering, Northwestern University. Vol. 30, pp. 475-489, 1988.

SHIMID, S. R. 2013. **Evaluation of ionic fluids as lubricants in manufacturing.** Journal of Manufacturing Process. 15, pp. 414 - 418, 2013.

SNIEKERS, R. J. J. M. **Experimental set-up and data processing of the radial strip-drawing friction test.** Materials Processing technology, p. 216-223, 1997.

STOLTE, S. **Ionic LIquids as lubricants ou lubrication additives: An ecotoxicity and biodegradability assessment.** 89, pp. 1135-1141, 2012.

STRACKE, M. P. 2008. **Líquidos iônicos: síntese, caracterização, utilização como reservatórios moleculares de hidrogênio e aplicação em baterias.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

TER HAAR, R. 1996. **Friction in Sheet Forming, the influence of (local) Contact Conditions and Deformation.** 1996.

TREVISAN, R. 2011. **Utilização de medições ultrassônicas de vibração e da emissão acústica para implantação de lubrificação base-condição visando a prevenção de falhas em mancais de rolamento.** Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

YUAN Y, Lee TR. 2013. **Contact Angle and Wetting Properties.** pp. 3-34, 2013.