

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA FERRAMENTA DE AÇO INOX 304 NO CONTATO COM A CHAPA DA LIGA DE AL-SI NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL

Diogo Azevedo de Oliveira, diogoazev@yahoo.com.br¹
Klaus Higor dos Santos, klaushigor@yahoo.com.br¹
Augusto Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹
Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹
Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901.

Resumo: O processo de estampagem incremental foi utilizado para produzir peças em diferentes condições de lubrificação e a seco, com objetivo de analisar o efeito da lubrificação na qualidade das peças produzidas e elucidar os mecanismos de desgaste desenvolvidos durante a operação. Os fluidos utilizados foram: o Óleo ISO 32, a Glicerina e o Quimatic. Os resultados indicam que em condições nas quais o deslizamento é predominante, é imprescindível a utilização do fluido lubrificante. A operação realizada a seco produziu uma maior quantidade de material removido e maior coeficiente de atrito, com consequente piora do acabamento superficial, enquanto o Óleo ISO 32 apresentou o melhor acabamento superficial, menores valores de coeficiente de atrito e de material removido. A adesão foi o principal mecanismo de desgaste observado, seguido pela abrasão por dois corpos e abrasão por três corpos.

Palavras-chave: estampagem incremental, mecanismos de desgaste, qualidade superficial, fluidos.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem incremental surge como alternativa, economicamente viável, de se produzir pequenos lotes de peças por meio de uma operação simples. O custo é relativamente baixo, pois não se torna necessária a fabricação de ferramentas de estampagem. Segundo Park *et al.* (2003), em um processo de estampagem incremental (*ISF-Incremental sheet forming*) uma ferramenta de geometria simples executa a conformação de uma chapa metálica por meio de deformações aplicadas sucessivamente. As peças são normalmente fabricadas em máquinas com comando numérico computadorizado (CNC), devido à facilidade de se produzir geometrias complexas e, principalmente, por serem máquinas facilmente encontradas no mercado. Com a evolução do processo de estampagem incremental, surgiu a necessidade de se adequar os parâmetros e operacionalidade e, como consequência, máquinas dedicadas ao processo foram produzidas, como exemplo, a máquina criada por Allwood *et al.* (2005).

Vários parâmetros influenciam a qualidade superficial e dimensional na operação de estampagem incremental. Segundo Micari *et al.* (2007), os principais são: diâmetro da ferramenta, valor do passo vertical, velocidade de rotação da ferramenta, lubrificante, propriedades do material, geometria da peça e espessura da ferramenta. Como a proposta do trabalho é avaliar o comportamento de alguns fluidos na operação de estampagem incremental, o único parâmetro abordado será a lubrificação.

De acordo com Lopes (2013), a lubrificação exerce enorme influência no desgaste das ferramentas e no acabamento superficial das peças. O autor aponta como principais funções dos fluidos: a redução do atrito entre a ferramenta e chapa, a absorção do calor causado pela deformação da chapa na zona de contato, a redução do desgaste da ferramenta, a melhora do acabamento superficial da peça e a minimização da força de trabalho exercida pela ferramenta.

Os fluidos utilizados nesta pesquisa foram: o óleo ISO 32, o Quimatic e glicerina. O óleo ISO 32 é utilizado nas máquinas com objetivo de lubrificar os componentes. Tiburi (2007), durante o processo *ISF*, obteve bons resultados no acabamento superficial da peça e na redução do desgaste, utilizando óleo para barramento e graxa a base de lítio. O Quimatic é um fluido de corte sintético utilizado em operações manuais de usinagem ou em operações em máquinas com baixas velocidades de corte, como na fabricação de roscas. Este fluido age como lubrificante na interface cavaco ou peça/ferramenta reduzindo o coeficiente de atrito com consequente redução da força de corte e melhora do acabamento superficial. Ele controla a temperatura na interface evitando a deformação da peça e falha dimensional além de impedir a adesão do cavaco junto à ferramenta. A glicerina é um composto orgânico obtido a partir de gorduras

animais, vegetais, biodiesel e diversos tipos diferentes de óleos de cozinha. É solúvel em água e possui propriedade higroscópica, ou seja, pode absorver facilmente a água em estado líquido ou em vapor em um ambiente circundante. Por ser tão eficaz em manter a umidade adequada ao ambiente, a glicerina líquida pode ser aplicada como lubrificantes industriais além de aplicações na indústria cosmética e alimentícia.

Este trabalho tem por finalidade avaliar como os fluidos com propriedades lubrificantes (óleo ISO 32, Quimatic e glicerina) afetam o comportamento tribológico na interface ferramenta-chapa, durante o processo de estampagem incremental, em função dos mecanismos de desgaste e do acabamento superficial da peça.

2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Os materiais das peças e da ferramenta são, respectivamente, a liga de alumínio-silício e o aço inox 304. As dimensões da chapa utilizada para a fabricação das peças foram 250 x 250 x 1,5 mm e a ferramenta possui o diâmetro de contato de Ø6 x 150 mm. As peças possuem uma geometria cônica, com diâmetro Ø150 x 30°. As peças foram produzidas em um centro de usinagem ROMI Discovery 560 (potência de 9 kW e rotação máxima de 7000 rpm). A determinação da força de estampagem foi feita em uma máquina de tração Instron com carregamento máximo de 10 ton. O coeficiente de atrito foi obtido no ensaio de pino sobre disco, o equipamento utilizado foi o tribômetro Microtest. O volume de material removido foi mensurado em uma balança de precisão com resolução de 10^{-4} g. As imagens foram captadas por meio do Microscópio óptico Zeiss- Axio Observer. D1m, com magnificação de 100X. Os parâmetros empregados na operação da estampagem incremental foram mantidos constantes, com magnitudes de velocidade de estampagem de 1m/min, profundidade de estampagem de 0,5 mm e rotação da ferramenta de 10 rpm. Foram fabricadas quatro peças, sendo três destas utilizando fluidos lubrificantes e uma a seco. Na fabricação da primeira peça foi utilizado como fluido lubrificante o óleo ISO 32, na segunda o Quimatic, na terceira a glicerina e, com objetivo de comparar a funcionalidade dos fluidos, a quarta peça foi produzida a seco. Depois de realizado o processo de estampagem incremental, foram captadas imagens das peças, por meio de microscopia, para posterior análise qualitativa. Para o ensaio de pino sobre disco, foram produzidos quatro corpos de prova cilíndricos (discos) com diâmetro de Ø65 x 1,00 mm com o mesmo material das peças estampadas e quatro pinos com pontas esféricas, com o mesmo material e diâmetro de contato da ferramenta, para que os testes fossem realizados em condições fidedignas às do processo de estampagem das peças. Por meio deste ensaio foram obtidos os coeficientes de atrito nas mesmas condições de lubrificação e a seco. Para a medição do volume de material removido, os discos foram pesados antes e após o ensaio de pino sobre disco. E com finalidade de realizar uma análise qualitativa, foram obtidas as imagens dos corpos de prova (discos) e dos pinos no final de cada teste. A figura 1 (a) e 1 (b) apresentam, respectivamente, o desenho em perspectiva do cone projetado e o cone fabricado.

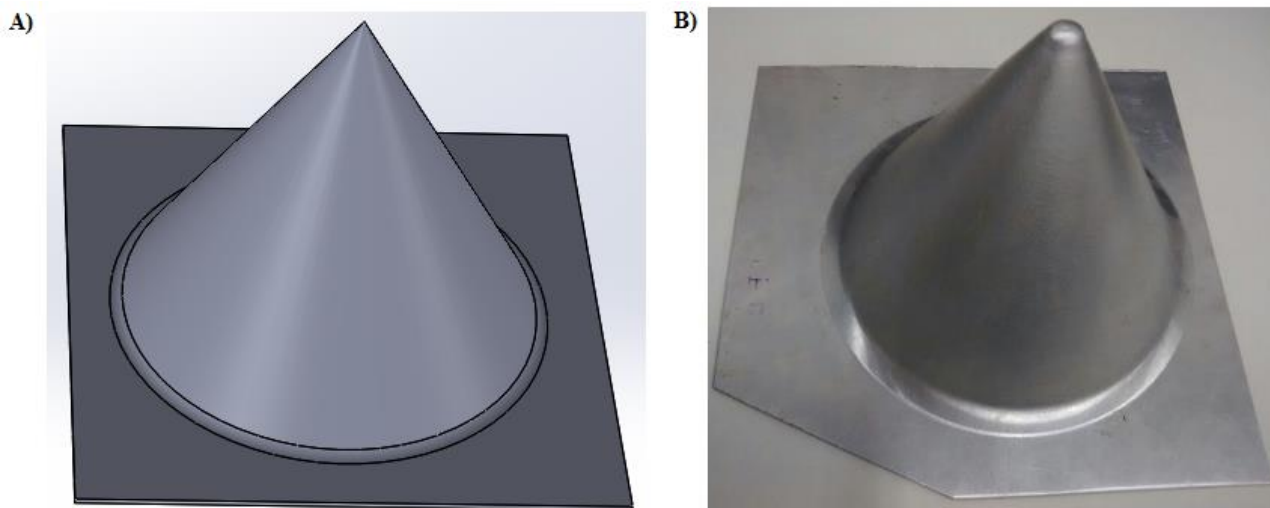


Figura 1 – (a) Desenho em perspectiva do cone; (b) Cone fabricado.

3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Os tópicos seguintes estão subdivididos em cinco seções, sendo a primeira relativa à quantificação dos coeficientes de atrito e do volume de desgaste em todas as condições de trabalho, a segunda referente à qualidade da peça produzida em condições de trabalho a seco. A terceira, quarta e quinta, estão concentradas na qualidade das peças produzidas em condições de lubrificação com os respectivos fluidos: glicerina, Quimatic-1 e Óleo ISO 32.

3.1. Coeficiente de Atrito e Volume de Material Removido por Desgaste

Os dados de coeficiente de atrito estão apresentados no gráfico 1. De acordo com o gráfico o óleo ISO 32 obteve o menor coeficiente de atrito, com valor médio de 0.075, seguido da glicerina e do Quimatic, que obtiveram ambos, o valor médio de 0.25 e por fim, a seco, com valor médio de 0.95. No gráfico 2 estão sintetizados os dados do volume de material removido, por consequência dos mecanismos de desgaste, no ensaio de pino sobre disco. Como verificado, a condição de trabalho a seco apresentou o maior volume de material removido, seguido pela glicerina, Quimatic e óleo ISO 32.

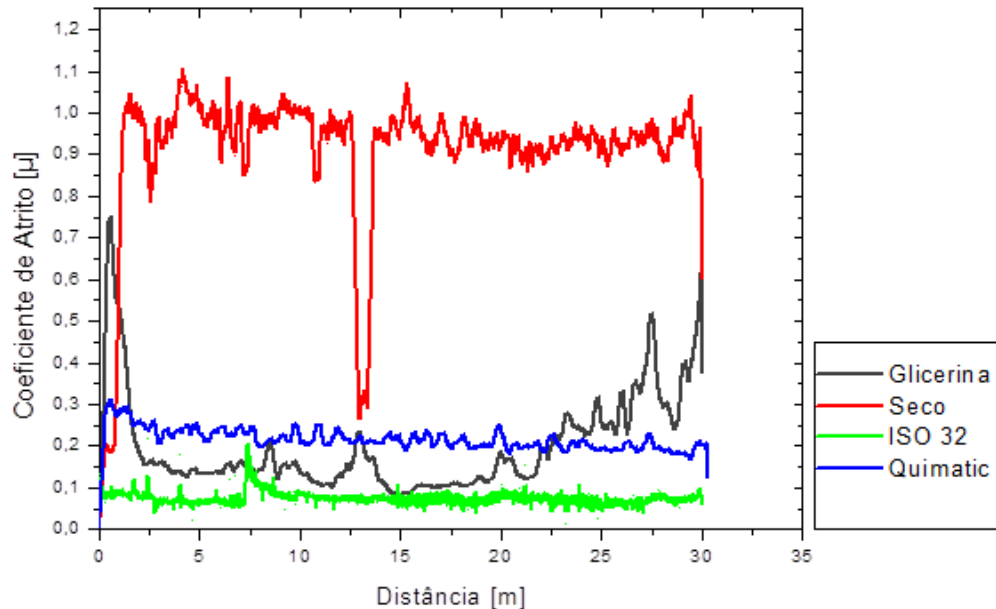


Gráfico 1 – Coeficiente de atrito em condições de lubrificação e a seco.

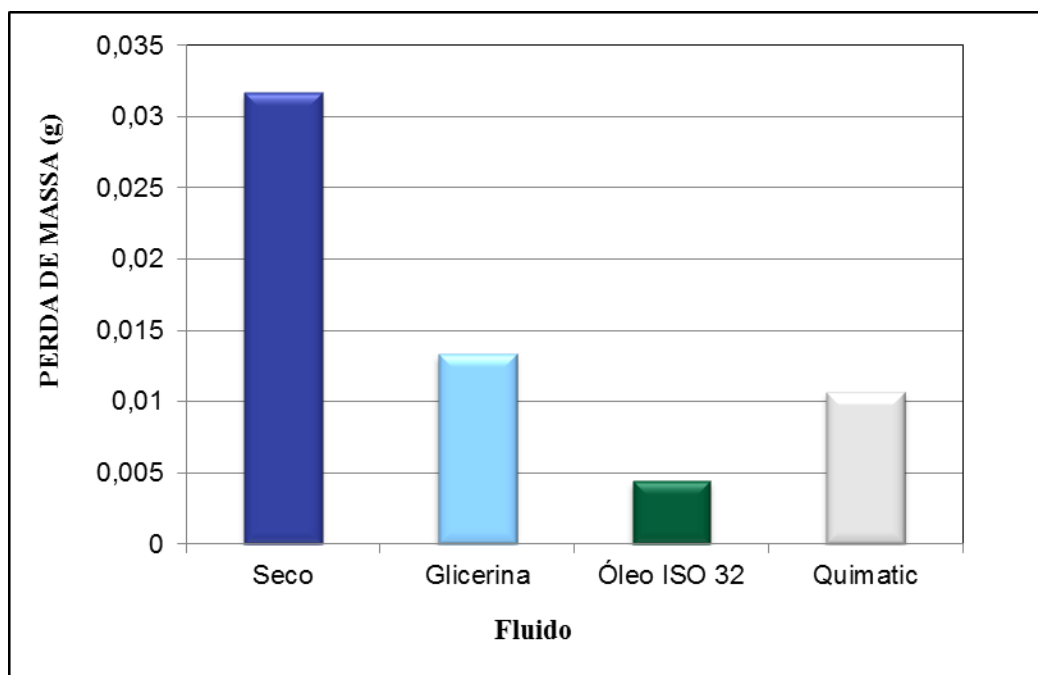


Gráfico 2 – Volume de material removido por mecanismos de desgaste.

3.2. Qualidade da Peça Produzida em Condição de Trabalho a Seco

Uma análise qualitativa, em condições de trabalho a seco, foi realizada na peça produzida. As imagens obtidas por microscopia, em regiões distintas da peça, estão apresentadas na figura 4. No início da operação de estampagem, em que a ferramenta atua próxima a borda da peça, observa-se recalque do material da peça e pouco desgaste. Logo abaixo da região da borda, o desgaste se apresentou mais acentuado, se tornando severo até o término da operação. É possível

observar uma grande quantidade de trincas formadas, além de deslocamento do material na superfície da peça. Outra observação relevante é a pouca presença de marcas de abrasão e grandes quantidades de vacâncias na superfície da peça, o que indica a predominância do mecanismo de adesão. Esta afirmação é ainda mais evidenciada quando se observa o gráfico de coeficiente de atrito 1, que indicou o valor médio de 0,95 e grande variação da amplitude entre os picos e os vales da curva no regime estacionário, que de acordo com Blau (2009), esta fonte de variação, pode ter como motivo, uma forte zona de aderência. Outra evidência foi a presença do material da peça aderido à superfície do pino, durante o ensaio de pino sobre disco, como pode ser observado na figura 5 (b). A adesão deste material foi somente observada em condição de trabalho a seco. Este fenômeno também sugere a ocorrência do mecanismo de desgaste de abrasão por dois corpos. Segundo Hutchings (1992), na ocorrência deste fenômeno, a força atômica de ligação na interface peça/ferramenta é maior que a força de ligação no interior do material de menor resistência (peça), como consequência, ocorre o cisalhamento interno. O material cisalhado se adere à ferramenta e forma uma aresta, o contato então passa a ocorrer entre a aresta formada e a peça. Com o contato contínuo, ocorre o encruamento deste material aderido que, consequentemente, se torna mais resistente que o material de origem (peça). Este fenômeno intensificou ainda mais o desgaste da peça, pois esta aresta, durante o contato, penetra na peça e promove uma remoção mais pronunciada do material. A figura 5 (a) apresenta uma região do corpo de prova (disco) do ensaio de pino sobre disco, e uma escala indicando a dimensão da largura da pista formada durante o ensaio, em que apresenta um valor médio de 2.5 mm. O trabalho a seco apresentou maior volume de material removido, como indicado no gráfico 2, atingindo um valor 60% maior comparado a glicerina, que apresentou o segundo pior resultado.

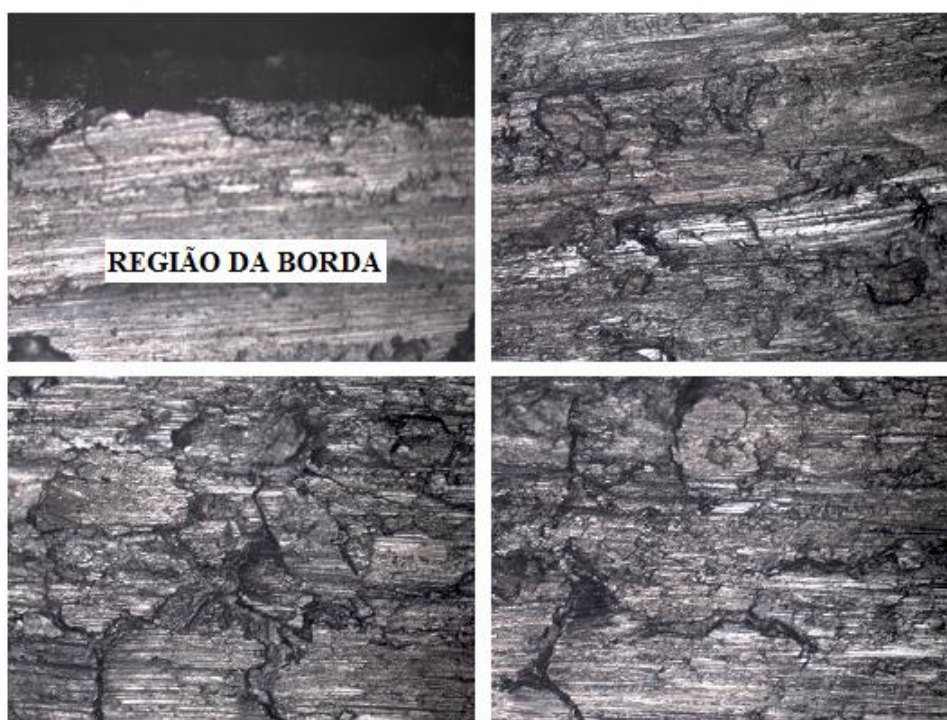


Figura 4 – Regiões distintas da peça fabricada em condições de trabalho a seco; b) região do corpo de prova no ensaio de pino sobre disco.

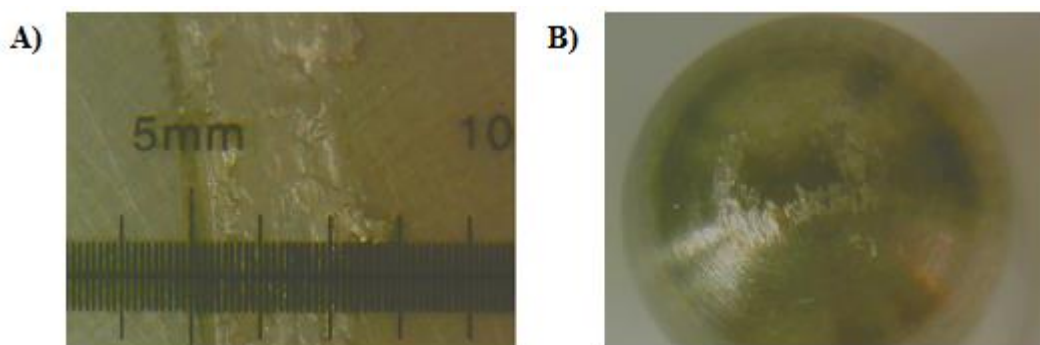


Figura 5 – Imagem do par tribológico utilizado no ensaio de pino sobre disco em condição de trabalho a seco; (a) disco - material da peça; (b) pino - material da ferramenta.

3.3. Qualidade da Peça Produzida Utilizando a Glicerina Como Lubrificante

Na figura 6 esta sintetizada as regiões das peças fabricadas utilizando a glicerina como lubrificante. A glicerina apresentou o segundo pior resultado em termos de desgaste. Por meio de análise qualitativa não se observa riscos de abrasão nas regiões das peças, exceto pela região da borda do cone, onde se inicia o processo. Outra observação é a grande quantidade de reentrâncias nas regiões da peça. A falta de marcas por abrasão, juntamente com estas reentrâncias indicam a predominância do mecanismo de desgaste por adesão. Apesar de ter obtido o valor médio de coeficiente de atrito de 0.25, observa-se no gráfico 2, uma grande variação e uma transição severa no perfil de atrito, com elevada variação dos valores entre picos e vales, no qual atinge o valor de rugosidade total (Rt) igual a 0.7, o que reforça ainda mais a teoria do mecanismo de adesão. Um aspecto que necessita ser estudado com mais atenção, é quanto à composição química da glicerina e suas propriedades. Por ter tido um coeficiente de atrito relativamente baixo e predominância da adesão, com grande remoção de material, pode ter ocorrido reações químicas entre a glicerina e o alumínio ou entre a glicerina e o aço inox, que justifiquem o fenômeno. Não se sabe ao certo se sua propriedade higroscópica, ou seja, a retenção de umidade traz benefícios ou malefícios ao processo de estampagem incremental. Embora a adesão tenha sido predominante, não foi possível observar a presença de material aderido junto ao pino, no ensaio de pino sobre disco, como visto na figura 7 (b). Como o coeficiente de atrito reduziu significativamente, é provável que a força de ligação na interface peça/ferramenta tenha sido mais fraca, fazendo com que o material aderido ao pino se desprendesse durante a operação. A figura 7 (a) apresenta uma região do corpo de prova cilíndrico (disco) do ensaio de pino sobre disco, e uma escala indicando a dimensão da largura da pista formada durante o ensaio, em que apresenta um valor médio de 1,5mm.

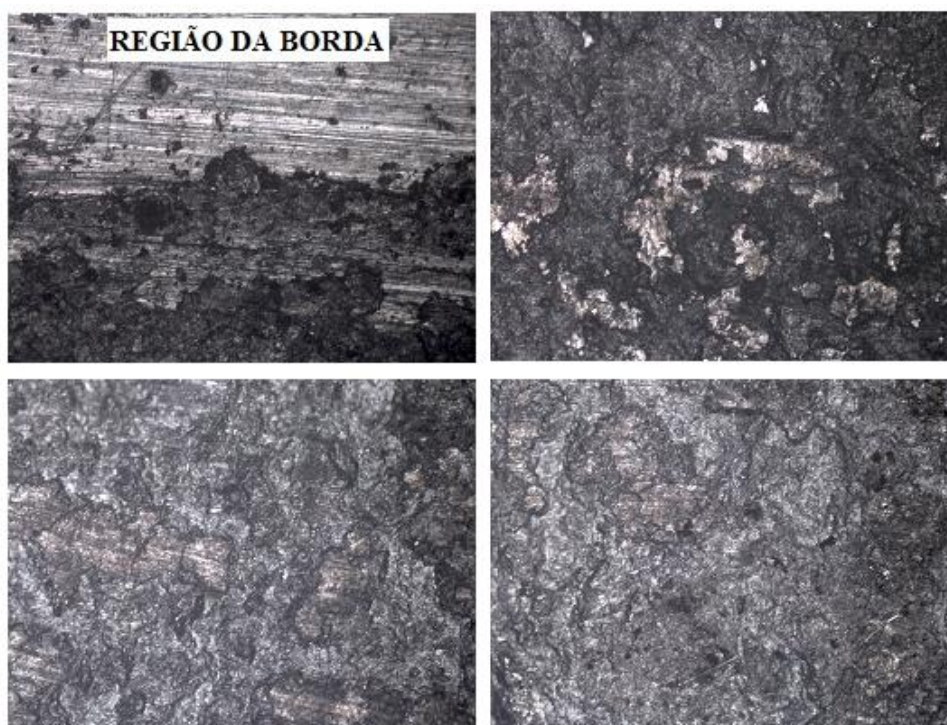


Figura 6 – Regiões distintas da peça fabricada utilizando a glicerina como fluido lubrificante.

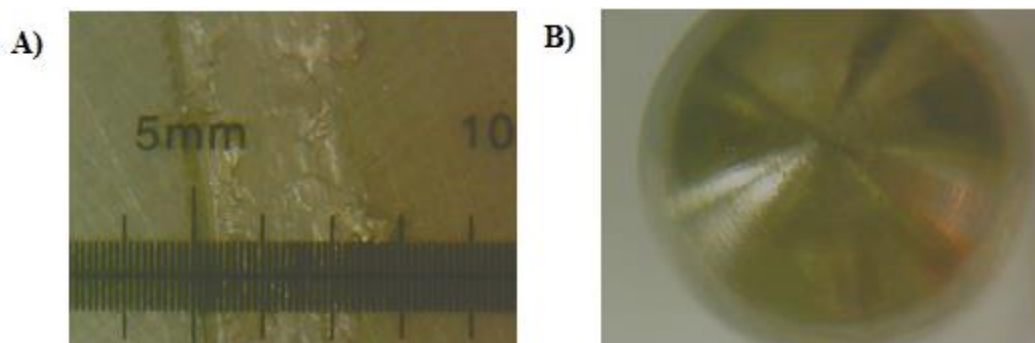


Figura 7 – Imagem do par tribológico utilizado no ensaio de pino sobre disco em condição lubrificada com glicerina; (a) disco - material da peça; (b) pino - material da ferramenta.

3.4. Qualidade da Peça Produzida Utilizando o Quimatic-1 Como Lubrificante

O Quimatic-1 apresentou o segundo melhor resultado, apresentando pouca adesão e predominando o mecanismo de desgaste por abrasão, como observado na figura 8 a grande quantidade de riscos produzidos. Observa-se na região da borda o sulcamento do material da peça provocado pela ferramenta durante a deformação. Pontos escuros da imagem indicam a remoção de material por adesão a um nível mais profundo, porém menor quando comparado com a glicerina e a seco. É possível visualizar ranhuras nas regiões, característica típica de abrasão. O Quimatic-1 utilizado, segundo o fabricante, é indicado para operações em metais ferrosos, aço, bronze e inox e contra indicado o uso em alumínio. A escolha do fluido foi baseada no material da ferramenta, que é o inox 304. As propriedades físicas e, principalmente, químicas do fluido, contra indicadas ao uso do alumínio, justificam a ineficácia do produto na operação de conformação incremental com este par tribológico. O coeficiente de atrito médio foi de 0.25, conforme gráfico 1, valor igual ao da glicerina. Porém a transição das fases do atrito foi mais suave e, no regime estacionário, a amplitude entre os picos e os vales foi menor, que propiciou uma condição de trabalho mais suave, promovendo uma redução na taxa de desgaste de aproximadamente 15%, comparada à glicerina. É importante ressaltar que, embora os valores de coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, utilizando o Quimatic-1, sejam próximos aos da glicerina, ambos apresentam a predominância de distintos mecanismos de desgaste. Sendo a abrasão predominante com o uso do Quimatic-1 e a adesão com a glicerina.



Figura 8 – Regiões distintas da peça fabricada utilizando o Quimatic como fluido lubrificante.

3.5. Qualidade da Peça Produzida Utilizando o Óleo ISO 32 Como Lubrificante

A peça produzida tendo o Óleo ISO 32 como lubrificante apresentou a melhor qualidade superficial dentre todos os fluidos testados. A análise qualitativa de regiões distintas da peça foi realizada e esta sintetizada na figura 9. O início da operação de estampagem foi suave, apresentando marcas de sulcamento do material da peça e pequenas ranhuras, provocadas pelo desgaste abrasivo durante o contato da ferramenta com a peça. Poucos pontos de adesão foram verificados. Segundo Burwell (1957), a adesão, por ser um fenômeno que envolve força de ligação atômica na interface e afinidade química entre os materiais, sempre ocorrerá, sendo impossível sua eliminação. Contudo, a utilização de um fluido eficiente pode mitigar o efeito da adesão, tornando-o um fator irrelevante no processo. Como constatado pelas imagens, o Óleo ISO 32 foi eficiente na redução do mecanismo de desgaste por adesão. Outro aspecto observado foi a presença de pequenos riscos na superfície da peça, que indica a ocorrência do mecanismo de abrasão por três corpos. Hutchings (1992) justifica que este fenômeno ocorre quando partículas que foram arrancadas da peça por outro mecanismo de desgaste (abrasão, adesão, etc.) ficam soltas na interface e o contato ocorre entre a ferramenta, a partícula e a peça, sendo a partícula a responsável pelo desgaste. Este mecanismo de desgaste é mais suave que a abrasão por dois corpos e a adesão, pois a partícula (que não possui geometria definida), durante o contato, é deformada, causando uma mudança na geometria, com tendência a uma forma esférica. A consequência deste mecanismo é a formação de micro ranhuras nas peças. O Óleo ISO 32 obteve o menor de coeficiente de atrito, com valor médio de 0.075, uma suave transição das fases do atrito e baixa variação da amplitude entre os picos e os vales. Ele apresentou uma redução da taxa

de desgaste de aproximadamente 88%, 70% e 64% comparado às respectivas condições: a seco, com a glicerina e com o Quimatic-1.

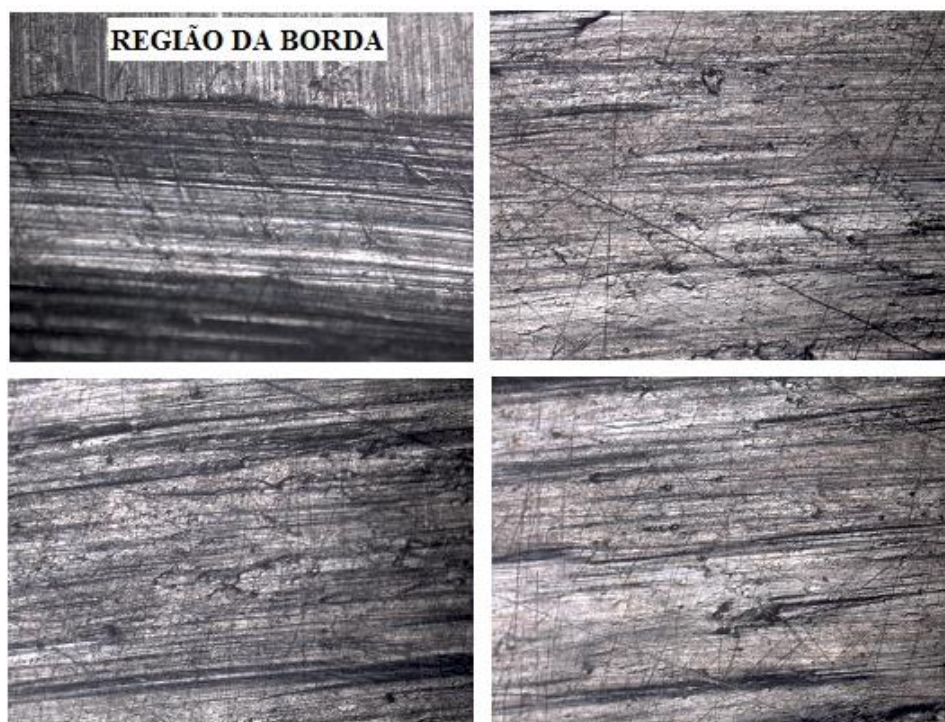


Figura 9 – Regiões distintas da peça fabricada utilizando o Óleo ISO 32 como fluido lubrificante.

4. CONCLUSÃO

Na estampagem incremental, onde o movimento de deslizamento é preponderante, é indispensável à utilização de um fluido com propriedade lubrificante, conforme verificado, o desgaste na condição de trabalho a seco foi severo.

Os mecanismos de desgaste atuaram simultaneamente, contudo, em cada condição de trabalho, houve predominantemente, um único mecanismo responsável pela maior taxa de desgaste durante o processo.

Em condições de trabalho a seco, observou os mecanismos de desgaste por adesão e abrasão e abrasão por dois corpos, sendo a adesão o mecanismo predominante.

Utilizando a glicerina como lubrificante, praticamente não se observa marcas de abrasão, sendo a adesão a principal responsável pelo desgaste ocorrido. É possível que o desgaste tenha sido influenciado por efeitos triboquímicos causados pela glicerina, para tanto, outras análises precisam ser realizadas.

Na operação realizada com o Quimatic-1 foi verificada a atuação dos mecanismos de desgaste por adesão e abrasão, tendo a abrasão como o mecanismo mais influente no processo de desgaste.

Na estampagem realizada com o Óleo ISO 32 foi observada pouca adesão, prevalecendo o mecanismo de desgaste por abrasão. Abrasão por três corpos também foi verificado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allwood, J. M., Bramley, A. N., Ridgman, T. W., MILEHAM, A. R., 2005. "A novel method for the rapid production of inexpensive dies and moulds with surfaces made by incremental sheet forming". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture: 323-327p
- Blau, P. J. 2009. "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials
- Hutchings, I. M., 1992. "Friction science and technology : from concepts to applications".
- John T. Burwell, Jr., 1957. "WEAR: SURVEY OF POSSIBLE WEAR MECHANISMS".
- Lopes, Tiago, 2013. Estampagem Incremental: "Compensação do Retorno Elástico e Análise à Rotura". Trabalho de Pós Graduação engenharia mecânica. Faculdade de engenharia da universidade do porto, FEUP: Portugal.
- Manutenção e suprimentos. Disponível em <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/>>. Acessado em 05 dezembro 2015.
- Micari, F.; Ambrogio, G.; Filice, I., 2007. "Shape and dimensional accuracy in single point incremental forming: state of art and future trends". Journal of Material Processing Tecnolgy, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.066.
- Park, J.; Kim, Y., 2003. "Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique". Journal of Materials Processing Technology, V. 140 p. 447-453.
- Quimatic/Tapmatic. Disponível em <<http://www.quimatic.com.br/>>. Acessado em 05 dezembro 2015.

Tiburi, F., 2007. “Aspetos do processo de estampagem incremental”, Trabalho de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Brasil.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EVALUATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF THE STAINLESS STEEL 304 TOOL IN CONTACT WITH THE AL-SI ALLOY SHEET IN THE INCREMENTAL SHEET FORMING PROCESS

Diogo Azevedo de Oliveira, diogoazev@yahoo.com.br¹

Klaus Higor dos Santos, klaushigor@yahoo.com.br¹

Augusto Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br¹

Marcelo Araújo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹

Alexandre Mendes Abrão, abrao@demec.ufmg.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901.

Abstract. *The Incremental sheet forming was employed to produce a workpiece under dry and lubrication conditions, aiming to evaluate the effect of lubricants on the surfaces quality of workpieces and to describe some possible wear mechanism in incremental sheet forming. The fluids employed were the lubricant Oil ISO 32, glycerin and Quimatic. It was found that in sliding pure conditions a lubricant fluid must be employed. Better lubrication was achieved with Oil ISO 32 recording the lowest wear. Adhesion was the main wear mechanism observed followed by abrasive wear.*

Palavras-chave: *estampagem incremental, mecanismos de desgaste, qualidade superficial, fluidos.*

Keywords: *incremental sheet forming, wear mechanism, surfaces quality, fluids.*