

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO SOB DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DE SUPERFÍCIES DE AÇO TEXTURIZADAS ¹

H.L. Costa^{*2}
I.M. Hutchings³

Resumo

O efeito da texturização de superfícies no atrito e na lubrificação quando há pequenas deformações plásticas presentes entre duas superfícies deslizantes foi investigado através de ensaios de estiramento a frio em tiras de aço inoxidável austenítico 316 18-8. Moldes especiais contendo insertos foram construídos, sendo que as performances de insertos texturizados com arranjos regulares de bolsos circulares e de canais paralelos foram comparadas com a performance de insertos lisos. Medições de capacitância foram utilizadas para avaliar a espessura do filme lubrificante, mas contato metálico foi detectado por toda a duração dos testes, o que confirmou a hipótese da ocorrência de lubrificação mista, mas impediu a medição da espessura de filme por esta técnica. A medição da força de atrito e a análise das superfícies deformadas foram os principais parâmetros de avaliação das superfícies texturizadas. Texturas com pequena porcentagem de área texturizada (f) e baixa relação profundidade / largura das características individuais que compõem a textura (h_1/w) não resultaram em aumento da performance tribológica. Para valores maiores de f e h_1/w , variações significativas foram detectadas no coeficiente de atrito e na força de estiramento. Quando canais paralelos foram orientados perpendicularmente à direção de estiramento, uma grande redução no coeficiente de atrito foi detectada. Acredita-se que os canais agiram como reservatórios de lubrificante e também induziram lubrificação microplastohidrodinâmica. Por outro lado, quando os canais foram orientados paralelamente à direção de estiramento, o coeficiente de atrito aumentou drasticamente e o acabamento superficial da tira piorou. Acredita-se que neste caso os canais guiaram o lubrificante para fora do contato durante o estiramento.

Palavras-chave: Texturização; Estiramento a frio; Lubrificação; Atrito; Microplastohidrodinâmica.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Laboratório de Tribologia e Materiais, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, Bloco 1R, Uberlândia, MG, 38400-901, Brasil.

³ Institute for Manufacturing, Department of Engineering, University of Cambridge, Mill Lane, CB21RX, Cambridge, GB.

*Autor para correspondência, e-mail: ltm-henara@ufu.br, fone: 55 34 88011713, fax: 55 34 32394273.

INTRODUÇÃO

Estiramento envolve a deformação de uma barra através de um molde que consiste de um canal convergente, sendo que a peça é puxada entre moldes estacionários. A barra normalmente possui seção circular ou retangular. Para barras de seção retangular fina, o processo é conhecido como estiramento de tiras. A geometria frontal do molde é projetada de forma a encorajar fluxo de lubrificante dentro da interface e a geometria traseira deve garantir uma queda gradual das tensões no molde. A tira deformante desliza sobre toda a zona de contato. Esse deslizamento gera uma tensão de atrito (τ) que opõe-se ao movimento da tira. O efeito da força de atrito sobre a força de estiramento (D) é importante, sendo que o atrito é equivalente a uma tensão traseira e então reduz a pressão na interface, mas às custas de maiores forças de estiramento. A deformação ocorre sob a combinação de tensões longitudinais (ou de estiramento) e de tensões compressivas indiretas.^(1,2)

Sob condições muito específicas, é possível manter um filme fluido lubrificante entre o molde e a peça. O regime de lubrificação atingido nestas condições é conhecido por lubrificação plastohidrodinâmica (PHD). Em síntese, um lubrificante viscoso entra na zona de deformação, formando um filme lubrificante hidrodinâmico devido à geometria convergente da geometria da entrada do molde. Entretanto, esse filme é insuficiente para manter uma separação completa entre o molde e a tira. Escoamento diferencial do material da peça resulta em aprisionamento local de óleo em bolsos superficiais. À medida em que a deformação procede, a extensão superficial torna-se muito grande e o lubrificante aprisionado nos bolsos torna-se cada vez mais insuficiente, aumentando a proporção de regiões sob lubrificação limite. O lubrificante aprisionado nos bolsos individuais comporta-se como um meio hidrostático. Entretanto, a ocorrência de lubrificação PHD é rara e a maioria dos processos de conformação ocorre sob lubrificação limite ou mista.⁽²⁻⁵⁾

A presença física de bolsos de lubrificante gerados durante alguns processos de conformação tem sido amplamente confirmada através da análise de superfícies deformadas sob condições de lubrificação mista. Isto sugere que a fabricação intencional de bolsos, seja na superfície da peça ou do molde, pode aumentar a ocorrência dos mecanismos de lubrificação PHD. O uso de bolsos de lubrificante fabricados artificialmente (texturização superficial) para aumentar a lubrificação em processos de conformação tem sido investigada por alguns pesquisadores.^(3,6-12)

Durante a deformação plástica, uma pressão hidrostática é gerada no lubrificante aprisionado dentro dos bolsos. O modelo representado na Figura 1 mostra como o lubrificante aprisionado dentro dos bolsos pode escapar devido a um aumento de pressão hidrodinâmica.⁽³⁾

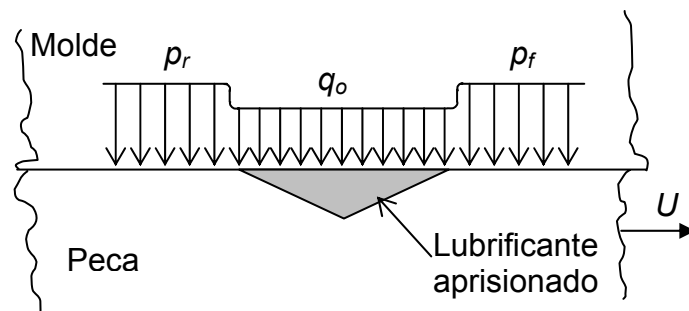


Figura 1. Distribuição de pressão em torno de um bolso contendo lubrificante pressurizado hidrostáticamente.⁽³⁾

O lubrificante aprisionado, sujeito a uma pressão hidrostática (q_0), e a região plana em volta dele, recebem o carregamento das pressões normais na região traseira do bolso (p_r) e na região dianteira (p_f). A peça move-se da esquerda para a direita, o que torna possível um aumento da pressão hidrodinâmica na aresta convergente que se forma na região traseira do bolso. Para que o lubrificante possa escapar do bolso, uma pressão hidrodinâmica (q_{dyn}) = $p_r - q_0$ é necessária. Esta pressão hidrodinâmica q_{dyn} pode ser calculada usando-se a equação de Reynolds. Este fluxo de lubrificante para trás do bolso é chamado lubrificação microplastohidrodinâmica.⁽³⁾ Na frente do bolso, um aumento de pressão hidrodinâmica não é possível, já que a cunha que se forma nessa região é divergente. O lubrificante somente pode escapar para a frente do bolso se a pressão hidrostática dentro do bolso tornar-se maior que a pressão p_r na frente do bolso. Isto é possível já que o bolso move-se em direção a regiões de maior pressão no molde. Este mecanismo é denominado lubrificação microplastohidrostática, pois o escape do lubrificante é promovido por uma sobrepressão hidrostática.⁽¹³⁾

Apesar de alguns trabalhos serem encontrados na literatura sobre o efeito da texturização de superfícies em processos de conformação, em geral eles envolvem severa deformação plástica. No presente trabalho, testes de estiramento de tiras são usados como um modelo experimental para investigar o efeito da texturização de superfícies no atrito e na lubrificação em situações tribológicas que envolvem a ocorrência de pequenas quantidades de deformação plástica. Em estudos anteriores, o efeito da texturização de superfícies em testes de deslizamento lubrificados envolvendo pequenas deformações elásticas foi analisado.⁽¹⁴⁾ Através do presente trabalho, espera-se que uma compreensão mais ampla dos efeitos fundamentais da texturização de superfícies metálicas em diferentes regimes de deformação e lubrificação seja obtida. O estiramento de tiras de pequena espessura foi escolhido, de modo a garantir deformação homogênea, já que deformação não-homogênea começa a tornar-se significativa quando a espessura média do corpo em deformação é bem maior que o comprimento do contato, com o centro deformando menos que o previsto.⁽²⁾ Os testes envolvem pequenas deformações, já que a maioria dos sistemas tribológicos na prática não envolve severas deformações plásticas. Além disso, garante-se que o isolamento elétrico do molde, necessário para as medições de capacitância, não seja destruído.

MATERIAIS E MÉTODOS

No equipamento para ensaios de estiramento, uma tira metálica é presa a um mandril e puxada através de um par de moldes estacionários. Moldes especiais contendo insertos foram projetados e construídos, conforme mostrado na Figura 2. O uso dos insertos permite que várias texturas superficiais sejam testadas mais facilmente. Insertos são pequenos, fáceis de manusear, baratos e podem ser retificados e polidos sem grandes dificuldades, de forma que a texturização pode ser feita somente nos insertos, ao invés de texturizar-se toda a superfície dos moldes. Tanto as bases dos moldes quanto os insertos foram construídos em aço ferramenta BW1A, tendo sido usinados no estado normalizado. Após usinagem, eles foram tratados termicamente para aumentar sua dureza. O tratamento térmico consistiu de aquecimento a 900°C seguido de têmpera em óleo e revenimento a 200°C por 2 horas, atingindo-se uma dureza Vickers de 2360 ± 250 MPa. O ângulo de convergência dos insertos (ϕ) foi de 4°. A tolerância de paralelismo ao longo do

comprimento dos inserts foi de 10 μm , o que ajudou a reduzir distribuições de tensões nao-homogêneas durante os ensaios.

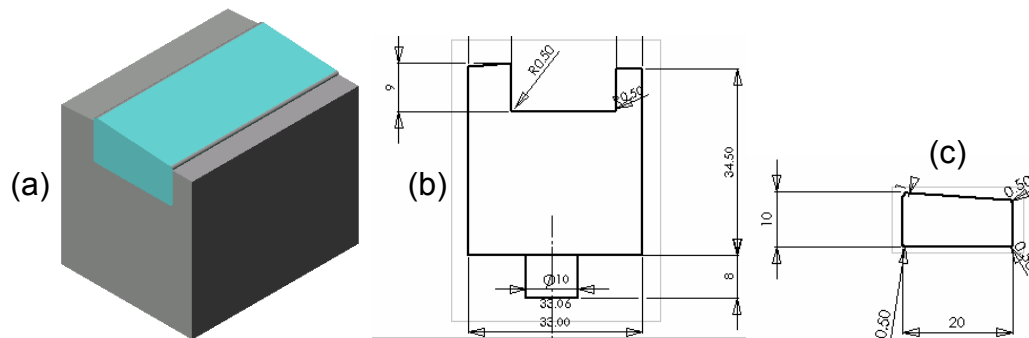


Figura 2. Moldes especiais com inserts: (a) perspectiva do molde com o inserto; (b) vista da base do molde; (c) vista do inserto.

Os inserts foram polidos com pasta de diamante 1 μm até obter-se um acabamento espelhado. Em seguida, foram texturizados através de fotolitografia combinada com ataque químico. O procedimento litográfico para texturização de amostras de aço já foi descrito em detalhes em trabalhos anteriores.⁽¹⁴⁾ A topografia de superfície dos inserts texturizados foi medida com um interferômetro ótico modelo Zygo New Image 200. A nomenclatura das amostras e as características geométricas de cada padrão de textura são apresentadas na Tabela 1. Padrões contendo sulcos paralelos e bolsos circulares (Figura 3) e também inserts não-texturizados (lisos) foram confeccionados. Em cada teste, um dos inserts do molde foi texturizado e o outro liso. Além disso, um teste foi conduzido com ambos os inserts lisos, para ser usado como referência. Dois padrões contendo sulcos paralelos muito similares foram testados, mas com diferentes orientações relativas entre os sulcos e a direção de estiramento.

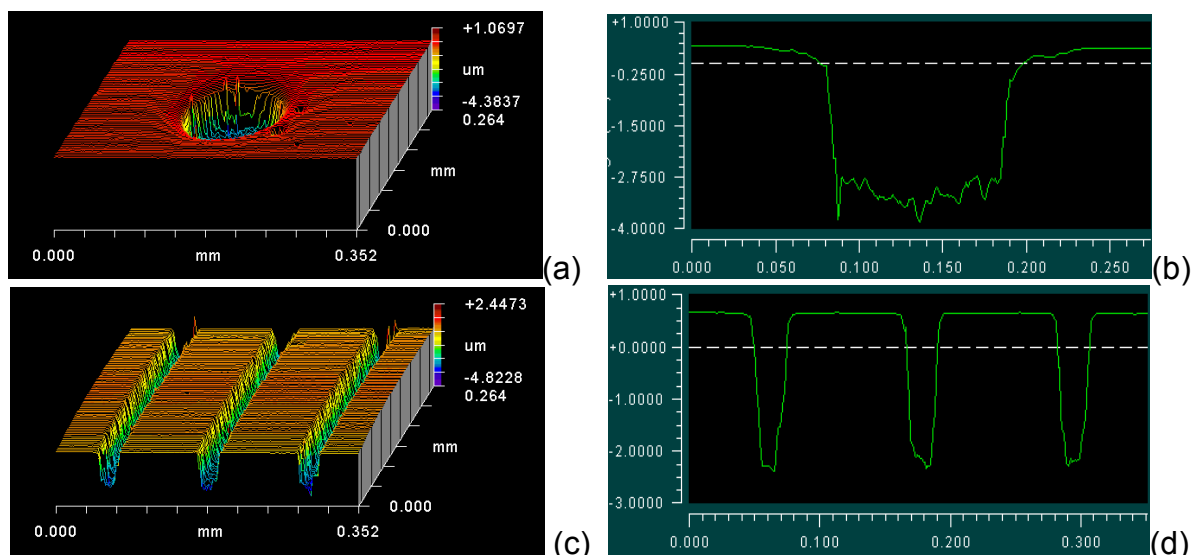
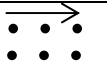


Figura 3. Topografia de superfície das amostras texturizadas; alturas dos bolsos em μm e largura em mm; perspectivas à esquerda e perfis à direita: (a) and (b) Amostra ST1; (c) and (d) Amostra ST2; todos os dados foram gerados por interferometria ótica.

Tabela 1. Nomenclatura e descrição das características geométricas dos inserts texturizados; w – largura de cada bolso ou canal; h_1 – profundidade; f – fração de área coberta pela texturização.

Inserto	Forma	w (μm)	h_1 (μm)	f	h_1/w	Direção de estiramento
ST1	Bolsos circulares	140	3.9	0.034	0.03	
ST2	Sulcos	42	3.0	0.24	0.07	
ST3	Sulcos	42	3.2	0.248	0.08	

Tiras de aço inoxidável 316 (18-8) com seção transversal retangular inicial de 20 x 3 mm foram usadas como amostras. Medições de dureza Vickers das tiras indicaram uma dureza média de 545 MPa. A rugosidade superficial das tiras foi medida na direção perpendicular ao estiramento, tanto antes quanto depois dos ensaios, utilizando um interferômetro ótico modelo Zygo New Image 200. Após os ensaios de estiramento, as amostras deformadas foram examinadas por microscopia ótica.

No início de cada teste, as superfícies dos inserts e das tiras foram pinceladas com lubrificante. O lubrificante foi um óleo mineral sem aditivos com uma viscosidade dinâmica a 20°C de 1.5 Pa s.

Para avaliar a lubrificação durante os ensaios, utilizou-se um aparato experimental desenvolvido em trabalhos anteriores para medir espessura de filmes lubrificantes através de medidas de capacitância.^(14,15) Chapas de poliestireno com espessura de 0.5 mm foram utilizadas para isolar eletricamente os inserts e as bases dos moldes. O isolamento era trocado no início de cada ensaio, uma vez que ele sofria deformação durante os testes.

A Figura 4 esquematiza as forças envolvidas durante os ensaios de estiramento. Todas as forças foram aplicadas por um sistema hidráulico. A força de indentação, ou seja, a força de compressão entre os moldes, foi mantida constante em 19.6 kN durante os testes. O comprimento de contato, determinado pela força de indentação e pelo limite de escoamento da tira, foi medido como sendo 4.5 mm. Após a tira ser presa ao mandril e lubrificada, ela foi puxada com uma velocidade linear constante de 22 mm.s⁻¹. As forças de estiramento foram medidas por extensômetros colados ao mandril. Para medir-se a força de atrito, um arranjo de extensômetros foi colado na direção paralela à interface entre o inserto e a tira.

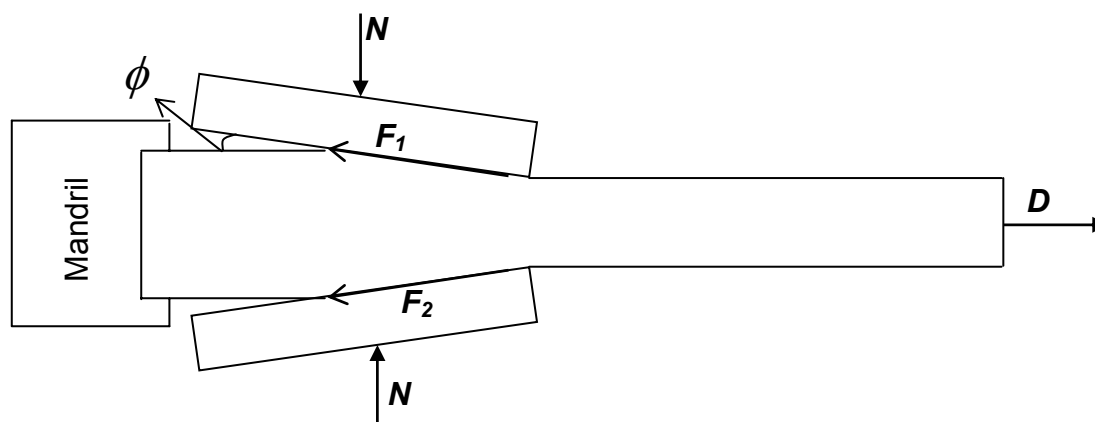


Figura 4. Diagrama de forças durante um ensaio de estiramento; N é a força de indentação, D é a força de estiramento, F_1 é a força de atrito entre a tira e o inserto texturizado e F_2 entre a tira e o inserto liso.

Os sinais de força de estiramento, força de atrito e capacitância foram registrados através de uma unidade de aquisição de dados modelo Iotech Datashuttle USB55, por sua vez ligada a um microcomputador. Os dados eram amostrados digitalmente com uma frequência de amostragem de 25 Hz.

RESULTADOS

Os sinais medidos com a intenção de avaliar-se a capacitância do contato indicaram valores muito baixos antes do contato entre as tiras e os moldes, já que as superfícies eram separadas por uma grande distância. Quando o sistema hidráulico era ligado, ocorria um aumento brusco destes valores, sendo que um valor máximo de aproximadamente 9.6 V era atingido mesmo antes de atingir-se a força de indentação desejada. Este valor de 9.6 V, que correspondia a uma situação de contato total entre as superfícies, mantinha-se constante pelo restante da duração do teste.

Os sinais medidos para as forças de atrito e estiramento são mostrados na Figura 5 para todas as amostras. A Figura 5-(a) apresenta as medições com ambos os insertos lisos, que será referência para os demais testes. Nota-se que a força de estiramento não é zero no início do estiramento, devido à aplicação prévia da força de indentação. Ao iniciar-se o estiramento, ocorre um pico na força de estiramento, que em seguida diminui e então permanece razoavelmente constante até o final do teste. A força de atrito inicia-se em zero e a seguir possui comportamento semelhante à força de estiramento. Em (b), tem-se as medições para o teste com um dos insertos texturizado com o padrão ST1 e o outro inserto liso. Observa-se comportamento semelhante ao obtido para os dois insertos lisos, mas as forças de atrito e estiramento são ligeiramente mais altas. Para o teste contendo um inserto com canais paralelos à direção de estiramento (ST2), tanto a força de atrito quanto a de estiramento foram bem maiores que para os insertos lisos, conforme mostrado em (c). Além disso, os sinais de força continuaram a crescer após o pico de escoamento, apesar de uma leve tendência de estabilização em torno da metade do comprimento de estiramento. O uso de um inserto com canais perpendiculares à direção de estiramento (ST3) resultou em forças de atrito e estiramento bem menores que para insertos lisos. Além disso, essas forças diminuíram ao longo da duração do estiramento, como é visto em (d).

A avaliação microscópica das tiras deformadas evidenciou a presença de riscos leves ao longo da direção de estiramento e alguns pequenos bolsos escuros, conforme exemplificado na Figura 6-(a). Uma exceção ocorreu para o teste com o inserto ST2, que apresentou riscamento severo da tira (b). A rugosidade (R_a) das tiras antes dos ensaios apresentou um valor médio de $0.198 \mu\text{m}$. As medições de rugosidade foram feitas em ambos os lados das tiras, tanto no lado que estava em contato com o inserto liso quanto com o texturizado. Diferenças muito pequenas de rugosidade foram detectadas entre os dois lados das tiras ($\sim 0.26 \mu\text{m}$), com exceção da tira em contato com o inserto ST3, com canais paralelos à direção de estiramento. Neste caso, R_a foi bem maior para o lado texturizado ($0.65 \mu\text{m}$) que para o lado liso ($0.24 \mu\text{m}$).

O aspecto dos insertos após estiramento é exemplificado na Figura 7, onde observa-se a presença de dano superficial, mas sem deformação significativa das texturas.

As medições da redução de espessura das tiras evidenciaram uma redução média de aproximadamente 2%.

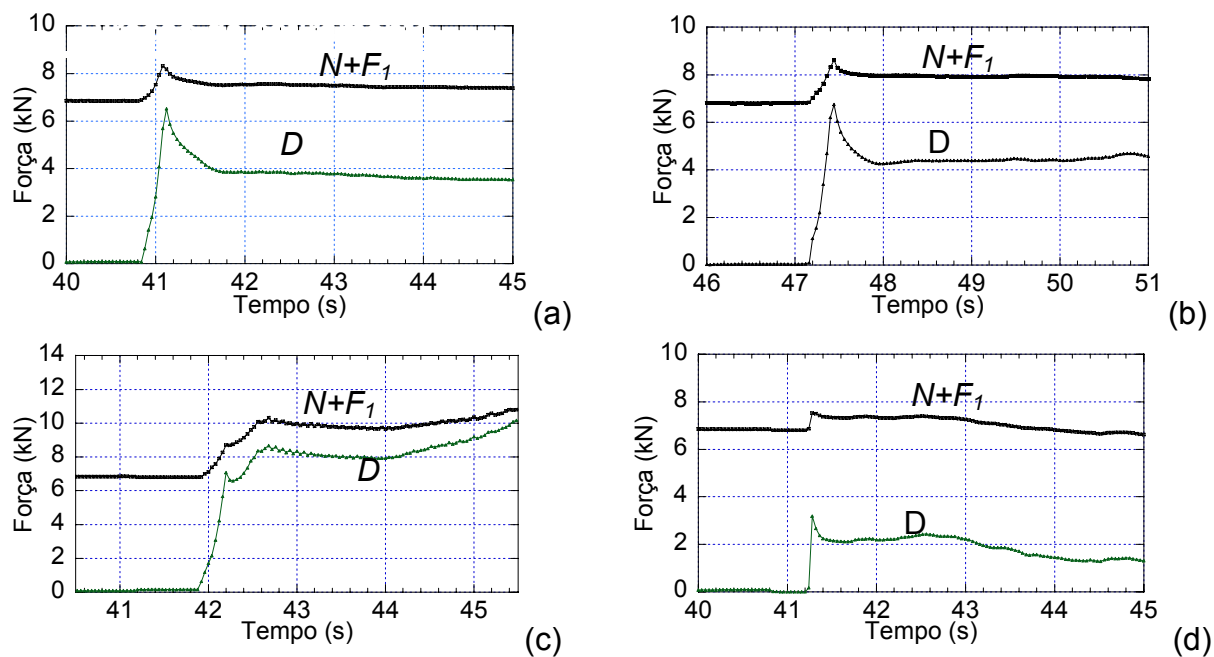


Figura 5. Forças durante o estiramento: (a) ambos os inserts lisos; (b) um inserto ST1; (c) um inserto ST2; (d) um inserto ST3.

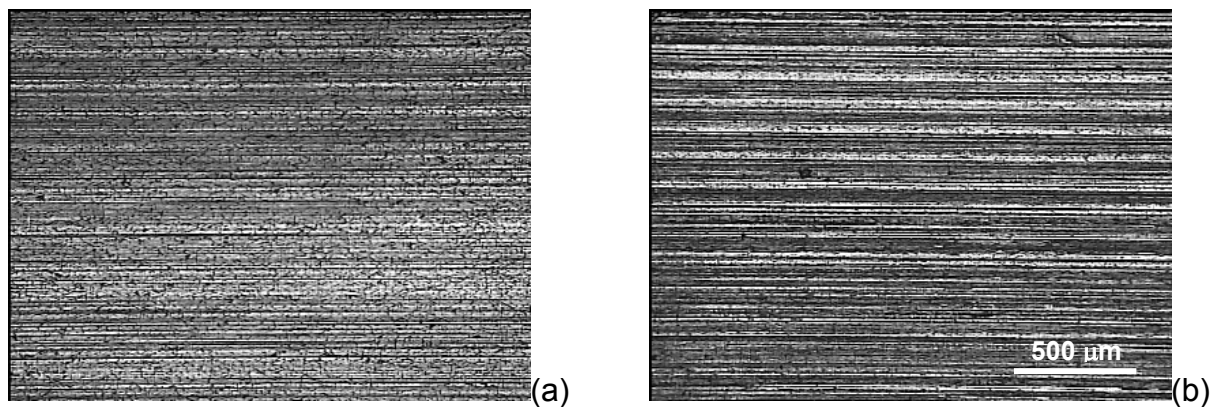


Figura 6. Aspecto das tiras após deformação: (a) Inserto liso; (b) inserto ST2.

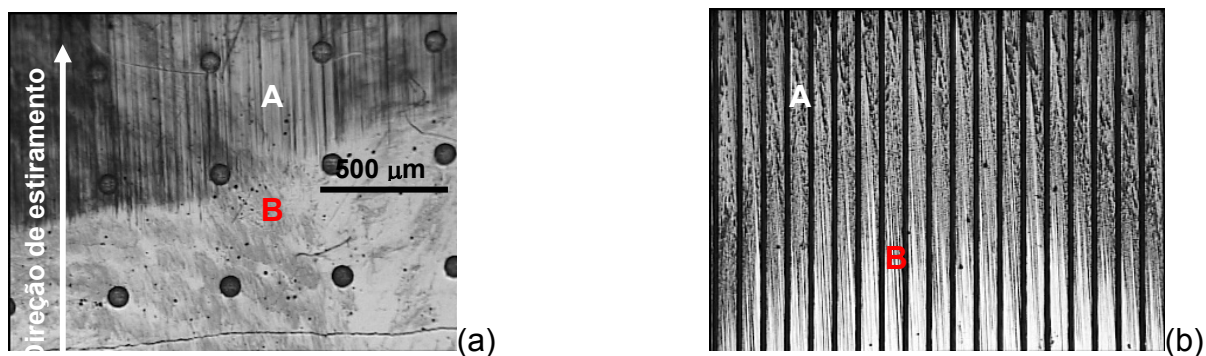


Figura 7. Micrografia dos inserts após os ensaios; **A** é a área de contato e **B** a área fora do contato: (a) ST1; (b) ST2.

DISCUSSÃO

Os sinais de capacitância medidos durante todos os ensaios correspondem a uma situação de contato metálico entre o molde e a peça. Desta forma, a técnica proposta não foi adequada para a avaliação da lubrificação do contato. Resultados similares foram obtidos por Merchant⁽¹⁶⁾ ao medir a resistência elétrica do contato. Mesmo em situações para as quais esperava-se lubrificação PHD, suas medições de resistência do contato sempre evidenciaram algum contato metálico, indicando que a lubrificação de fato estava no limite de uma lubrificação mista, apesar de na maioria do contato haver regiões separadas por um filme lubrificante.

Para analisar-se as tensões e deformações durante os ensaios, um balanço de forças no diagrama mostrado na Figura 4 pode ser feito através da equação $D = (F_1 + F_2) \cos \phi$. Para o teste com os dois insertos lisos, as forças de atrito em ambos os insertos deve ser a mesma. Desta forma, pode-se calcular o valor de F_1 através dos valores medidos da força de estiramento D .

Os coeficientes de atrito (μ) em cada inserto foram calculados por $\frac{D}{N} = \frac{2(\mu + \tan \phi)}{1 - \mu \tan \phi}$

(1) e são mostrados na Figura 9. Para facilitar sua interpretação, o instante no qual o estiramento começou foi redefinido como zero.

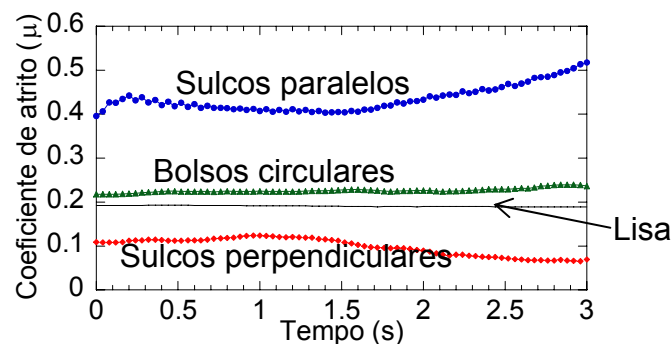


Figura 8. Comparação de μ entre as tiras e os insertos com diferentes geometrias.

O maior coeficiente de atrito do inserto com bolsos circulares em relação ao inserto liso foi atribuído aos seus baixos valores de f e h_1/w . Acredita-se que o volume de lubrificante contido nos bolsos era muito pequeno para influenciar positivamente a lubrificação durante os testes. Pelo contrário, provavelmente a redução da área de contato e a geração de concentrações de tensões em volta dos bolsos causada pela texturização tenha aumentado ligeiramente as tensões no contato. Em outro trabalho, quando superfícies texturizadas com baixos valores de f and h_1/w foram testadas sob condições de lubrificação hidrodinâmica,⁽¹⁴⁾ a texturização também não causou mudanças significativas sobre a lubrificação. Quando sulcos foram orientados perpendicularmente à direção de estiramento, ocorreu significativa redução em μ , o que foi atribuído a uma melhora na lubrificação. A textura neste caso provavelmente agiu como reservatórios de lubrificante, além de contribuir para aumentar a lubrificação MPHD. É importante também salientar que f and h_1/w eram muito maiores que para o inserto ST1. O atrito reduziu continuamente ao longo do teste, sugerindo que o efeito na melhora da lubrificação foi cumulativo. Para sulcos paralelos à direção de estiramento, μ foi muito maior que para os insertos lisos. Também ocorreu um grande aumento na rugosidade superficial da tira, que apresentou severo riscamento, característico de lubrificação limite. Além disso,

houve um aumento de μ ao longo do teste, sugerindo que a texturização reduziu a lubrificação, provavelmente porque ela canaliza o lubrificante para fora do contato. Resultados semelhantes foram obtidos em testes nos quais as tiras eram texturizadas, ao invés dos insertos,⁽⁷⁾ apesar da análise do trabalho restringir-se somente a medições de atrito, sem avaliação das superfícies deformadas. Quando superfícies com altos valores de f and h_1/w foram testadas em testes alternados,⁽¹⁴⁾ resultados semelhantes também foram observados, mas o efeito de canalização do lubrificante para fora do contato somente foi significativo para as maiores pressões de contato testadas. Além disso, deve-se salientar que o efeito positivo da texturização, nos casos em que esse ocorreu, foi muito mais significativo nos presentes ensaios de estiramento que nos ensaios alternados citados. Isto sugere que o efeito da texturização é bem maior em condições envolvendo lubrificação mista e deformação plástica que em situações envolvendo lubrificação hidrodinâmica e deformações elásticas.

CONCLUSÕES

1. O aparato utilizado para medições de capacitância mostrou-se inadequado para medir a espessura do filme lubrificante durante os ensaios de estiramento.

2. Um padrão de texturização composto de bolsos circulares com baixa fração de cobertura e pequena relação entre a profundidade e o diâmetro dos bolsos não resultou em melhora de performance tribológica. O volume de lubrificante dentro dos bolsos foi considerado muito pequeno para influenciar o regime de lubrificação.

3. Padrões de textura com maiores frações de cobertura influenciaram significativamente a força de atrito. Devido à direcionalidade da textura, que era composta de sulcos paralelos, a performance dependeu fortemente da orientação relativa entre a textura e a direção de estiramento.

4. Para sulcos orientados perpendicularmente à direção de estiramento, a força de atrito foi bem menor que para uma superfície lisa. A textura provavelmente resultou num aumento da lubrificação tanto devido à presença de reservatórios de lubrificante quanto ao favorecimento da lubrificação MPHD. A redução de atrito foi acumulativa com o tempo, provavelmente devido a um crescente aumento de lubrificante na interface.

5. Para sulcos orientados ao longo da direção de deformação, o atrito aumentou significativamente. Acredita-se que a lubrificação neste caso foi prejudicada porque os sulcos provavelmente canalizaram o lubrificante para fora do contato. O acabamento superficial da tira também foi negativamente afetado.

REFERENCIAS

1. LE, H. R. and SUTCLIFFE, M. P. F. Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication. **Tribology International**, v. 35, n. p. 123-128, 2002.
2. SCHEY, J. A. **Tribology in Metalworking**. Ohio: ASM, 1983.
3. BECH, J., BAY, N. and ERIKSEN, M. A study of the mechanisms of liquid lubrication in metal forming. **Annals of the CIRP**, v. 47, n. 1, p. 221-226, 1998.
4. AZUSHIMA, A., UDA, M. and KUDO, H. An interpretation of the speed dependence of the coefficient of friction under the micro-PHL condition in sheet drawing. **Annals of the CIRP**, v. 40, n. 1, p. 227-231, 1991.
5. KUDO, H., TSUBOUCHI, M., TAKADA, H. and OKAMURA, K. An investigation into plasto-hydrodynamic lubrication with a cold sheet drawing test. **Annals of the CIRP**, v. n. p. 175-180, 1982.
6. SORENSEN, C. G., BECH, J. I., ANDREASEN, J. L., BAY, N., ENGEL, U. and NEUDECKER, T. A basic study of the influence of surface topography on mechanisms of liquid lubrication in metal forming. **Annals of the CIRP**, v. 48, n. 1, p. 203-208, 1999.
7. STEINHOFF, K., RASP, W. and PAWELSKI, O. Development of deterministic-stochastic surface structures to improve the tribological conditions of sheet forming processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 60, n. p. 355-361, 1996.
8. IKE, H. Properties of metal sheets with 3-D designed surface microgeometry prepared by special rolls. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 60, n. p. 363-368, 1996.
9. SHEU, S. and HECTOR JR., L. G. Tool surface topographies for controlling friction and wear in metal-forming processes. **Transactions of ASME, Journal of Tribology**, v. 120, n. p. 517-527, 1998.
10. SHEU, S. and HECTOR JR., L. G. **Two-scale surface topography design scheme for friction and wear control in forging: theory and experiment**. 1999.
11. AZUSHIMA, A. and KUDO, H. Direct observation of contact behaviour to interpret the pressure dependence of the coefficient of friction in metal forming. **Annals of the CIRP**, v. 44, n. 1, p. 209-212, 1995.
12. WIHLBORG, A. H. **The influence of steel sheet surface topography on friction in stamping**. PhD Thesis, Gotenberg: Gotenberg University, 2000.
13. MIZUNO, T. and OKAMOTO, M. Effects of lubricant viscosity at pressure and sliding velocity on lubricating conditions in the compression-friction test on sheet metals. **ASME Journal of Lubrication Technology**, v. 104, n. 1, p. 53-59, 1982.
14. COSTA, H. L. and HUTCHINGS, I. M. Reciprocating lubricated sliding on textured steel surfaces. **submitted to Tribology International**, v. n. p. 2005.
15. COSTA, H. L. **Modification of surface topography: manufacturing methods and applications**. PhD Thesis, Cambridge: University of Cambridge, 2005.
16. MERCHANT, M. E. **Lubrication Engineering**, v. 6, n. p. 163-167, 1950.