

Avaliação das condições tribológicas em estampagem de chapas através do ensaio de dobramento sob tensão

Evaluation of the tribological conditions in sheet metal forming through bending under tension test

Luis Fernando Folle¹, Lirio Schaeffer²

¹ Mestrado em Design Uniritter – UniRitter - Porto Alegre - RS
e-mail: luis_folle@uniritter.edu.br

² Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS - Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS
e-mail: schaefer@ufrgs.br

RESUMO

A lubrificação em estampagem de peças tem um papel importante no processo de produção, auxiliando na redução do enrugamento, fratura prematura e afinamentos muito localizados da espessura da chapa. Para tal, o lubrificante deve ser capaz de reduzir o atrito a níveis baixos mas não tão baixos a ponto de promover outros tipos de defeitos como o enrugamento da chapa. Uma boa lubrificação também reduz o desgaste prematuro das ferramentas de estampagem que são utilizadas para produção de peças, assim como é essencial para se ter sucesso no processo desenvolvimento de novas peças. Neste trabalho, 4 condições de lubrificações foram avaliadas (3 lubrificantes líquidos e a ausência de lubrificantes) através do ensaio DST (Dobramento Sob Tensão) e ensaio *Swift* (deep drawing test). A atuação benéfica (redução do atrito) ao processo de estampagem, dos lubrificantes, foi testada através da medição da força máxima de embutimento no ensaio *Swift*, da força em cada lado da chapa, torque e força vertical no pino do ensaio DST. O material de estudo foi o alumínio comercialmente puro AA1100. As conclusões indicam que o lubrificante que minimiza o atrito sempre fica evidente, não importando o tipo do ensaio a que a chapa foi submetida, porém a medição do torque facilita a identificação do mesmo. É observado também que a medição da força vertical gerada no pino é menor quanto mais ineficiente for o lubrificante.

Palavras-chave: coeficiente de atrito, estampagem de chapas, ensaio de dobramento sob tensão, avaliação tribológica.

ABSTRACT

The lubrication in sheet metal forming plays an important role in the production process, helping to reduce the wrinkling, premature fracture and very localized thinning of the sheet thickness. To this end, the lubricant should be able to reduce friction at low levels but not so low that promote other kinds of defects such as wrinkling of the sheet. A good lubrication also reduces premature wear of the stamping tools used to produce parts, as it is essential for success in the process of developing new parts. In this work, four lubrication conditions were evaluated (3 liquid lubricants and the absence of lubricants) by the bending under tension test (BUT) and deep drawing test. The performance of the lubricants were evaluated by measuring the maximum force of deep drawing test, the forces on each side of the sheet, torque and vertical force on the pin of the BUT test. The material used was the commercially pure aluminum AISI AA1100 alloy. The results indicate that the best lubricant always show the best performance no matter what type of test, but the measurement of torque facilitates the identification of it. It was also observed that the measurement of vertical force generated at the pin is smaller the more inefficient is the lubricant.

Keywords: coefficient of friction, sheet metal forming, bending under tension test, tribological evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Tribologia é a área do conhecimento da ciência e engenharia que estuda os fenômenos que ocorrem entre superfícies em contato com movimento relativo. Na área de fabricação de produtos ou componentes, é comum haver contato com movimento relativo entre a peça a ser produzida e a ferramenta ao qual está executando o processo. No entanto, o contato entre esses dois materiais pode dar origem a defeitos quando o atrito não for bem controlado. Nesse sentido, alguns esforços vêm sendo executado para se aumentar o entendimento da atuação do atrito em estampagem (área ao qual esse estudo se aplica). Muitos métodos de determinação do coeficiente de atrito têm sido estudados e o mais usado atualmente é o método do dobramento sob tensão (DST). Esse método consiste em tencionar uma tira de chapa em um pino de raio R sob certo ângulo e faz-la deslizar para se medir as forças atuantes na chapa. LEE et al. [1] fizeram uso desse ensaio para estudar a correlação entre a rugosidade superficial e a espessura do filme de lubrificante com relação ao atrito. CERETTI et al. [2] verificaram a variação do atrito com relação a velocidade, pressão e temperatura. Eles usam uma versão modificada do ensaio DST.

FRATINI et al. [3] analisou o efeito de alguns acabamentos da superfície do pino juntamente com a aplicação de lubrificantes distintos. Ele constatou que uma superfície cromada só não basta para minimizar o atrito, é necessário se aplicar um lubrificante, que no caso de menor atrito foi de teflon. Outras informações importantes foram obtidas por HAO et al. [4] que variou a velocidade de embutimento, o lubrificante empregado e o material do pino com relação à deformação da chapa. De forma semelhante, LOVELL et al. [5] analisou o coeficiente de atrito em relação ao uso de óleos que não agredem ao meio ambiente e constatou que o óleo de canola com uma mistura de ácido bórico apresenta bons resultados de atrito. No trabalho de ANDREASEN et al. [6], foi constatado que o torque medido no pino durante o ensaio é mais sensível ao atrito que as forças de atuação e de contra-tensão.

Em relação a esse tema, o presente estudo tem por objetivo avaliar algumas condições tribológicas através da medição de força e torque no ensaio DST e da medição de força do punção em um teste de embutimento. O coeficiente de atrito também é determinado para cada lubrificante segundo as equações propostas por diversos autores e a diferença entre os valores são comparados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição do ensaio *Swift*

Como o objetivo desse estudo é avaliar a performance de lubrificantes na estampagem de chapas através do ensaios de dobramento sob tensão, foi feita uma primeira avaliação dos lubrificantes através do ensaios Swift para ser ter uma ideia do desempenho prévio deles. Esse teste foi baseado no trabalho desenvolvido por KIM et al. [7]. Para tanto foi estampada uma geometria simples e medido a força e deslocamento do punção como forma de comparação com os resultados da simulação. Basicamente o conjunto de ferramentas utilizado para o ensaio Swift é composto por um punção cilíndrico, prensa chapas e matriz. As dimensões são mostradas na Figura 1. Podem-se utilizar corpos de prova (CP's) cilíndricos de vários diâmetros que são restringidos pelo prensa chapas. O punção é então forçado contra os CP's provocando o embutimento, isto é, a chapa é forçada para dentro da matriz até que o material seja todo embutido.

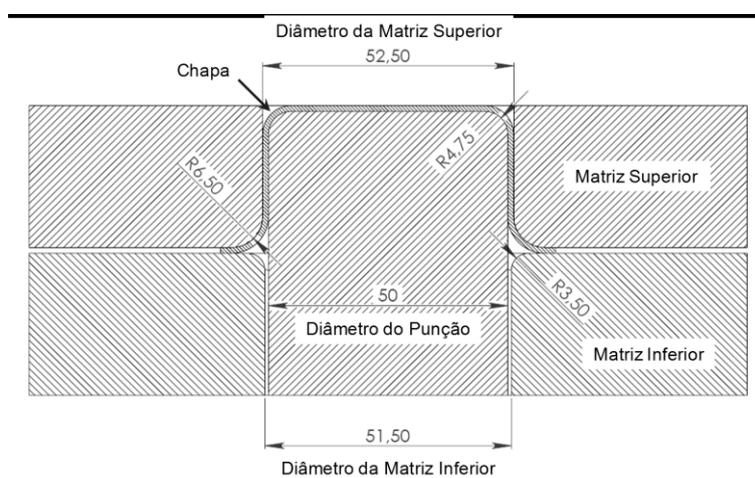


Figura 1: Vista em corte do ferramental do ensaio prático (dimensões em mm).

O perfil de rugosidade superficial Ra e Rmax das matrizes e do material da chapa, usados nesse estudo, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Perfil de rugosidades superficial das matrizes e do material da chapa em μm .

RUGOSIDADES	RA	RMAX
Matriz superior	0,20	2,36
Matriz inferior	0,30	2,38
Punção	0,11	1,46
Chapa base	0,36	3,79

Os lubrificantes utilizados para os ensaios práticos são de uso comercial e de base mineral e foram classificados usando a seguinte nomenclatura: lubrificantes F, L e S. A condição de ausência de lubrificação também foi testada.

A metodologia de aplicação dos lubrificantes consistiu em passar em abundância nos dois lados da geratriz, ou seja, na chapa a ser estampada e não passar nem nas matrizes nem no punção. Nesse caso, como há lubrificação em excesso na chapa, essa se espalha para o punção e as ferramentas, não necessitando assim lubrificá-la. Para a remoção do lubrificante e posterior aplicação de outro, foi usado Acetona, que foi passada também em excesso tanto nas matrizes como no punção para se assegurar uma limpeza e remoção completa do lubrificante e assim não se ter uma mistura entre eles. A metodologia de aplicação dos lubrificantes na tira de chapa submetida ao ensaio DST seguiu os mesmos princípios do usado no ensaio de estampagem *Swift*.

As propriedades do material alumínio AA1100 ou alumínio comercialmente puro foram medidas e estão descritas na tabela 2. O material das ferramentas testadas durante esse estudo foram o AISI 4340.

Tabela 2: Propriedades usadas para definir o material da geratriz.

PROPRIEDADES DO MATERIAL		
Densidade	2,7	g/cm ³
Modulo de Young	69000	MPa
Coefficiente de Poisson	0,33	
Coefficiente de encruamento (n)	0,09	
Coefficiente de resistência (C)	196	MPa
Anisotropia (0°)	0,82	
Anisotropia (45°)	0,76	
Anisotropia (90°)	0,81	
Deformação de escoamento	0,2	%
Tensão de escoamento	124	MPa

2.2 Ensaio de Dobramento sob Tensão

O ensaio de dobramento sob tensão (DST – do inglês *BUT – Bending Under Tension Test*) consiste em dobrar uma tira de chapa através de um pino de raio pré-determinado e sobre esse pino fazer a chapa deslizar. Para isso, há a aplicação de uma força em uma das extremidades da chapa para que haja o movimento relativo entre a chapa e o pino. Na outra extremidade é aplicada uma força contrária ao movimento com o objetivo de tensionar a chapa e poder-se variar a pressão de contato incidente sobre o pino. Na Figura 2, há um desenho esquemático desse ensaio. A força que gera o movimento é chamada de força de atuação (F2) e a força que é aplicada no sentido contrário é chamada de força de contra-tensão (F1). O pino de raio r tem a função de simular o atrito na passagem do raio da matriz de estampagem, por ser nessa região que as tensões são maiores.

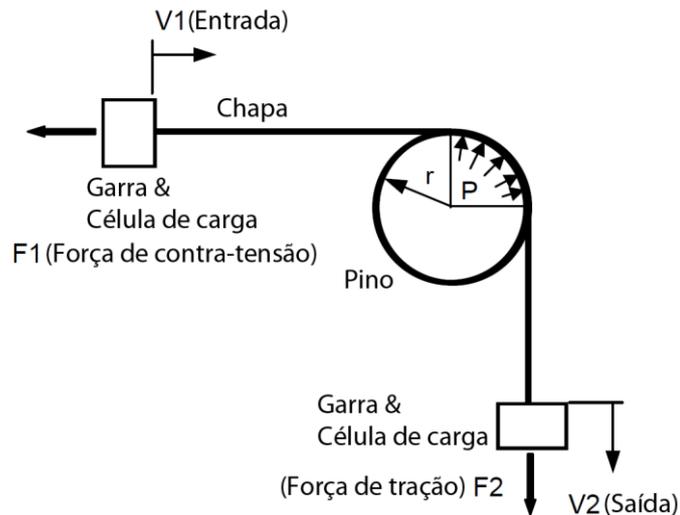


Figura 2: Figura esquemática do ensaio DST. Fonte: adaptado de [8].

Nesse ensaio, existem duas forças necessárias para fazer com que a chapa deslize sobre o pino, uma é a força de atrito entre as superfícies de contato e a outra é a força necessária para realizar o dobramento e desdobramento da chapa. Como o propósito do ensaio é de se conhecer a força de atrito entre as superfícies de contato, ele é executado em duas etapas. Na primeira, o pino por onde a chapa passa pode rotacionar livremente através do seu eixo, fazendo com que não haja um movimento relativo na interface pino/chapa. Isso gera uma condição de atrito mínimo, sendo que a força necessária para fazer a chapa se movimentar é devido exclusivamente à força de dobramento e desdobramento da chapa. Na segunda etapa, esse mesmo pino é fixado no seu eixo impedindo qualquer movimento. A força necessária para fazer a chapa se movimentar é composta então pela força de dobra mais a força de atrito. Na Figura, 3 há um esquema das duas etapas. Assim, pode-se descontar a força de dobra, medida na primeira etapa, da segunda e obter-se como resultado apenas a força de atrito.

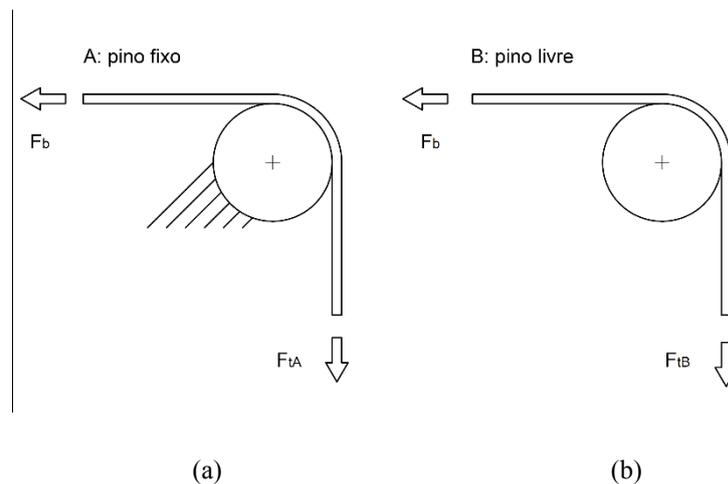


Figura 3: Etapas do ensaio DST. Em (a) o ensaio é feito com pino fixo e em (b) com o pino móvel. Fonte: adaptado de [6].

A máquina usada para medição de atrito, Figura 4 e Figura 5, foi projetada com objetivo de medir e avaliar o coeficiente de atrito em estampagem e é baseada no ensaio DST. Para tal, existem dois cilindros hidráulicos que tem a função de fazer uma tira de chapa deslizar sobre um pino. Esses cilindros hidráulicos foram montados em uma estrutura triangular que tem como objetivo a diminuição da influência da vibração dando mais estabilidade para transmitir as forças durante o ensaio. O cilindro hidráulico, item 1 da Figura 4, tem a função de tracionar a tira de chapa que está presa ao outro cilindro hidráulico, item 2 da Figura 4, tem a

função de fazer uma força de resistência oposta para gerar o nível de sollicitação desejado na chapa.

No vértice superior da máquina há um pino (item 3 da Figura 5) que pode ser apoiado com ou sem rolamentos. Sobre esse pino passa a tira de chapa com ângulo de dobra de 90°.

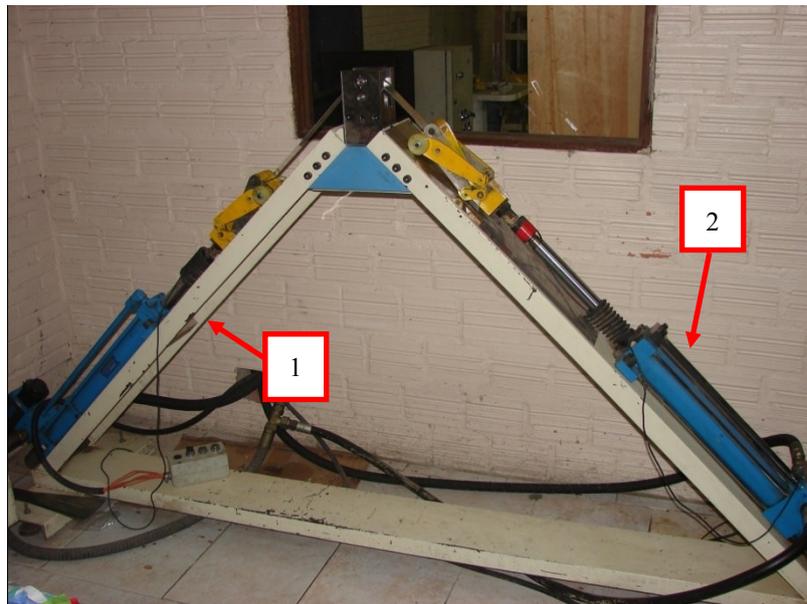


Figura 4: Máquina usada para o ensaio DST.

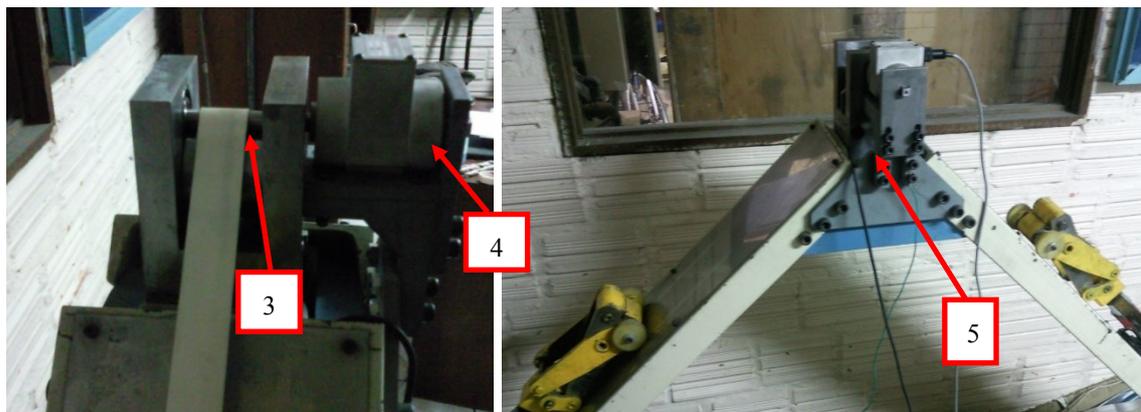


Figura 5: Máquina usada para a realização do ensaio DST.

Na Figura 5, é mostrada a máquina de avaliação de atrito através de ensaio DST. No item 1 da Figura 4, há uma célula de carga acoplada ao cilindro hidráulico, o qual tem o papel de medir a força de atuação na chapa. No item 2 da Figura 4, há outra célula de carga que tem a função de medir a força de contra-tensão atuante na chapa. Ambas as células de carga tem capacidade de 50 kN. Acoplado ao pino superior por onde a chapa passa há uma célula de carga (item 5 da Figura 5) que tem a função de medir a força vertical que incide sobre o pino. Por fim, também acoplado ao pino por onde passa a chapa há um sensor de torque (item 4 da Figura 5) com capacidade de 50 Nm, que tem por objetivo medir o torque ao qual o pino é submetido quando a chapa passa por ele.

Há dois tipos de ensaios que a máquina pode executar. No primeiro, o pino por onde passa a chapa é deixado livre, ou seja, pode girar livremente. Esse ensaio tem por objetivo medir apenas a força de dobra, pois se considera um atrito muito pequeno, ou praticamente nulo entre a chapa e o pino quando ele está livre. No segundo ensaio, o pino é fixado, ou seja, ele não pode girar em torno do seu eixo. Nesse ensaio, considera-se que haverá a atuação da força de dobra adicionada das forças de atrito entre a chapa e o pino. Os dois tipos de testes serão avaliados nesse estudo.

3. RESULTADOS DISCUSSÕES

3.1 Avaliação dos lubrificantes através das curvas de força vs. deslocamento

Os gráficos resultantes das medições da força no punção pelo seu deslocamento são mostrados na figura 6. Para cada gráfico da figura 6 é obtida uma força que corresponde ao valor máximo que cada curva atinge e que ocorre com aproximadamente 15mm de deslocamento do punção. Após esse máximo, a força medida no punção decai até zero correspondendo ao final da estampagem onde se obtém a forma final desejada da peça.

Os valores das forças máximas obtidas pelos dados que geram as curvas para os lubrificantes F, L, S e sem lubrificação foram 19.8 kN, 19.2 kN, 17.3 kN e 22.9 kN, respectivamente.

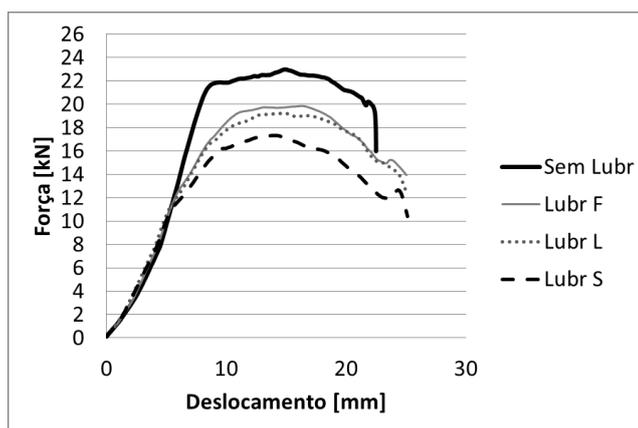


Figura 6: Gráficos de força por deslocamento medido para cada lubrificante.

3.2 Avaliação dos lubrificantes através das medições das forças em cada lado da chapa do ensaio DST

Os resultados para as medições das forças em cada lado da chapa versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante e a ausência de lubrificação são mostrados na Figura 7. A primeira observação é referente aos dois picos máximos no atrito seco. Isso se deve ao fato que o alumínio apresenta um fenômeno chamado de aderência (adesão) de material, ou seja, uma “colagem” ou “micro soldagem” de alumínio sobre o pino por onde a chapa passa. Esse fenômeno ocorre porque há picos das asperezas de ambas as superfícies que estão limpas e suficientemente próximas para que haja uma atração entre os átomos dos dois materiais, promovendo essa adesão. Isso forma um acúmulo de material que em um dado momento acaba por se desprender da chapa, fazendo com que haja uma diminuição na força medida. Esse fenômeno só é registrado no lado da chapa que está sendo puxada, ou seja, depois que a chapa passou pelo pino. A Figura 9 mostra uma visualização ampliada das principais regiões da chapa ensaiada sem lubrificação. Os dois círculos amarelos correspondem ao material que se acumulou na chapa devido à aderência do alumínio sobre o pino. É possível observar nessas regiões que houve uma planificação das asperezas, que ocorre porque em há um cisalhamento de material na zona aderida, como se o material tivesse sido cortado por uma ferramenta de corte. A imagem em 3D da Figura 9 mostra esse efeito. Outra observação importante na Figura 7 é que os lubrificantes mantiveram uma força estável, sem picos, durante o ensaio, impedindo o fenômeno da aderência de material.

Na Figura 7 é importante observar que as força de atuação e contra-tensão estão se sobrepondo em vários lugares, o que dificulta a identificação do melhor lubrificante. Entretanto, o que se deve considerar para isso é na verdade o distanciamento entre as curvas, que corresponde a subtrair uma curva da outra. Quanto maior o distanciamento entre elas, maior será a força necessária para fazer a chapa deslizar pelo pino e, portanto, maior será a força de atrito gerada (Figura 8). A força de atrito mínima, que corresponde ao atrito de rolamento, ocorre quando o pino está livre para girar e o distanciamento entre as curvas para esse caso foi o mínimo registrado durante o ensaio.

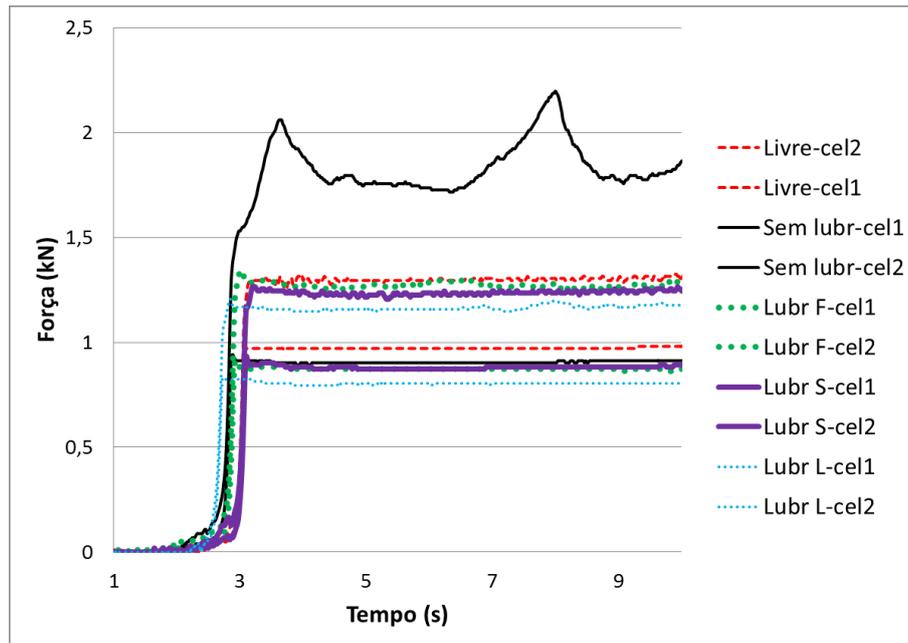


Figura 7: Forças em cada lado da tira versus tempo para cada lubrificante juntamente com o caso sem lubrificante.

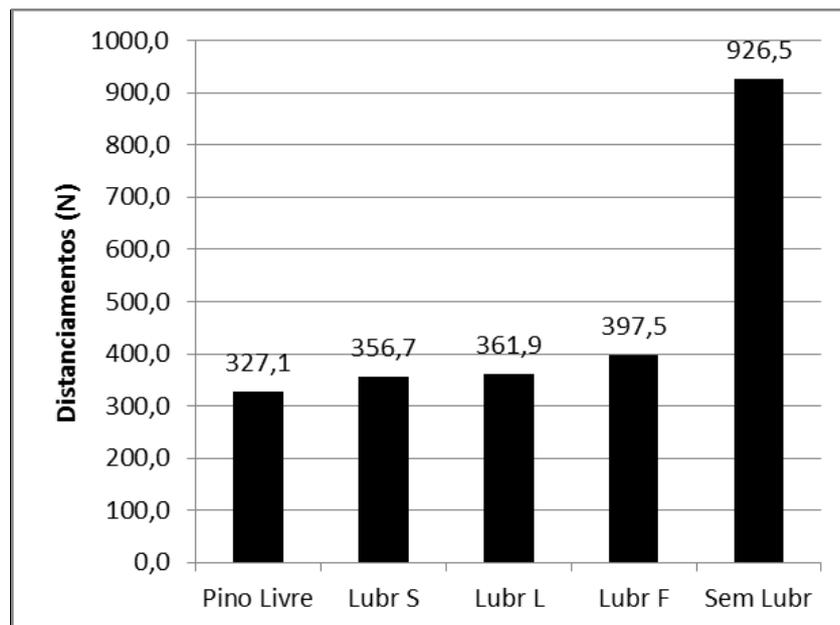


Figura 8: Distanciamento entre as curvas de força em cada lado da chapa no ensaio DST.

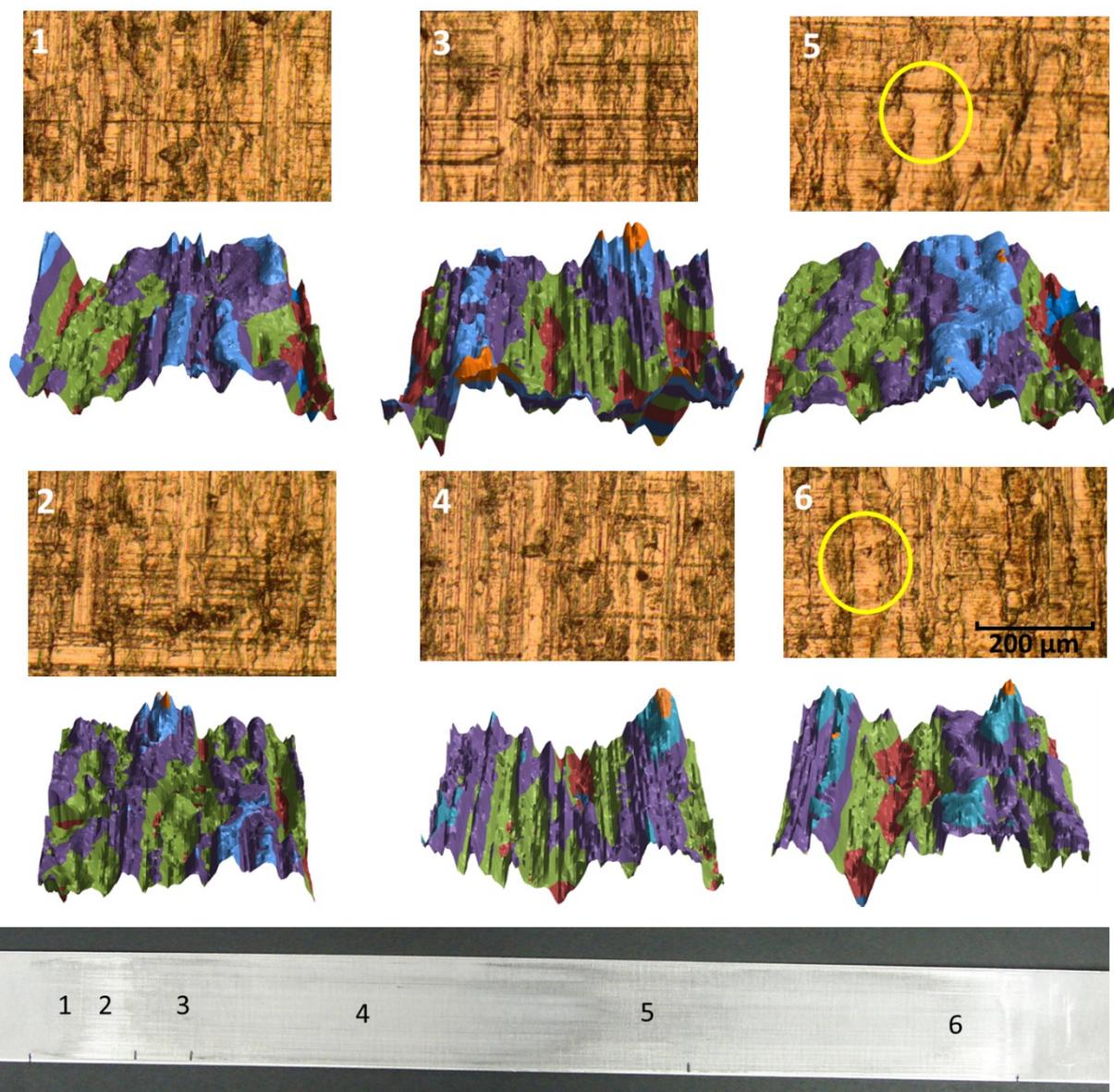


Figura 9: Visualização microscópica de cada região da chapa ensaiada sem lubrificação (ampliação de 100 vezes).

3.3 Avaliação dos lubrificantes através das medições do torque no pino do ensaio DST

O resultado para as medições do torque versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante mais a ausência de lubrificante é mostrado na Figura 10. Como no caso da medição das forças em cada lado da chapa, o torque para ausência de lubrificante gera o mesmo perfil de curva nas mesmas regiões da chapa. Isso mostra que a medição do torque está de acordo com os resultados das forças em cada lado da chapa. Outra observação importante é que a medição do torque favorece a avaliação dos lubrificantes pois diminui a quantidade de medidas e deixa mais evidente a performance do lubrificante pois as curvas de torque ficam espaçadas entre si e não sobrepostas como na medição da força em cada lado da chapa. Isso pode ser visto na Figura 11 onde são mostrados os resultados medidos de força na chapa e torque no pino apenas para os lubrificantes na região onde as forças e os torques se estabilizam.

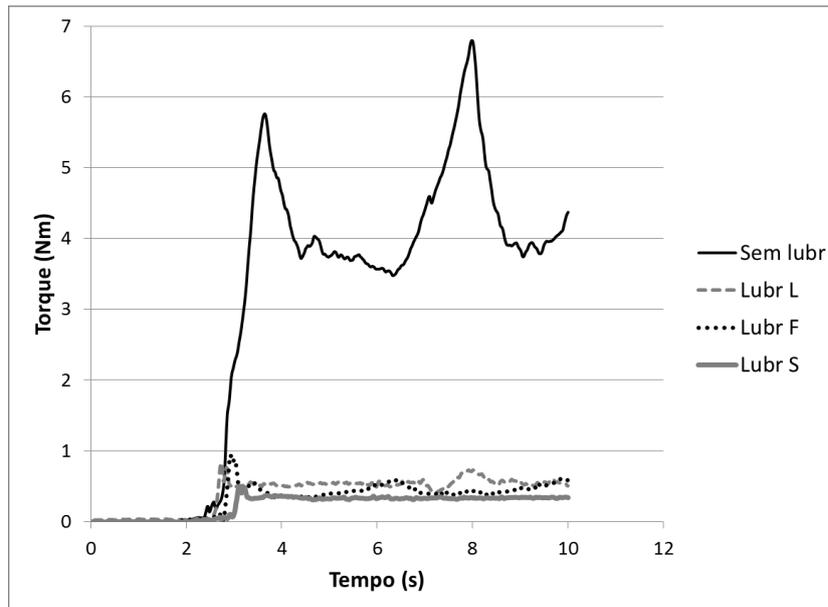


Figura 10: Torque no pino versus tempo para cada lubrificante mais o caso sem lubrificante.

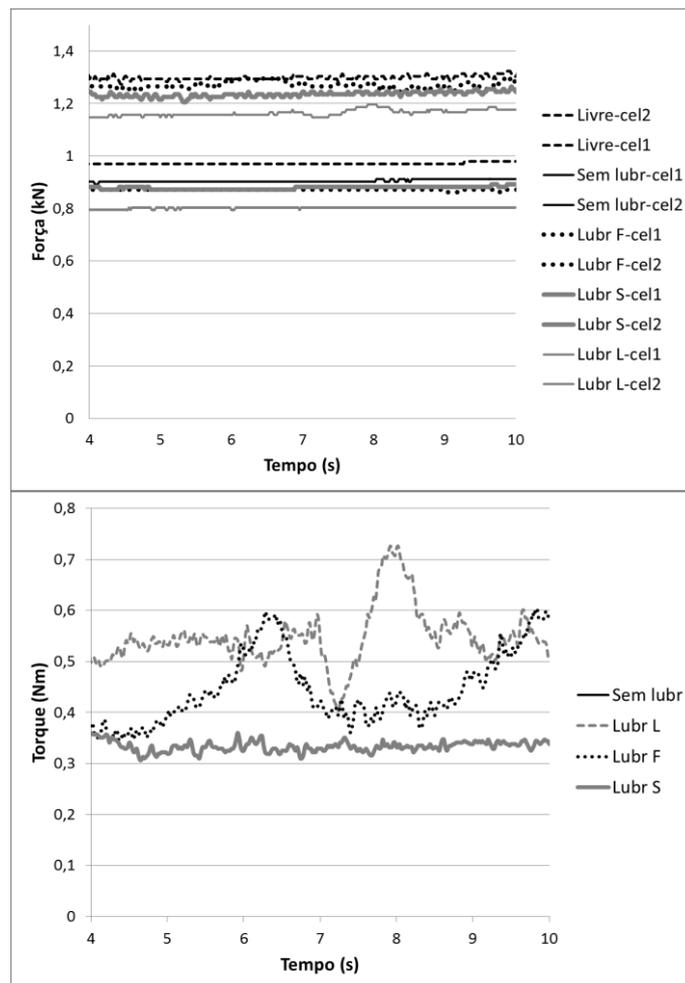


Figura 11: Comparação entre os resultados das forças na chapa e do torque no pino.

3.4 Avaliação dos lubrificantes através das medições das forças verticais no pino do ensaio DST

O resultado para as medições da força vertical no pino versus o tempo de duração do ensaio para cada lubrificante mais o caso sem lubrificante é mostrado na Figura 12. Ao contrário dos outros ensaios, os resultados das medições da força vertical no pino foram exatamente o oposto dos resultados anteriores. A medição da força vertical do caso sem lubrificante foi a menor entre todas as medidas enquanto que os lubrificantes de melhor desempenho tiveram valores altos de força. A explicação para esse fenômeno está baseado em dois fatos. O primeiro deles é que estudos anteriores [8-11] mostram que durante o ensaio DST sempre ocorre dois picos de pressão no pino que correspondem à entrada e saída da chapa na região do pino. Esses picos são mais ou menos intensos dependendo da condição de lubrificação aplicada. Foi mostrado [12], através de simulação com o ABAQUS que um maior atrito gera picos mais elevado e localizados na região do dobramento da chapa. Isso faz com que a força normal media seja mais baixa. A Figura 13 mostra esse fenômeno.

O outro fato, que foi observado pelo estudo de AZUSHIMA e KUDO [13] é que sempre existem regiões da chapa que não entram em contato com as matrizes. Essas regiões, quando na existência de lubrificantes aprisionam o mesmo, não deixando o lubrificante escapar e por isso promovendo uma pressão hidrostática que é menor que a pressão atuante no contato metal-metal. A Figura 14 mostra uma representação esquemática desse fenômeno. Quando o lubrificante apresenta bom desempenho, ele tem a capacidade de equalizar as pressões nessa região, promovendo, dessa maneira uma elevação da força normal medida nessa região. Como na ausência de lubrificante, caso sem lubrificante, não há essa pressão hidrostática (“q” na Figura 14), as regiões de contato metal-metal (“ p_{re} ” na Figura 14) serão as únicas contabilizadas na força normal, abaixo a mesma em relação as situações lubrificadas. O sub índice “re”, nas letras da Figura 14 são derivadas de uma área de contato real, indicadas por “ A_{re} ”.

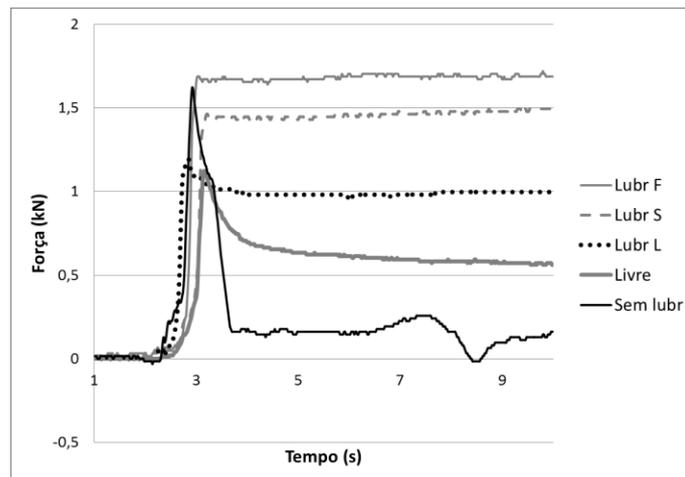


Figura 12: Força vertical no pino versus tempo para cada lubrificante mais o caso sem lubrificante.

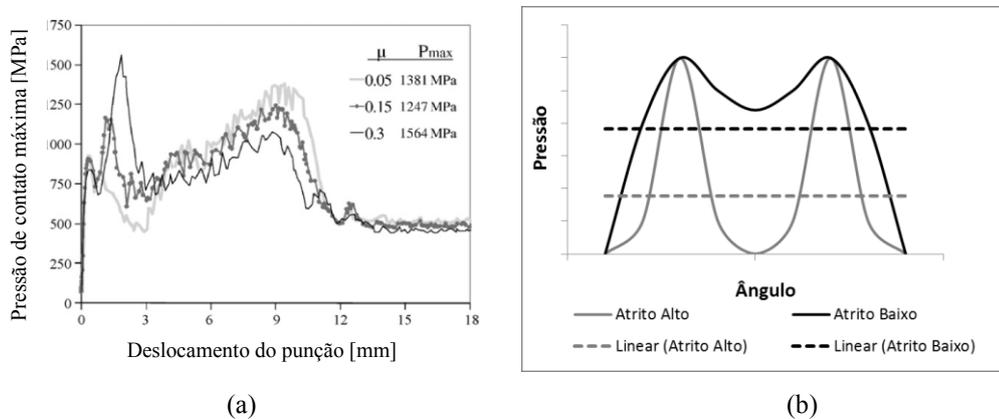


Figura 13: (a) resultados da simulação no ABAQUS obtido por PEREIRA *et al.* 2008 [12] para a pressão de contato para três atritos diferente. (b) representação esquemática da força media para um atrito alto e um baixo.

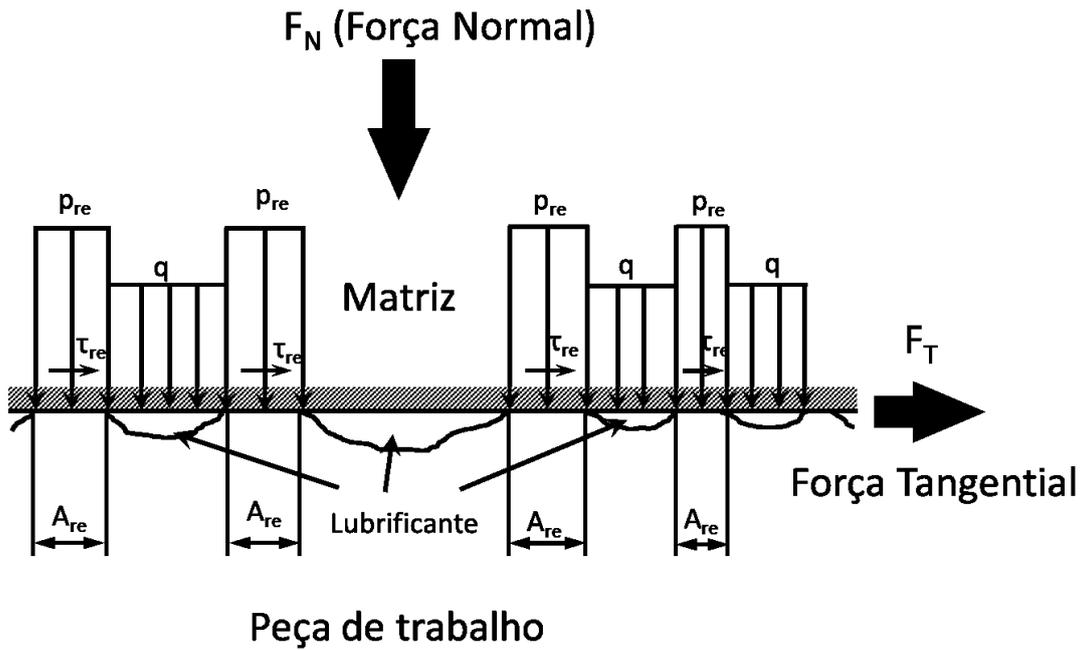


Figura 14: Representação esquemática do contato entre a chapa e a matriz para situações de lubrificação de contorno. Fonte: AZUSHIMA e KUDO [13].

Outra observação importante na Figura 13 é que a chapa ensaiada com o pino livre apresentou um abaixamento na força vertical ao longo do ensaio. Isso se deve ao fato que a chapa apresenta um grau de liberdade a mais que nos outros casos, isso faz com que a chapa apresente um alongamento uniforme e provoque uma redução na força. Isso é mostrado na tabela Tabela 3, onde é possível observar que a chapa no ensaio com pino livre apresentou o segundo maior alongamento. A chapa ensaiada sem lubrificante apresentou o maior alongamento pois provavelmente foi influenciada por deformações localizadas muito altas que no total acabam gerando maior alongamento.

Tabela 3: Comprimento inicial e final da chapa para cada condição de lubrificação aplicada.

LUB.	TAMANHO INICIAL	TAMANHO FINAL
Seco	800	814,5
Livre	800	809,4
Lub. L	800	809,3
Lub. F	800	808,6
Lub. S	800	808,6

3.5 Medição dos coeficientes de atrito gerados pelos lubrificantes através das medições do ensaio DST

Assim como os ensaios DST tem variações na sua forma básica, as equações que se usa para determinar o atrito também têm diferenças segundo a forma construtiva do sistema que é usado ou segundo alguns autores que propuseram formas distintas de cálculo. A primeira aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito foi baseada nas equações para o cálculo de polias. Nesse caso tem-se que o atrito na interface pino/chapa é dado por um logaritmo natural da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão como pode ser visto na equação (1).

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (1)$$

Sendo que F_1 é a força de atuação e F_2 é a força de contra-tensão. O termo $2/\pi$ é referente ao ângulo de 90 graus entre as forças F_1 e F_2 . Porém, conforme descrito anteriormente, é necessário realizar dois ensai-

os para que se possa descontar a atuação da força de dobramento e desdobramento da chapa. Por isso, na equação (1) foi adicionado um termo que se refere a força de dobra da chapa. Esse termo é chamado de força de dobra F_b da equação (2) e é obtido pela subtração das forças de atuação e contra-tensão durante o ensaio com o pino livre, F_1^* e F_2^* da equação (3), respectivamente.

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

$$F_b = F_1^* - F_2^* \quad (3)$$

Como pode ser visto nas equações (1) e (2), a geometria do ensaio, raio do pino e espessura da chapa, não tem nenhuma contribuição no atrito. Por isso, foi proposta outra forma de medição do coeficiente de atrito onde o raio do pino e a espessura da chapa são levados em consideração, equação (4). Essa equação foi usada por diversos trabalhos [14-17].

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left[\frac{r+0.5t}{r} \right] \ln \left[\frac{F_1 - F_b}{F_2} \right] \quad (4)$$

Pode-se notar que todas as equações mencionadas até aqui são compostas por um logaritmo natural da razão entre duas ou mais forças. Porém, foi proposto outra forma de se calcular o atrito, que pode ser visto na equação (5). Essa equação foi descrita e usada por outros autores [3, 18].

$$\mu = \frac{2 \cdot (F_1 - F_2 - F_b)}{\Theta \cdot (F_1 + F_2)} \quad (5)$$

Onde F_1 é a força de atuação, F_2 é a força de contra-tensão, F_b é a força de dobra e Θ é o ângulo de dobramento da chapa.

Como foi mencionado anteriormente, [9, 6] o torque no pino do ensaio DST foi usado com o objetivo de eliminar a segunda etapa do ensaio com o pino livre. A equação (6), foi concebida [9] para que o coeficiente de atrito fosse calculado com a medição de um torque.

$$\mu = \frac{\frac{F_0 D}{R}}{\sqrt{F_P^2 + F_{Bp}^2 - \left(\frac{F_0 D}{R}\right)^2}} \quad (6)$$

Onde o termo $F_0 D/R$ representa o torque no pino, F_P é a força de atuação e F_{Bp} é a força de contra-tensão.

A equação concebida por ANDREASEN et al. [6] em seu trabalho foi concebida para se soubesse a tensão de atrito que ocorre na interface pino/chapa e é dada pela equação (7).

$$\tau = \frac{2T}{\pi W R^2} \quad (7)$$

Onde τ é a tensão de atrito, T representa o torque do pino, W a largura da tira de chapa que passa sobre o pino e R é o raio do pino.

Pode ser visto que para o cálculo do coeficiente de atrito foram propostas várias formas, porém para o cálculo da pressão de contato entre a chapa e o pino, todos os autores usam a mesma equação (8).

$$p = \frac{F_1 + F_2}{2WR} \quad (8)$$

Onde p é a pressão de contato, F_1 é a força de atuação, F_2 é a força de contra-tensão, W a largura da chapa que passa sobre o pino e R é o raio do pino.

A relação entre a equação (7) e (8) gera o coeficiente de atrito, equação (9).

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{4T}{\pi R (F_1 + F_2)} \quad (9)$$

Com os resultados das medições de força em cada lado da chapa e torque no ensaio DST foi possível fazer o cálculo dos coeficientes de atrito para cada formulação em cada condição de lubrificação. A Tabela 4 mostra os resultados para cada situação. Para o cálculo do coeficiente de atrito do caso sem lubrificante foi

feita uma média das curvas após o primeiro pico máximo de força e torque.

Tabela 4: Coeficientes de atrito calculados segundo as 6 equações diferentes

EQUAÇÕES	EQUAÇÃO 1	EQUAÇÃO 2	EQUAÇÃO 4	EQUAÇÃO 5	EQUAÇÃO 9	EQUAÇÃO 6
Lub. L	0,237	0,027	0,029	0,023	0,054	0,060
Lub. F	0,239	0,049	0,053	0,042	0,041	0,044
Lub. S	0,217	0,021	0,023	0,018	0,031	0,034
SECO	0,449	0,323	0,348	0,279	0,304	0,338

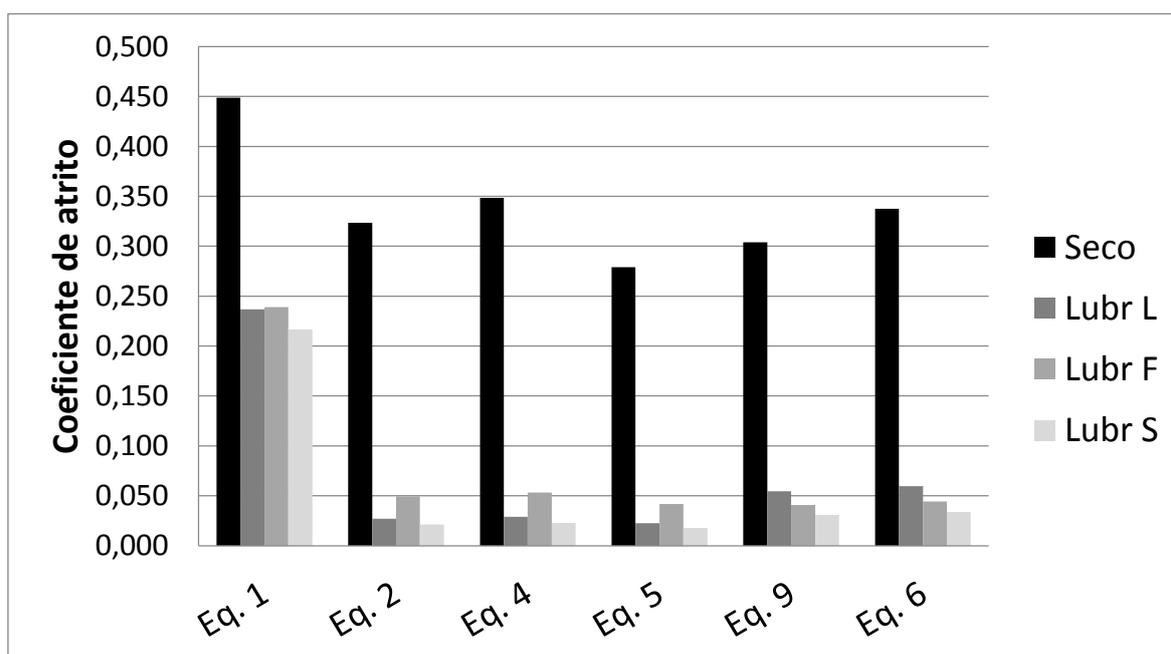


Figura 15: Comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação.

A Tabela 4 mostra que há uma considerável diferença no valor calculado do coeficiente de atrito dependendo do tipo de equação usada. A equação (1) mostra um valor de atrito que não é correspondente com os demais valores por não remover a força necessária para dobrar a chapa. Para as equações (2), (4) e (5), houve diferença apenas para o lubrificante F e para o caso sem lubrificante, os outros apresentaram valores de atrito semelhantes. Já para as equações (6) e (9) houve uma diferença visível pelo fato de essas equações considerarem o torque no pino. Nesse caso o torque no pino funciona como se fosse um filtro que deixa a atuação dos lubrificante mais visível se comparado com os outros métodos de cálculo que levam em consideração apenas as forças em cada lado da chapa. A Figura 15 mostra uma comparação entre os coeficientes de atrito calculados para cada equação e cada lubrificante, onde é possível observar de forma mais nítida o resultado que cada equação gerou no cálculo do coeficiente de atrito.

4. CONCLUSÕES

A atuação de 3 lubrificantes mais o caso sem lubrificante foi avaliado usando-se a medição da força no punção no ensaio de embutimento, a medição das forças nos dois lados da chapa, a medição do torque e a força vertical no pino no ensaio DST. O coeficiente de atrito também foi calculado usando-se as diversas equações propostas. Os resultados observados são:

Para o caso sem lubrificante as medições indicaram ser a pior condição como é de se esperar. Na medição de força e torque houveram dois picos que corresponderam ao acúmulo de material caracterizado como adesão e um subsequente desprendimento de material da chapa.

O lubrificante S teve o melhor desempenho seguido do F e o L teve o pior desempenho.

A medição do torque se mostrou eficiente para prever o melhor lubrificante e mais simples de ensaiar que o ensaio com medição da força em cada lado da chapa que por sua vez não conseguiu definir bem a atuação dos lubrificantes.

Na medição da força vertical no pino houve uma inversão de posições, o caso sem lubrificante gerou uma menor força enquanto que o melhor lubrificante gerou uma alta força. Isso se deve ao fato que uma boa lubrificação gerar forças hidrostáticas que previnem tensões localizadas muito altas.

No cálculo dos coeficientes de atrito, constatou-se que as maiores diferenças ocorreram quando o torque é contabilizado na equação. As equações 2, 3 e 4 apresentaram coeficientes de atrito praticamente iguais entre si. O mesmo aconteceu para as equações 5 e 6 entre si. Porém as equações 5 e 6 apresentaram valores diferentes das 2, 3 e 4, com exceção do lubrificante F que ficou com o mesmo valor em todos os cálculos. O cálculo com as equações das polias gerou resultados diferentes por contabilizar a força de dobramento da chapa, por isso não devem ser considerada para fins de cálculo do coeficiente de atrito.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo financiamento das bolsas estudantis.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] LEE, B. H., KEUM, Y. T., WAGONER, R. H., "Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 130, pp. 60-63, Dec 20, 2002.
- [2] CERETTI, E., FIORENTINO, A., GIARDINI, C., "Process parameters influence on friction coefficient in sheet forming operations," *The international journal of material forming*, v. 1, n. 1, pp. 1219-1222, January, 2008, 2008.
- [3] FRATINI, L., CASTO, S. L., VALVO, E. L., "A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 172, n. 1, pp. 16-21, Feb 20, 2006.
- [4] HAO, S., KLAMECKI, B. E., RAMALINGAM, S., "Friction measurement apparatus for sheet metal forming," *Wear*, v. 224, n. 1, pp. 1-7, Jan, 1999.
- [5] LOVELL, M., HIGGS, C. F., DESHMUKH, P., *et al.*, "Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, n. 1-3, pp. 87-90, Jul 3, 2006.
- [6] ANDREASEN, J. L., OLSSON, D. D., CHODNIKIEWICZ, K., BAY, N., "Bending under tension test with direct friction measurement," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, v. 220, n. 1, pp. 73-80, Jan, 2006.
- [7] KIM, H., SUNG, J. H., SIVAKUMAR, R., *et al.*, "Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, n. 14, pp. 2120-2132, Nov, 2007.
- [8] KIM, Y. S., JAIN, M. K., METZGER, D. R., "A Finite Element Study of Capstan Friction Test". pp. 2264-2269, Jun, 2004
- [9] SNIKERS, R. J. J. M., SMITS, H. A. A., "Experimental set-up and data processing of the radial strip-drawing friction test," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 66, n. 1-3, pp. 216-223, Apr, 1997.
- [10] PEREIRA, M. P., DUNCAN, J. L., YAN, W., ROLFE, B. F., "Contact pressure evolution at the die radius in sheet metal stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, n. 7, pp. 3532-3541, 2009.
- [11] COUBROUGH, G. J., ALINGER, M. J., VAN TYNE, C. J., "Angle of contact between sheet and die during stretch-bend deformation as determined on the bending-under-tension friction test system", *Journal of Materials Processing Technology*, v. 130-131, pp. 69-75, 2002.
- [12] PEREIRA, M. P., YAN, W., ROLFE, B. F., "Contact pressure evolution and its relation to wear in sheet metal forming," *Wear*, v. 265, n. 11-12, pp. 1687-1699, 2008.
- [13] AZUSHIMA, A., KUDO, H., "Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 44, n. 1, pp. 209-212, 1995.

- [14] WIHLBORG, A., GUNNARSSON, L., "A frictional study of uncoated EBT steel sheets in a bending under tension friction test," *Wear*, v. 237, n. 1, pp. 129-136, Jan, 2000.
- [15] JONASSON, M., WIHLBORG, A., GUNNARSSON, L., "Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 38, n. 5-6, pp. 459-467, May-Jun, 1998.
- [16] NANAYAKKARA, N. K. B. M. P., KELLY, G., HODGSON, P., "Application of bending under tension test to determine the effect of tool radius and the contact pressure on the coefficient of friction in sheet metal forming," *Materials forum*, v. 29, pp. 114 - 118, 2005.
- [17] HAN, S. S., "Influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming," *Journal of Materials Processing Technology*, v. 63, n. 1-3, pp. 129-133, Jan, 1997.
- [18] SAHA, P. K., WILSON, W. R. D., TIMSIT, R. S., "Influence of surface topography on the frictional characteristics of 3104 aluminum alloy sheet," *Wear*, v. 197, n. 1-2, pp. 123-129, Sep, 1996.