

# O EFEITO DO ATRITO NA TREFILAÇÃO DE ARAMES METÁLICOS<sup>1</sup>

Antonio de Pádua Lima Filho<sup>2</sup>

Emílio Pedan<sup>3</sup>

Tiago Filipe Soares da Cunha<sup>3</sup>

João Batista Campos Silva<sup>4</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a variação da tensão/força de trefilação de arames de alumínio e cobre, com e sem lubrificação usando um equipamento construído para a trefilação de arames metálicos. Durante o ensaio, os arames metálicos foram progressivamente trefilados em estágios de um diâmetro inicial de 4,0mm para 1,3mm. Para cada estiramento do arame, dez fieiras de carboneto de tungstênio foram usadas e escolhidas para produzir reduções de área sucessivas de aproximadamente 20%, resultando numa deformação verdadeira total de aproximadamente 225%. O efeito da lubrificação e sua falta na força de estiramento foram medidos usando grafite coloidal para comparação. O lubrificante foi aplicado na superfície do arame e também sobre as zonas de cada fieira. A grafite coloidal facilitou a mínima força de estiramento pela formação de um cone antiatrito entre o arame e a zona de conformação da fieira. A ação do lubrificante também reduziu a taxa de carregamento para alcançar a força de trefilação necessária. O acabamento superficial do arame foi melhor para o ensaio sem lubrificação. Entretanto, a dificuldade de trefilar o arame nesta condição foi aumentada devido à fratura prematura do arame parando o processamento várias vezes. A velocidade de estiramento do arame foi de  $7,8 \times 10^{-3}$  m/s. Os resultados experimentais foram comparados com modelos teóricos. Os coeficientes de atrito para cada condição foram também calculados utilizando diferentes modelos. Medições na célula de carga (500kgf  $\approx$  4,9kN de capacidade) confirmou que a força necessária para trefilar arame de maior diâmetro é maior do que para diâmetros menores.

**Palavras-chave:** Trefilação; Coeficiente de atrito; Lubrificação; Arames de cobre e alumínio.

## THE EFFECT OF FRICTION ON DRAWING OF METALLIC WIRES

### Abstract

The aim of this work is to study the variation of drawing force/stress for aluminium and copper alloy wires, with and without lubricant using equipment built for drawing of metallic wires. During tests, metallic wires were drawn in stages from an initial 4.0mm diameter down to 1.3mm. For each pulling wire, ten tungsten carbide dies were used and chosen to produce successive area reductions of approximately 20%, resulting in a total true deformation of approximately 225%. The effect of lubrication and lack of it on the wire pulling force was measured and used colloidal graphite as the lubricant. This was applied to the wire surface and also on the wall of the wire drawing die. Colloidal graphite facilitated minimum wire pulling force by forming an interfacial antifriction cone of lubricant between the wire and the forming zone of the wire drawing die. The lubricant action also enabled the drawing force to be reached more quickly. Without lubricant the finished wire surface was more easily tested but it was also much more difficult to draw the wire successfully due to the increased occurrence of premature fracture of the wire. This stopped processing several times. The pulling wire velocity was  $7.8 \times 10^{-3}$  m/s. The experimental results were compared with theoretical models. The coefficients of friction for each condition were computed utilizing different models. Load cell measurements (500kgf  $\approx$  4.9kN capacity) confirmed that the force needed to draw larger diameter wire is greater than for smaller diameter wire.

**Key words:** Drawing; Friction coefficient; Lubrication; Aluminium and copper wires.

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

<sup>2</sup> UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Eng. Mecânica - Eng. Metalúrgico pela EEIMVR-UFF; Mestre em Ciência pelo ITA; Dr. pela University of Sheffield – Inglaterra.

<sup>3</sup> UNESP – Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica.

<sup>4</sup> UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. de Eng. Mecânica - Eng. Mecânico pela UFU; Mestre em Ciência pelo ITA; Doutor em Engenharia Mecânica pela UNICAMP.

## INTRODUÇÃO

A lubrificação e o atrito são uns dos principais fatores em estudos nos processos de conformação plástica dos metais. O atrito é causado pela resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato direto. Nos processos de conformação, o atrito provoca deformações plásticas excessivas, aquecimento e desgaste prematuro do ferramental e microdefeitos resultando na fratura do material. Como resultado, ocorre perda de eficiência devido à interrupção do processo, desgaste do ferramental e solicitação maior de potência do equipamento empregado.

A determinação dos esforços é vital no processo de trefilação e outros processos de conformação plástica dos metais e depende de variáveis tais como: geometria da ferramenta, lubrificação, temperatura e velocidade de processamento. Na trefilação, deformação plástica a frio, o material vai sendo encruado pelo aumento de densidade de discordâncias e assim a sua tensão de escoamento aumenta. Durante a deformação plástica a frio de metais dúcteis, a quantidade de microvazios vai aumentando devido a dificuldade de novas discordâncias geradas sofrerem deslizamento.<sup>(1)</sup> Os microvazios podem agrupar e degradar as propriedades mecânicas do material levando a falha catastrófica pela concentração de tensão no corpo do material.

O estado de tensão cilíndrico atua no corpo do arame em trefilação. Duas tensões principais de compressão iguais ( $\sigma_2 = \sigma_3 < 0$ ) e uma de tração ( $\sigma_1 > 0$ ) provoca um aumento da tensão cisalhante que é responsável pela deformação plástica dos metais para uma tensão de estiramento do arame abaixo de sua tensão de escoamento.<sup>(1)</sup>

A velocidade na trefilação varia de 1 a 2,5m/s em máquinas de redução única (trefilação de bancada – sarilho de estirar arames grosso ou puxados num dispositivo linear) e utiliza sebo como lubrificante. Velocidade de até 25m/s é obtida em máquinas de trefilação em série (trefilação por via úmida). Neste caso, as fiéis são imersas num fluido lubrificante. As fiéis são feitas geralmente de carbeto de tungstênio, *ASM Handbook, vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, 1990.

O atrito na trefilação é estudado através de modelos experimentais que visam realizar ensaios simplificados para obter-se uma idéia de como a lubrificação influencia nos esforços necessários para a realização do processo.

Por exemplo, experimentos realizados por Bech, Bay e Eriken<sup>(2)</sup> mostram o efeito dos parâmetros: viscosidade do lubrificante, velocidade de trefilação, grau de redução, tensão a ré, expoente de encruamento e coeficiente de atrito sobre a força de trefilação de tiras de ligas de alumínio.

Su<sup>(3)</sup> mostra que a lubrificação é altamente dependente das condições superficiais do material através do efeito das reações eletroquímicas do arame de cobre com o lubrificante por emulsão de ácido graxo sobre a camada de óxido do arame. Ele constatou que a redução do atrito detectado para vários potenciais depende da composição química do lubrificante.

Defeitos de porosidade devido à nucleação de micro-vazios gerados pelo encruamento excessivo do material variando o ângulo da matriz, lubrificante, velocidade de deformação e trincas tipo *chevron* (marcas em forma de V) tem sido modelados respectivamente por Lee e HaHm<sup>(4)</sup> e Komori.<sup>(5)</sup>

Obi e Oyinlola<sup>(6)</sup> usaram diferentes lubrificantes baseados em óleos gordurosos, variando o grau de redução e o ângulo das feiras para prever os valores do coeficiente de atrito ocorrendo na trefilação de arames de aço e cobre.

A determinação dos esforços é vital no processo de trefilação e outros processos de conformação plástica dos metais e depende de variáveis tais como: geometria da ferramenta, lubrificação, temperatura e velocidade de processamento. Os métodos de análises nos processos de conformação plástica dos metais em ordem crescente de complexidade são: 1. método da energia de deformação uniforme; 2. método do elemento; 3. teoria do campo da linha de deslizamento; 4. soluções baseadas no limite superior e inferior ; e 5. métodos de elementos finitos.<sup>(1)</sup> Equações 1 e 2 mostram respectivamente o método da energia de deformação uniforme e o método do elemento utilizados neste trabalho:<sup>(1)</sup>

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A_f} = C \cdot \bar{\sigma} \ln \left( \frac{D_0}{D_f} \right)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_t = \phi \bar{\sigma} \frac{1+B}{B} \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right], B = \mu \cot \alpha. \quad (2)$$

$\sigma_t$ ,  $F_t$ ,  $A_f$  são respectivamente a tensão, força e área do material trefilado.  $D_0$  e  $D_f$  são os diâmetros inicial e final do arame.  $C \approx 1,5$  é um constante devido ao trabalho para superar o atrito na interface metal/feira. O trabalho redundante é dado por  $\phi \cong 1,2$ .

A magnitude da tensão de fluxo média  $\bar{\sigma}$  pode ser obtida através dos critérios de escoamento.<sup>(1)</sup> Kapakjian<sup>(7)</sup> assume o valor de  $\bar{\sigma} = \frac{k \varepsilon^n}{n+1}$  onde  $k$ ,  $n$  e  $\varepsilon$  são respectivamente o coeficiente de resistência, de encruamento e a deformação verdadeira,  $\mu$  é o coeficiente de atrito e  $\alpha$  é a metade do ângulo do cone de trabalho da feira.

A tensão de trefilação relacionando a tensão de fluxo do material, o atrito e a geometria da feira, foi descrita por Su<sup>(3)</sup> em seu trabalho como:

$$\sigma_t = \phi \bar{\sigma} (1 + \mu \cot \alpha) \ln \left( \frac{D_0}{D_f} \right). \quad (3)$$

Esta equação é mais simples do que a Equação 2 para estimar o coeficiente de atrito na trefilação de arames.

O objetivo deste trabalho foi determinar a força de trefilação para dois tipos de arames de mesma estrutura cristalina (cúbica de face centrada), mas com diferente energia de defeito de empilhamento (EDE), comparar a força/tensão de trefilação sem e com lubrificante, e calcular os coeficientes de atrito para cada redução aplicada. Os arames utilizados foram os de alumínio (200 erg cm<sup>-2</sup> de EDE) e cobre (80 erg cm<sup>-2</sup> de EDE) para esta pesquisa.<sup>(1)</sup> O lubrificante empregado foi à base de grafite coloidal. Método da energia de deformação uniforme foi usado para estimar a força/tensão de trefilação e comparar com os resultados experimentais.

## MATERIAL E MÉTODOS

Arames de alumínio 1350 H19 e cobre encruado (ASTM B1) AWG 6 (4,0mm) de diâmetro inicial foram preparados para ser trefilados a uma velocidade constante de  $7,8 \times 10^{-3}$  m/s, com e sem lubrificação até o diâmetro final de 1,3mm através de feiras feitas de carboneto de tungstênio encapsulada em aço ABNT 1040, Figura 1 e 2. Estas feiras foram fabricadas por uma empresa que fornece feiras para a indústria de trefilação. Estes arames são utilizados para transportar energia elétrica, *ASM Handbook, vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, 1990. O lubrificante empregado foi o Dycote DR 178 a base de grafite coloidal (produto FOSECO) aplicado sobre o arame e nas feiras com auxílio de um pincel.

O arame teve sua extremidade apontada por limagem de modo que pudesse passar pela fieira e ser preso pela garra da máquina, Figura 3. Figura 4 mostra o aparato experimental e a arquitetura do sistema de aquisição de sinais e dados empregados (condicionador digital de sinais modelo TMDE e um osciloscópio de memória TEKTRONIX TDS 210). Um microcomputador 133MHz Pentium IBM com 48Mb de RAM, através do software Wavestar, captura o sinal armazenado no osciloscópio e o perfil da força de trefilação é obtido. Um motor trifásico (3/4hp; 898,5 rpm) impulsiona um redutor (15,5rpm). Lima Filho<sup>(8)</sup> mostra a montagem deste equipamento.

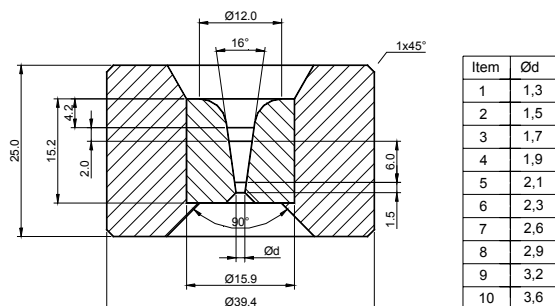


Figura 1. Geometria das feiras.



Figura 2. Fotografias das feiras empregadas.

Este sistema possibilitou o monitoramento contínuo da força de tração do arame através de uma célula de carga de 500kgf ( $F(N) = 0,4826V$ ) posicionada no cabeçote de tração da máquina de trefilação. O grau de redução em área foi aproximadamente 20% aplicado em cada fieira.



**Figura 3.** Arame submetido ao processo de limagem.



**Figura 4.** Aparato experimental.

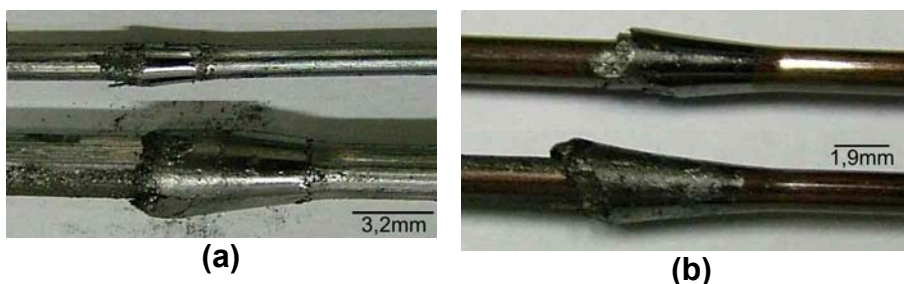
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ação do Lubrificante pela Formação de uma Camada Isolante entre os Arames e as Fieiras

O excesso de lubrificante foi observado pela quantidade de grafite deixada no portamatriz. À medida que o arame encrua causado pela diminuição do seu diâmetro, faz com que o excesso de lubrificante fica retido pela fieira. Uma distribuição uniforme do filme lubrificante sobre o material trefilado forma a cada passada do processo (Figura 5).

Um cone de grafite compacto aderido aos arames formou-se ao longo da zona de conformação da fieira minimizando o desprendimento de partículas sólidas dos materiais envolvidos (Figura 5).

A formação do cone pode ser devido a uma distribuição de pressão de compressão interfacial aumentando a viscosidade do lubrificante, retendo uma quantidade de grafite sólida entre o arame e a zona de trabalho da fieira. Este isolamento entre o arame e a matriz, tende a aumentar a vida útil da matriz. Então, a grafite coloidal teve sua atuação eficiente como lubrificante.



**Figura 5.** Exemplos de cone formado de grafite isolando o arame de alumínio (a); e cobre (b) em contato com a zona de deformação da fieira.

### Efeito Metalúrgico sobre o Transporte do Lubrificante

Materiais com maior energia de defeito de empilhamento (EDE) como é o caso do alumínio comparado com o cobre, uma recuperação dinâmica mais intensa ocorre pela formação de estruturas celulares minimizando a pressão de interface metal/fieira. Assim, o lubrificante, tenderia escapar com maior facilidade em direção a força de trefilação (Figura 5). Uma outra possibilidade seria a maior aderência da

grafite coloidal sobre a superfície do arame de alumínio. O excesso de lubrificante, sobre a superfície do arame de alumínio, poderia ser explicado também pela formação de microcanais formados pela quebra da camada de óxido superficial de alumina durante a deformação plástica facilitando o escape do lubrificante.

Por outro lado, arames/fieiras que não foram lubrificadas sofreram desgaste pela retirada de partículas dos materiais da fieira e em maior quantidade naturalmente do material em processamento. Isto pode ocasionar defeitos superficiais dos arames, superaquecimento, desgaste prematuro da fieira e exigência maior de potência para a conformação plástica. Quebras sucessivas do material ocorreu trefilando arames nessa condição, interrompendo a trefilação várias vezes.

### **Características dos Arames Trefilados**

A Figura 6 mostra as reduções feitas nos arames trefilados de alumínio e cobre com um diâmetro inicial de 4,0mm até 1,3mm, efetuando uma deformação verdadeira de aproximadamente 225%. Para obter este grau de deformação, foi necessário usar dez fieiras (Figura 2).

Como anteriormente discutido, pode-se observar que a grafite coloidal aderiu sobre a superfície dos arames, indicando uma boa adesão e assim um bom efeito lubrificante. A qualidade da superfície e a espessura do filme lubrificante, disposto sobre os arames trefilados para diversos diâmetros, podem ser avaliadas através do uso do microscópio eletrônico de varredura. Assunto a ser posteriormente investigado.

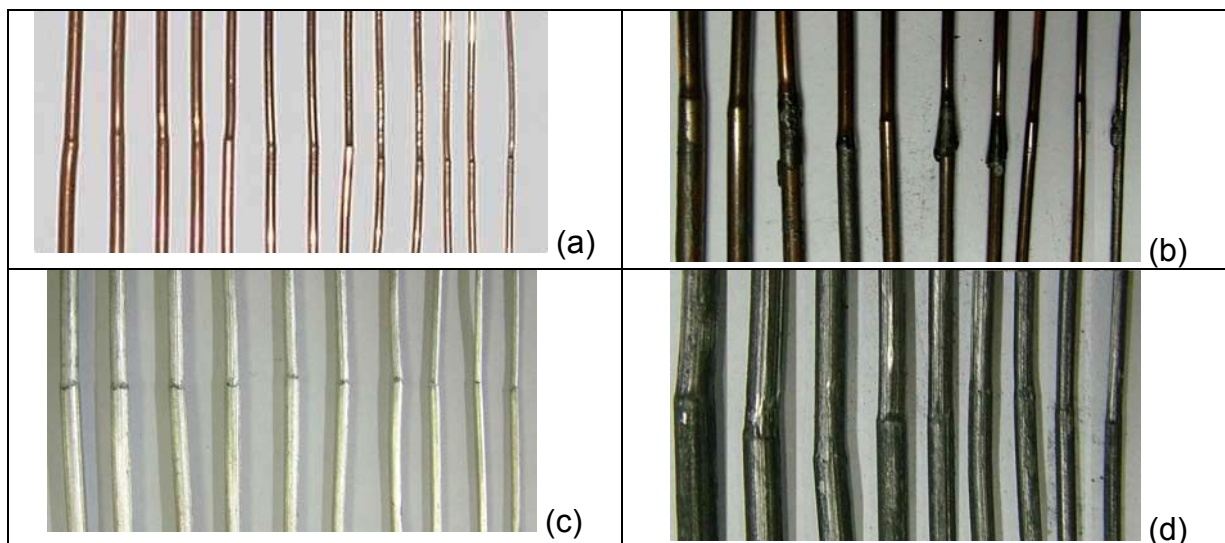
### **Perfis das curvas força e tensão de trefilação obtidas experimentalmente e calculada pela Equação 1**

Os valores teóricos da tensão/força de trefilação para cada diâmetro da fieira foram calculados pela Equação 1 e comparados com os dados experimentais obtidos (Figura 7). As tensões médias ( $\bar{\sigma}$ ) para os diâmetros dos arames de cobre e alumínio foram obtidas do *ASM Handbook, vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, 1990, considerando a resistência a tração desses materiais em relação a bitola do arame em questão. As forças e tensões sem lubrificação são maiores do que com lubrificação. Os dados estimados pela Equação 1 estão abaixo dos valores medidos pela célula de carga. A grafite coloidal mostrou ser um bom lubrificante como mostrado anteriormente.

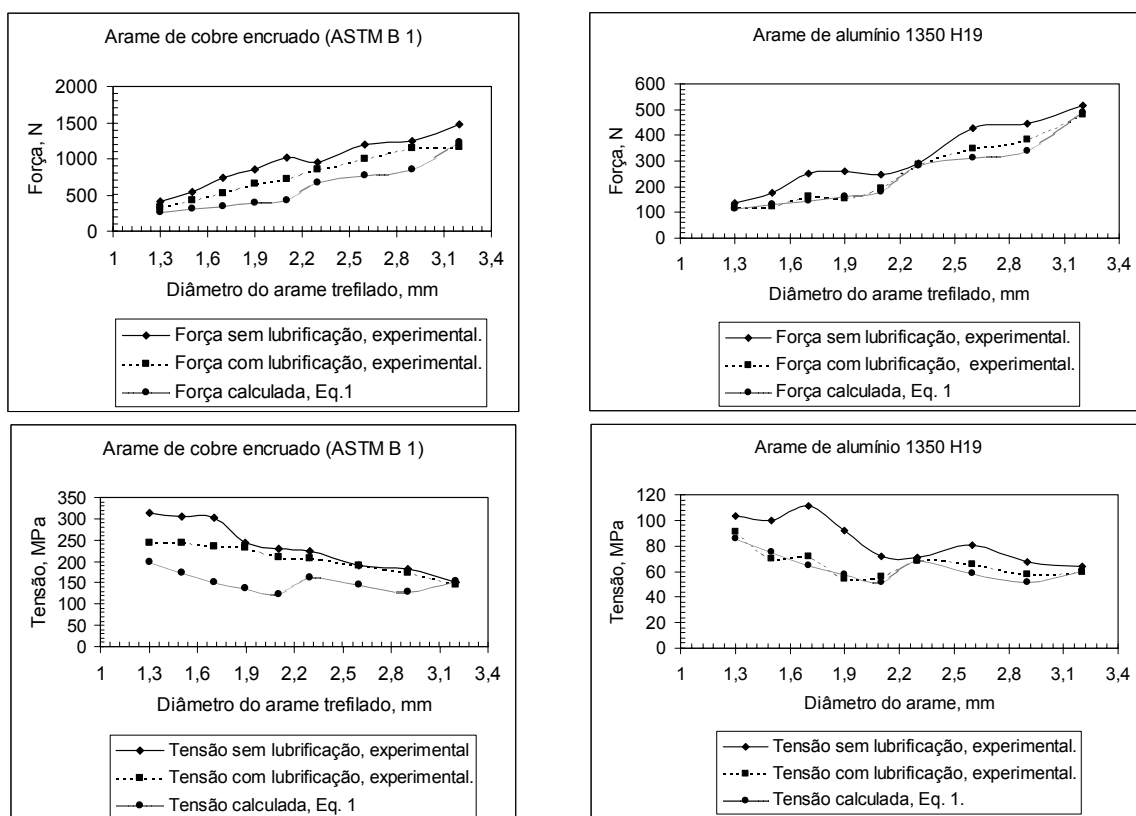
Nota-se que à medida que o diâmetro do arame trefilado é diminuído para qualquer situação, menor é a força de trefilação gasta no processo. Em geral, a tensão de trefilação aumenta devido à redução de área. Entretanto, os perfis das curvas obtidas são ondulados, lembrando um comportamento senoidal mais para a liga de alumínio 1350 H19 do que a do cobre.

Essas ondulações podem estar relacionadas com o efeito da liberação e emperramento das discordâncias. Assim, devido ao encruamento, as discordâncias são ancoradas e somente liberadas após a passagem para a outra fieira de menor diâmetro, diminuindo dessa forma a força de trefilação. O arame encrua e novamente vai se processando dessa forma.

A curva do cobre tem um perfil ondular discreto, pois este material tem menor energia de defeito de empilhamento, formando subgrãos maldefinidos características de um movimento conservativo das discordâncias, em vez de estruturas celulares (subgrãos quase perfeitos) como no caso do arame de alumínio onde as discordâncias sofrem deslizamento cruzado.<sup>(1)</sup>



**Figura 6.** Variação no diâmetro dos arames trefilados de cobre (a e b) e alumínio (c e d). Para todas as fotografias, o primeiro arame a esquerda tem diâmetro inicial de 4mm.



**Figura 7.** Força e tensão de trefilação dos arames obtidas experimentalmente e comparadas com os valores calculados pela Equação 1.

### Oscilações na Força e Tensão de Trefilação

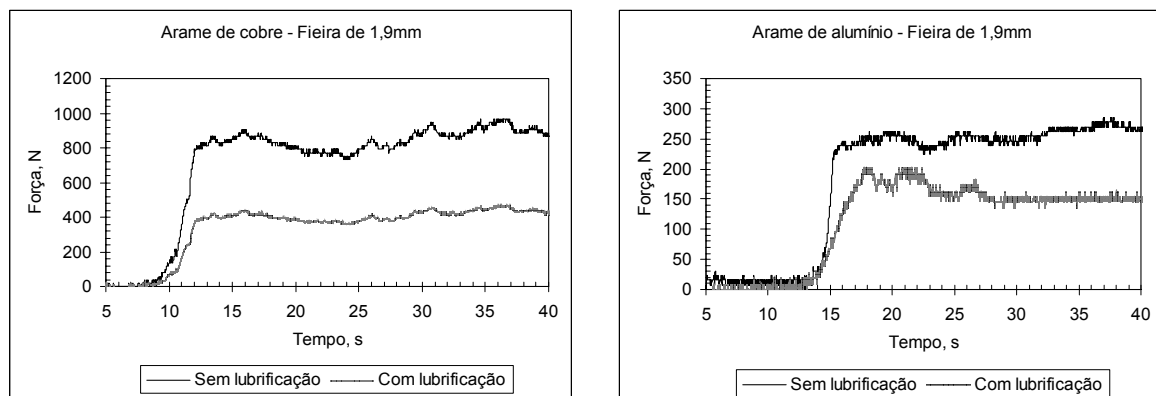
Oscilações na força de trefilação foram observadas nas condições com e sem lubrificação (Figura 8). Estas oscilações foram constatadas por Bech, Bay e Eriksen<sup>(2)</sup> e Su<sup>(3)</sup> estudando respectivamente o efeito da lubrificação no arame de cobre e tiras de alumínio utilizando lubrificantes líquidos. Eles descreveram essas oscilações correspondentes a variação do coeficiente de atrito durante o processamento. Maior



o valor do coeficiente de atrito maior o valor do sinal obtido pela célula de carga. Assim, estas oscilações podem ser causadas pela falta de se criar um filme lubrificante contínuo.

A amplitude das oscilações da força obtida pode também estar relacionada com a sensibilidade do osciloscópio usado na captura do sinal gerado pela célula de carga através do condicionador de sinais TMDE. Então, há uma necessidade de emprego de um sistema de aquisição de sinais que tenha um filtro contra as perturbações geradas de fontes externas ao sistema em estudo quando se trabalha com força menor. Esse é o próximo passo a ser adotado nos estudos seguintes.

Entretanto, a Figura 8 mostra que um maior gradiente de força ( $dF/dt$ ) aumenta com o aumento do coeficiente de atrito até a saída da zona de conformação da fieira. Um maior gradiente de força impossibilita a trefilação contínua pela quebra prematura dos arames. Assim, um menor valor de  $dF/dt$  possibilita a trefilação sem interrupção e conseqüentemente pode-se aumentar a velocidade de processamento.



**Figura 8.** Oscilações das forças medidas experimentalmente durante a trefilação do arame de alumínio e cobre com e sem lubrificação.

### Variação do Coeficiente Atrito

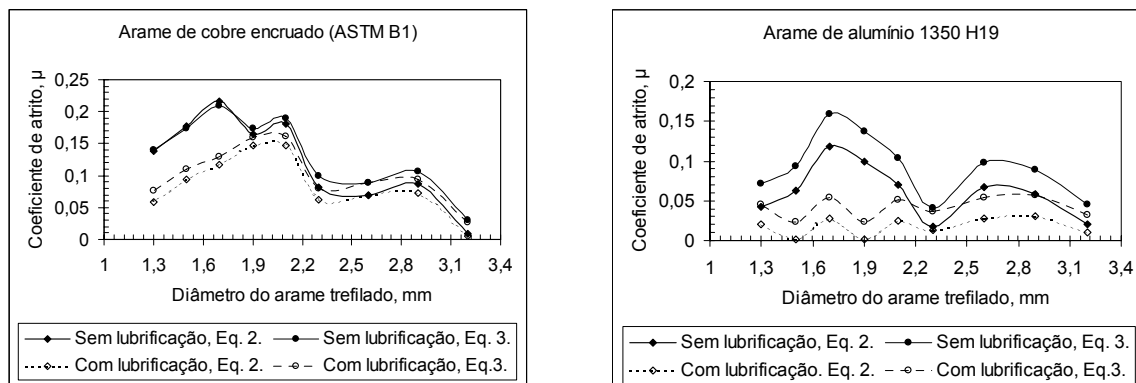
A Equação 2 pode ser resolvida para se calcular o coeficiente de atrito no processo de trefilação, uma vez que as demais variáveis naquela equação tem sido medidas. Entretanto, na variável  $\mu$ , Equação 2 é uma equação transcendental, que pode ser resolvida por tentativa e erro, ou por algum método apropriado. No caso do presente trabalho tem sido utilizado o Mathcad13© (© 1986-2005 Mathsoft Engineering & Education, Inc.) para obtenção do coeficiente de atrito.

As Equações 2 e 3 fornecem valores bem próximos para o coeficiente de atrito para os arames de cobre (Figura 9a) do que para os arames de alumínio (Figura 9b). Equação 3 tende a ser conservativa obtendo valores do coeficiente de atrito ligeiramente superiores aos obtidos pela Equação 2. O atrito para ambos os materiais tende a seguir a uma distribuição senoidal mais proeminente para o arame de alumínio, Figura 9b. Este fenômeno pode ser explicado pela característica metalúrgico do material, pelo grau de aderência e continuidade superficial do lubrificante sobre a superfície do material como anteriormente discutido.

Assim, a força naturalmente alcança um valor mínimo quando a pressão na interface metal/fieira seja relaxada pela liberação de discordâncias bloqueadas. Por sua vez, o atrito atinge um valor máximo quando o encruamento do arame atinge um alto grau, para ser novamente diminuído pelo mecanismo explicado anteriormente.



Desse modo, as feiras que tenham um maior valor de  $\mu$  naturalmente causariam danos superficiais na superfície do arame trefilado e desgaste prematuro do ferramental. Estas então seriam as feiras a sofrerem re-polimento e ou substituição com maior frequência.



**Figura 9.** Variação dos valores do coeficiente de atrito calculados em relação ao diâmetro do arame trefilado, sem e com lubrificação.

## CONCLUSÃO

O lubrificante empregado diminui a força, a tensão e a taxa de carregamento para atingir o estiramento do arame necessário a trefilação. Assim, a velocidade de trefilação poderia ser aumentada sem perigo de fratura prematura do arame. As oscilações obtidas na força de trefilação precisam ser mais bem investigadas utilizando um equipamento de aquisição de sinais e dados com menor nível de ruído. Equação 1 forneceu dados satisfatórios para prever a tensão de trefilação para os diversos graus de redução. Os valores dos coeficientes de atrito calculados pelas Equações 2 e 3 estão bem próximos e possibilitou acompanhar a sua variação ao longo da redução progressiva dos arames. A distribuição senoidal da variação do atrito com o diâmetro das feiras possibilita prever quais as futuras trocas de feiras necessárias.

## Agradecimentos

Os autores são gratos aos técnicos: Marino e Edvaldo da Oficina Mecânica da UNESP – Campus de Ilha Solteira (UNESP-FEIS-DEM); e ao técnico Everaldo da UNESP-FEIS-DEE. Ao Sr. Fábio da FOSECO pelo lubrificante utilizado. A Sra. Érika da UNESP-FEIS-DEM pelo desenho da trefila. Ao Sr. Fábio da FOSECO pelo lubrificante utilizado. Ao Prof. Dr. Del Rio e Sr. Elias pelas fotografias/filmagem digitais da mesma instituição dos autores. Ao meu amigo Niel pela revisão do Abstract.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
- 2 BECH, J., BAY, N.; ERIKSEN, M. Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming. **Wear**, 232, p. 134-139, 1999.
- 3 SU, Y.Y. Enhanced boundary lubrication by potential control during copper wire drawing. **Wear**, 210, p. 165-170, 1997.
- 4 LEE, Y.S.; HAHM, S.Y. Mechanical property changes in drawing/extrusion of hardening viscoplastic materials with damage. **Int. J. Mech. Sci.**, v. 39, n. 5, p. 565-573, 1997.
- 5 KOMORI, K. Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing. **Int. J. Mech. Sci.**, 41, p. 1499-1513, 1999.
- 6 OBI, A.I.; OYINLOLA, A.K. Frictional characteristics of fatty-based oils in wire drawing. **Wear**, 194, p. 30-37, 1996.
- 7 KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Process for Engineering Materials**, Third Edition, Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1997.
- 8 LIMA FILHO, A. A wire drawing machine designed for research and experimental teaching of mechanical and metallurgical engineering courses. In: Proceedings of COBEM 2003: International Congress of Mechanical Engineering, November 10-14, São Paulo, SP, ABCM, 2003. 1 CD.