

# INSTRUMENTAÇÃO DE UMA BANCADA DE TREFILAÇÃO PARA APLICAÇÃO DE PRESSÃO HIDROSTÁTICA INTERNA<sup>1</sup>

*Tiago Filipe Soares da Cunha<sup>2</sup>  
Antonio de Pádua Lima Filho<sup>3</sup>*

## **Resumo**

A lubrificação desempenha um papel importante nos processos de conformação mecânica estabelecendo uma película entre o ferramental de conformação e o produto. A eficiência deste processo está relacionada à capacidade do lubrificante em formar uma película estável evitando o desgaste do ferramental e um menor gasto de energia. Um aparato experimental foi construído e adaptado em uma bancada de trefilação com o intuito de garantir a continuidade deste lubrificante na zona de deformação da fiação através da aplicação de óleo mineral sob pressão hidrostática interna durante o processo de trefilação do metal. Este aparato experimental envolve basicamente uma bomba de óleo de capacidade de 69 MPa, uma mangueira com capacidade de 28 MPa, uma cápsula de pressão com 1,4m de comprimento e 3 mm de espessura, 10 fias de carboneto de tungstênio e um sistema de aquisição de dados. Arames de cobre com diâmetro inicial de 4 mm foram submetidos a trefilação progressiva sob pressão hidrostática interna até o diâmetro final de 1,3 mm, apresentando uma redução total de aproximadamente 225%. As pressões aplicadas foram de 7 MPa, 14 MPa e 21 MPa durante a trefilação. A aplicação de óleo sob pressão hidrostática se apresentou como uma excelente alternativa para lubrificação em processos de trefilação de arames metálicos.

**Palavras-chave:** Trefilação; Lubrificação; Arames de cobre; Pressão hidrostática interna.

## **INSTRUMENTATION OF A WIRE DRAWING MACHINE USING AN INTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE CHAMBER**

### **Abstract**

The lubrication plays an important role in metal forming processing establishing a film between the tool and the product. The accuracy of this process is related to the capacity of the lubricant in forming a steady film preventing the consuming of the tool and a lesser expense of energy. An experimental apparatus was built and adapted in a wire drawing machine to guarantee the continuity of this lubricant in the die deformation zone through the mineral-oil application under internal hydrostatic pressure during the metal wire drawing. This experimental apparatus basically involves an oil bomb with capacity of 69 MPa, a hose with capacity of 28 MPa, a pressure chamber with 1,4m of length and 3 mm of thickness, ten tungsten carbide dies and a data acquisition system. Copper wires were drawn under hydrostatic pressure in stages from an initial 4.0mm diameter down to 1.3mm resulting in a total true deformation of approximately 225%. The applied pressures had been of 7MPa, 14 MPa and 21 MPa during the wire drawing. The oil application under hydrostatic pressure was an excellent alternative for lubrication in wire drawing process of metallic wires.

**Word-key:** Copper wire; Wire drawing; Lubrication; Internal hydrostatic pressure.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *UNESP – Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica - Discente.*

<sup>3</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.*

## 1 INTRODUÇÃO

Cetlin<sup>(1)</sup> define que a trefilação de metais consiste na redução de área da seção transversal de um material através da passagem deste por uma matriz cônica, envolvendo a aplicação de uma força à frente desta matriz.

O arame deve ser apontado e inserido através da fieira, sendo, em seguida, presa por garras que são tracionadas por corrente. As fieiras de trefilação são usualmente construídas de carboneto de tungstênio devido a sua grande durabilidade. Elas são caracterizadas por quatro zonas: 1. entrada, 2. conformação, 3. calibração, e 4. saída. A zona de entrada é construída ligeiramente maior que o ângulo de trefilação, para facilitar o processo de lubrificação. A zona de calibração fornece a estabilidade dimensional ao produto trefilado.

ASM Handbook<sup>(2)</sup> denomina fieira como a ferramenta de precisão utilizada na obtenção de fios, barras e tubos de materiais metálicos no processo de trefilação. A escolha do material da ferramenta para trefilação metálica de formas contínuas depende primeiramente do tamanho, composição, formato, tolerância e quantidade de material a ser trefilado. O custo do material para o ferramental também não pode ser desprezado.

Fieiras utilizadas no processo de trefilação estão sujeitas a abrasão severa. Consequentemente a maioria dos produtos oriundos deste processo possuem partículas de carbono de tungstênio ou diamante cementadas ao longo de seu comprimento.

No decorrer do processo de trefilação, a zona de deformação e a zona de calibração sofrem severos desgastes devido ao atrito. A vida útil da fieira é definida pela quantidade de material trefilado que passa através da fieira até o máximo tamanho que a tolerância do produto permite. O desgaste dessas zonas estão relacionadas a velocidade de processamento, composição química do metal a ser trefilado, tratamento térmico preliminar, grau de redução por passagem na fieira e dureza do material da ferramenta.

Segundo Dieter,<sup>(3)</sup> 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.

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.

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.

Experimentos realizados por Bech, Bay e Eriken<sup>(4)</sup> mostraram 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.

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>(5)</sup> e Komori.<sup>(6)</sup>

Obi e Oyinola<sup>(7)</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, segundo Dieter,<sup>(3)</sup> 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. Equações 1 e 2 mostram respectivamente o método da energia de deformação uniforme e o método do elemento utilizados neste trabalho:

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

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

$\sigma_t$ ,  $F_t$ ,  $A_f$  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, Dieter<sup>(3)</sup>. Kapakjian<sup>(8)</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>(9)</sup> em seu trabalho como:

$$\sigma_t = \phi \bar{\sigma} (1 + \mu \cot \alpha) \ln \left( \frac{D_0}{D_f} \right)^2. \quad (3)$$

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

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Máquina de Trefilar e Acessórios

A Figura 1 mostra a máquina de trefilar. Dois eixos paralelos (SAE 52100) servem de apoio para os rolamentos lineares encapsulados no cabeçote de tração. Neste cabeçote está instalada a garra e a célula de carga, que possui capacidade de até 4,9 kN( 500 kgf). Um motor trifásico (3/4hp; 895,5 rpm) aciona um redutor (15,5 rpm) que move um carretel que bobina um cabo de aço que por sua vez puxa o cabeçote de tração através de um sistema de roldanas e assim a trefilação ocorre. A máquina pode operar em duas velocidades de estiramento:  $7,8 \times 10^{-3}$  m/s e  $3,2 \times 10^{-2}$  m/s.<sup>(10)</sup>



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 1.** Máquina de trefilar com sistema aquisição de sinais e dados e a câmara de pressão (pedido de patente depositado). A pressão empregada foi de 7 MPa, 14 MPa e 21 MPa.

O sistema de aquisição de sinais e dados é composto por um condicionador digital de sinais (modelo TMDE), um osciloscópio de memória (modelo TEKTRONIX TDS 210), uma célula de carga de 4,9 kN( 500 kgf) acoplada ao cabeçote da máquina de trefilar e um microcomputador. Este microcomputador é conectado ao condicionador de sinais que por sua vez é conectado à célula de carga. Os dados são capturados através do software WaveStar. A pressão foi obtida através de um manômetro analógica.

### 2.2 Constituição da Câmara de Pressão

A câmara é formada por um tubo de aço de baixo carbono de 18 mm de diâmetro interno com 3 mm de espessura e com 1,4 m de comprimento para abrigar o arame e injetar o óleo mineral sob pressão (Figura 2). Numa extremidade o tubo é soldado por brasagem um flange o qual é rosqueado no suporte da luva de bronze onde está posicionado a fieira. Na outra extremidade do tubo um sistema de engate rápido é soldado por brasagem para ser acoplado a bomba de óleo manual de capacidade de 68 MPa (Figura 3). A mangueira suporta uma pressão máxima de 28 MPa e é monitorada por um manômetro de 35 MPa de capacidade aproximadamente,.



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 2.** Câmara de pressão acoplada na estrutura da máquina de trefilar.



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 3.** Bomba de óleo e manômetro.

O suporte da luva foi usinado em aço baixo carbono. Este mantém a luva de bronze e a fieira. A câmara de pressão é rosqueada no suporte e através de anéis de vedação (o *rings*) posicionados na luva de bronze, possibilita a aplicação da pressão hidrostática interna, prevenindo desta forma o vazamento de óleo sob pressão (Figura 4).

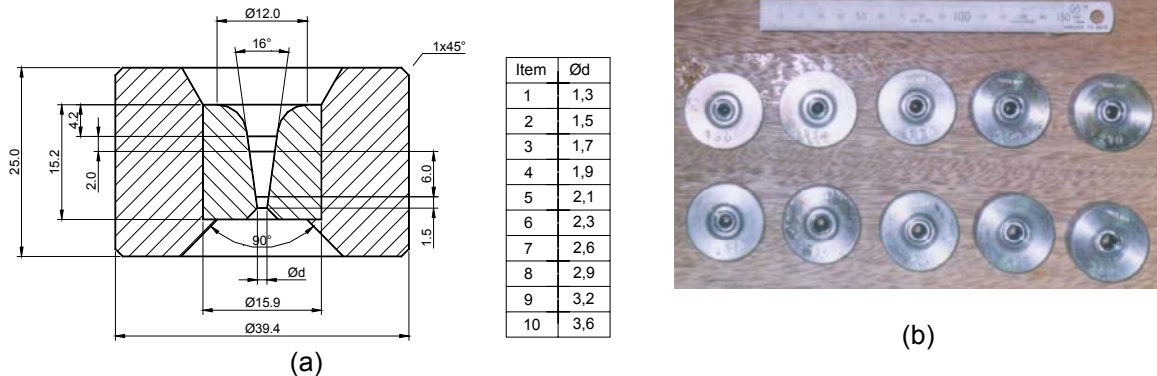


Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 4.** Dispositivo adaptado à máquina de trefilar para aplicação da pressão hidrostática interna para diminuir o coeficiente de atrito (pedido de patente depositado).

## 2.3 Feiras Empregadas

Dez (10) feiras de carboneto de tungstênio (WC) encapsuladas em aço ABNT 1040 foram utilizadas para redução gradativa do arame de cobre encruado (ASTM B1) (Figura 5).



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ILHA SOLTEIRA

**Figura 5.** Geometria da feira (a); feira de carboneto de tungstênio encapsuladas em aço ABNT 1040 (b).

Para a obtenção dos dados da força de trefilação sem lubrificação as feiras foram limpas para que todo o resquício de lubrificantes (grafite coloidal e óleo mineral) e pó de cobre que se encontrassem na zona de deformação da feira provenientes de processos anteriores fossem retirados conferindo ao ensaio uma maior precisão dos dados obtidos.

## 2.4 Preparação dos Aroles

Aroles de cobre de diâmetro inicial de 4,0mm tiveram uma de suas extremidades reduzidas através do processo de limagem com o intuito de este ser preso pela garra da máquina de trefilar após passagem pela feira. O processo de limagem deve ser realizado de forma cuidadosa e uniforme de tal forma que não venha ocasionar fratura inesperada do arole causando a interrupção do processo de trefilação. Após o processo de limagem, o arole é alojado dentro da câmara de pressão.

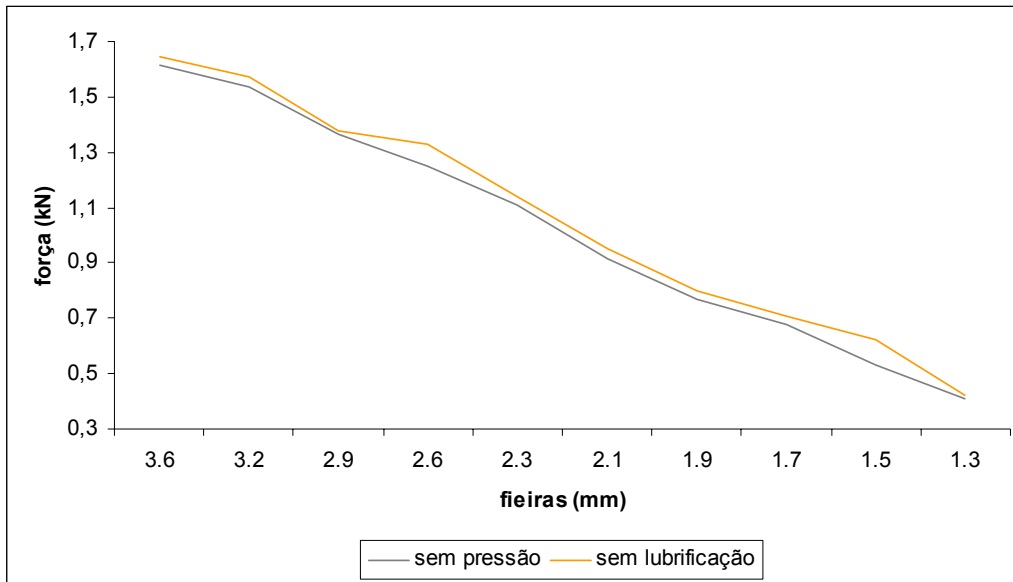
## 3 RESULTADOS

### 3.1 Comparação dos Aroles Trefilados sem Lubrificação e com Lubrificação com Óleo Mineral sem Pressão

A Figura 6 compara os dados obtidos na trefilação do arole de cobre sem e com lubrificação. Neste caso, não é aplicada a pressão hidrostática. A força de trefilação é maior para os aroles trefilados de maior diâmetro e menor quando se aplica o lubrificante.

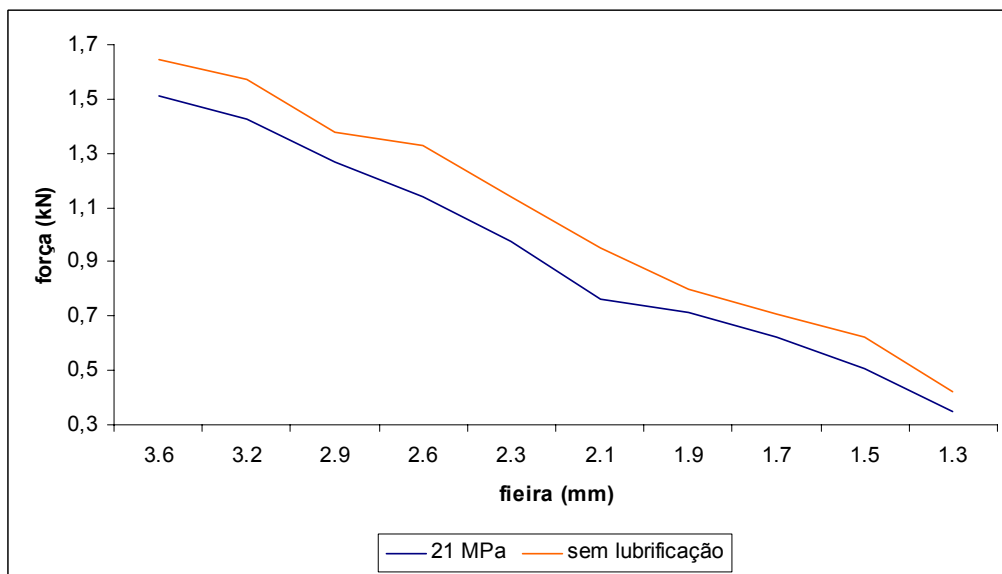
### 3.2 Comparação da Força de Trefilação sem Lubrificação e com a Máxima Pressão Aplicada (21 MPa)

A Figura 7 mostra o efeito da máxima pressão hidrostática aplicada na redução da força de trefilação quando comparada com a trefilação sem lubrificação. Assim, uma maior eficiência obtém-se com a aplicação da pressão hidrostática.



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 6.** Comparação entre força de trefilação exigida para cada fieira quando utilizado óleo mineral como lubrificante sem pressão e sem aplicação de lubrificante.

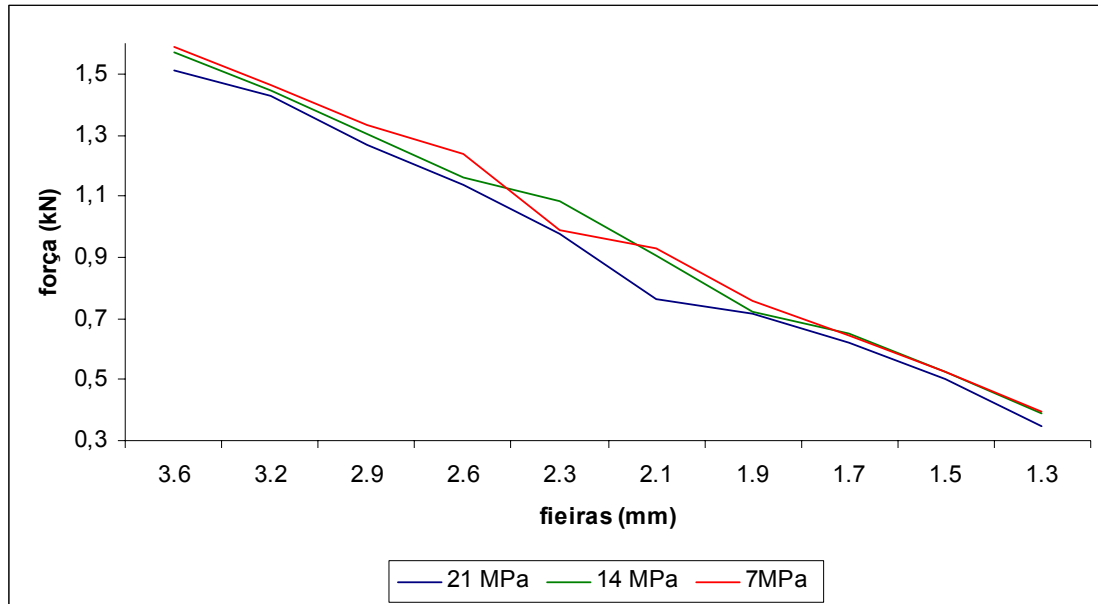


Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 7.** Comparação entre a força de trefilação exigida para cada fieira quando utilizado óleo mineral como lubrificante sob pressão de 21 MPa e sem lubrificação.

### 3.3 Comparação da Força de Trefilação sob Pressão Hidrostática Interna

A Figura 8 mostra o efeito do aumento da pressão hidrostática interna sobre a força de trefilação. A força de trefilação tende a igualar quando diminui o diâmetro do arame trefilado. Os resultados apresentados estão bem próximos alternando em certos pontos para uma pressão hidrostática de 7MPa a 14 MPa.



Fonte: Laboratório de Processos de Fabricação - UNESP/ ILHA SOLTEIRA

**Figura 8.** Comparação entre força de trefilação exigida para cada fieira quando utilizado óleo mineral como lubrificante sob pressão de 21 MPa, 14 MPa e 7 MPa.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Câmara de Pressão

Os anéis de borracha instalados na luva de bronze garantiram de forma efetiva a vedação, não ocorrendo assim o vazamento durante a trefilação hidrostática. A pressão interna era corrigida à medida que o arame era estirado. A pressão foi mantida acionando a bomba de óleo manual.

### 4.2 Efeito da Pressão Hidrostática

A utilização de óleo sob pressão hidrostática melhora a ação do lubrificante durante a trefilação, diminuindo a força necessária (Figuras 6, 7 e 8). A diminuição da força requerida deve diminuir o efeito do encruamento e assim possibilitando trefilar materiais de baixa ductilidade com esta nova técnica. Isto diminui o número de recozimentos necessários para continuar a trefilação de ligas de baixa ductilidade. Este efeito tem maior ação para os arames de maior bitola (Figura 7), por exemplo. A diferença entre a força de trefilação quando se utiliza óleo com e sem pressão e sem lubrificação tende a se aproximar à medida que o diâmetro do arame trefilado diminuiu. Isto pode ser explicado devido ao menor gradiente de encruamento entre a periferia e o centro do arame trefilado. Por outro lado, isto pode ocorrer também devido à baixa efetividade da lubrificação para diâmetros de arames cada vez menores durante o processamento.



Observou-se que a força de trefilação requerida quando é aplicado óleo sob pressão de 14 MPa nem sempre foi menor do que a força de trefilação requerida quando se aplica a pressão de 7 MPa para fieira de 2,1 e tornando os dados praticamente iguais a partir da fieira de 1,7 mm, Figura 8. Esse comportamento não ocorreu ao realizarmos a trefilação sob pressão hidrostática de 21 MPa, ou seja, em nenhum momento a força de trefilação realizada nessa condição sobrepujou a trefilação realizada com pressão de 7 MPa a 14 MPa.

A diminuição do atrito na interface arame/fieira ocorre devido ao aumento da pressão hidrostática interna. Naturalmente, o lubrificante sob pressão tende a preencher a descontinuidade superficial na interface arame/fieira.

Apesar da capacidade da bomba de óleo ser elevada, cerca de 69 MPa, a mangueira que comunica a cápsula de pressão e essa bomba possui especificação de 28 MPa como condição de operação máxima. Por motivos de segurança, os testes realizados foram operados com uma pressão máxima de 21 MPa, ou seja, trabalhamos com 75% da capacidade de operação da mangueira.

Vale ressaltar que a tendência para uma maior aplicação de óleo com uma maior pressão é a diminuição da força de trefilação podendo ser esta uma alternativa de lubrificação mais eficaz do que a ação do lubrificante sem pressão.

## 5 CONCLUSÃO

O processo de trefilação possui ampla aplicação industrial e por esse motivo estudos visando à otimização e melhoramento deste processo de fabricação, se caracterizam relevantes.

Testes devem ser realizados para averiguar qual o patamar máximo de pressão hidrostática que pode ser alcançado e que resulte em uma menor aplicação de força de trefilação. Outros lubrificantes líquidos podem ser testados sob pressão e seu comportamento observado. Estes não podem cristalizar sob elevada pressão hidrostática.

## REFERÊNCIAS

- 1 CETLIN, P.; A trefilação de metais. *Metalurgia e Materiais*, Setembro de 1999, pp. 458.
- 2 ASM Handbook, vol 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 1990.
- 3 DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
- 4 BECH, J., BAY, N.; ERIKSEN, M. Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming. **Wear**, 232, p. 134-139, 1999.
- 5 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.
- 6 KOMORI, K. Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing. **Int. J. Mech. Sci.**, 41, p. 1499-1513, 1999.
- 7 OBI, A.I.; OYINLOLA. A.K. Frictional characteristics of fatty-based oils in wire drawing. **Wear**, 194, p. 30-37, 1996.
- 8 KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Process for Engineering Materials**, Third Edition, Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1997.
- 9 SU, Y.Y. Enhanced boundary lubrication by potential control during copper wire drawing. **Wear**, 210, p. 165-170, 1997.
- 10 L. 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.