

TREFILAÇÃO DE ARAMES METÁLICOS SOB PRESSÃO HIDROSTÁTICA INTERNA¹

*Antonio de Pádua Lima Filho²
Tiago Filipe Soares da Cunha³*

Resumo

O efeito do atrito deve ser minimizado nos processos de conformação plástica dos metais para reduzir o desgaste do ferramental e defeitos no produto final. O objetivo deste trabalho é maximizar a lubrificação pela aplicação da pressão hidrostática no óleo mineral, forçando-o a penetrar na interface arame/fieira durante a trefilação. Com esta intenção, uma câmara de pressão foi projetada e construída. Um arame de cobre é apontado suficientemente para permiti-lo a passar pela fieira e esse conjunto foi então colocado dentro da câmara de pressão. As pressões hidrostáticas aplicadas no processo de trefilação do arame de cobre foram: 7 MPa (1000 psi), 14 MPa (2000 psi) e 21 MPa (3000 psi), usando uma bomba manual de óleo (68 MPa de capacidade). Os resultados obtidos foram comparados com aqueles do mesmo sistema sem lubrificação, e usando óleo mineral sem pressão externa. O arame de cobre foi reduzido de 4 mm para 1,3 mm no diâmetro, empregando 10 fieiras feitas de carboneto de tungstênio. A redução de área foi aproximadamente de 20% para cada arame. O menor esforço de trefilação foi obtido quando usando a mais alta pressão hidrostática aplicada. Assim, esta técnica pode ser idealmente adotada para aqueles metais e ligas metálicas os quais encruam rapidamente durante a trefilação.

Palavras-chave: Trefilação; Pressão hidrostática; Arame de cobre; Lubrificação hidrostática.

METALLIC WIRE DRAWING SUBJECT TO INTERNAL HYDROSTATIC PRESSURE

Abstract

The effect of friction must be minimized in metal forming processes in order to reduce toll wear and flaws in the final product. The aim of this work is to maximize lubrication by the application of hydrostatic pressure on the mineral oil, forcing it to penetrate at the wire/die interface during drawing. With this intention, a pressure chamber was designed and built. A copper wire was filed sufficiently to allow it to pass through the wire drawing die and this assembly was then placed in the pressure chamber. The applied hydrostatic pressures when drawing the copper wire were: 7 MPa (100 psi), 14 MPa (2000 psi) and 21 MPa (3000 psi), using a manual oil pump (68 MPa of capacity). The achieved results were compared with those of the same system without lubrication, and using mineral oil without external pressure. The drawn copper wire was reduced from 4 mm to 1.3 mm in diameter, employing 10 drawing frames made of tungsten carbide. The area reduction was approximately 20% for each pulling wire. The lowest wire pulling force was obtained when using the largest hydrostatic applied pressure. Thus, this technique can be ideally adopted for those metal and metallic alloys which work harden rapidly during wire drawing.

Key words: Wire drawing; Hydrostatic pressure; Copper wire; Hydrostatic lubrication.

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

² *UNESP-Campus de Ilha Solteira – Depto. De Engenharia Mecânica – Eng. Metalúrgico pela EEIMVR-UFF; Mestre em Ciência pelo ITA; PhD pela University of Sheffield-Inglaterra*

³ *UNESP-Campus de Ilha Solteira. Departamento de Engenharia Mecânica*

1 INTRODUÇÃO

A ação do lubrificante sobre a qualidade do produto conformado e a prevenção de danos no ferramental, tem sido estudada ao longo dos anos. Na operação de trefilação, trabalho a frio, por exemplo, ocorre o contato metal/fieira a elevada velocidade (20 m/s).⁽¹⁾ Como consequência deste processo surge um aquecimento do conjunto produto/fieira devido ao atrito. Assim, muitos estudos têm sido realizados para obter um produto trefilado de elevada qualidade com mínimo de defeitos internos e externos, e garantir o menor desgaste do ferramental.⁽²⁻⁴⁾

Diversas patentes sobre o assunto têm sido divulgadas na literatura. A Patente de 1901 (N° 678789)⁽⁵⁾ relata sobre um melhoramento do desempenho da fieira para a trefilação de eixos, barras e tubos pelo reviramento da fieira quando começa a ficar super-aquecida de um lado. Isto evita a retificação precoce da fieira para uma bitola maior.

Em 1936 a Patente (N° 2028652)⁽⁶⁾ descreve sobre a trefilação de arames. O autor relata que uma boa trefilação requer uma baixa temperatura do cone de aproximação (zona de trabalho) da matriz e uma alta contra-tensão dentro da matriz. Este autor utiliza duas fieiras em linha, semelhante à laminação tipo trem. Dessa forma, uma fieira anterior provoca uma contra tensão na fieira posterior e assim o arame vai sendo trefilado no meio lubrificante. De acordo com o autor, este procedimento evita desgaste da fieira e sem risco de quebra do arame durante a trefilação.

A Patente N° 3879973 datada em 29 de abril de 1975⁽⁷⁾ descreve um sistema composto de duas fieiras para fornecer uma lubrificação hidrodinâmica para trefilação de materiais metálicos: arames, barras e tubos. O autor relata que um intensivo resfriamento das fieiras é fornecido ao longo da operação de trefilação. As fieiras são posicionadas e alinhadas numa luva de pressão que é refrigerada. A alta pressão é produzida pelo lubrificante o qual é levado pela superfície do material a ser trefilado. Este lubrificante fica zelado entre as fieiras dentro da luva de pressão garantindo assim a formação de um filme na interface metal/fieira.

A Patente N° 3641795 datada em 15 de fevereiro de 1972⁽⁸⁾ descreve a aplicação de um lubrificante sólido (estearato de cálcio) sob alta pressão numa coluna formada por três fieiras. Após a compactação do lubrificante, um furo é realizado para a introdução do arame previamente revestido por imersão a quente. Um reservatório de lubrificante sólido (estearato de cálcio) é posicionado na entrada da fieira. O autor relata que o lubrificante é transportado pelo arame para ser trefilado com a ajuda de um mecanismo que provoca a vibração do lubrificante sólido neste reservatório. De acordo com os autores, uma película de lubrificante é formada continuamente entre as fieiras e o arame revestido, garantindo assim uma boa lubrificação.

A lubrificação hidrodinâmica que evita o contato direto do produto com a fieira também é relatada pela Patente N° 4015459 em 1977⁽⁹⁾ que permite obter uma redução de seção transversal de 39 a 55% de tiras metálicas em apenas um passe. O aparato é composto por duas seções: a primeira promove a lubrificação hidrodinâmica; e a segunda a redução da tira metálica com o lubrificante sob pressão. Os lubrificantes utilizados são óleos e sabões usados na trefilação convencional. Os sabões utilizados na trefilação são preferidos, pois possuem uma viscosidade significativamente maior.

A aplicação de pressão durante a trefilação de arames é descrita pela Patente N° 5402664 em 4 de abril de 1995.⁽¹⁰⁾ Este sistema é composto por uma luva de pressão que permite que o arame metálico arraste o óleo lubrificante para a fieira. A

pressão de óleo vai aumentando entre o espaço da fieira e da luva de pressão e assim o arame é trefilado. A fieira é substituída quando ela aquece.

A Patente N° 6430980 B1 datada em 13 de agosto de 2002,⁽¹¹⁾ relata um conjunto de duas fieiras alinhadas que recebe um lubrificante de estearato de cálcio sob pressão de 40 MPa (câmara de baixa pressão), entre o bocal de entrada e a primeira fieira. Este lubrificante passa para o estado semi-sólido e torna-se líquido entre a fieira do meio e a última (câmara de alta pressão) gerando uma elevada pressão hidrostática para a trefilação de arames metálicos (80 a 500 MPa). O arame é trefilado a um velocidade de 2 m/s e reduzido a 10% pela primeira fieira e 15% pela segunda fieira. A aplicação da pressão hidrostática para a conformação de metais tem sido pesquisada a partir da década de 50 visando à extrusão hidrostática direta, geralmente na temperatura ambiente, de materiais frágeis, uma vez que a pressão hidrostática aumenta a ductilidade do material.⁽¹²⁾ O atrito é diminuído, pois não há contato entre o *billet* e a parede do cilindro. As pressões hidrostáticas usualmente empregadas são em torno de 1400 MPa (200 ksi). Óleos vegetais são utilizados como fluido hidráulico particularmente o óleo de mamona porque é um bom lubrificante e sua viscosidade não é influenciada significativamente pela pressão. Para a extrusão a elevada temperatura, geralmente se utiliza materiais poliméricos ou vidro como fluido hidráulico.⁽¹²⁾

Este trabalho tem como objetivo realizar a trefilação de arames de cobre sob pressão hidrostática interna para diminuir o coeficiente de atrito na interface arame/fieira, pela formação de uma película lubrificante contínua. A câmara de pressão como construída permite aplicar pressão até 21 MPa (3000 psi). Arame de cobre é trefilado de um diâmetro inicial de 4,0 mm para 1,3 mm aproximadamente passando por dez fieiras de carboneto de tungstênio. A redução de cada fieira é em torno de 20%.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Máquina de Trefilar, Câmara de Pressão e Sistema de Aquisição de Sinais e Dados

Um aparato experimental foi construído para a trefilação do arame de cobre a uma velocidade de $7,8 \times 10^{-3}$ m/s⁽¹³⁾ (Figura 1). A pressão hidrostática é aplicada na câmara de pressão (1,4 m de comprimento por 18 mm de diâmetro interno e 3 mm de espessura) por meio de uma bomba manual de óleo de capacidade de 68 MPa através de um mangueira de pressão 28 MPa.

A fieira já com o arame apontado é colocada dentro da luva de pressão a qual são adaptados anéis de borracha para a vedação. Este conjunto é alojado dentro da luva de suporte que é fixada na máquina de trefilar. Por último, a câmara de pressão é aparafusada na luva de suporte, Figura 2. Um manômetro analógico de fundo de escala de 35 MPa (5000 psi) determina a pressão do lubrificante dentro da câmara de pressão. As pressões usadas foram de 7 MPa (1000 psi); 14 MPa (2000 psi); e 21 MPa (3000 psi).

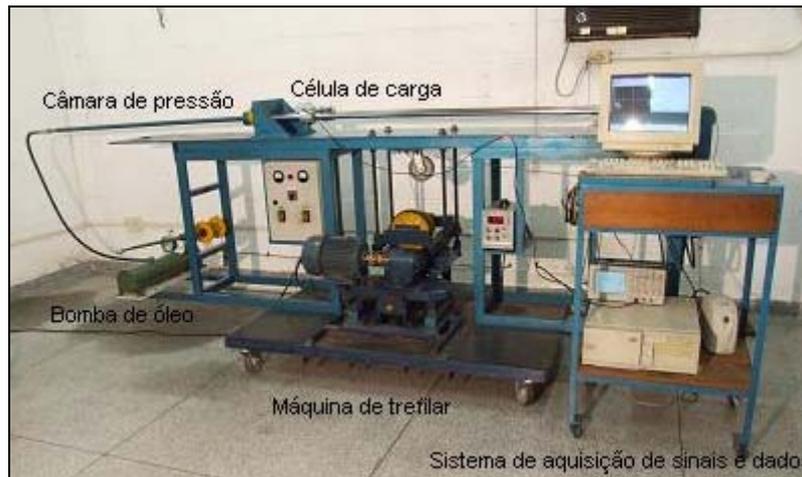


Figura 1. Aparato experimental para trefilação de arames metálicos, com a câmara de pressão e o sistema de aquisição de sinais e dados. Pedido de patente em análise.



Figura 2. Detalhes da câmara de pressão, luva de pressão e luva de suporte. Pedido de patente em análise.

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.

2.2 Fieiras Empregadas

Dez (10) fieiras de carboneto de tungstênio (WC) encapsuladas em aço ABNT 1040 foram utilizadas para redução gradativa do arame de cobre encruado (ASTM B1), Figura 3. Para a obtenção dos dados da força de trefilação sem lubrificação, as fieiras foram lavadas e secas.

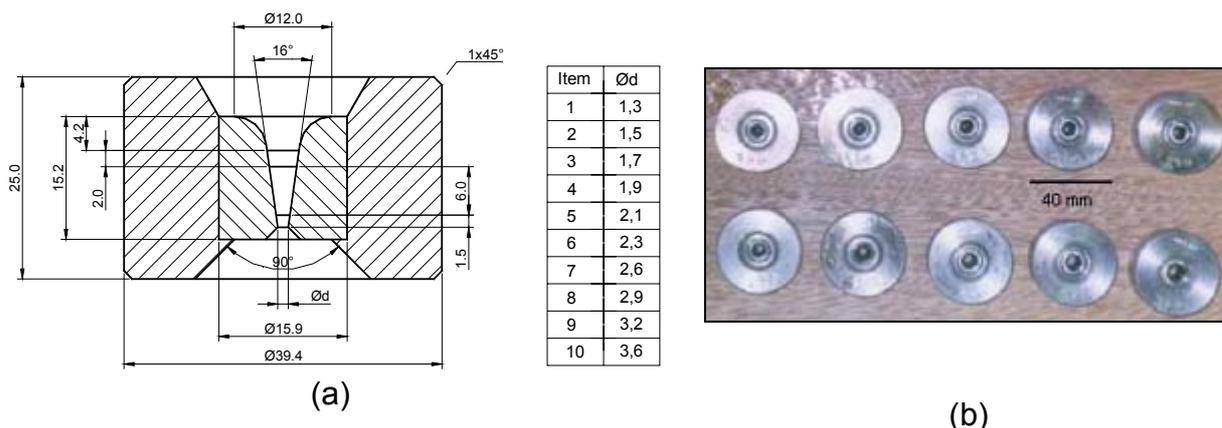


Figura 3. Geometria das fieiras (a); fieiras de carboneto de tungstênio encapsuladas em aço ABNT 1040 (b).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação das Forças Médias de Trefilação com as Condições do Meio Lubrificante

A Tabela 1 compara os dados obtidos para diversas situações de trefilação do arame de cobre. Praticamente não há diferença na força de trefilação para os dados obtidos para a pressão hidrostática variando de 7 MPa a 14 MPa. Entretanto, a lubrificação é aumentada pela ação da pressão hidrostática. Um distanciamento maior ocorre para a pressão hidrostática máxima empregada (21 MPa). Então, o óleo mineral sob alta pressão provoca uma boa lubrificação e deve prevenir danos na superfície do arame (formação de escamas e riscos, por exemplo) e do cone de conformação da fieira. A operação de trefilação continua sem dificuldades e sem a interrupção do experimento. Por outro lado, na trefilação sem lubrificação, os arames de cobre sempre fraturavam, interrompendo a operação, principalmente para fieiras menores de 2,1 mm, este assunto será discutido nas próximas seções.

Tabela 1. Força média de trefilação sob pressão hidrostática interna de 21 MPa para cada fieira.

Diâmetro da fieira (mm)	Pressão hidrostática*, força média (N)**				
	21 MPa*	14 MPa*	7 MPa*	Sem pressão	Sem lubrificação
3,6	1509**	1569**	1586**	1612**	1644**
3,2	1428	1449	1461	1538	1570
2,9	1268	1306	1334	1368	1377
2,6	1138	1162	1237	1251	1330
2,3	975	1085	986	1112	1139
2,1	765	905	929	914	954
1,9	717	723	758	770	802
1,7	620	648	645	675	707
1,5	504	526	524	533	621
1,3	349	387	396	409	424

**Média de três amostras

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

A Figura 4 compara os dados obtidos para o arame de cobre trefilado a uma pressão hidrostática máxima de 21 MPa e sem lubrificação. Para ambas as situações a força de trefilação aumenta com o diâmetro do arame trefilado. Entretanto, as forças de operação são menores para o arame trefilado sob pressão hidrostática interna, como anteriormente descrito. A pressão hidrostática promove a formação de uma camada contínua de lubrificante na interface arame/fieira, diminuindo assim o atrito que pode causar: desgaste prematuro da ferramenta e defeito do produto trefilado.

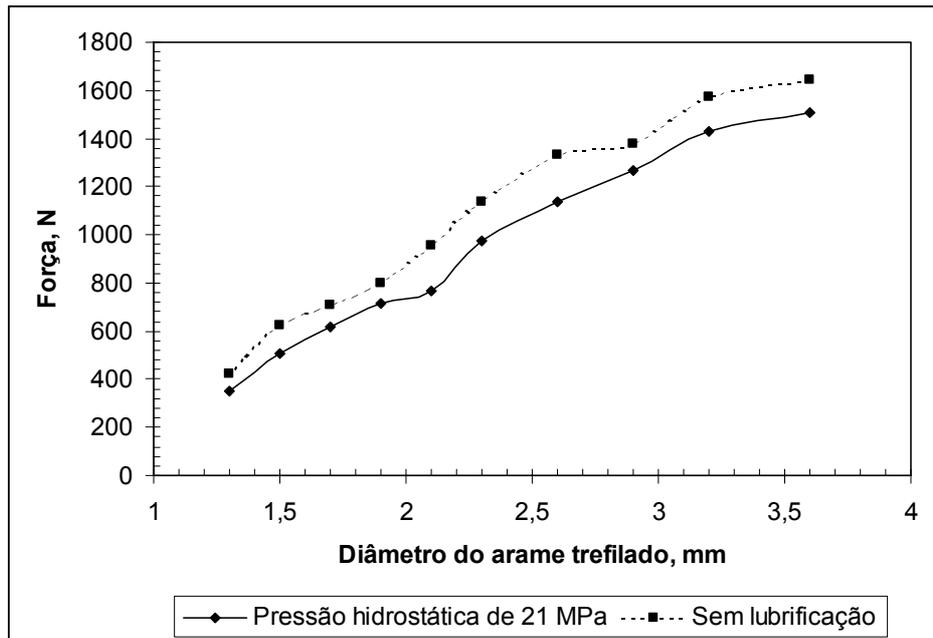


Figura 4. Comparação das forças de trefilação para as duas condições como indicado na figura. Praticamente as curvas apresentam o mesmo perfil.

A tensão de trefilação aumenta com a diminuição da seção transversal do arame, e é sempre menor quando da ação da pressão hidrostática, Figura 5. A partir da fieira de 2,6 mm para a menor de 1,3 mm, ocorre uma ligeira mudança nos perfis das curvas. A tensão de trefilação para os arames sem lubrificação é bem maior. Isto pode explicar as diversas interrupções causadas pela quebra do arame de cobre nesta situação. Este aumento na tensão pode ser devido ao maior coeficiente de atrito, assunto a ser analisado adiante. Outra hipótese seria a geração de menor número de partículas de desgaste do arame de cobre devido ao menor gradiente de deformação entre a superfície e o centro do arame, e assim acumulando mais calor na zona de conformação da fieira, causando a grimpagem do arame.

A tensão diminui quando o arame é trefilado do diâmetro de 2,3 mm para 2,1 mm, mais abruptamente para a trefilação sob pressão hidrostática interna. Isto pode ser causado pela a liberação de discordâncias que estavam travadas pelo encruamento. Continuando a trefilação do arame a partir da fieira de 2,1 mm a tensão aumenta até a fieira de 1,5 mm. Novamente, a partir desta para a fieira de 1,3 mm a tensão cai. Este efeito é o mesmo como descrito anteriormente, Figura 5.

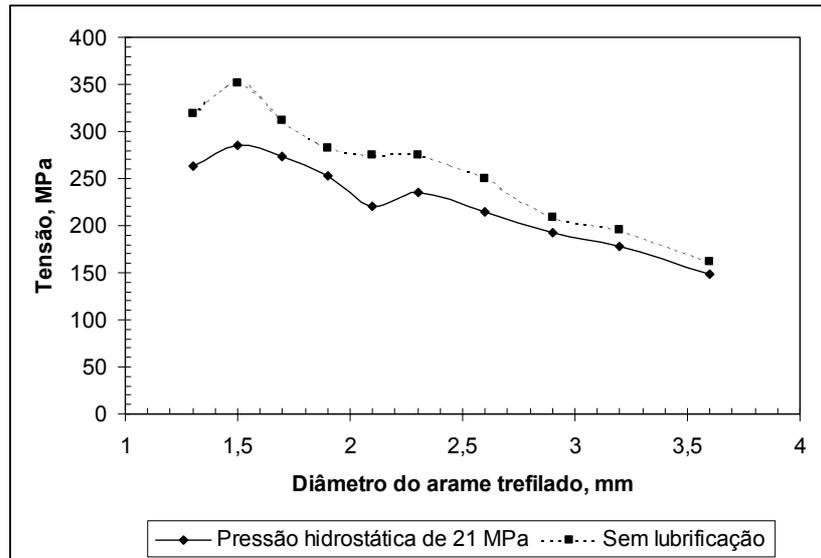


Figura 5. Perfis da tensão de trefilação para o arame submetido à pressão hidrostática (21 MPa) e sem lubrificação.

3.3 Oscilação na Força de Trefilação

O aterramento do sistema de condicionamento de sinais e dados possibilitou reduzir o ruído externo ao sistema, Figura 6. Verifica-se à medida que a pressão hidrostática aumenta, um filme contínuo tende a formar nas zonas de conformação da fieira, como anteriormente descrito, e menos oscilações da força são observadas. Então, conclui-se que as oscilações são devidas a não formação de uma película contínua de lubrificante que provoca um maior atrito e assim maior força de estiramento do arame através da fieira. Estas oscilações podem estar acompanhadas por oscilações térmicas e acompanhadas de partículas de desgaste.⁽¹⁴⁾

Estas oscilações também foram constatadas por Bech, Bay e Eriksen⁽¹⁵⁾ e Su⁽¹⁶⁾ 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.

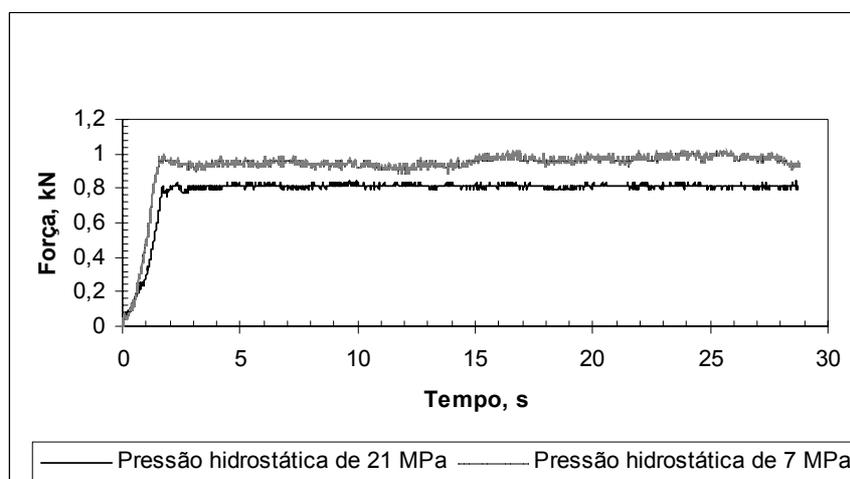


Figura 6. Perfis da força de trefilação versus tempo para a fieira de 2,1 mm em função da mínima (7 MPa) e máxima pressão hidrostática (21 MPa).

3.4 Distribuição do Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito foi calculado usando a seguinte equação:⁽¹⁶⁾

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

Explicitando o coeficiente de atrito (μ) tem-se:

$$\mu = \frac{1}{\cot g \alpha} \left[\frac{\sigma_t}{\phi \bar{\sigma} \ln(D_o/D_f)^2} - 1 \right], \quad (2)$$

onde α é a metade do ângulo do cone de trabalho da fieira (8°); σ_t , $\bar{\sigma}$, ϕ , D_o e D_f são respectivamente a tensão de trefilação, a tensão de fluxo média, trabalho redundante aproximadamente 1,2, diâmetro inicial e final do arame. As tensões médias ($\bar{\sigma}$) dos arames de cobre foram obtidas do ASM Handbook,⁽¹⁾ considerando a resistência a tração desse materiais em relação a bitola do arame em questão. Lima Filho et al.⁽¹⁷⁾ mostraram que o coeficiente de atrito calculado pela Equação 2 tem um valor aproximado daquele calculado pelo do método do elemento onde o valor de μ deve ser obtido por tentativa e erro pois se trata de uma equação transcendental.

A Figura 7 mostra a distribuição do coeficiente de atrito com o diâmetro do arame trefilado para a trefilação hidrostática máxima (21 MPa) e sem lubrificação. Coeficientes menores de atrito são obtidos quando está presente uma camada contínua de lubrificante. As fieiras desgastam mais rapidamente para um maior μ devido a grande dissipação de energia. Então, as fieiras de 1,3, 2,3 e 3,2 mm tem maior durabilidade que as outras fieiras usadas neste trabalho.

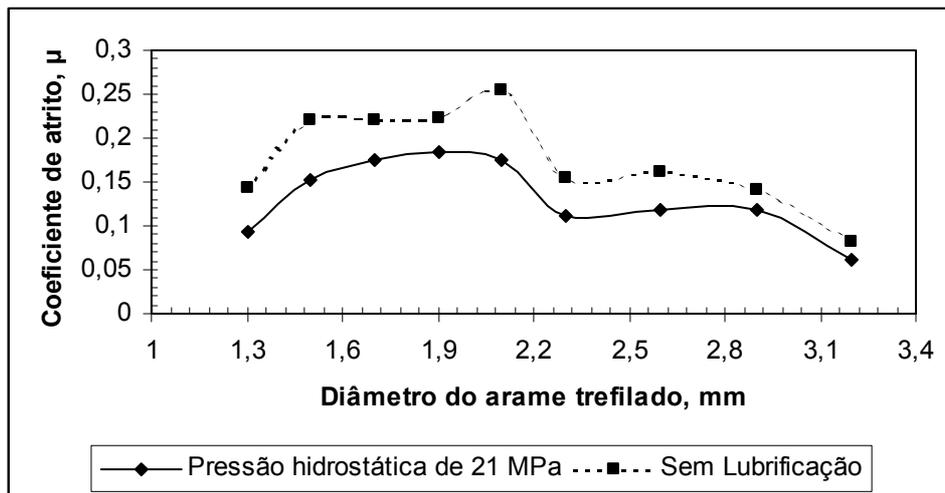


Figura 7. Variação do coeficiente de atrito de acordo com o diâmetro das fieiras nas situações analisadas como indicadas na figura.

4 CONCLUSÃO

O aparato montado para a aplicação da pressão hidrostática não apresentou problema de vazamento durante a realização do ensaio. Então, um equipamento para aplicar maior pressão hidrostática está em estudo pelo grupo de pesquisa.

A aplicação da pressão hidrostática cria um filme contínuo na zona de conformação da fieira. Então, o incremento de pressão tende a manter a integridade do filme lubrificante. Isto deve ser útil na trefilação de arames frágeis ou que encruam muito rapidamente.

A distribuição do coeficiente de atrito ao longo de diversas fieiras é importante para realizar análise de desgaste e defeitos superficiais e no interior do produto trefilado.

Agradecimentos

Sinceros agradecimentos aos técnicos da Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica/UNESP – Campus de Ilha Solteira: Sr. Edvaldo Silva de Araújo e Marino Teixeira Caetano pelo suporte técnico. A FAPESP pela bolsa de Iniciação Científica do aluno Tiago Filipe Soares da Cunha. Ao meu amigo Nielsen Kann pela revisão do *abstract*.

REFERÊNCIAS

- 1 TYLER, E. D. Wrought copper and copper alloy products. ASM Handbook, vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, p. 241-264, 1990.
- 2 KO, D. C., KIM, B. M. The prediction of central burst defects in extrusion and wire drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, 102, p. 19-24, 2000.
- 3 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.
- 4 KOMORI, K. Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing. **Int. J. Mech. Sci.**, 41, p. 1499-1513, 1999.
- 5 McCOLL, W. Die for metal-drawing machines. United States Patent Office. No. 678789, July 16, 1901.
- 6 MULATIER, J. D. Drawing of wires. United States Patent Office. No. 2028652, June 29, 1934.
- 7 GODY, A., PRAJSNAR, T., RULINSKI, J., SIKORA, L., WUSATOWSKI, R., ZGLOBICKI, E. Drawing device with hydrodynamic lubrication. United States Patent Office. No. 3879973, April 29, 1975.
- 8 LESTER, R. H.; SNYDER, J. N. Method and apparatus for wire drawing with pressure dies. United States Patent Office. No. 3641795, February 15, 1972.
- 9 WINTER, J., SHAPIRO, E., SMITH, W. F. Hydrodynamic drawing of multiple gauge metal strip. United States Patent Office. No. 4015459, April 5, 1977.
- 10 SARVER, D. R., SARVER, G. L. wire drawing die assembly. United States Patent Office. No. 5402664, April 4, 1995.
- 11 WEINHOL, H., HUEBNER, A., KURZE, B., ZSCHORN, G. Method and device for coating and shaping strand-shaped metallic material by drawing. United States Patent Office. No. 6430980 B1, August 13, 2002.
- 12 KALPAKJIAN, S. **Manufacturing Process for Engineering Materials**, Third Edition, Addison-Wesley, Menlo Park, California, 1997.

- 13 LIMA FILHO, A. D. P. 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.
- 14 CZICHOS, H. The role of tribology as science and technology – what are the essentials? **Tribology International**, v. 28, n. 1, p. 15-16, 1995.
- 15 BECH, J., BAY, N.; ERIKSEN, M. Entrapment and escape of liquid lubricant in metal forming. **Wear**, 232, p. 134-139, 1999.
- 16 SU, Y.Y. Enhanced boundary lubrication by potential control during copper wire drawing. **Wear**, 210, p. 165-170, 1997.
- 17 LIMA FILHO, A.D.P., BEDRAN, E., CUNHA, T. F. D., SILVA, J. B. C. O efeito do atrito na trefilação de arames metálicos. In: Proceedings of 61º Congresso Annual da ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro, RJ, p. 3818-3827. 1 CD. 2006.