

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO ATRAVÉS DE UMA MÁQUINA DE TRAÇÃO¹

Andréa Pinheiro Santos²

Dangelis Rafael Santos³

Marcelo dos Reis Van Opstal Nascimento⁴

Willy Ank de Moraes⁵

Resumo

A partir da implementação de um sistema para simular o processo de trefilação através da utilização de recursos de uma máquina de tração do laboratório de metrologia da Unisanta, foram executadas simulações do processo de conformação de fios de cobre. Estas simulações foram realizadas em diferentes condições objetivando-se quantificar a sensibilidade dos resultados obtidos com a condição do processo de trefilação executado e demonstrar o potencial de uso da técnica de simulação desenvolvida em máquina de tração.

Palavras-chave: Trefilação; Simulação; Máquina de tração; Fios de cobre.

SIMULATION OF THE DRAWING PROCESS BY THE USE OF A TENSILE TEST MACHINE

Abstract

After the implementation of a system to simulate the drawing process, by the use of a tensile test machine from metrology laboratory of Unisanta, were performed simulations of drawing process of copper wires. These simulations have been performed under different conditions with the goal to quantify the sensitivity of the results obtained with the process condition executed and, thus, demonstrating the potential of the drawing simulation technique using a tensile test machine.

Key-words: Drawing; Simulation; Tensile test machine; Copper wires.

¹ *Contribuição técnica ao 3º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 28 a 30 de novembro de 2012, São Paulo, SP.*

² *Graduanda em Engenharia Mecânica da Unisanta. Estagiária na Petrobras. E-mail: andreagja@yahoo.com.br.*

³ *Graduando em Engenharia Mecânica da Unisanta. Estagiário na divisão de projetos na Supervisão de Engenharia da Vale Fertilizantes. E-mail: dangelis.r.s@gmail.com.*

⁴ *Graduando em Engenharia Mecânica da Unisanta. Inspetor da Turbogem do Brasil. E-mail: marcelo.van@globo.com.*

⁵ *Doutorando, Mestre, Eng^o Metalurgista, Téc. em Metalurgia. Especialista em Produto da Usiminas-Cubatão, Prof. Faculdade de Engenharia da Unisanta, Consultor Técnico da Inspebras e Diretor da divisão técnica "Aplicações de Materiais" da ABM. E-mail: willy.morais@usiminas.com.*

1 INTRODUÇÃO

A trefilação é o processo mecânico de conformação plástica dos metais para fabricação de arame e barras finas.^(1,2) É um processo industrial que acarreta na redução da seção transversal (largura) e respectivo aumento no comprimento do material. Consiste na passagem de uma peça através de uma matriz chamada fieira ou trefila, com forma de canal convergente.⁽²⁾ A maior parte do escoamento plástico é causada por esforços de compressão resultantes da reação do metal com a matriz.⁽³⁾ Geralmente a parte metálica apresenta simetria circular, embora isto não seja um requisito necessário. Existem muitas aplicações para a trefilação como produção de fios elétricos, cabos, cliques de papel, corda para instrumentos musicais e raio para rodas.

Os esforços preponderantes na deformação são esforços de compressão exercidos pelas paredes do furo da ferramenta sobre o fio, quando de sua passagem, por efeito de um esforço de tração aplicado na direção axial do fio e de origem externa, conforme Figura 1. A passagem do material pela matriz, resultante do esforço externo de tração, gera uma força de compressão na matriz, por isso o processo de trefilação é considerado uma conformação por compressão indireta.

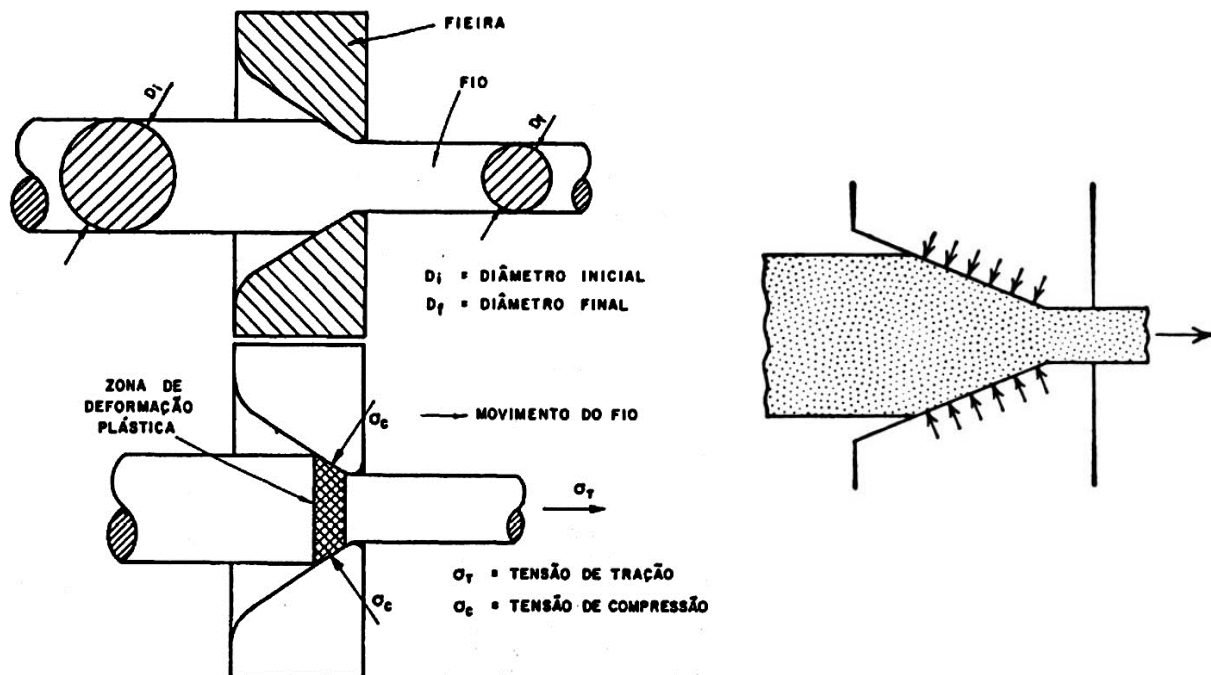


Figura 1. Representação da passagem do fio pela fieira e dos esforços atuantes.^(1,3)

As máquinas de trefilar podem ser classificadas:⁽²⁾

- 1) quanto ao modo com que exercem o esforço de trefilação;
- 2) quanto aos sistemas de lubrificação adotados;
- 3) quanto aos diâmetros dos fios trefilados, neste caso podendo ser:
 - (3.1) máquinas de barras redondas ($\varnothing > 5,00$ mm) - são mais robustas que as demais, além disso, tais máquinas permitem grandes reduções de seções retas ($> 70\%$), as forças de trefilação alcançam valores acima de 1 tonelada e as velocidades são da ordem de 2m/s.
 - (3.2) máquinas para fios grossos ($2,00 < \varnothing < 5,00$ mm) - apresentam comumente anéis tirantes individualizados, mas trabalham em velocidades superiores.

- (3.3) máquinas para fios médios ($0,50 < \varnothing < 2,00$ mm) – estas máquinas são do tipo com deslizamento, dotada de cones, utilizando o sistema de lubrificação por imersão, como também o sistema de aspersão.
- (3.4) máquinas para fios finos ($0,15 < \varnothing < 0,50$ mm) – são máquinas muito semelhantes às anteriores, mas com a diferença que as velocidades de trabalho são superiores.
- (3.5) máquinas para fios capilares ($\varnothing < 0,51$ mm) – estas máquinas devem ter uma elevada precisão e isentas de vibrações mecânicas, controle da tensão de bobinamento (não confundir com tensão de trefilação), as velocidades de trabalho podem atingir, como já mencionado, 40 m/s.

A parte principal do processo de trefilação é a matriz de trefilação, também conhecida como fieira, para a trefilação de arames e fios. A fieira é uma ferramenta cilíndrica que contém um furo no centro por onde passa o fio, e cujo diâmetro vai diminuindo, seu formato é semelhante ao de um funil. Nela, quatro regiões são de especial interesse, a saber: região do ângulo de entrada (2γ), região do ângulo de trefilação (2α), zona cilíndrica e região do ângulo de saída. A Figura 2 ilustra este elemento.

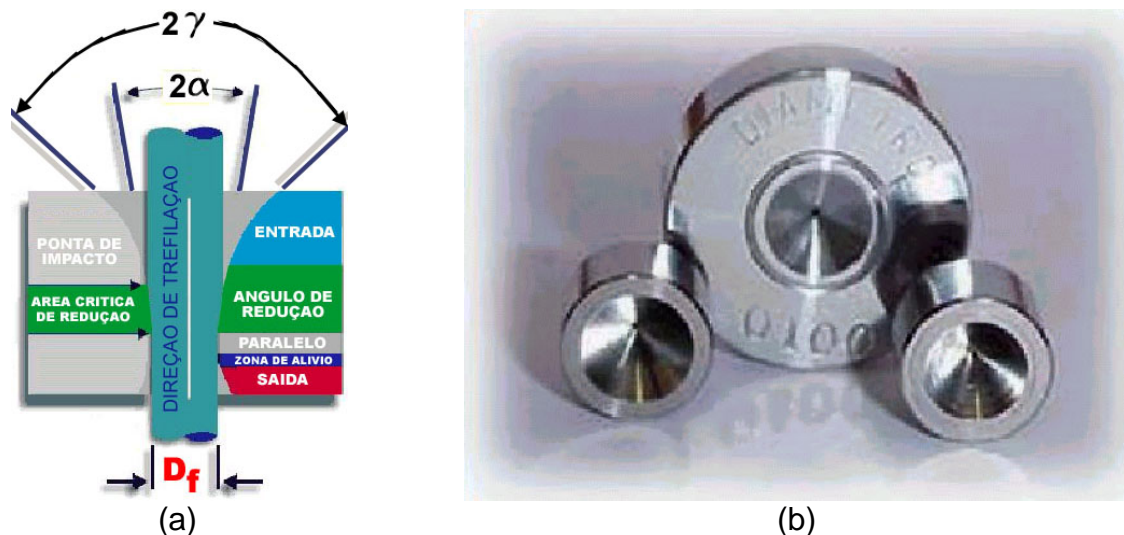


Figura 2.(a) Esquema ilustrando as relativas posições de interesse das empresas da região⁽²⁾. (b) Fotografias de matrizes.⁽²⁾

A região do ângulo de entrada tem por finalidade auxiliar na lubrificação da barra, garantindo que o lubrificante seja arrastado para dentro da região de deformação. Na região do semiângulo de trefilação, ocorre a redução do diâmetro da barra. A zona cilíndrica é responsável pelo controle dimensional do produto e pelo aumento da vida útil da fieira. A região do ângulo de saída evita uma abrasão adicional entre fieira e arame proveniente de algum desalinhamento (Figura 4).

O material da fieira depende das exigências do processo (dimensões, esforços) e do material a ser trefilado. Nestes casos, os materiais mais utilizados são:⁽²⁾

- carbonetos sinterizados – *widia*;
- metal duro;
- aços de alto C revestidos de Cr (cromagem dura);
- aços especiais (Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W etc.);
- ferro fundido branco;
- cerâmicos (pós de óxidos metálicos sinterizados); e

- diamante (p/ fios finos ou de ligas duras).

No presente trabalho uma máquina de tração da Unisanta foi adequada para executar simulações do processo de trefilação de fios grossos. Foi projetado e confeccionado uma fieira e um dispositivo auxiliar (um “porta fieira”) para fazer a fixação desta à garra da máquina de tração. Com o sistema montado, foi possível fazer a conformação de fios de cobre, com a possibilidade de variar a velocidade de deformação na máquina e medindo-se a força em função do deslocamento ocorrido. Os fios empregados foram testados mecanicamente e obtiveram-se os valores de propriedades mecânicas, em especial os valores da constante plástica de resistência (K) e expoente de encruamento (n), empregados na equação de Hollomon:⁽⁴⁾

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

Os parâmetros obtidos do material servem como dados de entrada de métodos analíticos teóricos, tipicamente empregados, conforme descritos na literatura,^(1,3,5) para analisar o processo de trefilação.⁽²⁾ Empregando-se os dados gerados nos ensaios de caracterização do material e os dados obtidos durante as simulações, foi possível comparar matematicamente os resultados práticos obtidos com os valores teóricos calculados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Máquina de Tração

Para realizar o ensaio de trefilação foi utilizada uma máquina universal de ensaios, tipicamente empregada na Unisanta para realizar ensaios de tração. Essa máquina é da linha DL (*Digital Line*) da EMIC e possui capacidade de carga para até 100 kN de força.

2.2 Fieira

A fieira, mostrada na Figura 3.a, foi construída em aço carbono SAE 4043 seguindo as medidas externas típicas de uma matriz para fios grossos de cobre.⁽²⁾ Após usinagem a fieira foi temperada em óleo de tal forma a adaptar a sua dureza.⁽⁵⁾ A Figura 4 apresenta as dimensões adotadas para a construção da fieira. Para averiguação dimensional, utilizou-se o projetor de perfil Mitutoyo[®] do laboratório de Metrologia da Unisanta. Este aparelho foi empregado para verificar e garantir um diâmetro interno na fieira, que no caso foi de 3,45 mm.

O diâmetro interno do cilindro de calibração foi usinado com uma broca helicoidal. Porém o seu pequeno tamanho não permitiu realizar um polimento direto, como é necessário. Foi efetuado o polimento no cone de entrada e no cone de trabalho onde, ocorre o início da deformação do fio. Posteriormente a região de calibração teve sua rugosidade diminuída por um polimento realizado com fio de algodão embebido em alumina de polimento metalográfico, entretanto com resultados limitados.

2.3 Dispositivo de Fixação da Fieira (“Porta-fieira”)

A máquina utilizada no trabalho, empregada para realizar ensaios de tração, não apresenta condições para a passagem do fio no sentido longitudinal da fieira. Por isso, foi necessário projetar um dispositivo que se adequasse as necessidades do

processo de trefilação de tal forma que pudese ser executado na máquina configurada para realizar um ensaio de tração. Este dispositivo está ilustrado na Figura 3.b.

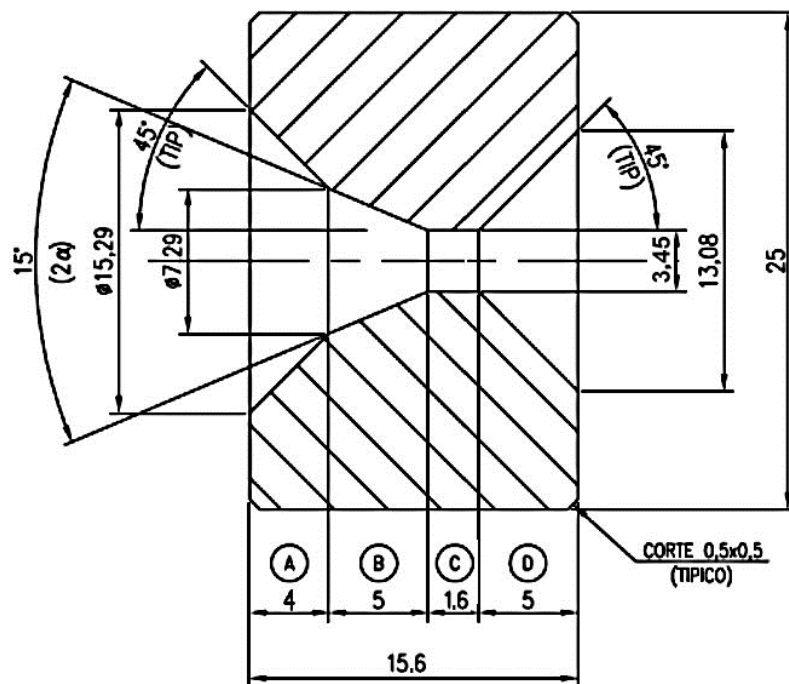


(a)



(b)

Figura 3. (a) Aspecto da fieira construída para o trabalho. (b) Dispositivo para acoplar a fieira à garra da máquina de tração ("porta-fieira").



- (A) CONE DE ENTRADA: PERMITE O ACESSO DO LUBRIFICANTE E DA BARRA ÀS PARTES DE TRABALHO DA FIEIRA.
- (B) CONE DE TRABALHO: INÍCIO DA DEFORMAÇÃO OCORRE NESTA ÁREA.
- (C) CILINDRO DE CALIBRAÇÃO OU PARALELO: É A ÁREA ONDE OCORRE O ACOMODAMENTO DO MATERIAL.
- (D) CONE DE SAÍDA: ÁREA DA SAÍDA DA BARRA TREFILADA. A ALTURA DA ZONA DE SAÍDA DEVE SER ADEQUADA DE FORMA A DAR SUPORTE E TENSÃO MECÂNICA AXIAL PRODUZIDA PELO PROCESSO.

Figura 4. Desenho da fieira construída para o trabalho.

O dispositivo de fixação de fieira foi projetado e construído a partir de um tubo SCH 60 com diâmetro de 1¼ pol. e comprimento de 80 mm. Foi usinada uma abertura de 27 mm para a entrada da fieira e também para a entrada do fio a ser trefilado. A este tubo foi soldado um tarugo de aço carbono de diâmetro de 42 mm.

Essa peça foi usinada para permitir que a mesma se encaixe na garra da máquina de tração, de tal forma que esta possa ser tracionada. A Figura 5 ilustra como ficou o aspecto do sistema Fieira-Dispositivo-Máquina-Fio conforme empregado no trabalho.

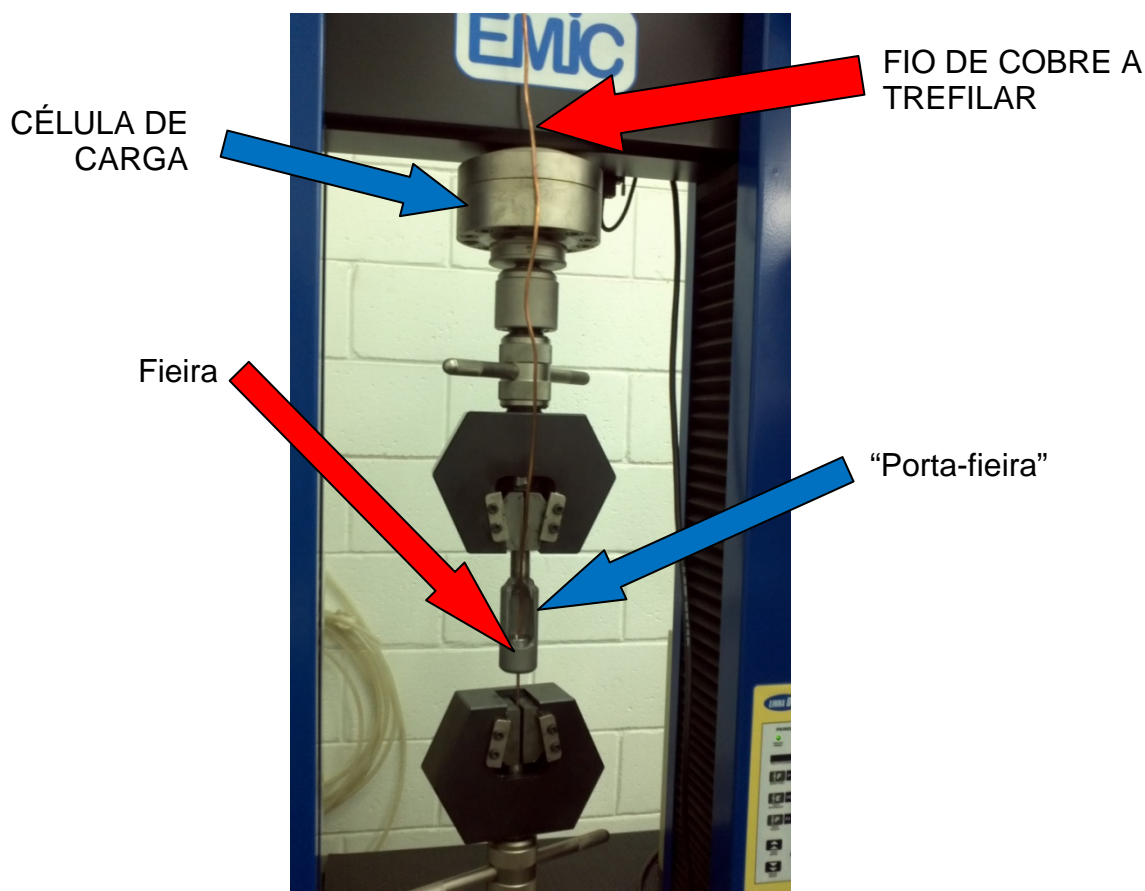


Figura 5. Montagem para realizar uma simulação de trefilação na máquina de tração.

2.4 Fio

Para realizar a trefilação foi empregado fio de cobre com 3,68 mm de diâmetro, usado em condutores elétricos. Antes da realização da trefilação, o fio foi recozido em um forno elétrico do laboratório de metalografia da Unisanta a uma temperatura de 500°C, conforme recomendado pela literatura.⁽⁵⁾

Este fio foi trefilado com uma redução de 6,67% no diâmetro (de 3,68 mm para 3,45 mm) ou de 12,11% em área (de 10,6 mm² para 9,35 mm²). Para executar o processo de trefilação foram empregados como CPs de trefilação pedaços de fio de cobre recozido com de 200 mm de comprimento. Todos os CPs utilizados neste trabalho tiveram o seu diâmetro medido em três posições diferentes e em três medidas diferentes com o uso de um micrômetro.

2.5 Trefilação

Uma das extremidades do CP de trefilação foi afinada mecanicamente de tal forma que um comprimento de cerca de 50mm passasse através da fieira e pudesse ser fixada na garra inferior da máquina de tração (Figura 5). A trefilação se deu com o deslocamento do cabeçote superior da máquina de tração que através da garra

puxou o “porta-fieira” (Figura 3.b) e a fieira (Figura 3.a) estando a extremidade do fio de cobre fixa pela garra inferior (Figura 5). Os CPs com 200mm de comprimento foram trefilados em cinco diferentes condições de trefilação em função da velocidade de conformação e condição de lubrificação. Estas condições estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de trefilação empregadas

Quantidade de CPs	Condição de lubrificação	Velocidade (mm/min.)
5	Sem lubrificação	50
2		200
3	Grafite em pó	50
3		200
2	Óleo	50

Ao longo do processo de trefilação (Figura 5) foram registrados os valores da força aplicada através da célula de carga e o deslocamento através do sensor de deslocamento do travessão (LVDT) da máquina de tração. Resultados típicos, obtidos durante o processo de conformação estão ilustrados no gráfico da Figura 6.

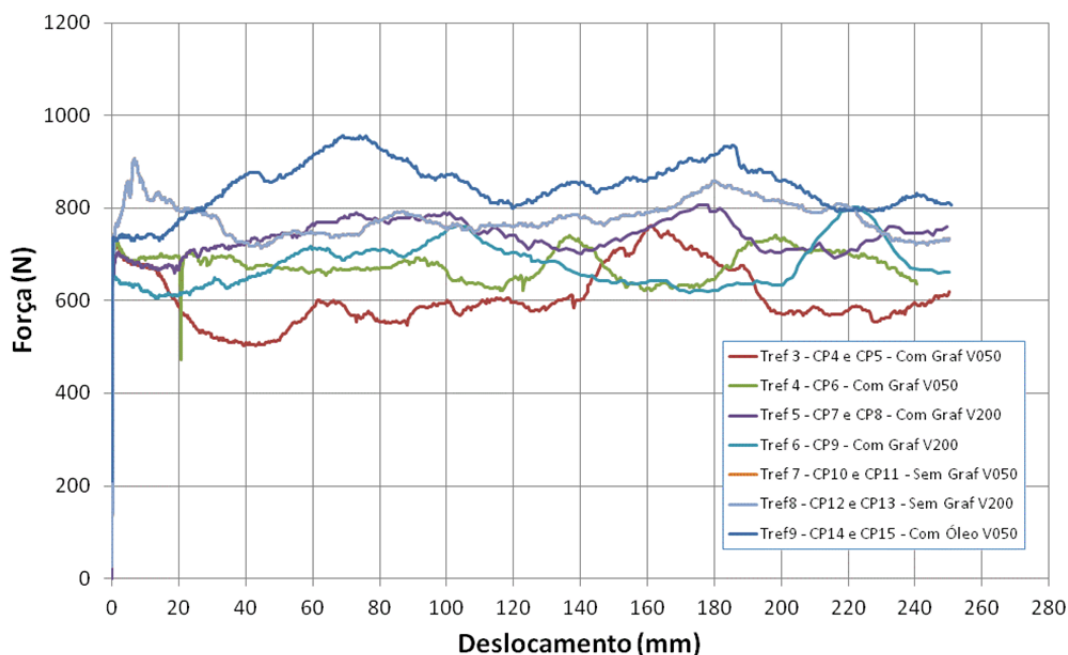


Figura 6. Curvas força x deslocamento obtidas durante a simulação da trefilação.

2.6 Ensaio de Tração

Após a trefilação, realizada nas condições da Tabela 1, os CPs trefilados foram ensaiados por tração. Neste caso foi empregada a mesma máquina usada no processo de conformação, porém reconfigurada para a realização de ensaios de tração de fios, o que pode ser feito com rapidez.

A Figura 7 ilustra a montagem empregada para fazer os ensaios de tração nos fios de cobre. Nesses ensaios foi empregado um extensômetro afixado no CP (Figura 7) de forma a permitir a obtenção de valores precisos de deformação, necessários para a determinação da constante plástica de resistência (K) e o expoente de encruamento (n) conforme descritos pela Equação de Hollomon (Eq.1). Neste caso, o fio de cobre no estado recozido apresentou:

- $K = 605\text{MPa}$ e
- $n = 0,476$.

As curvas tensão x deformação obtidas e mostradas na Figura 8, visam analisar o grau de encruamento e comparar o efeito das variáveis de processamento dos fios de forma simples e prática nesta simulação da trefilação.



Figura 7. Teste de tração da amostra do fio de cobre com uso de extensimetria.

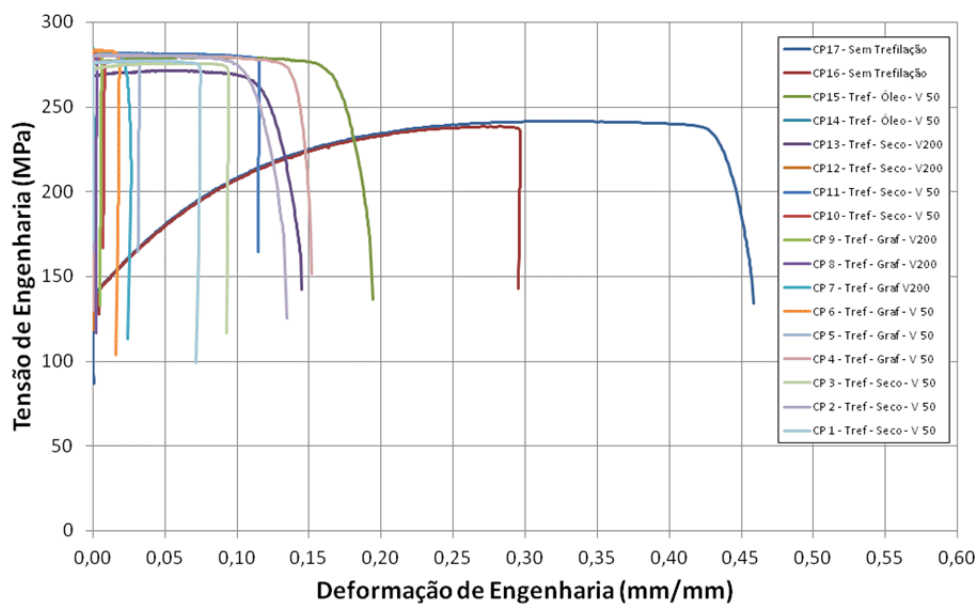


Figura 8. Curvas tensão deformação dos fios de cobre após a trefilação.

2.7 Análise Mecânica

O objetivo primordial dos cálculos da conformação plástica de metais é a determinação do esforço de conformação do material até a forma final desejada. Indiretamente, os métodos de cálculo também permitem obter dados, tais como:

- esforços de conformação (principal);
- potência a ser utilizada (importante no dimensionamento dos equipamentos);
- dimensionamento das ferramentas e/ou equipamentos auxiliares;
- necessidade do tipo e quantidade de lubrificação;
- determinação das trocas térmicas e/ou temperaturas dos produtos;
- distribuição das tensões e/ou deformações durante e após a conformação; e

- encruamento presente e conseqüente alteração nas propriedades mecânicas.

Para obter estes dados é importante considerar os fenômenos básicos do processo de conformação e empregá-los convenientemente na metodologia de cálculo trabalhada. Obviamente, existem vários métodos de cálculo, cada qual com vantagens e limitações, sendo que o método mais adequado a ser utilizado dependerá dos seguintes fatores básicos:

- precisão relativa necessária para o cálculo;
- possibilidade de modelar o sistema;
- disponibilidade de pessoal e recursos para implementar o modelo; e
- disponibilidade e representatividade de dados (históricos ou não).

Os métodos de cálculo, por sua vez, podem ser classificados de acordo com a maneira como foram concebidos:

- métodos empíricos e/ou experimentais ou
- métodos teóricos, que podem ser:
 - modelos numéricos;
 - métodos analíticos: o processo de conformação é estudado com base na mecânica do contínuo, quando se obtém um modelo matemático que relaciona variáveis de conformação. A resolução do modelo é obtida por meio de aproximações convenientes, correlacionadas com a precisão desejada.

Na análise dos processos de conformação, por outro lado, existem três modos de deformação que devem ser quantificados:^(1,3)

- deformação homogênea (ϵ_{Homog});
- deformação por atrito (ϵ_{Atrito}); e
- deformação redundante ($\epsilon_{\text{Red.}}$).

Todas as três formas de deformação ocorrem nos processos de conformação mecânica. Uma maneira de visualizar a presença destes modos de deformação é através da análise da força empregada para a conformação, como ilustrado no gráfico da Figura 9. Esse gráfico ilustra a quantificação da presença dos três modos de deformação para o processo de trefilação em função de valores crescentes do semi-ângulo da matriz ou fieira de trefilação (α , Figura 2). À medida que o ângulo cresce:

- a deformação homogênea, que depende das dimensões inicial e final do material não varia (reta horizontal do gráfico da Figura 9);
- aumenta-se a complexidade da conformação, aumentando a deformação redundante até valores comparáveis à deformação homogênea; e
- diminui-se a área de contato e o montante de deformação por atrito presente.

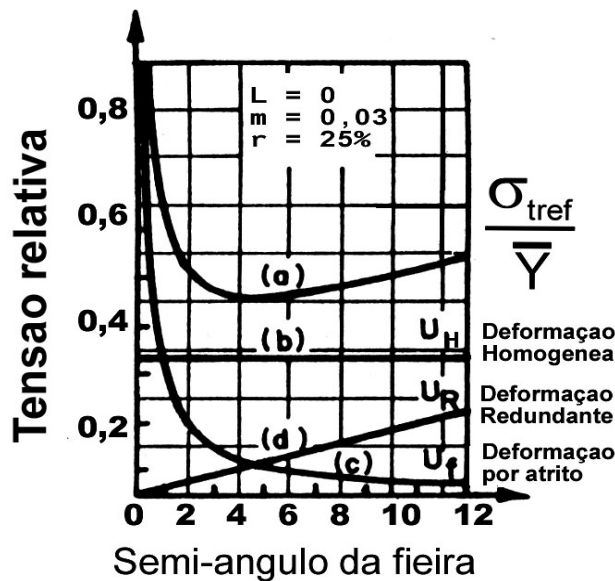


Figura 9. Correlação relativa das deformações homogênea, redundante e por atrito presentes em um processo de trefilação.⁽³⁾

Diferentes equações estão disponíveis na literatura,^(1,2,3) cada qual se baseia em condições específicas do processo. Alguns exemplos estão mostrados a seguir.

Deformação de engenharia (e) ou redução de área (r):

$$e = \frac{A_0 - A_F}{A_0} = 1 - \left(\frac{D_F}{D_0} \right)^2 = r \quad (2)$$

Onde: A_0 é a área da seção reta de entrada e A_F é a área da seção reta de saída.

Deformação verdadeira (ε):

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{A_0}{A_F} \right) \quad (3)$$

Razão de trefilação (R):

$$R = \frac{A_0}{A_F} = \left(\frac{D_0}{D_F} \right)^2 \quad (4)$$

Segundo Dieter⁽⁶⁾, uma análise baseada apenas na deformação uniforme fornece a seguinte equação para o processo de trefilação:

$$\sigma_{Tref} = \bar{Y} \cdot \ln \frac{A_0}{A_F} = \bar{Y} \cdot \ln(R) \quad , \quad \text{onde:} \quad \bar{Y} = \frac{k \cdot (\varepsilon_F)^{(n)}}{n+1} \quad (5)$$

Quando só se considera a deformação homogênea, a real carga de conformação é subestimada, pois não são consideradas as deformações por atrito e redundante. Uma possível correção é através do coeficiente de eficiência da deformação (η):

$$\sigma_{Tref Real} = \eta \cdot \sigma_{Tref} = \eta \cdot \bar{Y} \cdot \ln \frac{A_0}{A_F} \quad , \quad \text{onde:} \quad \bar{Y} = \frac{k \cdot (\varepsilon_F)^{(n)}}{n+1} \quad (6)$$

Johnson e Rowe⁽⁴⁾ propuseram uma equação para considerar o efeito do atrito, através dos valores do coeficiente de atrito estático (μ), sobre a equação 5, obtendo:

$$\sigma_{Tref} = \bar{Y} \cdot (1 + B) \cdot \ln \frac{A_0}{A_F}, \quad \text{onde:} \quad \bar{Y} = \frac{k \cdot (\varepsilon_F)^{(n)}}{n + 1} \quad ; \quad B = \mu \cdot \cotag(\alpha) \quad (7)$$

Considerando a presença do atrito (μ) e o uso do método dos blocos, obtêm-se a seguinte equação, sem levar em consideração a deformação redundante:

$$\sigma_{Tref} = \bar{Y} \cdot \frac{1 + B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_F}{D_0} \right)^{2B} \right], \quad \text{onde:} \quad \bar{Y} = \frac{k \cdot (\varepsilon_F)^{(n)}}{n + 1} \quad ; \quad B = \mu \cdot \cotag(\alpha) \quad (8)$$

Outra forma de considerar o efeito das deformações não homogêneas é através do parâmetro de Rowe ou parâmetro do trabalho redundante (ϕ):

$$\phi = f(\alpha, r) = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \quad (9)$$

Onde ε^* é a deformação aumentada correspondendo ao limite de escoamento que foi homoganeamente deformado até ε .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas tensão x deslocamento foram transformadas em curvas de probabilidade através do *software* MiniCalc[®]. Os resultados estão apresentados na Figura 10. Nesta figura pode-se perceber que a simulação foi sensível às diferentes condições de trefilação impostas, conforme descritas na Tabela 1. Os resultados apontados pelos gráficos podem ser resumidos na Tabela 2, que associa as condições de trefilação com a força observada com 50% de probabilidade (moda) de obtenção no processo.

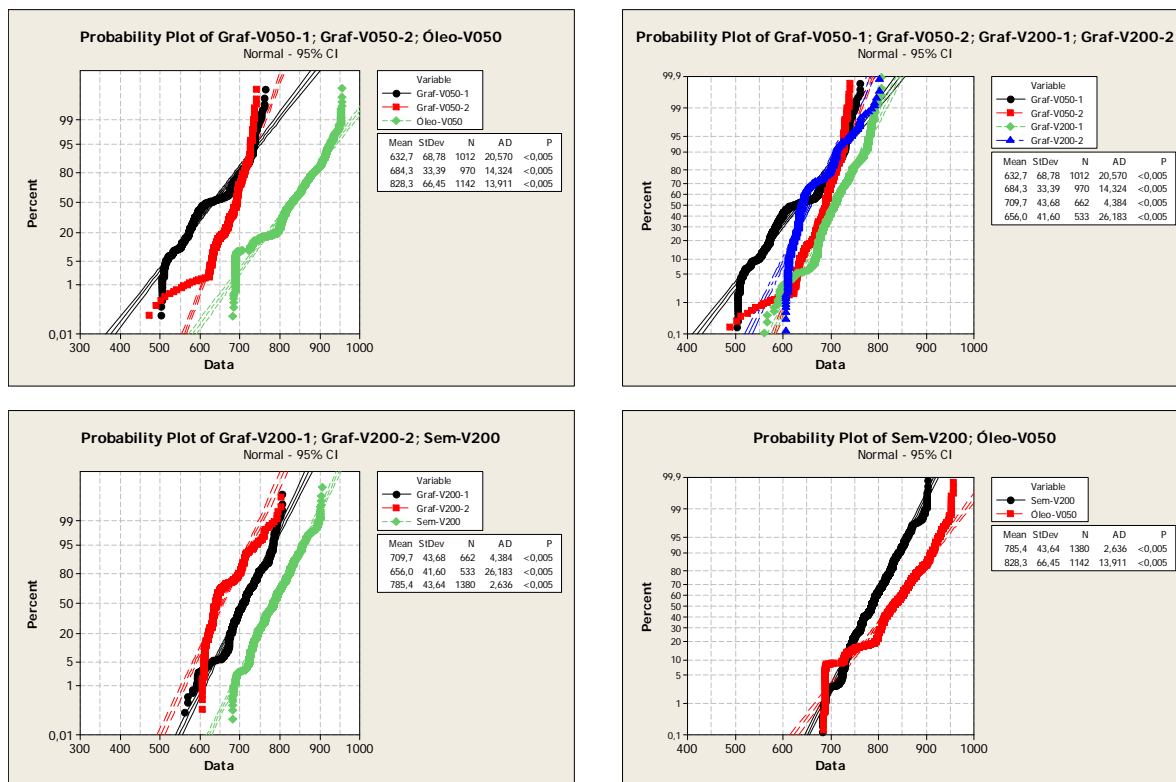


Figura 10. Curvas de probabilidade de força de trefilação obtida nas diferentes condições simuladas na máquina de tração da Unisanta.

Tabela 2. Força de trefilação ($F_{50\%}$) em função das condições de trefilação.

Condição de lubrificação	Velocidade (mm/min.)	Força de trefilação - $F_{50\%}$ (N)
Óleo	50	828 ^(*)
Sem lubrificação	50	n.d. ^(*)
	200	785
Grafite em pó	200	683
	50	658

(*) – O óleo não penetrou na fieira, portanto os resultados podem ser considerados como 'sem lubrificação'

Apesar do comportamento relativamente estável dos gráficos de força de trefilação, é visível algumas distorções presentes. Estas distorções podem ser explicadas pelo rugosidade da fieira na região da calibração, local cujo polimento da superfície foi restrito e pela heterogeneidade de alinhamento do fio sendo trefilado (Figura 5).

Empregando as equações de (2) a (8) é possível analisar a influência do processo de trefilação e também inferir valores de algumas variáveis importantes tais como o coeficiente de atrito e o parâmetro de Rowe, caso estejam disponibilizados dados experimentais do processo. A simulação feita na máquina de tração oferece estes resultados, especialmente quando se considera as condições de matriz/fieira similares à realidade prática. Um exemplo está descrito abaixo, no qual as condições de trefilação descritas na Tabela 2 foram empregadas em conjunto com os resultados da força de trefilação ($F_{50\%}$) para obter os dados apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Resultados da análise do processo de trefilação simulado

Condição (vide Tabela 2)	F_{Tref} (N)	σ_{Tref} (MPa)	μ	η	ϵ_{Homog}	$\epsilon_{Red.}$	ϵ_{Atrito}	ϵ_{TOTAL}
V=50 / seco	828	88,6	0,277	22,5%	0,129	0,076	0,368	0,573
V=200 / seco	785	84,0	0,256 (ref.)	23,8%	0,129	0,076	0,338	0,543
V=200 / grafite	683	73,1	0,188 (ref.)	27,3%	0,129	0,076	0,268	0,472
V=50 / grafite	658	70,4	0,177	28,4%	0,129	0,076	0,250	0,455

Na Tabela 3 é possível notar que foram obtidos altos valores do coeficiente de atrito estático (μ) e baixos valores do coeficiente de eficiência da deformação (η), ambos resultados correlacionados às limitações durante a fase de confecção da fieira (ver item 2.2). Porém esta limitação não invalida o emprego da técnica de simulação desenvolvida, pois esta apresentou sensibilidade e capacidade de quantificar variáveis dos processos de trefilação. Resultados realísticos poderão ser obtidos ao se empregar as ferramentas reais empregadas em processos industriais que poderão ser análise por estas simulações.

4 CONCLUSÕES

Empregando-se os dados gerados nos ensaios de caracterização do material e os dados obtidos durante as simulações de trefilação na máquina de tração, é possível comparar matematicamente os resultados práticos obtidos com os valores teóricos calculados. Além disso, podem ser investigadas diferentes condições de trefilação para quantificar o efeito sobre o esforço médio de conformação.

Com isso, é possível empregar um recurso de acesso relativamente fácil (máquina de tração) para simular e analisar o processo de trefilação de forma simples e prática. O trabalho executado demonstra o potencial de emprego desta metodologia na análise de condições de trefilação e conseqüentemente para melhorias do processo de trefilação, como por exemplo, na quantificação do uso de novos lubrificantes.

REFERÊNCIAS

- MORAIS, W.A. Conformação Plástica. Notas de Aula. Disponível em <http://cursos.Unisantabr/mecanica/cpm-0864.html> <Acesso em 01/10/2012>.
- BUTTON, S.T.; Curso: Trefilação. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2002.
- HELMAN, H.; CETLIN, P.R.; Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. Editora Guanabara Dois, 1983.
- MORAIS, W.A. *et. al.* Estudo das variáveis de deformação plástica em aços através de ensaios de tração instrumentados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 59., 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004. 1 CD-ROM.
- MENEZES NETTO, E. B. Tecnologia dos tratamentos térmicos. In: MORAIS, W.A., MAGNABOSCO, A.S. e MENEZES NETTO, E. B. Metalurgia Física e Mecânica Aplicada (2ª edição). São Paulo: ABM, 2009. mód.2, cap.3, p.205-228.
- DIETER, G. E.; Mechanical Metallurgy. SI Metric edition. McGraw Hill, Singapore, 1988.