

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FIEIRA NA TREFILAÇÃO DE FIOS (1).

Gustavo A Santana Martinez (2)

Sérgio Tonini Button (3)

Splinter J. Cestari (4)

SUMÁRIO

Este trabalho apresenta uma análise da influência da geometria da fieira sobre a força no processo de trefilação com dois tipos de óleo lubrificante de diferentes viscosidades.

Foram utilizados duas fieiras: a primeira tem geometria próxima à ideal e a segunda, uma geometria de uso comum.

Ambas foram utilizadas para trefilar aço inoxidável ABNT 304 a velocidades que variaram de 0 a 14 m/s, com os óleos MJF 2 e MJF 5.

Foi também analisado o coeficiente de atrito e sua variação devido à influência da velocidade no processo de trefilação.

(1) Contribuição técnica a ser apresentada no " I Seminário de Trefilação de Arames, Barras, Tubos e Metais Ferrosos e Não-Ferrosos" - ABM - São Paulo - 18 a 19 de novembro de 1993.

(2) MsC - Doutorando - DEMa-FEM-UNICAMP.

(3) Professor Doutor - DEMa-FEM-UNICAMP.

(4) Diretor - Quality Dies Ltda.

I - INTRODUÇÃO

Devido à internacionalização do mercado brasileiro a utilização de processos com enfoque em qualidade e produtividade torna-se vital.

Esta tendência tem proposto um grande número de problemas aos especialistas da área de trefilação, cuja responsabilidade é a de garantir um desempenho satisfatório na operação

Verifica-se essencialmente alguns problemas decorrentes do aumento da velocidade

- o aumento da taxa de produção de calor, que afeta o desempenho do lubrificante, pela redução de sua viscosidade;
- afetada a viscosidade ocorre uma diminuição na eficiência da separação fio-matriz, que pode ser verificada na prática pela ocorrência de um acabamento brilhante típico da lubrificação limite;
- tem-se também problemas no acabamento da superfície do produto acabado;
- a vida da matriz é diminuída, acarretando uma diminuição do comprimento de produto trefilado;
- também o tempo perdido na troca das matrizes (fieiras) é aumentado, com a elevação do tempo de máquina parada.

A diferença entre a produtividade brasileira e a estrangeira^[GM], pode ser explicada pela escolha inadequada do tipo de lubrificante empregado na trefilação do aço inoxidável e pela não utilização de geometria de fieira apropriados.

II - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência da geometria da fieira sobre a força no processo de trefilação com dois tipos de óleo lubrificante de diferentes viscosidades.

Também analisa o coeficiente de atrito e sua variação devido à influência da velocidade no processo de trefilação.

Assim, serão estudados alguns parâmetros do processo de trefilação, sempre com a perspectiva de:

- redução no consumo de energia;
- aumento do grau de utilização das máquinas por unidade de tempo;
- manutenção da qualidade do produto acabado.

^{GM} Comunicação pessoal, 1992/1993.

III - TREFILAÇÃO

A trefilação é um processo de conformação a frio no qual o fio metálico é tracionado através de uma ferramenta oca denominada feira, onde sofre deformação plástica. Em consequência dessa deformação, o diâmetro do fio é reduzido e seu comprimento é aumentado.

A finalidade do processo de trefilação é a obtenção de fios de dimensões, acabamento superficial e propriedades mecânicas controladas [1].

III.1 - FIEIRAS

Denomina-se feira, a ferramenta apropriada para realizar convenientemente o processo de trefilação.

A ferramenta de trefilar, é constituída de regiões distintas, ao longo do furo interno como pode ser visto na figura 1.

O cone de entrada tem a finalidade de guiar o fio em direção ao cone de trabalho e permitir que o lubrificante acompanhe o fio e contribua para a redução do atrito entre as superfícies do fio e do cone de trabalho.

No cone de trabalho ocorre a redução, sendo, portanto, a região onde é aplicada ao fio o esforço de compressão e onde o atrito deve ser minimizado para reduzir, também ao mínimo, o desgaste da feira.

No cilindro de calibração, ocorre o ajuste do diâmetro do fio. É objeto de controle o comprimento, ou melhor, a altura desse cilindro, pois, quando essa altura é pequena, facilita as operações de retificação das feiras gastas para obtenção de uma feira de diâmetro final maior.

O cone de saída deve proporcionar uma saída livre do fio sem causar danos nas superfícies da feira e do fio.

Tem especial importância para este trabalho o ângulo de trabalho (ou ângulo da feira) e a altura do cilindro de calibração, denominados 2α e H_c respectivamente.

A feira é fabricada com materiais de extrema resistência ao desgaste, empregando-se comumente metal duro (carboneto de tungstênio), diamante (natural ou policristalino) e também alguns materiais cerâmicos (óxido de zircônio, carboneto-nitreto de titânio, etc).

Qualquer que seja o material usado na fabricação das ferramentas para trefilação, são exigidas as seguintes características [1]:

- permitir a trefilação de grande quantidade de fios sem que ocorra um desgaste acentuado da feira;

- permitir a trefilação a altas velocidades para produzir elevadas quantidades por unidade de tempo,
- permitir a adoção de elevadas reduções de secção,
- conferir calibração constante do diâmetro do fio,
- conferir longa vida à ferramenta, sem necessidade de paradas da máquina de trefilar para controle de dimensões e substituição da ferramenta,
- permitir a obtenção da superfície do fio liso e brilhante, durante longo período de uso

III.1.1 - ÂNGULO DE TRABALHO (2α).

No ângulo de trabalho acontece a conformação, isto é, ocorre o processo de redução da secção do fio. É nesse ponto que temos a transformação de parte da tensão de tração em tensão de compressão induzida pela inclinação da fiera.

Bonzel [2] afirma que uma lubrificação ideal ou uma mudança adequada no ângulo da fiera pode diminuir o efeito de redução da tensão de compressão no fio à medida que se aproxima da saída da ferramenta.

Também mostra que a associação de um ângulo ótimo, que é o ângulo ideal para a mínima força de trefilação. Com um regime ótimo de lubrificação, permite a obtenção de alta qualidade superficial do fio trefilado e menor desgaste da fiera.

Rowe [3] afirma que um regime ótimo de lubrificação é mais facilmente obtido através do uso de pequeno ângulo de trabalho e uma grande velocidade.

O ângulo de trabalho (2α) depende de dois fatores principais [4]:

- a. o tipo de material a ser trefilado;
- b. a porcentagem de redução da secção transversal.

Frascio [4] afirma que o melhor sistema para se determinar experimentalmente o ângulo ótimo de trabalho, é através do controle da variação da tensão de tração, em função da variação do cone de trabalho, fixando outros parâmetros como: qualidade e rugosidade da fiera utilizada, diâmetro e qualidade do fio, tipo de lubrificante e velocidade de trefilação.

Eder [5] afirma que materiais de baixa resistência mecânica necessitam de 2α maiores que materiais de alta resistência, embora reconheça a existência de exceções a esta regra.

O método do limite superior de Avitzur [6] é o que melhores resultados tem apresentado no cálculo do ângulo de trabalho (2α). Esse método considera o trabalho redundante, o trabalho de atrito e o trabalho de deformação homogênea.

O método baseia-se no teorema do limite superior, o qual afirma que, quando um corpo escoar, o trabalho das forças externas é menor ou igual ao trabalho das forças associadas a qualquer campo de velocidades cinematicamente admissível no corpo sob deformação.

A expressão (1) apresenta a equação do método do limite superior desenvolvido por Avitzur.

$$\frac{\sigma_y}{\alpha} = \frac{\frac{\sigma_{xb}}{\alpha} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} \cot \alpha \right) + 2\mu \left(\cot \alpha \left[1 - \frac{\sigma_{xb}}{\alpha} - \ln \frac{R_o}{R_f} \right] \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right)}{1 + 2\mu \frac{L}{R_f}} \quad (1)$$

onde

- | | |
|---|--------------------------------|
| σ_{xf} - tensão de trefilação, | R_o - raio inicial, |
| σ_o - tensão de escoamento efetiva, | R_f - raio final, |
| σ_{xb} - tensão frontal, | μ - coeficiente de atrito, |
| α - semi-ângulo de trabalho, | |
| L - comprimento da região cilíndrica de calibração. | |

Esta abordagem sempre fornece uma força superestimada à necessária para causar o escoamento de um material de von Mises.

II.1.2 - CILINDRO DE CALIBRAÇÃO (Hc).

Esta região tem como finalidade obter o diâmetro exato do material trefilado que define sua altura ou comprimento.

A região cilíndrica de calibração geralmente é dividida em classes [5]:

- pequeno - quando tem de 0 a 20 % do diâmetro;
- médio - de 20 a 30 % do diâmetro;
- longo - quando tem de 30 a 50 % do diâmetro.

Frascio [4] afirma que o cilindro de calibração, não basta ser exato e liso como o cone de trabalho, mas que seu comprimento deve ser proporcional ao diâmetro e à redução de secção a ser efetuada. Se for longo pode ocasionar uma resistência ao movimento do material trabalhado e se for curto pode determinar um alargamento prematuro do cilindro.

Segundo Keebler [7] para prevenir o rápido desgaste da ferramenta acima das medidas toleráveis, o comprimento do cilindro de calibração deve ser de 35 a 66% do diâmetro final.

Em relação à região cilíndrica de calibração Maxwell [8] faz as seguintes afirmações:

1. o comprimento deve ser entre 35 a 50 % do diâmetro final;

2. o acabamento superficial deve ser elevado,
3. a região de calibração deve ser paralela em todo o seu comprimento

II.2 - LUBRIFICAÇÃO

Os lubrificantes dividem-se em três grupos: líquidos, pastosos e sólidos

Qualquer que seja o grupo a que pertença, o lubrificante deve satisfazer as seguintes propriedades :

- ser capaz de manter separadas a superfície da fiação e a superfície do material trefilado durante todo o processo de trefilação;
- manter-se estável perante a mudança de temperatura;
- não reagir quimicamente com as superfícies metálicas,
- manter limpas as superfícies lubrificadas

Tanto na utilização do lubrificante sólido como no lubrificante líquido, duas características do processo de trefilação têm grande influência:

- a temperatura de trabalho que atua de forma direta na viscosidade do lubrificante
- a pressão de trabalho que é constante e diretamente proporcional à redução de secção transversal do material.

A escolha correta de um lubrificante baseia-se em parâmetros como os materiais usados na ferramenta e na peça, a temperatura e a velocidade de processo. A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob as condições de processo, que previna o contacto entre as superfícies [9].

Quanto à espessura do filme de lubrificação existente entre as superfícies, Wilson define os regimes de lubrificação descritos a seguir:

- **Regime de filme espesso** (figura 2.a), onde as superfícies são totalmente separadas por um filme muitas vezes superior à rugosidade média das superfícies envolvidas e ao tamanho molecular do lubrificante empregado.
- **Regime de filme fino** (figura 2.b) onde a espessura do filme apresenta-se entre três a dez vezes o valor da rugosidade superficial média das superfícies.

- No regime de camada limite (figura 2.c), o filme que separa as superfícies apresenta espessuras da ordem de algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante.
- Regime de lubrificação mista (figura 2.d), onde a espessura do filme é menor que três vezes o valor da rugosidade média das superfícies.

O estabelecimento de um ou mais regimes de lubrificação durante o processo de trefilação, está relacionado a fatores como a velocidade do processo, a viscosidade do lubrificante e a força aplicada nas superfícies.

A figura 3 obtida de Hersey apud Button [9] apresenta a variação da resistência ao cisalhamento da interface de contacto, representada por um coeficiente de atrito, devido ao aumento do parâmetro S (velocidade x viscosidade/força). Representa a passagem dos diversos regimes:

- camada limite, para pequenos valores de S ;
- misto, para valores de S um pouco maiores;
- hidrodinâmico, para valores de S acima de um ponto crítico.

A baixas velocidades, a quantidade de lubrificante carregada para a região de contacto é mínima, a possibilidade de contacto metálico é grande, bem como o coeficiente de atrito.

Com o aumento da velocidade, uma maior quantidade de lubrificante é trazida à região de contacto, preenchendo os vales, separados por passagens estreitas entre picos. Com o decorrer do processo, mais e mais lubrificante é trazido para os vales até que se estabelece um regime misto. As camadas de filme lubrificante são continuamente supridas pelo lubrificante existente nos vales.

O valor crítico de S , onde ocorre a passagem para um regime hidrodinâmico, representa a presença de um filme contínuo entre as superfícies. A existência desse filme é possível graças à deformação provocada nos picos, que faz com que o lubrificante existente nos vales seja distribuído ao longo das superfícies, separando-as totalmente.

A queda do coeficiente de atrito é facilmente explicada pela crescente separação das superfícies.

Já o aumento do coeficiente após atingir-se o regime hidrodinâmico, pode ser explicado observando-se a quantidade de lubrificante presente entre as superfícies, bem como a pressão a que estará submetido o filme.

O aumento de velocidade acarreta uma maior quantidade de lubrificante carregada para a região de contacto, a espessura do filme tende a crescer porém, também a pressão atuante sobre o filme se eleva, o que exige uma maior tensão para promover o cisalhamento do filme e conseqüentemente, ocorre um aumento do coeficiente de atrito [9].

II.3 - TREFILAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO ABNT 304.

O aço inoxidável austenítico ABNT 304 apresenta uma elevada plasticidade, o que permite sua deformação a frio até valores de 92 % de redução da seção transversal entre recozimentos.

O material de partida é o fio-máquina recozido e decapado com diâmetro na faixa de 5,50 a 7,94 mm e resistência à tração na faixa de 620 a 725 MPa.

A trefilação do aço ABNT 304 normalmente ocorre nas velocidades [11]:

- trefilação a seco - 3 a 5 m/s;
- trefilação úmida - 1 a 2 m/s.

Num pequeno número de empresas a trefilação por via úmida chega a ocorrer a uma velocidade de até 6 m/s para fios com diâmetro na faixa de 0,40 mm.

É comum o uso de feiras de carboneto de tungstênio na trefilação a seco e de feiras de diamante na trefilação úmida.

As indústrias brasileiras de trefilação de aço inoxidável têm como padrão feiras com ângulo de trabalho (2α) de 16 a 18° e cilindro de calibração variando entre pequeno e médio, diferente do recomendado pela "Steel Wire Handbook" [12] que indica 2α igual a 18° e Hc com 30 a 50 % do diâmetro do produto.

O arame de aço inoxidável ABNT 304 está disponível no mercado com os seguintes acabamentos:

- decapado - no estado recozido ou encruado;
- revestido com capa metálica - podendo ser de cobre ou chumbo;
- trefilado - como saído da máquina de trefilação;
- polido - é um acabamento liso e brilhante obtido após a trefilação ou recozimento.

O aço ABNT 304 não possui nenhuma característica especial no seu processo de trefilação, podendo ser trefilado como os outros arames da família 300.

III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

O procedimento experimental empregado neste trabalho constou de três etapas:

- ensaios com a matéria-prima: os fios a serem trefilados foram submetidos a ensaios de tração;
- ensaios de trefilção: nesta etapa foi avaliada a influência de cada feira com geometria específica e da viscosidade dos lubrificantes utilizados;
- ensaios com os produtos: os fios trefilados foram avaliados quanto ao aspecto visual e resistência à tração

A seguir faz-se a descrição de cada um dos ensaios acima relacionados.

III.1 - ENSAIOS REALIZADOS.

III.1.1 - Ensaio com a Matéria-prima.

O material a ser retrefilado é um aço inoxidável ABNT 304 recozido e não decapado, totalmente isento de qualquer tratamento superficial.

Foram realizados ensaios de tração para determinação das propriedades mecânicas da matéria-prima

III.1.2 - Ensaio de Trefilção.

Os ensaios de trefilção foram realizados em uma trefiladora montada e instalada no Laboratório de Conformação do Departamento de Engenharia de Materiais da FEM - Unicamp.

A trefiladora utilizada é uma máquina de cabrestante único, velocidade variável e caixa de feira adaptada para permitir a medição do esforço de trefilção, como pode ser visto na figura 4.

A sequência de trefilção tem início na fixação de um carretel plástico ABNT 160 contendo aproximadamente 5 kg de aço inoxidável em um desenrolador horizontal que trabalha sobre dois rolamentos. O fio passa na sequência por dois tensionadores alinhados. Estes tensionadores têm como função evitar que esforços contrários ao esforço de trefilção, ocasionados pelo desenrolamento, influenciem no sistema de medição do esforço de trefilção.

Na sequência, o fio entra na caixa de feira onde encontra o óleo lubrificante e a feira de trefilção. A feira totalmente imersa em óleo é apoiada sobre um suporte deslizante, que por sua vez tem como guia a tampa da caixa de feira (figura 5). O suporte de feira deslizante tem como obstáculo a lâmina onde se encontram os extensômetros elétricos.

Finalmente, na saída da caixa de feira tem-se o cabrestante, que traciona o fio forçando a sua passagem pela feira. O cabrestante é movido por um motor de corrente contínua de 18,4 kW e 3000 rpm de velocidade angular máxima.

A velocidade de trefilação variou de 0 a 14,6 m/s. O controle da velocidade foi feito por um tacômetro digital.

Para a medição da força de trefilação utilizou-se um dispositivo composto de uma lâmina, que é flexionada durante o processo. Nesta lâmina estão colados dois extensômetros (strain-gauges) em meia ponte de Wheatstone.

Este dispositivo encontra-se conectado a um amplificador de sinais Philips, um milivoltímetro digital e um registrador gráfico. A tabela 1 apresenta algumas informações complementares desse medidor.

A calibração do dispositivo de medição foi realizada utilizando-se pesos com valores conhecidos e a leitura dos resultados feita através do milivoltímetro.

Através de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados obteve-se a seguinte relação de força (N) versus voltagem (mV):

$$F = 0,688 \times V$$

com o coeficiente de correlação $R^2 = 0,998$

O controle da geometria de todas as feiras foi feito através de um aparelho perfilográfico Taylor-Hobson.

Como lubrificante, foram utilizados dois óleos da classe MJF [13].

Os lubrificantes da classe MJF são lubrificantes à base de óleos vegetais e minerais combinados com cloridrinas de alto peso molecular, contendo aditivos para pressões elevadas.

As viscosidades desses óleos foram avaliadas pelo fabricante através de um viscosímetro BrookField, e os resultados estão na tabela 2.

III.1.3 - Ensaios com os Produtos.

Estes ensaios tiveram como objetivo determinar as propriedades dos produtos obtidos no processo de trefilação, a fim de avaliar como a geometria da ferramenta, a velocidade de trefilação e a viscosidade dos lubrificantes influem na qualidade do produto.

Um aspecto importante, verificado a cada experimento, foi a qualidade do material trefilado, em termos de aspecto superficial e retilidade.

Os ensaios de tração verificaram a variação da tensão de escoamento a 0,2% e tensão limite de resistência com a redução de 0,50 mm para 0,45 mm de diâmetro em um único passe à velocidade de 14,6 m/s

IV - RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

IV 1 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS COM MATERIA-PRIMA.

Os resultados dos ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas realizados com a matéria-prima encontram-se na tabela 3.

Esses resultados indicam que a matéria-prima encontra-se num estado de recozimento ótimo, pois os valores obtidos estão abaixo da faixa de 685-960 MPa indicado para fios com diâmetro entre 0,05 e 0,50 mm.

IV 2 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TREFILAÇÃO.

Os ensaios de trefilação foram divididos em três conjuntos.

As figuras 6 e 7 apresentam os resultados obtidos nesses ensaios. Os valores de força apresentados são valores médios de seis medidas.

Nessas figuras, também são apresentadas as curvas polinomiais do segundo grau, cujas expressões são mostradas a seguir:

óleo lubrificante - MJF 2

$$\text{fieira 2} - F = 46,58 - 0,79 V + 0,03 V^2$$

$$\text{fieira 5} - F = 44,91 - 1,11 V + 0,04 V^2$$

óleo lubrificante - MJF 5

$$\text{fieira 2} - F = 52,08 - 2,78 V + 0,12 V^2$$

$$\text{fieira 5} - F = 35,78 - 0,61 V + 0,02 V^2$$

No primeiro conjunto de ensaios foi utilizado o lubrificante de baixa viscosidade MJF 2 com fieiras de ângulo de trabalho (2α) de 10° , 14° e Hc igual a 35 % de Df.

Esses ensaios tinham como objetivo verificar a influência do ângulo de trabalho (2α) sobre o esforço de trefilação a várias velocidades.

A figura 6 mostra os resultados desses ensaios.

A fieira número 2 ($2\alpha = 10^\circ$ e Hc = 35% de Df) apresenta uma queda da força de trefilação igual a 4,8 % na faixa de velocidade de 5,8 a 14,3 m/s, devido ao carreamento de maior quantidade de lubrificante para a região de contato, aumentando a camada de filme lubrificante.

Acima de 14 m/s a fieira número 5 ($2\alpha = 14^\circ$ e Hc = 35% de Df) é a que melhor resultado apresenta, com uma queda da força de 2,7 % em relação à fieira número 8 e 9,3 % em relação à fieira de número 2.

Neste primeiro conjunto de ensaios fica claro que para pequenos ângulos de trabalho predomina o efeito do atrito acarretando um elevado valor para o esforço de trefilação.

A medida que o ângulo de trabalho aumenta, o efeito do atrito diminui, de tal forma que apesar do aumento do trabalho redundante, existe uma redução significativa do esforço de trefilação.

Além disso, tem-se a existência de um ângulo pequeno entre a ferramenta e o fio associado a grande velocidade relativa, que favorece a formação de um filme espesso contínuo de óleo lubrificante, como apresentado por Rowe [3].

Isto fica claro quando se observa o comportamento das feiras de números 5, principalmente a velocidades acima de 14 m/s.

O segundo conjunto de ensaios teve por objetivo analisar a influência da viscosidade do óleo lubrificante em altas velocidades e diferentes ângulos de trabalho.

A figura 7 mostra os resultados desses ensaios.

O lubrificante utilizado foi o óleo MJF 5, que possui viscosidade maior que o óleo MJF 2 utilizado nos dois primeiros conjuntos de ensaios.

Nesta etapa utilizou-se 2α igual a 10° , 14° e fixou-se H_c em 35 % de D_f , para melhor analisar a influência do óleo lubrificante sobre o esforço de trefilação.

O comportamento das três feiras teve uma melhora significativa com a utilização do óleo MJF 5.

A feira número 2 (1035) novamente apresenta maiores forças de trefilação, mas apresentou uma queda de 10,9 % em comparação aos resultados obtidos com o óleo MJF 2 a velocidades acima de 14 m/s.

No comportamento da feira número 2 predomina o efeito do atrito a baixas velocidades. A altas velocidades o atrito diminui devido ao carreamento de maior volume de óleo lubrificante e, conseqüente formação de um filme espesso.

Embora nos ensaios com o óleo lubrificante MJF 2 a feira número 5 tenha apresentado menores esforços de trefilação apenas em velocidades acima de 14 m/s, nesta segunda etapa ela tem uma queda uniforme e gradual da força em todas as faixas de velocidades.

Dos resultados obtidos verifica-se que:

- o melhor óleo lubrificante é o MJF 5, pois é o que melhor comportamento apresentou em todos ensaios de trefilação, mantendo viscosidade adequada nos diversos níveis de pressão e temperatura atingidos nesses ensaios.
- a melhor geometria é a da feira número 5. É a que melhor associa pequeno ângulo de trabalho com altas velocidades a um comprimento de região cilíndrica de calibração mais estável. E também apresenta vida mais longa na operação de recuperação para diâmetros maiores.

Com os resultados experimentais de força de trefilação e a expressão para cálculo do coeficiente de atrito (μ) extraída do método do limite superior de Avitzur, foram calculados coeficientes de atrito para os diversos ensaios efetuados.

$$\mu = \frac{\sigma_v \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_v} + 2f(\alpha) \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right) \right) \sigma_v}{2 \left(\left(\frac{L}{R_f} \right) \sigma_v \right) \left(\sigma_v \left\{ (\cot \alpha) \left[1 - \frac{\sigma_w}{\sigma_v} \ln \frac{R_o}{R_f} \right] \ln \frac{R_o}{R_f} + \frac{L}{R_f} \right\} \right)} \quad (2)$$

Para que se possa melhor analisar os resultados dessas simulações, foram feitos ajustes polinomiais de segundo grau que são apresentados junto aos valores do coeficientes de atrito obtidos

Da análise das figuras 8 a 11 verifica-se a queda do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de trefilação

Sobre os valores de coeficientes de atrito obtidos por simulação e observando-se a curva de Stribeck (figura 3) e a análise dos regimes de lubrificação (Wilson [10]), pode-se estimar que:

- a feira número 2 na trefilação com MJF 2 apresenta coeficientes de atrito característicos do regime de camada limite em baixas velocidades passando para regime misto em altas velocidades,
- a feira número 5 na trefilação com MJF 5 apresentou coeficientes de atrito de regime misto em todas as velocidades ensaiadas,
- a feira número 2 na trefilação com MJF 5 apresenta coeficientes de atrito de regime misto em baixas velocidades passando para regime hidrodinâmico em altas velocidades,
- a feira número 5 na trefilação com MJF 5 apresentou coeficientes de regime hidrodinâmico em todas as velocidades ensaiadas

Os ensaios com o lubrificante MJF 2 (figuras 8 e 9) apresentam valores de coeficiente de atrito na faixa de 0,2 a 0,07 que, segundo Wilson [10], é uma condição de regime de lubrificação mista

Os ensaios com o lubrificante MJF 5 (figuras 10 e 11) apresentaram valores de coeficiente de atrito na faixa de 0,17 a 0,05 que, é uma condição de regime de lubrificação variando de lubrificação mista a lubrificação hidrodinâmica, segundo Wilson [10]

Tanto com o lubrificante MJF 2 como com o MJF 5, a feira número 5 apresentou o melhor desempenho, atingindo valores de coeficiente de atrito típicos de regime de filme espesso, segundo Wilson.

Através dos resultados da simulação verifica-se que, para as condições em que foram efetuados este trabalho, o melhor lubrificante é o que possui a maior viscosidade. Isto é, o óleo lubrificante MJF 5.

Os menores coeficientes de atrito foram alcançados pela feira com o ângulo de trabalho (2α) igual a 14° e comprimento do cilindro de calibração igual a 35 % do diâmetro final (Df) como pode-se

observar na figura 11, onde o ajuste polinomial apresenta um comportamento descendente e o coeficiente de atrito tem valores reduzidos (0,05 a 0,07) em todas as velocidades

A queda do coeficiente de atrito até valores da ordem de 0,05 é explicada pelo aumento da velocidade e conseqüente aumento do carreamento de óleo lubrificante, para a região de deformação até atingir-se o regime de lubrificação hidrodinâmica

Conforme se observa na curva de Stribeck (Figura 3) existe uma velocidade limite a partir da qual o coeficiente de atrito começa novamente a aumentar.

Esse limite não pode ser observado na faixa de velocidade em que foram efetuados os ensaios. Para isso seria preciso aumentar a velocidade, o que não foi possível devido a restrições operacionais do equipamento.

No entanto, atingiu-se o objetivo do trabalho que era otimizar a velocidade sem perda da qualidade do produto. Alcançou-se velocidades da ordem de 14 m/s, ou seja, 2 vezes maiores que as empregadas industrialmente.

A otimização não foi somente na queda da força e qualidade do produto, mas na produtividade e economia do processo.

Os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento do processo de trefilação na indústria brasileira, tendo em vista a falta de dados técnicos para

- a definição do ângulo de trabalho (2α) correto das fceiras utilizadas na trefilação do aço inoxidável, e sua importância no processo de trefilação,
- a definição do comprimento da região cilíndrica de calibração (H_c) correto e, sua importância no processo de trefilação e na vida da fiera,
- a utilização do lubrificante próprio para altas velocidades e temperaturas,

IV.3 - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS COM O PRODUTO

Os resultados dos ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas dos produtos encontram-se na tabela 4.

Pela análise dessa tabela observa-se que o produto apresenta um esperado aumento da tensão de resistência a tração, resultante do encruamento sofrido devido a redução de secção transversal de 19%.

Todos os produtos resultantes dos ensaios tiveram seus diâmetros medidos e encontram-se dentro da tolerância dimensional para este tipo de produto. Também passaram por inspeção visual e, apresentaram-se sempre retilíneos e opacos.

A falta de brilho do material trefilado demonstra que os regimes de lubrificação alcançados nos ensaios de trefilação são adequados ao processo, como visto na análise do coeficiente de atrito.

A retilineidade do produto trefilado demonstrar o acerto do alinhamento do conjugado caixa de feira-cabrestante.

V - CONCLUSÕES.

Dos resultados obtidos nos ensaios realizados e nas simulações efetuadas pode-se concluir que:

- A tensão de trefilação depende da geometria da feira, mesmo em condições ideais de lubrificação.
- A velocidade de trefilação tem grande influência sobre a força de trefilação.
- O coeficiente de atrito depende do regime de lubrificação estabelecido que é função da rugosidade das superfícies em contato, bem como da velocidade e da geometria da ferramenta.
- Existe uma geometria ótima para cada velocidade de trefilação e óleo lubrificante.
- Óleos lubrificantes de elevada viscosidade apresentam um melhor comportamento a altas velocidades de trefilação.

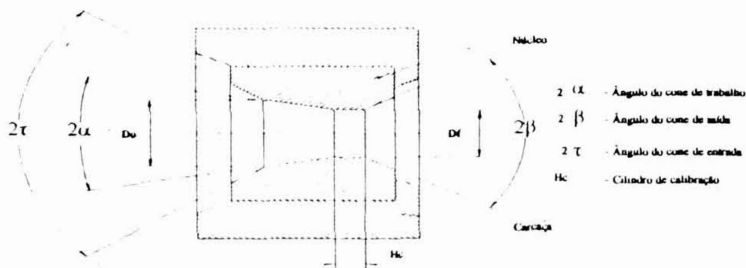


Figura 1 - Representação dos ângulos dos cones e da altura e diâmetro do cilindro de calibração [1].

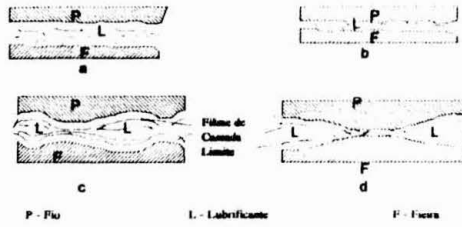


Figura 2 - Representação dos regimes de lubrificação em processos de conformação [10].

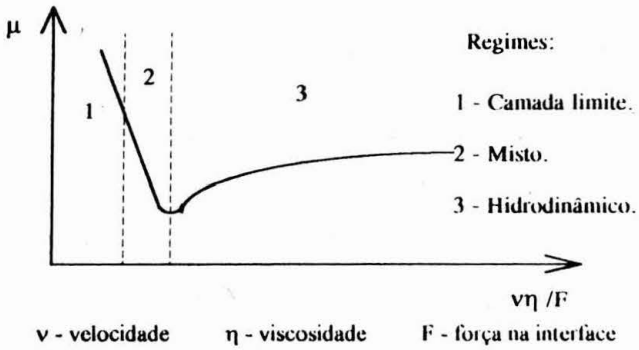


Figura 3 - Curva de Stribeck [9].

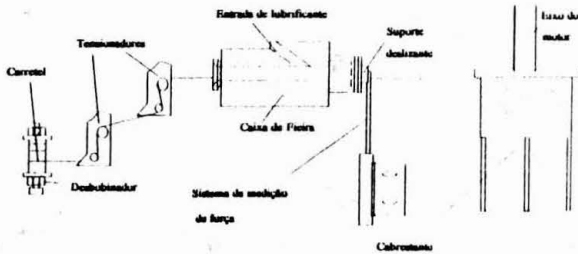


Figura 4 - Trefiladora Monobloco.

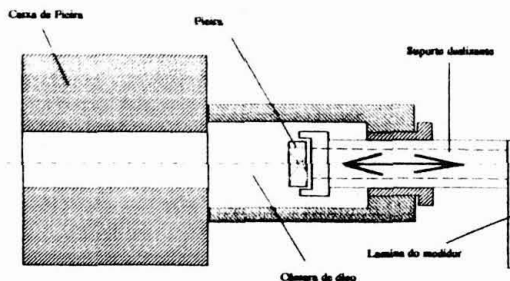


Figura 5 - Sistema de suporte deslizante da caixa de fibra.

Tabela 1 - Ponte e registrador - informações complementares.

* Ponte	
Sensibilidade (mV/V)	200
Tensão de alimentação (V)	2
Faixa de medição (N)	0 - 147
* Registrador	
Velocidade de alimentação do papel (mm/min)	160
Escala para medição de força (mV)	100

Tabela 2 - Características dos lubrificantes.

Óleo	Viscosidade a 25°C (N s/m ²)	Densidade a 25 °C (g/ml)
MJF 2	1,3	1,093
MJF 5	3,1	1,084

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da matéria-prima.

Tensão limite de resistência a tração (MPa)	662,5
Tensão de escoamento a 0,2% (MPa)	329,9
Alongamento (%)	62,5

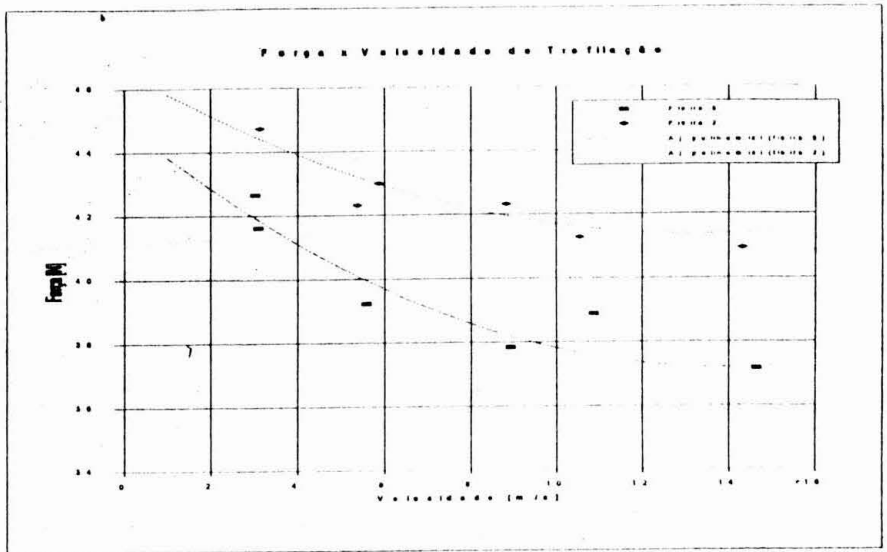


Figura 6 - Influência do ângulo de trabalho 2α sobre o esforço de trefilação com óleo MJF 2.

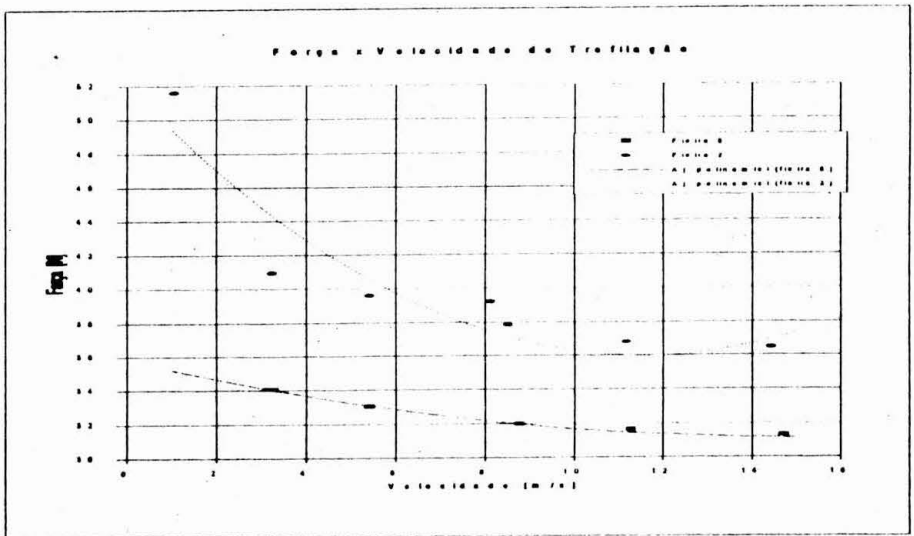


Figura 7 - Influência da viscosidade do óleo lubrificante MJF 5 sobre o esforço de trefilação.

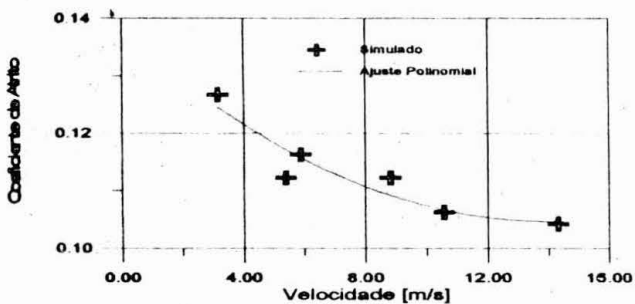


Figura 8 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e feira nº 2.

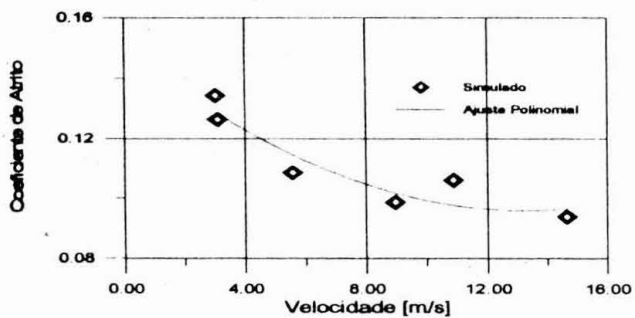


Figura 9 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 2 e feira nº 5.

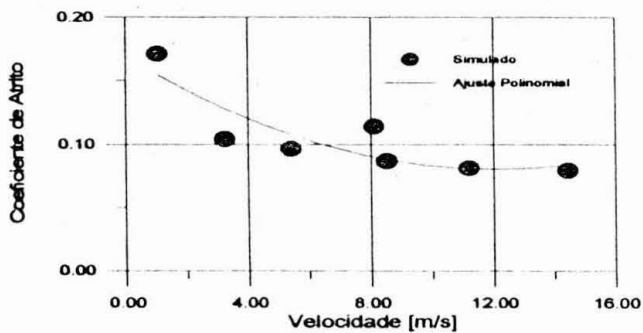


Figura 10 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 5 e feira nº 2.

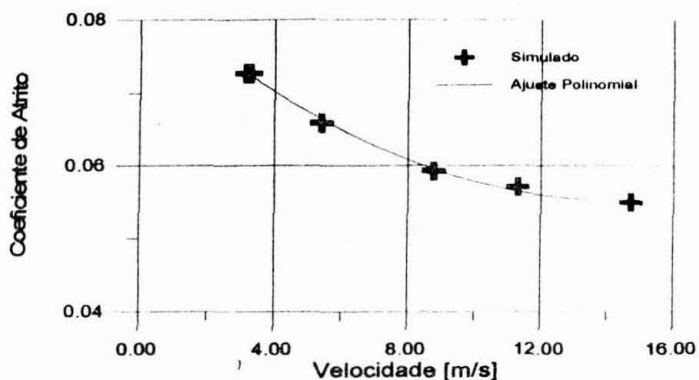


Figura 11 - Coeficiente de atrito x Velocidade com óleo MJF 5 e feira nº 5.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos produtos trefilados.

Tensão limite de resistência a tração (MPa)	930,5
Tensão de escoamento a 0,2% (MPa)	813,5
Alongamento (%)	12,5

VI - ABSTRACT.

This work presents a study on the wire drawing speed improvement with different die geometries and two types of lubricants. The influence of different geometries on austenitic stainless steel AISI 304 wire drawing force was also analyzed. Dies with bell angles of 10 and 14 and bearing lengths of 35 % of the final diameter were used. The influence of high drawing speeds was studied also. The friction coefficient in wire drawing was also evaluated.

VII - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [1] Bresciani F^o, E. at all - "Conformação Plástica dos Metais" - Ed. da Unicamp - 1991.
- [2] Bonzel, M. - "Steel Wire - Manufacture and Properties", Eng. Book Shop, N.Y. - 1935 - p. 94-114.
- [3] Rowe, G.W. - "Conformado de los Metales" - Ed. Urmo - Espanha - 1965
- [4] Frascio, A. - "Il filo metalico" - Ed. Hoepli - Italia - 1970.

- [5] Eder, K., Sigfried Eder GmH, Vienna, Austria Wire Industry, November 1981, p. 797-803.
- [6] Avitzur, B., "Handbook of Metal Forming", 1a. ed - John Wiley and Sons, Nova Iorque, 1983
- [7] Keebler J., Technical Dir., Wire Technology International Magazine, May, 1990, p. 29-38.
- [8] Maxwell, Thomas H., Carbide die design - impact upon wire quality, Wire Journal International, December 1991, p. 45-50.
- [9] Button, Sérgio T. - "Estudo da Lubrificação Hidrodinâmica na Extrusão Hidrostática" - S.P. - 1990 - Tese (Doutorado) - FEM-DEMa - Unicamp
- [10] Wilson, W.R.D. - "Friction and Lubrication in Bulk Metal - Forming Processes", J. of App. Metalworking, vol. 1, nº. 1, p. 7-9 - 1979.
- [11] "Fabricacion de Alambre"- Steel Sales Training - Sandvik.
- [12] The Wire Association - "Steel Wire Handbook"- Ed. Allan B. Dove, Vol. I - USA - 1975.
- [13] INBRA - "Informe de Dados Sobre Produtos"- MSG 26026, Julho 1993 - p. 5.

