

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA LUBRIFICAÇÃO SECA PARA TREFILAÇÃO E PROPOSTA DE
PADRONIZAÇÃO DE LUBRIFICANTES PARA ARAME DE MÉDIO CARBONO**

por

William Brusius Jr.

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

Análise da Lubrificação Seca para Trefilação e Proposta de Padronização de Lubrificantes para
Arame de Médio Carbono

por

William Brusius Jr.

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas.
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Joyson Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Liciane Sabadin Bertol

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Porto Alegre, Dezembro de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, William e Marlei, e minha irmã, Vanessa, pelo apoio e estímulos dados;

a minha namorada Débora, pelo carinho e incentivo dedicados a mim;

ao meu orientador, Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco, por todas as orientações dedicadas ao trabalho;

ao Prof. Dr. Telmo Strohaecker, por ter autorizado a utilização do LAMEF para realização de testes;

e a todos os meus colegas da Gerdau Riograndense, em especial Rogério Laydner da Rosa, pela grande ajuda, incentivo e suporte técnico prestadas.

BRUSIUS, W. Jr. **Análise da lubrificação seca para trefilação e proposta de padronização de lubrificantes para arame de médio carbono.** Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre lubrificação seca para um arame ovalado 15x17 (2,40 x 2,90mm) de médio carbono em uma máquina de 7 passes de redução. Foram analisados dois tipos de lubrificantes utilizados na trefilaria da Gerdau Riograndense, um sabão a base de cálcio e outro a base de sódio, com o objetivo de identificar o tipo de lubrificação existente em cada passe de redução e as variáveis de processo que influenciam. Assim foram realizados 3 testes com diferentes configurações de sabões sólidos, nos quais mediu-se e analisou-se parâmetros como percentual de torque do motor [%], rugosidade superficial do arame [μm] e residual de lubrificante sobre o arame [g/m^2]. A matéria prima utilizada foi o fio máquina 5,50 mm aço SAE 1045. Através dos resultados obtidos, verificou-se que o sabão que mais agrega lubrificação ao arame é o sabão a base de cálcio, devido a sua maior viscosidade. Além disso, realizou-se a classificação do regime de lubrificação para cada passe e por fim, analisou-se o comportamento da lubrificação com o aumento da velocidade de trefilação.

PALAVRAS-CHAVE: Trefilação, Lubrificação Seca, Sabão lubrificante e Padronização de lubrificantes.

BRUSIUS, W. Jr. **Analysis of dry lubrication on Wire drawing and proposal for standardization of lubricants for medium-carbon wire.** Monograpry (Mechanical Engineering Final Paper) – Mechanical Engineering Department, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRAT

This work introduces a study on dry lubrication for a oval wire 15x17 (2.40 x 2.90 mm) of medium-carbon in a wire drawing machine with 7 steps. Two types of lubricants used in wire drawing process at Gerdau Riograndense, a soap based on calcium and other based on sodium, in order to identify the type of lubrication in each step of reduction and process variables that influence. So tests were performed with 3 different configurations of solid soaps, in which was measured and analyzed parameters such as percentage of engine torque [%], surface roughness of the wire [μm] and residual lubricant on the wire [g / m^2]. The raw material used was 5.50 mm rod wire steel SAE 1045. The results obtained show that the soap that adds more lubricant to the wire is a soap based on calcium, due to its higher viscosity. Moreover, there was a classification system of lubrication for each step and finally, analyzed the behavior of lubrication with increasing of speed in wire drawing.

PALAVRAS-CHAVE: Wire drawing, dry lubrication, lubricant soap e standardization of lubricants.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO.....	2
1. PROCESSO DE TREFILAÇÃO	3
2. MATÉRIA PRIMA	3
3. REPARAÇÃO SUPERFICIAL	4
4. TREFILAÇÃO	5
4.1. MÁQUINAS	5
4.2. FIEIRA.....	6
4.3. LUBRIFICAÇÃO	7
5. TENSÃO E TEMPERATURA NA TREFILAÇÃO	12
6. METODOLOGIA	14
7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	15
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	15
8.1. ANÁLISE DO PERCENTUAL DE TORQUE DOS MOTORES	17
8.2. ANÁLISE DA RUGOSIDADE	17
8.3. ANÁLISE DO RESIDUAL DE SABÃO	18
9. CONCLUSÕES.....	22
10. BIBLIOGRAFIA.....	23
11. ANEXOS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24

INTRODUÇÃO

A qualidade superficial do produto acabado é uma das principais exigências do mercado e sua obtenção e controle tem sido a preocupação de diversos pesquisadores. Quando se fala sobre trefilação de arames tem-se a mesma preocupação. Para se obter uma qualidade superficial ideal, é necessário entender quais são os parâmetros que determinam o sucesso operacional na trefilação. Dentre os parâmetros de grande influência podemos citar o tipo de material, máquina e lubrificantes usados, esse último com maior importância.

Atualmente no mercado existem vários fabricantes de lubrificante secos para trefilação, cada um oferecendo aumento de produtividade e maior vida útil das fiéis. O desempenho de um lubrificante está relacionado com as suas propriedades físico-químicas, entre elas, a viscosidade tem maior importância. Porém, o estudo da lubrificação a seco na trefilação não se limita a formulação do sabão. A preparação superficial do material (decapagem) cria uma rugosidade no arame, que irá influenciar diretamente na capacidade de formar uma película de lubrificante sobre o arame.

Este trabalho analisa o processo de fabricação do arame ovalado 15x17 trefilado em uma máquina de 7 passes de reduções, utilizando dois tipos de lubrificantes sólidos, um a base de Cálcio e outro a base de Sódio. Optou-se em estudar o arame ovalado 15x17, de dimensões 2,40 mm por 2,90 mm, pois se trata de um material de grande demanda no mercado, produzido a partir de um aço 1045. Sua aplicação é voltada para a agropecuária e cercas.

Para estudar o comportamento dos dois tipos de lubrificantes utilizados foram realizados 3 testes, cada um com uma configuração diferente, utilizando análises de percentual de torque no motor de cada passe de redução da máquina, residual de lubrificante e rugosidade superficial do arame.

OBJETIVO

Este trabalho de diplomação tem como objetivo entender as variáveis que influenciam na lubrificação seca no processo de trefilação. Analisando dois tipos de lubrificantes utilizados na trefilaria da Gerdau Riograndense através da análise de testes como residual de lubrificante sobre o arame, rugosidade superficial e torque dos motores na trefilação de fios de aço médio carbono. O objetivo é encontrar a melhor configuração de lubrificantes utilizados na Trefilaria da Gerdau Riograndense com o propósito de criar uma padronização de lubrificantes para um arame de médio carbono.

1. PROCESSO DE TREFILAÇÃO

Trefilação é um dos processos mais antigos e mais importantes na fabricação de produtos metálicos contínuos de diversas geometrias possíveis [Dove, 1969]. O processo de trefilação ocorre com o tracionamento de um fio ou barra através de uma matriz cônica (fieira), ocasionando uma redução de área e um alongamento de comprimento. Trata-se de um processo mecânico que confere ao material precisão dimensional e melhores propriedades mecânicas.

A trefilação é considerada um processo de conformação a frio, pois o material não é aquecido antes. O princípio da trefilação é proporcionar uma redução de área no material (Figura 1.1 – Cetlin, 2002). Essa redução é calculada conforme Equação 1.1. Segundo a lei da constância de volume mostrada, a quantidade de volume que entra na fieira deve ser a mesma que sai. Em termos de vazão, pode-se relacionar a velocidade de saída do arame com a velocidade de entrada e suas respectivas áreas, conforme Equação 1.2. O processo de trefilação pode ser demonstrado no fluxograma da Figura 1.2.

$$r = 1 - \left(\frac{A_i}{A_f} \right)^2 \quad (1.1)$$

$$A_i \cdot v_i = A_f \cdot v_f \quad (1.2)$$

Onde: r é a redução da secção do material, A_i é a área inicial do material, A_f é a área final, v_i e v_f são as velocidades iniciais e finais, respectivamente do material.

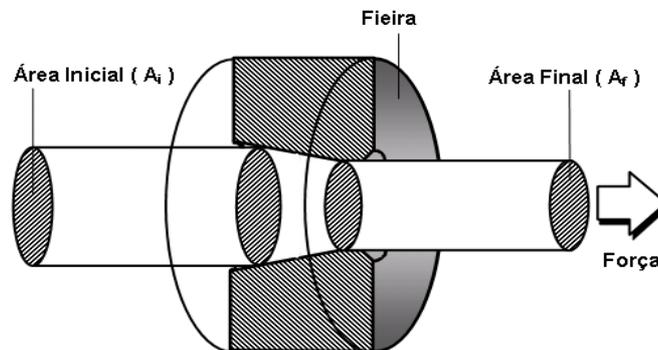


Figura 1.1 - Princípio da Trefilação [Cetlin, 2002]

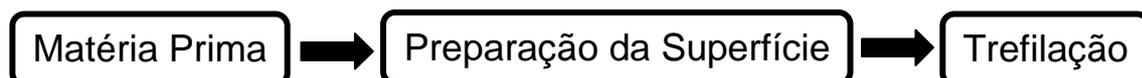


Figura 1.2 - Fluxograma do processo de Trefilação

2. MATÉRIA PRIMA

Todo processo se inicia com o fio-máquina. O fio-máquina é um produto oriundo da laminação, no qual tarugos provenientes do lingoteamento contínuo das aciarias são laminados

a quente. A Laminação do fio-máquina inicia-se com o reaquecimento do tarugo (entre 1100 a 1300 °C no início e 900 a 700°C no final) para facilitar a conformação. Logo após o tarugo aquecido passa por uma sequência de laminadores, chamados gaiolas, os quais a seção e comprimento são alterados (desbaste e Trem intermediário). Em seguida, o material passa pelo bloco Morgan (trem acabador) que tem a função de dar o acabamento final do material laminado. No final do processo, logo após a zona de resfriamento o Fio-Máquina passa pelo formador de expiras.

3. REPARAÇÃO SUPERFICIAL

A superfície do fio-máquina é coberto por uma camada de óxidos metálicos, também chamado de carepa (Figura 3.1 - Cetlin, 2002), cuja dureza é de 3 a 10 vezes maior que a do aço e composta por 3 camadas: Hematita, Magnetita e Wustita. A espessura da carepa de cada camada de óxido depende da temperatura da laminação, da atmosfera durante o período de aquecimento e da velocidade do resfriamento.

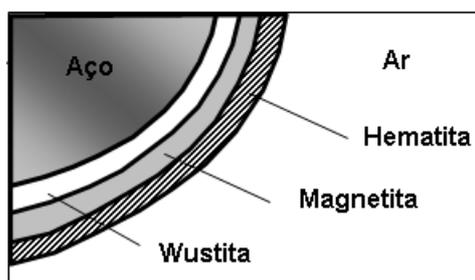


Figura 3.1 - Tipos de carepas no Fio-Máquina [Cetlin, 2002].

Devido à sua natureza abrasiva, dureza e falta de maleabilidade, a carepa deve ser removida antes de iniciar-se a trefilação. Esse processo de remoção dos óxidos, denomina-se decapagem, no qual pode ocorrer através de dois métodos: decapagem química e/ou mecânica.

- Decapagem Química: é um processo baseado na dissolução dos óxidos pela reação química destes com ácidos. Neste tipo de decapagem, o fio-máquina é mergulhado em tanques de ácido sulfúrico ou clorídrico (agentes decapantes). Depois da remoção da carepa, o material passa em tanques de água para lavagem, para retirada do resto de ácido. Após a lavagem, o material sofre um processo de neutralização com banhos de cal ou bórax para evitar uma nova oxidação. Contudo, este processo está sendo substituído gradativamente nas trefilarias pela decapagem mecânica, devido ao alto custo com o agente decapante (ácido sulfúrico ou clorídrico), elevado custo com o tratamento de efluentes gerados no processo e exposição de pessoas a vapores ácidos.

- Decapagem Mecânica: nesse processo, o fio-máquina é flexionado em uma polia. Como a carepa possui uma dureza relativamente alta, ela se rompe e cai quando o material é flexionado (Figura 3.2.a). O Fio-máquina é dobrado em 180°C nos dois planos (vertical e horizontal), removendo assim a carepa grossa, que é constituída pela hematita. Como a decapagem mecânica por dobramento deixam resíduos, comumente colocam-se, logo após o decapador, um sistema com escovas metálicas ou com cintas de lixas rotativas para remoção da carepa fina. A utilização de decapagem por lixas rotativas (Figura 3.2.b) possui um ganho, pois além da remoção da carepa mais fina (Magnetita e Wustita), as lixas deixam leves marcas superficiais no material que facilitam o arraste de lubrificante. Além disso, é comum uma unidade de limpeza da superfície com jatos de água seguida de aplicação de um pré-lubrificante e secagem do material.

O pré-lubrificante, normalmente de cal ou de bórax, tem a finalidade de formar uma película opaca sobre o fio-máquina, que auxilia o arraste do lubrificante na caixa de fieira de sabão e a lubrificação na trefilação.

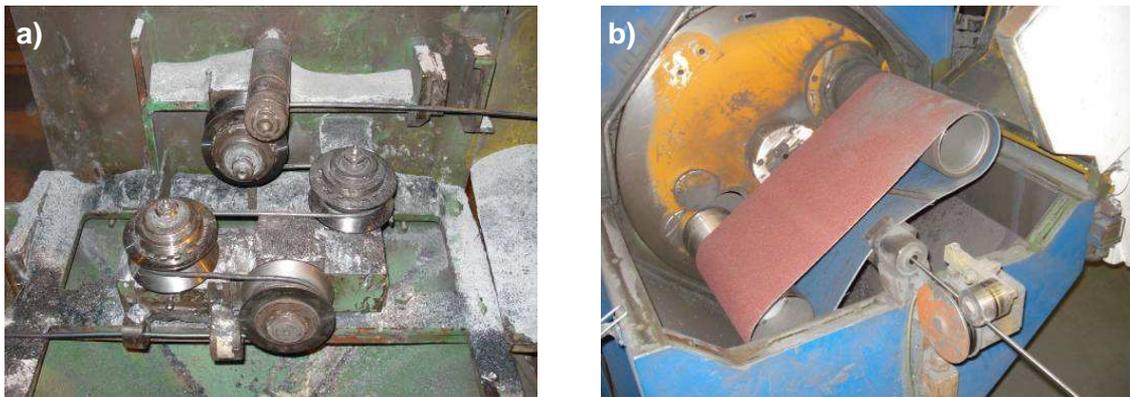


Figura 3.2 - a) decapador mecânico por flexão e b) decapador por lixas rotativas.

4. TREFILAÇÃO

Na trefilação, três aspectos devem ser considerados, são eles: tipo de máquina, fieira e lubrificação.

4.1. MÁQUINAS

No processo de trefilação, existem vários modelos de máquinas e sistemas usados. O diâmetro final do material depende do número de passes que existe em uma máquina. Assim, quanto ao número de passes, uma máquina pode ser classificada como Monobloco, onde existe apenas um passe de trefilação, baixas velocidades e é utilizada para trefilação de grandes diâmetros (8 a 10 mm). Já as máquinas Múltiplos passes, caracterizam-se por apresentar alta velocidade de processo e produção de diâmetros menores (1 a 3 mm).

Em relação ao sistema de trefilação, existe:

- Sistema OTO ou Cumulativo: sistema de trefilação onde a velocidade da bobina é constante. O material fica acumulado nas bobinas e é retirado para o processo seguinte por cima da bobina (Overhead Take Off). Nesse sistema, para uma melhor performance, o jogo de reduções em cada passe de máquina deve ser adequado, para evitar o descarregamento da bobina (Figura 4.1.a).
- Sistema Não Cumulativo: sistema onde a velocidade de cada bobina é controlada automaticamente por um dispositivo chamado Dancer, no qual pela tensão imposta pelo arame ele aumenta ou diminui a velocidade da bobina. No sistema automático, cada bobina tem apenas algumas voltas de arame e o material sai de um bloco para outro pela tangencial da bobina (Figura 4.1.b).

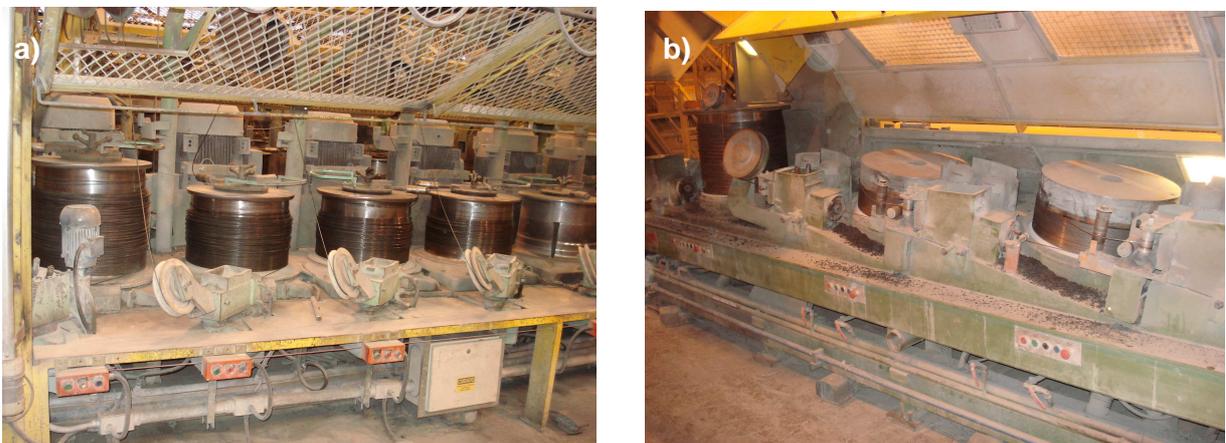


Figura 4.1 – Máquina Cumulativa ou Sistema OTO(a) e Máquina com Sistema Não Cumulativo(b).

4.2. FIEIRA

A ferramenta mais difundida para realizar o processo de trefilação é a fieira. A fieira convencional é composta por uma carcaça de aço, normalmente aço SAE 1045, e um núcleo de carbeto de tungstênio sinterizado com uma mistura de carbeto de tungstênio e de cobalto. Além disso utiliza-se núcleo de diamante (natural ou policristalino), que proporciona uma resistência ao desgaste e uma durabilidade maior.

O núcleo de uma fieira é constituído por 5 partes, conforme Figura 4.2 (adaptada do Cetlin, 2002):

- Raio de Entrada: tem como função eliminar cantos vivos, que poderiam danificar o fio-máquina que entra na fieira;
- Cone de Entrada: sua principal função é auxiliar a entrada de lubrificante na região do cone de trabalho;
- Cone de trabalho: região onde ocorre a redução da secção do material. O ângulo α do cone de trabalho é o principal responsável pela quantidade de lubrificante que passa pela fieira, além de ter influencia direta no grau de esforço feito pelo arame. Se for muito pequeno, provoca uma elevada tensão na trefilação e um aumento excessivo no atrito. À medida que aumenta, atinge um valor ótimo, onde o atrito e a tensão alcançam seus menores valores. Se continuar aumentando, pode ocorrer excessiva deformação na superfície do material e pouca conformação plástica na parte central do arame (Anexo I – Figura 4);
- Paralelo: tem a função de dar o acabamento superficial do material. Normalmente, o comprimento do paralelo é de 0,03 a 0,05 do diâmetro de saída;
- Cone de Saída: tem como função proteger o paralelo contra quebras;

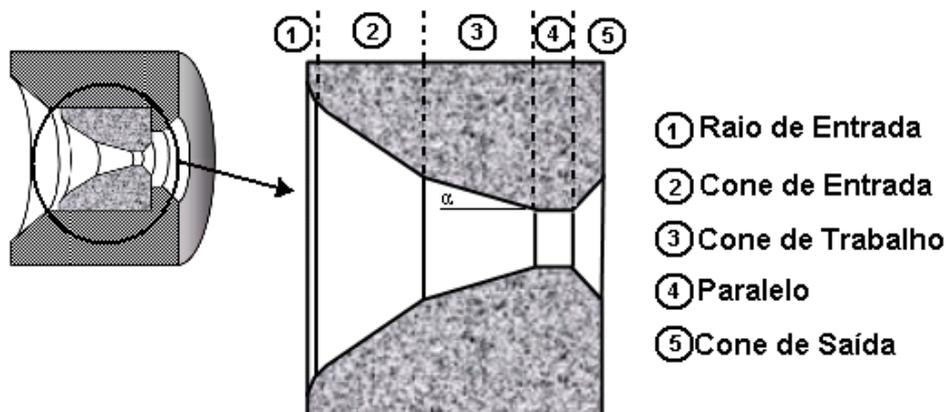


Figura 4.2 – Fieira e parte do Núcleo. Adaptada do Cetlin, 2002.

Uma outra técnica em trefilação é o uso de fieiras de pressão. Tal sistema consiste em colocar uma fieira de diâmetro pouco maior ao diâmetro do arame de entrada logo a frente da fieira de trabalho (Anexo I – Figura 3), em média 10% maior, cujo o objetivo é promover um maior diferencial de pressão no sabão, fazendo com que este já chegue pastoso à região de conformação da segunda fieira. Com esse aumento de pressão, as condições para desempenhar uma lubrificação hidrodinâmica serão ideais. Dessa forma, obtêm-se espessuras na camada lubrificante muito superiores às de uma fieira convencional, promovendo velocidades mais elevadas de produção. Atualmente no mercado, são utilizadas fieiras de pressão Paralock (Anexo I – Figura 7.a), do fabricante Paramount Die, e Fieiras VG402, do fabricante Vassena (Anexo I – Figura 7.b).

4.3. LUBRIFICAÇÃO

Lubrificante é qualquer substância, fluido ou sólido, que quando colocado entre duas superfícies reduz tanto a fricção entre as superfícies quanto o desgaste das mesmas. O objetivo do lubrificante é impedir o contato direto entre dois corpos, no caso da trefilação, evitar o contato direto entre o arame e a fieira. (Figura 4.3 – adaptada do Dove, 1979).

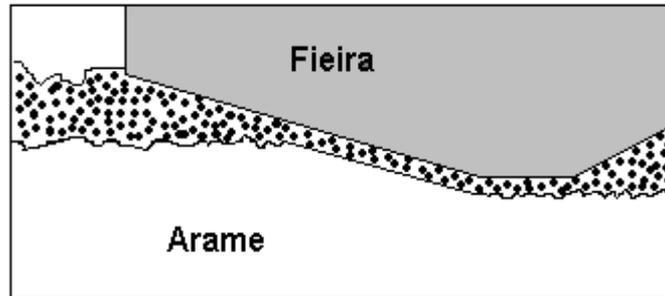


Figura 4.3 – Lubrificação no processo de Trefilação. Adaptada do Dove, 1979.

O conhecimento da lubrificação se baseia nas teorias desenvolvidas por Navier-Stokes, Beuchamp Tower, entre outros e nas interpretações dadas por Osborne Reynolds. Este verificou a existência de dois tipos de escoamento de fluidos: o escoamento turbulento e o escoamento laminar. Neste último, a resistência ao escoamento varia diretamente com a velocidade e viscosidade, conforme Equação 4.1

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{d.h} \quad (4.1)$$

Onde: η é a viscosidade do fluido, v é a velocidade do fluido e h é espessura da camada do fluido.

A escolha correta do lubrificante é umas das grandes dificuldades existentes em qualquer processo. Essa escolha baseia-se em parâmetros como os materiais, a ferramenta, a temperatura e a velocidade do processo. Assim, um bom lubrificante deve apresentar as seguintes características [Button, 2002]:

- um baixo coeficiente de atrito;
- garantir a completa separação das superfícies da matriz e do material trefilado;
- ser resistente ao calor;
- favorecer o bom acabamento superficial do produto trefilado;
- ser limpo;
- resistir à pressão de deformação;

Os lubrificantes utilizados no processo de trefilação, podem ser divididos em dois grandes grupos: lubrificantes líquidos e lubrificantes sólidos.

Os lubrificantes líquidos são normalmente de origem animal, vegetal ou mineral. Utilizados para a trefilação de arames finos e recobertos com camadas de cobre, zinco, latão, bronze, etc., a altas velocidades. Normalmente, deseja-se muito pouco resíduo de lubrificante na superfície.

Os lubrificantes sólidos são a base de sabões, talco, mica, cal, grafite dissulfeto de molibdênio e Tungstênio, etc. Os sabões são de uso mais comum entre as trefilações de arames, que são depositados em uma caixa posicionada antes da caixa de fieira, conforme figura no Anexo I - Figura 6.b. A maioria dos sabões tem a composição a base de estearato de cálcio e sódio. Existem aditivos que possuem alto poder reativo e que são usados para aumentar a reatividade de um sabão. Esses reativos são conhecidos por extrema pressão (EP)

e reagem com a superfície do metal formando uma película que reduz o atrito. Os principais aditivos são: enxofre, fosfato, grafite e cloro. Os sabões também podem ser classificados como ricos ou pobres conforme seu teor de ácidos graxos. Um sabão rico é aquele que possui alto teor de sais graxos e tem baixo ponto de fusão. De um modo geral, se outros fatores são mantidos constantes, os lubrificantes ricos produzem camadas finas flexíveis, enquanto que os lubrificantes pobres produzem camadas grossas e mais quebradiças [Coelho, 1975].

A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob as condições de processo, que previna o contato entre as superfícies [Button, 2002]. A formação da camada de sabão, necessária a uma boa lubrificação, depende em grande parte das propriedades físicas e químicas dos mesmos. Os sabões devem ser capazes de suportar as temperaturas de trabalho da fieira (Figura 4.4), que atuam de forma direta na viscosidade do lubrificante e a pressão de trabalho exercidas no cone de trabalho do núcleo, que é constante e diretamente proporcional a redução da secção do arame. Outro fator é a reatividade do sabão com a superfície do arame [Coelho, 1975], quanto maior a polaridade de um lubrificante, maior será a capacidade deste em agregar sabão à superfície do arame.

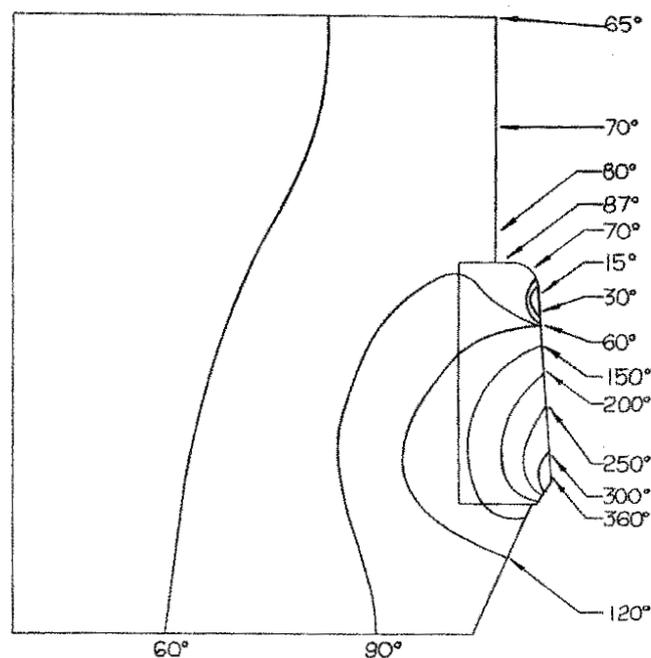


Figura 4.4 – Distribuição de temperatura dentro da fieira em °C [Dove, 1969].

Segundo Wilson [1979], a espessura da camada de lubrificante sobre o arame pode ser definida conforme a espessura do filme do mesmo, descritos a seguir.

- a) Regime de Filme espesso (Figura 4.5.a) as superfícies são totalmente separadas por um filme muitas vezes superior à rugosidade das superfícies envolvidas e ao tamanho molecular do lubrificante empregado. Como as superfícies são completamente separadas pelo filme, o desgaste das superfícies inexistente. Entretanto, pode ocorrer corrosão ou erosão devida à presença de partículas estranhas no lubrificante.
- b) Regime de filme Fino (Figura 4.5.b), a espessura do filme apresenta-se entre três a dez vezes do valor da rugosidade superficial média das superfícies. O comportamento da resistência ao movimento relativo é similar ao do regime de filme espesso, exceto que no regime de filme fino, a não uniformidade da rugosidade superficial pode apresentar uma influência maior sobre o atrito.
- c) Regime de cama Limite (Figura 4.5.c), o filme que separa as superfícies apresenta espessuras da ordem de algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante. O

desgaste é maior do que nos outros regimes e a rugosidade da peça tende a decrescer desde que não ocorra a ruptura do filme;

- d) Regime de lubrificação mista (Figura 4.5.d), a espessura do filme é três vezes menor que o valor da rugosidade média das superfícies. Se o lubrificante é escolhido corretamente, ele formará nas superfícies, finíssimas películas aderentes (camada limite), que apesar da reduzida espessura, podem prevenir o contato metálico direto. Nos vales, os filmes são relativamente espessos e essa situação pode ser analisada como um regime modificado de filme fino.

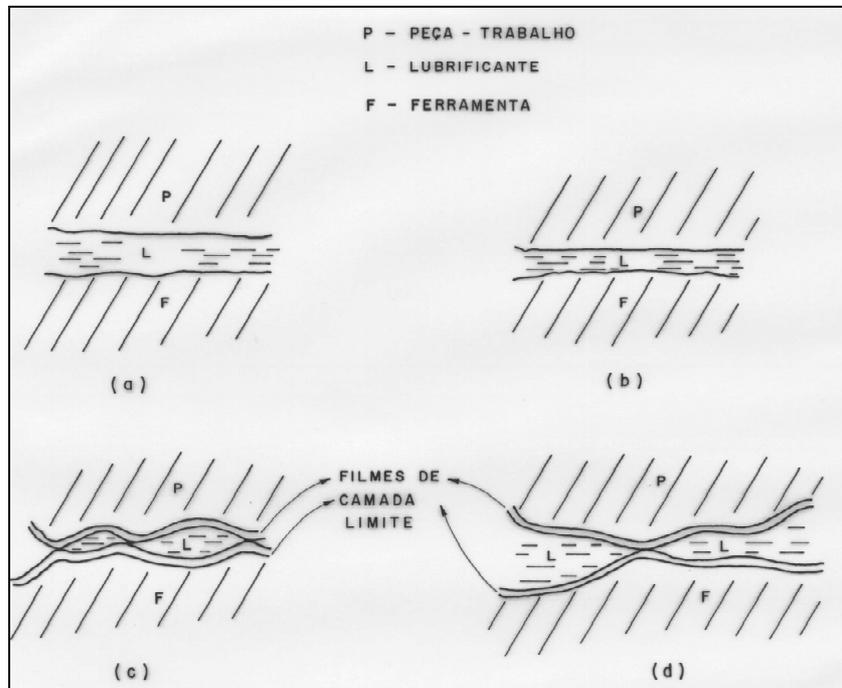


Figura 4.5 – Regimes de lubrificação característicos do processo de trefilação [Wilson 1979].

A formação de um ou mais regimes durante o processo de trefilação está relacionado a fatores como a velocidade do processo, a viscosidade do lubrificante e a força aplicada nas superfícies. Segundo Wilson[1979], a espessura da camada de lubrificante é essencial para obter uma lubrificação adequada. Porém, para que espessuras ideais sejam atingidas, é preciso considerar aumento de velocidade, sua influência sobre a temperatura e, conseqüentemente, na viscosidade do lubrificante. A Figura 4.6 apresenta a curvas de Stribeck, onde se verifica a variação da espessura de filme de lubrificante com os diversos tipos de lubrificação. Os tipos de lubrificação são classificados como:

- Lubrificação Limite: é caracterizado por baixas velocidades, onde a quantidade de lubrificante carregada para região de cone de trabalho da fieira é mínima, possibilitando um contato metálico grande bem como o coeficiente de atrito;
- Lubrificação Mista: com o aumento da velocidade, uma maior quantidade de lubrificante é trazida ao cone de trabalho da fieira preenchendo os vales do material. As camadas de filmes lubrificantes são continuamente supridas pelo lubrificante existente nos vales, ocorrendo assim, uma diminuição no coeficiente de atrito;
- Lubrificação Hidrodinâmica: caracteriza-se pela formação de um filme contínuo entre as superfícies, ocasionando uma completa separação entre as superfícies. A queda do coeficiente de atrito é facilmente explicada pela crescente separação entre as superfícies. Já o aumento do coeficiente, após atingir o regime

hidrodinâmico, deve-se a quantidade de lubrificante entre as superfícies. Na lubrificação hidrodinâmica ocorre os regimes de filmes fino e espesso;

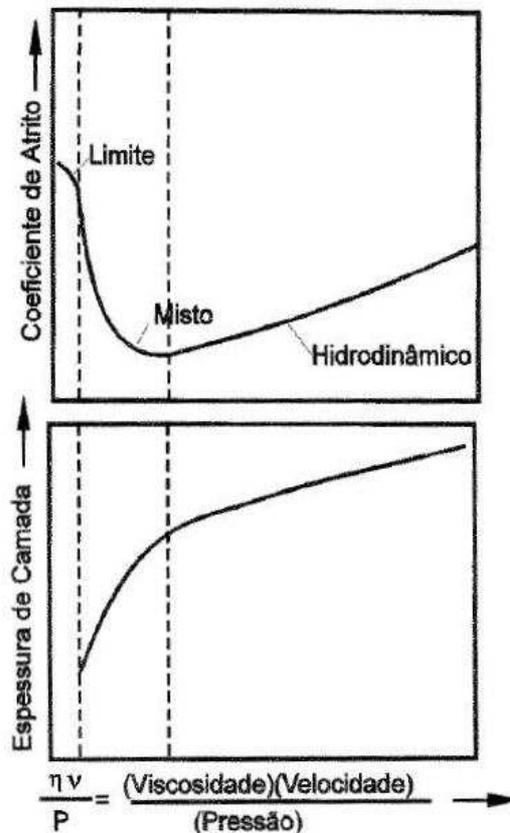


Figura 4.6 – Curvas de Stribeck.

A condição superficial do material a ser trefilado é outro dos fatores do processo de trefilação, pois determina o regime de lubrificação na zona do cone de trabalho na fiação pelo carregamento de lubrificante e manutenção do lubrificante durante a trefilação. A rugosidade do arame a ser trefilado depende principalmente de dois critérios: a temperatura da laminação a quente, o pós-resfriamento do fio-máquina e o tipo de decapagem. A temperatura da laminação do FM atua diretamente no tipo de óxido de ferro que será formado. Temperaturas menores que 950 °C favorecem a formação da camada de hematita, na qual proporciona uma rugosidade maior no material. Já o tipo de decapagem influencia no tipo de rugosidade. A decapagem química ocasiona formação de pequenas cavidades côncavas sobre o arame (Anexo I - Figura 1.a) o que facilita o arraste de lubrificante. Em contra partida, a decapagem mecânica por flexão ocasiona rugosidades paralelas (Anexo I - Figura 1.b) oriundas da laminação a quente sobre o arame, o que causa a fuga do lubrificante. Durante o processo de trefilação, a rugosidade do arame diminui com o aumento da deformação transversal do material.

O arraste de lubrificante para dentro do cone de trabalho da fiação é de vital importância para se obter uma boa lubrificação. O arraste ocorre em duas partes conforme Figura 4.7 (adaptada do Cetlin, 2002). No arraste hidroestático, quanto maior a rugosidade e velocidade do arame, melhor será o arraste. A granulometria do lubrificante é muito importante para que o sabão tenha arraste. Quanto menor o tamanho do grão do lubrificante, maior será o arraste. Porém maior a capacidade de se formar túneis (Anexo I - Figura 2), onde o contato entre arame-lubrificante é dificultado. Para evitar essa formação de túneis é de comum uso nas trefilarias a utilização de aplicadores (Anexo I - Figura 6.a e 6.b). Os mesmos proporcionam uma agitação constante na caixa de sabão e ajudam na aderência do lubrificante no arame.

Já no arraste hidrodinâmico, a pressão sobre o arame no cone de trabalho da fieira é essencial para a formação do sabão no estado pastoso. A utilização de feiras de pressão aumenta essa condição.

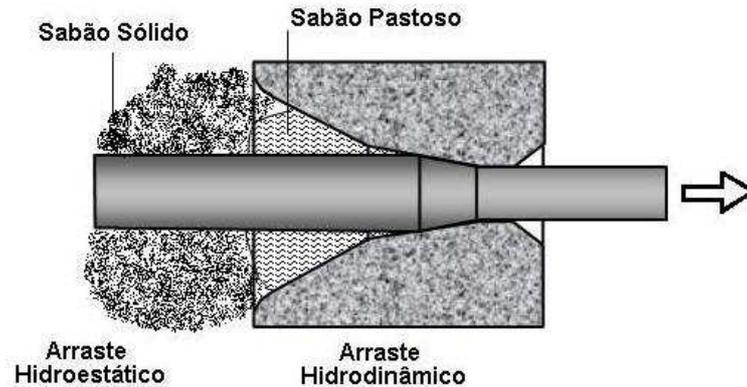


Figura 4.7 – Desenho esquemático do arraste do lubrificante para fieira.
Adaptada de Cetlin, 2002.

Como já citado antes, a viscosidade dos sabões é influenciada diretamente pela temperatura no cone de trabalho da fieira. Na Figura 5 no Anexo I, pode ser notado que o sabão a base de cálcio possui uma viscosidade superior a altas temperaturas comparado com o sabão a base de sódio. Segundo as curvas de Stribeck, quanto maior a viscosidade do lubrificante, mais fácil de se obter o regime hidrodinâmico de lubrificação. Porém, a qualidade superficial do produto acabado é uma das principais exigências do mercado ou do processo subsequente. No caso de arames trefilados nem sempre um alto residual de sabão é bom. A quantidade de sabão sobre o arame, irá depender do processo subsequente que irá passar. Por exemplo, arames para produção de pregos é desejável um baixo residual de sabão, pois as máquinas de corte necessitam de uma superfície limpa para tracionar o arame durante o processo. Também em processos como galvanização, uma superfície limpa é desejada pois qualquer impureza sobre o arame pode ocasionar falhas na camada de zinco.

Para esse controle da qualidade superficial, Nakamura introduziu uma metodologia na qual possibilita o controle da qualidade superficial, denominada Razão de Alisamento, que é a relação entre a área lisa da superfície e a área total da amostra. A Figura 4.8, mostra a razão de alisamento, espessura da camada residual de lubrificante e pressão de lubrificante.

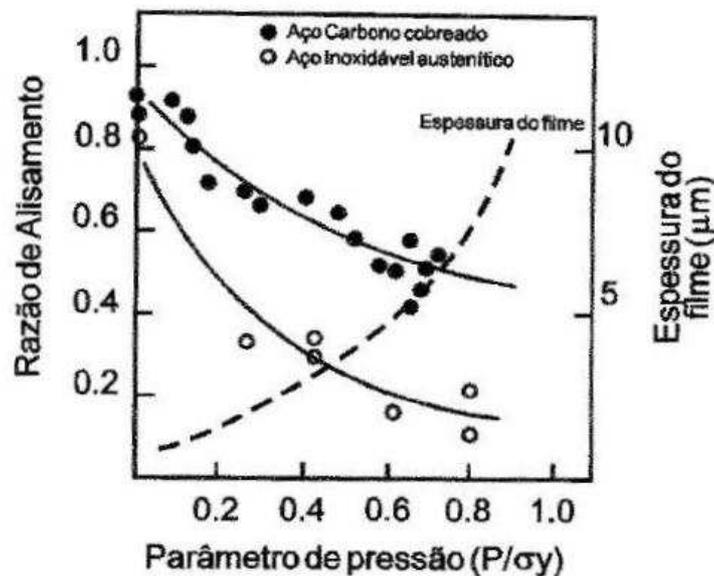


Figura 4.8 – Efeito da rugosidade do material [Nakamura, et al.].

Nesta figura pode ser visto que a espessura da camada de lubrificante sobre o arame aumenta conforme a razão de alisamento diminui. Quanto maior a razão de alisamento, menor a rugosidade do arame, conseqüentemente menor será o residual de lubrificante.

Nessas condições, é comum a utilização de sabões a base de cálcio com baixo teor de ácidos graxo (sabão pobre) e baixo ponto de fusão nos primeiros passes, onde encontramos baixas velocidades, temperaturas menores que 130 °C e alta deformação do material. Em contra partida, nos últimos passes onde a velocidade e temperaturas são maiores e as reduções promovidas são menores, a fim de obter-se uma superfície mais limpa, utiliza-se sabão a base de sódio, com alto teor de ácidos graxos (sabão rico) e alto ponto de fusão, com uma granulometria mais fina, para promover um melhor arraste pelo arame.

5. TENSÃO E TEMPERATURA NA TREFILAÇÃO

Na literatura sobre trefilação existe uma série de modelos teóricos para cálculo de força. A grande maioria destes modelos baseia-se na Teoria do Limite Superior ou na Teoria Elementar da Plasticidade [Cetlin, 2002]. Entre os modelos mais conhecidos, encontra-se o de Sachs, Kroerber e Eichinger e Siebel. Todas essas fórmulas de cálculo apresentam soluções divergentes, apesar de estarem fundamentadas nas mesmas variáveis como: ângulo da fieira, coeficiente de atrito, área, reduções de áreas e tensão de escoamento.

Neste trabalho, será levado em consideração para análises futuras os modelos de Pomp, Siebel e Houdremont. A Equação 5.1 considera o efeito dos trabalhos relativos devido aos três tipos de deformações: a homogenia, por atrito e a redundante. Nesta equação a tensão de trefilação varia conforme a Área inicial (A_i) do material, deformação logarítmica (φ_A), a tensão média de escoamento (k_{fm}), o ângulo da fieira (α) e o coeficiente de atrito (μ) entre o material e a fieira.

$$\sigma_f = k_{fm} \cdot \varphi_A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (5.1)$$

No processo de trefilação de arames finos utiliza-se taxas de conformações elevadas. O desempenho do lubrificante torna-se essencial para atingir a qualidade superficial do produto trefilado. O atrito presente no processo é responsável pela geração de calor, onde a quantidade de energia de deformação transformada e dissipada na forma de calor pode chegar a 90% [Button, 2002].

Button[2002], apresenta uma equação para estimativa do aumento de temperatura devido a energia de conformação e ao aumento da velocidade no processo. A Equação 5.2, não considera os efeitos de extração de calor pelo lubrificante ou por um sistema de resfriamento externo.

Aparentemente, um aumento na taxa de conformação reduz a transferência de calor para a matriz, mas também pode diminuir a eficiência do lubrificante. Como as deformações no material trefilado não são homogêneas (Anexo I – Figura 4) a distribuição de temperatura também não será (Figura 5.1).

$$\Delta T = \frac{1}{c_p \cdot \rho} \int_0^t \sigma_f \cdot \bar{\varepsilon} \cdot dt \quad (5.2)$$

Onde: ΔT é um incremento em temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ou K), c_p é calor específico a pressão constante do arame, ρ é a densidade do arame, σ_f é a tensão residual do arame e ϵ é a taxa de deformação. No caso de barras cilíndricas e arames, o tempo t pode ser calculado por:

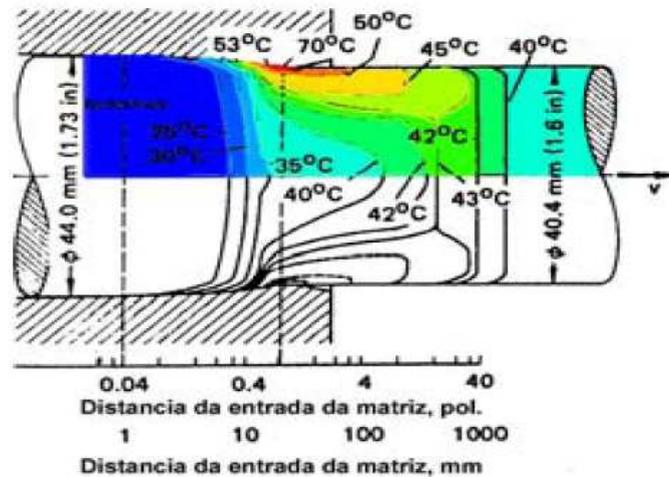


Figura 5.1 - Distribuição de temperatura em uma barra cilíndrica trefilada [Button, 2002].

$$t(x) = \frac{x}{v(x)} \quad (5.3)$$

Onde:

$$x = \frac{D_i - D_f}{2 \cdot \tan \beta} \quad (5.4)$$

$$v(x) = v_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^2 \quad (5.5)$$

e

$$\bar{\epsilon} = \frac{2 \cdot \ln \left(\frac{R_{0,y}}{R_{x,y}} \right)}{t(x)} \quad (5.6)$$

A figura 5.2 ilustra o sistema de coordenadas utilizado para cálculo de temperatura.

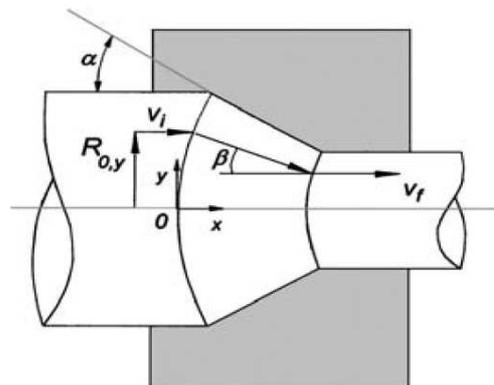


Figura 5.2 - Sistema de referência utilizada para a aplicação das equação 5.2. [Button,2002]

Nos testes foram analisados três fatores:

- O percentual do torque do motor: Como o coeficiente de atrito está diretamente ligado a tensão para trefilar, conforme formula 5.1, logo qualquer alteração no torque será evidenciado pelo aumento ou diminuição do coeficiente de atrito gerado pela falha na lubrificação. Os 7 motores da máquina são motores elétricos de CA de 44 kW com Torque máximo de 112 N.m;

- Residual de sabão sobre o Arame (g/m²): Como visto anteriormente, o residual de sabão é importante, principalmente nos primeiros passes, para uma boa trefiabilidade. Porém, conforme o processo subsequente, o residual de sabão sobre o arame deve ser pouco ou quase nulo. A análise de sabão é feita através da coleta de 8 amostras de 15 cm de arame do mesmo diâmetro. Inicialmente é identificado o peso das 8 amostras, e logo após elas passam por um banho químico com clorofórmio, para remoção do lubrificante. Após o banho, as amostras são pesadas novamente. O residual de sabão é calculado conforme Equação 6.1. O erro da medição é o erro da balança (Erro: 0,0238%);

$$Camada(g / m^2) = \frac{(Peso_i - Peso_F) \cdot \phi \cdot 10^4}{0,51 \cdot Peso_F} \quad (6.1)$$

Onde: Peso_i= Peso inicial (g) das 8 amostras;

Peso_F = Peso final (g) das 8 amostras após o banho químico com clorofórmio;

ϕ - Diâmetro (cm)

- Rugosidade superficial do arame (μm): a capacidade do lubrificante de ficar agregado ao arame varia diretamente com a rugosidade. Conforme visto na Figura 4.8, quanto maior a rugosidade, maior será a quantidade de lubrificante nos vales. A rugosidade superficial considerada será a Rugosidade média (Ra);

7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para cada um dos testes iniciou-se o acompanhamento do setup do jogo de fiéis, limpeza das caixas de sabão e inspeção nas condições da matéria-prima. Após 2 horas de operação com a máquina em condições normais e trabalhando a uma velocidade de 10m/s no 7º passe, iniciou-se a coleta de dados do percentual de torque do motor do painel IHM (interface homem-máquina) dos 7 passes da máquina. Cada passe da Máquina MF7 é composta por 7 motores elétrico CA de 44 kW com um torque máximo de 112.5 N.m. Foi realizada uma coleta de dado a cada 5 minutos, totalizando 10 amostras para cada passe.

No final da coleta de percentual de torque, a máquina foi parada para a coleta de 9 amostras de 15 cm para cada passe, sendo 8 para análise de residual de sabão e uma para análise de rugosidade superficial. Para as amostras de residual de sabão, foi montado um sistema de armazenamento de amostras (Anexo I - figura 8), evitando qualquer contato com as amostras que possa interferir nos resultados da análise. O fluxograma (Figura 7.1) mostra a sequência das tarefas realizadas.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente apresenta-se uma tabela (Tabela 8.1) com valores teóricos de redução, força, velocidade e temperatura imediata para os 7 passes da máquina, afim de que os dados sejam usados como referência para futuras análises. Em seguida, apresentou-se gráficos de distribuição de torque, rugosidade e residual de sabão ao longo dos 7 passes de

redução. Posteriormente classificou-se o tipo de regime de filme de lubrificante para as 3^o experiências realizadas. Por fim, analisou-se os resultados e variáveis, a fim de padronizar a lubrificação para o arame ovalado 15x 17 (2,40 x 2,90 mm). A Tabela 8.1 mostra os valores de deformação radial ϕ_r , velocidade, força e temperatura.

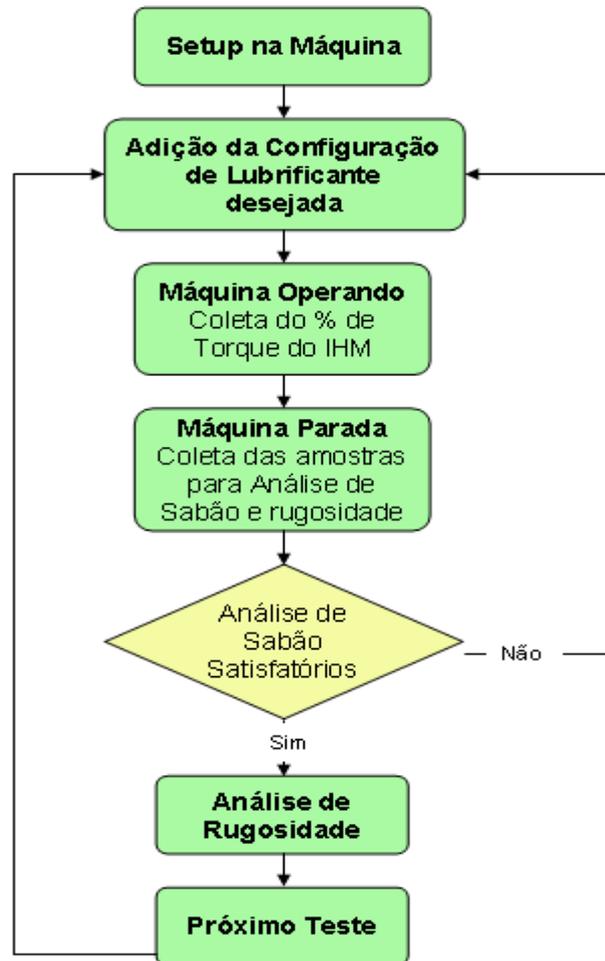


Figura 7.1 - Fluxograma de atividades realizadas para cada teste.

Tabela 8.1 - Dados de diâmetro [mm] e valores teóricos para área [mm²], deformação ϕ_r , velocidade [m/s], força [N] e temperatura [°C] para cada passe da máquina MF7.

	Entrada	1º Passe	2º Passe	3º Passe	4º Passe	5º Passe	6º Passe	7º Passe
Diâmetro [mm]	5,50	4,60	4,06	3,60	3,27	3,00	2,80	2,40 x 2,90
Área [mm ²]	23,76	16,62	12,95	10,18	8,40	7,07	6,16	5,47
Deformação ϕ_r		17,9%	12,5%	12,0%	9,6%	8,6%	6,9%	7,4%
Velocidade [m/s]	2,30	3,29	4,22	5,37	6,51	7,73	8,88	10,00
Força [N]		3.767	3.035	2.497	1.924	1.585	1.286	1.193
Temperatura [°C]	50	206,03	330,48	462,10	566,43	661,71	736,10	820,61

Na tabela 8.1, pode-se observar que a deformação radial ϕ_r tem um comportamento decrescente com exceção do 7^o passe. Essa diferença no 7^o passe se dá pela utilização de uma fieira oval, onde a geometria de uma elipse não proporciona uma deformação uniforme. A força para trefilar também possui um comportamento decrescente ao longo dos passes. Isso se deve a diminuição da taxa de deformação radial, ocasionando assim um menor esforço para trefilar o arame. A velocidade, ao contrário, possui um comportamento crescente. Como visto antes, pela lei da constância do volume, a medida que área do material é reduzida, a

velocidade aumenta proporcionalmente. Vale salientar, que as temperaturas indicadas na tabela, considera a temperatura teórica imediata da superfície do arame logo após a fieira. Nestes valores não está sendo considerado nem uma taxa de extração de calor por algum sistema de resfriamento externo entre cada passe da máquina.

8.1. ANÁLISE DO PERCENTUAL DE TORQUE DOS MOTORES

São apresentados os resultados obtidos nos testes realizados com cada configuração de sabão conforme Tabela 6.3. Para todos os 3 testes (Figura 8.1), comprovou-se a queda de esforço de trefilação ao longo dos passes. Isso comprova os valores teóricos mostrados na Tabela 8.1, onde com a diminuição da deformação radial ao longo dos passes, um menor esforço para trefilar é exigido.

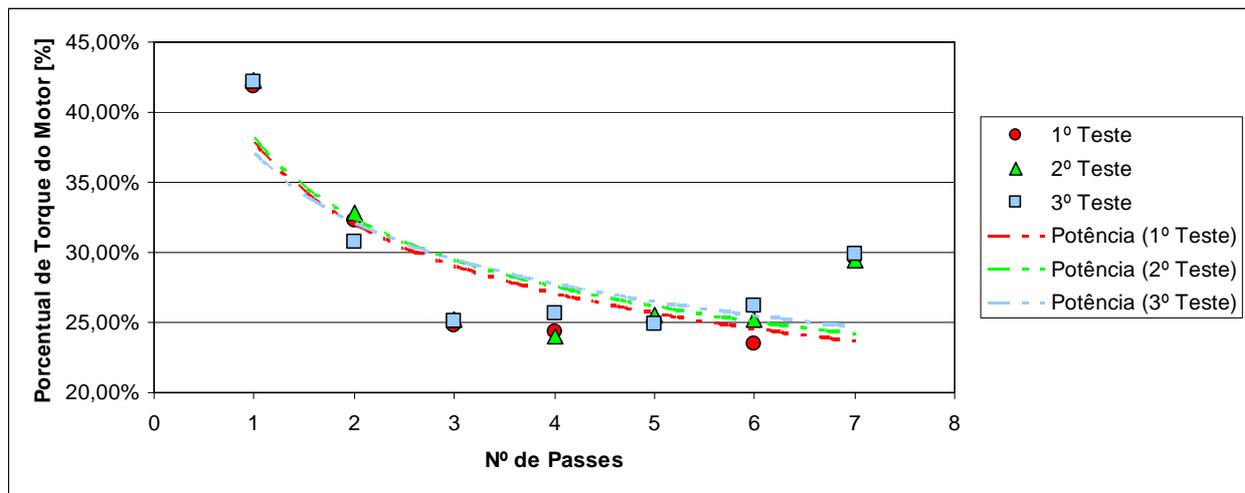


Figura 8.1 – Percentual de torque do motor para cada passe de trefilação da Máquina MF7 nos 3 testes realizados.

Analisando individualmente cada passe de redução, verificam-se variações muito pequenas para cada teste realizado. No último passe ocorre um aumento de torque devido o formato do bloco da máquina. O último bloco é constituído por duas partes, conforme Figura 10 do Anexo I, no qual o arame é bobinado duas vezes.

Comparando-se as linhas de tendências para cada teste, comprova-se um aumento de torque do 1º ao 3º teste. Isso se deve pelo o aumento da viscosidade ocasionado pela adição de sabão de cálcio no passes 3, 4 e 5. Pela teoria de escoamento laminar de Reynolds apresentados anteriormente, o aumento de viscosidade aumenta diretamente a tensão de escoamento do fluido, exigindo assim um esforço maior para trefilar o arame.

8.2. ANÁLISE DA RUGOSIDADE

Conforme observado, a rugosidade superficial do arame influencia no arraste de lubrificante para dentro da fieira. Além disso, uma superfície mais rugosa possui uma maior capacidade de reter o lubrificante nos vales, assim quando o arame passa pela fieira, esses vales trabalham como bombas que expulsam o lubrificante para fora, ajudando na lubrificação.

A rugosidade Ra do fio-máquina logo após a decapagem mecânica por lixas rotativas varia de 1,37 a 2,43 μm . Essa variação se dá pelo desgaste da lixa durante o processo. Quanto mais nova a lixa, maior será a rugosidade superficial do fio-máquina.

Na Figura 8.2, observa-se a redução gradativa da rugosidade conforme aumenta a redução da secção do arame ao longo dos passes. Nos últimos passes, nota-se uma tendência

da rugosidade Ra em permanecer entre 0,30 a 0,40 μm . Pode-se dizer que a rugosidade limite do material é atingida no 6º passe, diâmetro do arame de 2,80 mm, para os três testes.

A variação de rugosidade nos testes, principalmente nos primeiros passes se deve a variação da rugosidade do fio-máquina causado pela decapagem por lixas. No 1º e 2º testes, verifica-se que a rugosidade limite do arame é alcançada já no 5º e 6º passe, analisado posteriormente.

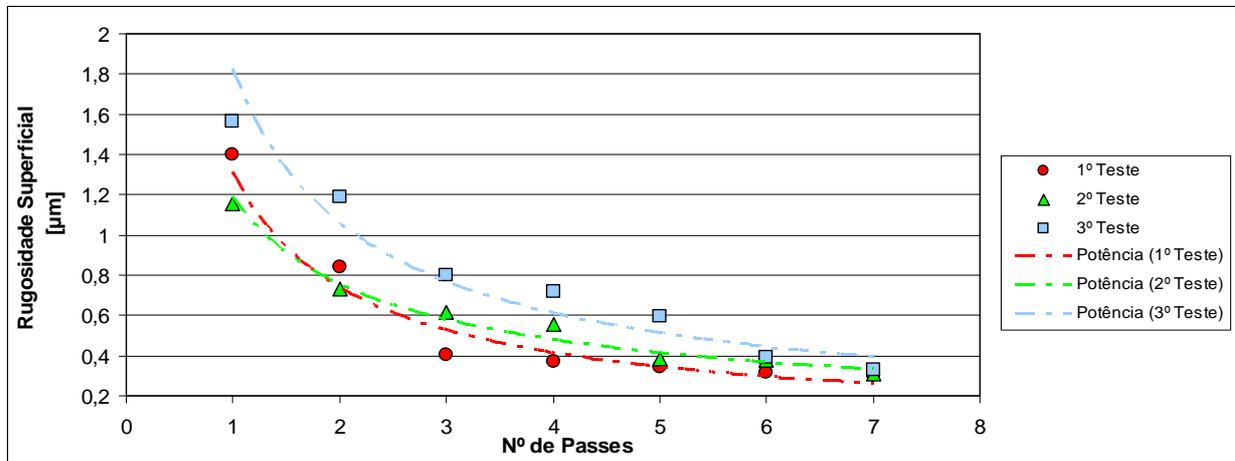


Figura 8.2 – Rugosidade superficial do arame para cada passe de trefilação da Máquina MF7 nos 3 testes realizados.

8.3. ANÁLISE DO RESIDUAL DE SABÃO

Conforme os resultados das análises de percentual de torque e rugosidade superficial, os valores do residual de sabão sobre o arame ao longo dos passes possuem o mesmo comportamento decrescente a medida que aumenta a redução da secção do arame. Com exceção do último passe devido a utilização de uma fieira oval, na qual permite uma passagem maior de lubrificante. A Figura 8.3 mostra esses valores para cada configuração usada nos 3 testes, conforme Tabela 6.3.

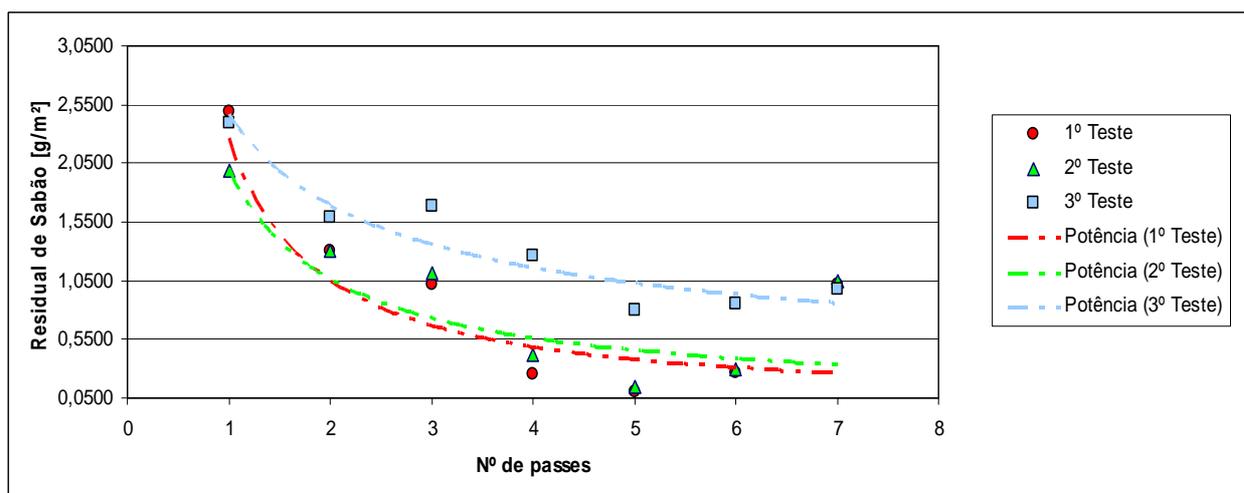


Figura 8.3 – Residual de sabão sobre o arame para cada passe de trefilação da Máquina MF7 nos 3 testes realizados.

A medida que foi adicionado sabão a base de cálcio do 3º ao 5º passe, nota-se um aumento de residual de lubrificante sobre o arame nesses passes. Isso se dá pela maior viscosidade do sabão a base cálcio comparado aquele a base de sódio. Diferenças de residual

no 1º e 2º passe se devem as variações de rugosidade provocadas pela decapagem já citadas anteriormente.

Comparativamente com as análises anteriores, o 3º teste apresentou maior camada residual ao longo dos passes. Isso se dá pela maior rugosidade superficial que o arame apresentou e pela utilização de sabão a base de cálcio do 1º ao 5º passe de redução. Já o 2º teste não é evidenciando nenhum acréscimo devido a adição parcial de sabão de cálcio nos mesmos passes.

Nos 1º e 2º testes, devido a baixa rugosidade superficial apresentada no 4º e 5º passe (rugosidade limite do arame), o residual de sabão encontrado foi relativamente baixo comparado com os resultados do 3º teste. Esses valores condizem com a teoria de Razão de Alisamento [Nakamura, et. all], que diz que quanto mais lisa for a superfície, entenda-se baixa rugosidade superficial, menor será a camada de lubrificante sobre o material. Porém, analisando o 6º passe para os três testes, observa-se um leve aumento de residual de sabão. Isso se dá pela utilização de um aplicador de sabão na caixa de fieira, o qual tem a função de agitar e pressionar o sabão contra o arame, facilitando o arraste para dentro da fieira.

Contudo, em todos os testes o residual de sabão no 7º passe foi praticamente o mesmo. Isso ocorre porque o arame já atingiu sua rugosidade superficial limite, logo não consegue mais reter sabão, existindo apenas uma fina camada de lubrificante sobre o arame.

Para determinação do regime de lubrificação utilizou-se os critérios apresentados por Wilson [1979]. Primeiramente foram somados os valores da rugosidade do arame mostrados na Figura 8.2 com a rugosidade da fieira (Tabela 8.2). A rugosidade da fieira adotada é a mesma de uma superfície polida, assumiu-se o valor de 0,1 μm .

Considerando que a camada de lubrificante sobre o arame possui uma espessura h uniforme e a densidade do sabão ($\rho_{\text{sabão}}$) é de $1,04 \times 10^6 \text{ g/m}^3$, calculou-se h (μm) pela Equação 8.1, para todos os 3 testes (Tabela 8.2).

$$h = \frac{\text{Residual}}{\rho_{\text{sabão}}} \quad (8.1)$$

Onde: *Residual* é o residual de Sabão sobre o arame e $\rho_{\text{sabão}}$ é a densidade do sabão lubrificante.

Tabela 8.2 - Valores de h e rugosidade.

	1º Teste		2º Teste		3º Teste	
	Rugosidade [μm] (fieira + Arame)	h do residual de lubrificante [μm]	Rugosidade [μm] (fieira + Arame)	h do residual de lubrificante [μm]	Rugosidade [μm] (fieira + Arame)	h do residual de lubrificante [μm]
1º Passe	1,497	2,389	1,252	2,322	1,662	2,303
2º Passe	0,944	1,250	0,830	1,257	1,291	1,526
3º Passe	0,503	0,972	0,714	1,075	0,902	1,612
4º Passe	0,468	0,249	0,652	0,403	0,821	1,219
5º Passe	0,441	0,098	0,481	0,134	0,694	0,767
6º Passe	0,416	0,259	0,477	0,283	0,488	0,815
7º Passe	0,403	0,981	0,325	0,998	0,422	0,940

Multiplicando os valores da rugosidade (fieira e arame) por 3, tem-se os valores mínimos para a espessura do filme lubrificante para se atingir uma condição de regime fino. Seguindo o mesmo critério, mas multiplicando-se por 10, tem-se os valores mínimos de espessura para atingir uma condição de regime de filme espesso. A Figura 8.4 mostra os resultados para os testes realizados.

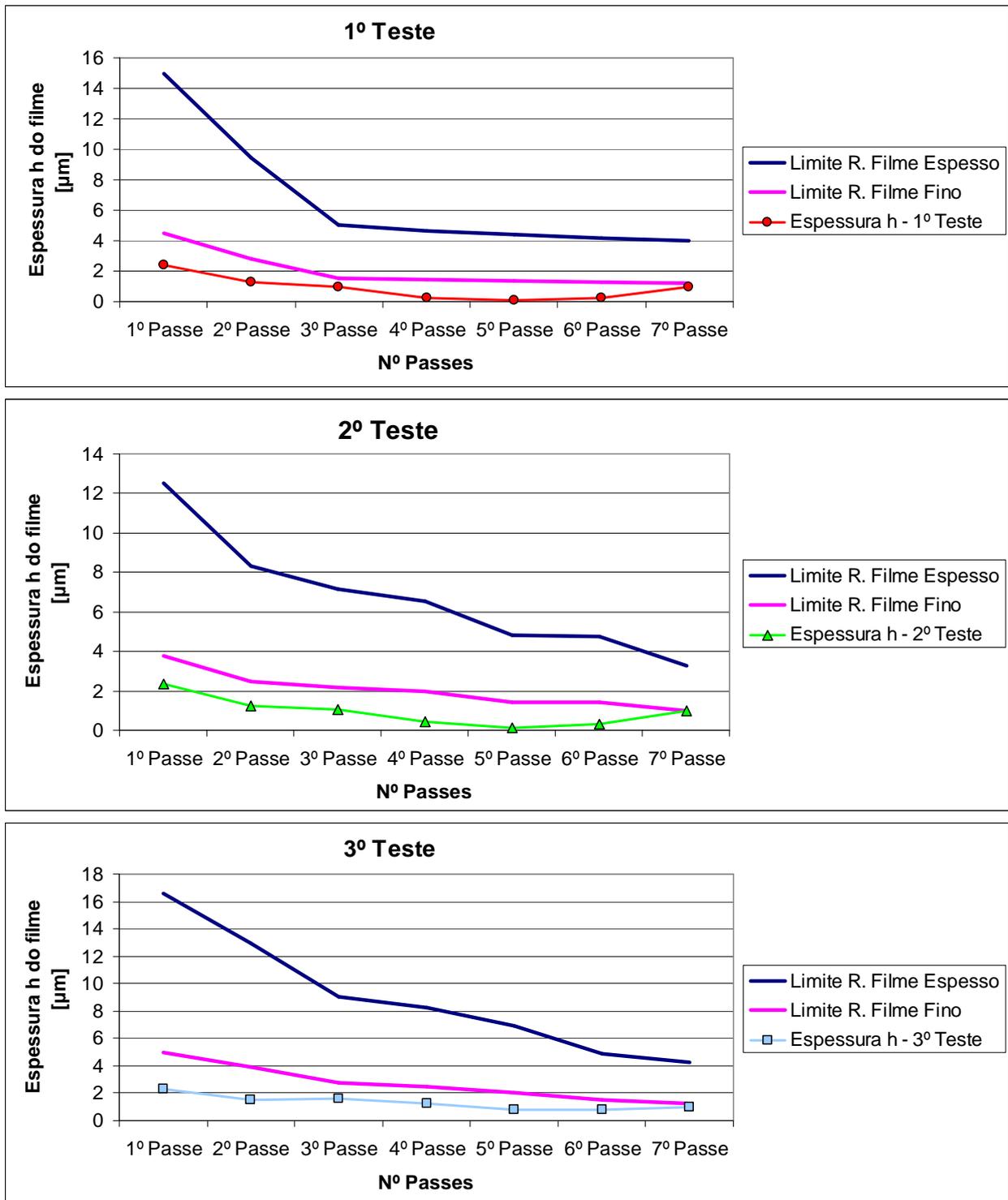


Figura 8.4 – Análise da Espessura h do Filme lubrificante ao longo dos passes, segundo os critérios de Wilson [1979].

Verifica-se que em nenhum dos testes os valores encontrados para a espessura h de lubrificante ultrapassou a linha do limite de Regime de Filme Fino. Analisando separadamente cada passe para os 3 testes tem-se:

- Nos três primeiros passes, nota-se que em nenhum dos testes os valores ultrapassaram a linha de limite mínimo para atingir o Regime de Filme Fino. Assim, para os primeiros passes o regime de lubrificação, segundo Wilson [1979] é um Regime de Lubrificação Mista;

- Para os 1º e 2º testes os valores de espessura h de filme obtidos para os passes 4, 5 e 6 são próximos de zero. Visto que para esses testes a rugosidade limite do material foi alcançada no 5º passe, pode-se classificar um Regime de Lubrificação Limite nesses passes;
- O regime de lubrificação nos passes intermediários do 3º teste pode ser classificado como Regime de Lubrificação Mista.
- Nos três testes, apenas no 7º passe tem-se valores bem próximos do limite mínimo de Regime Fino;

Por fim, optou-se por fazer uma verificação no comportamento da lubrificação com o aumento de velocidade no 6º passe da máquina MF7. Juntamente com o teste de Residual de Sabão realizou-se a Análise de Rugosidade Superficial do arame. O sabão utilizado foi um Sabão a base de Sódio com o uso de aplicadores de sabão. Os valores encontrados estão na Figura 8.5.

A Figura 8.5 mostra uma curva decrescente de residual de sabão a medida que a velocidade é aumentada, contrariando as curvas de Stribek (Figura 4.6). Já os valores das rugosidades superficiais tem um comportamento constante, condizentes com os valores encontrados para o 6º passe anteriormente realizados. Deduz-se que o comportamento decrescente do residual de sabão com o aumento de velocidade se deve à formação de túneis de lubrificação, característico da granulometria fina do sabão a base de sódio, o que dificulta o arraste hidrostático do lubrificante para dentro da fieira, mesmo com a utilização de aplicadores na caixa de sabão.

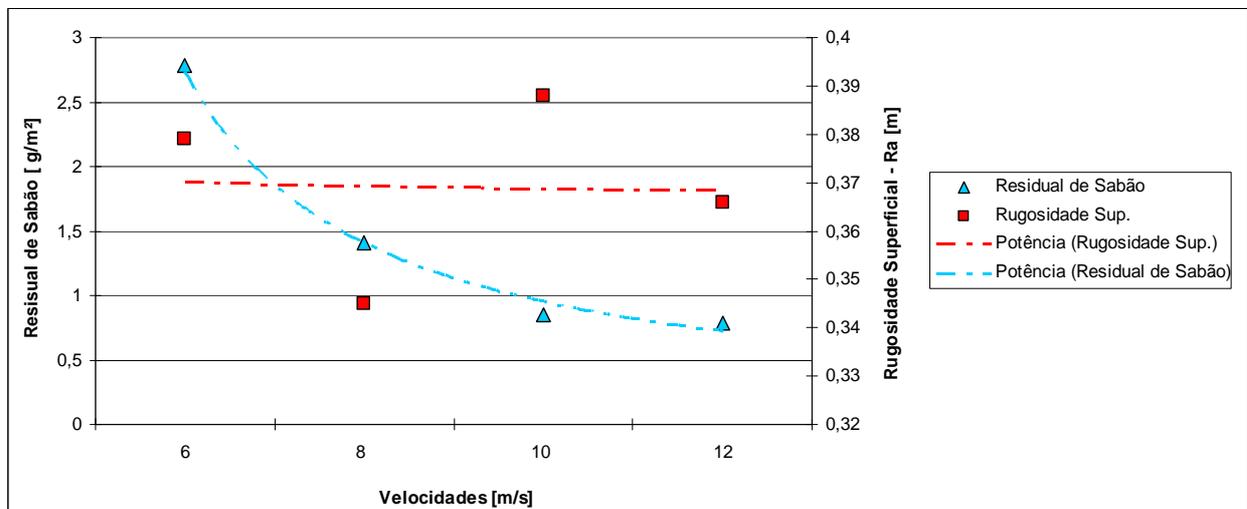


Figura 8.5 – Residual de Sabão e Rugosidade Superficial para o 6º passe variando a velocidade de trefilação;

9. CONCLUSÕES

A seleção do agente lubrificante é experimental e baseia-se em informações tais como o tipo de máquina de trefilar, a velocidade de trefilação e o diâmetro final desejado do material. Outro fator de influência é a qualidade superficial exigida no produto acabado.

Com relação às análises realizadas entres os dois tipos de sabões, conclui-se:

- A medida que a deformação radial ao longo dos passes diminui, um menor esforço para trefilar é exigido;
- A utilização de sabão a base de cálcio proporciona um aumento de residual de sabão ao longo dos passes de redução, devido a maior viscosidade desse lubrificante;
- Quanto maior a rugosidade superficial do arame, maior será a capacidade de reter lubrificante nos vales. Porém, após atingida a rugosidade limite do material (diâmetro inferior a 3,0 mm), não é observado nenhum ganho em residual de sabão;
- A utilização de aplicadores de sabão favorece o arraste de lubrificante para dentro da fieira, principalmente quando o material esta muito liso, perdendo a capacidade de arrastar o lubrificante.;
- Em todos os passes da máquina, o regime de lubrificação evidenciado foi o Regime de Lubrificação Mista;
- Comprovou-se que o aumento de velocidade em um passe de redução diminui o residual de sabão. Essa redução se deve a formação de túneis de lubrificante, ocasionado uma falha no arraste de lubrificante;

A fim de padronizar a lubrificação, inicialmente deve-se realizar uma decapagem mecânica bem eficiente para proporcionar uma rugosidade superficial do arame, essencial para uma melhor lubrificação. Para arames com diâmetro final maior que 3,00 mm, quando maior a utilização de lubrificantes a base de cálcio maior será o residual de sabão no produto final. Já para arames com diâmetros finais menores de 3,00 mm, uma maior proporção de sabão a base de cálcio não acrescentará um aumento de residual de sabão. Porém, nem sempre um alto residual é desejado. Em casos de baixos residuais de sabão exigidos, aconselha-se a utilização de sabão a base de cálcio nos primeiros passes (do 1º ao 3º) e sabão a base de sódio nos demais passes para proporcionar um acabamento final mais limpo.

Sugere-se aqui a realização de trabalhos futuros visando quantificar o residual de sabão exigido para processos subseqüentes, como galvanização e corte para pregos. Propõem-se também realizar novos testes de estudos de lubrificantes para diferentes tipos de máquinas, para identificar outros variáveis que influenciam na lubrificação de arames.

10. BIBLIOGRAFIA

- BUTTON, S. T.; **“Trefilação: Programa de Educação Continuada”**, São Paulo: ABM, 2002.
- CETLIN, P.R: **“Curso de Tecnologia de trefilação de arames de aço”**, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFMG, 2002.
- CÉZAR, J. L.; **“Análise da Força e Lubrificantes em Trefilação de Arames de Aço”**, PPGEMM/UFRGS, 1986.
- COELHO, A. R. Z.; Magnavacca, E. H.; **“Lubrificação a seco em arames de aço carbono”**, Wire Industry, p. 651–660, 1975.
- COLLIER, J.; & Co Ltd.; **“Wire drawing Lubrification. Application, Behaviour, Effects”**, WireIndustry, p. 678-682, August 1972.
- DOVE, A. B.; **“Steel Wire Handbook”**, vol. 1 e 2, The Wire International Association Inc, 3ª ed., 1979.
- NAKAMURA, Y., KAEAKAMI, H. MARSUSHITA, T., SAWASA, H.: **“An evaluation of lubrication in wiredrawing”**, Wire jornal, p; 54-58, 1980;
- RIGONI, A.; **“Comparação de Porta Lubrificantes e Lubrificantes na Trefilação de Arames de Aço”**, PPGEMM/UFRGS, 1978.
- WILSON, W. R. D: **“Friction and lubrication in bulk metal forming processes”**, J. of App. Metalworking, v. 1, 1979
- WRIGHT, R. N.: **“Physical conditions in the lubricant layer”**, Wire Journal International, August 1997

11. ANEXOS – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

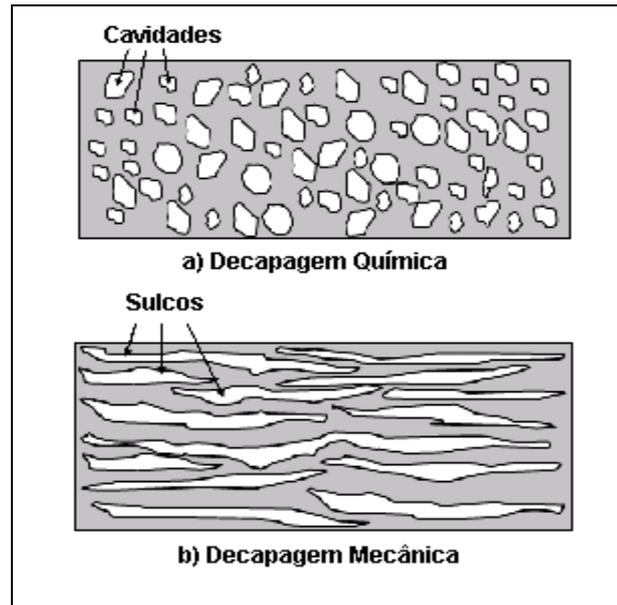


Figura 1 – Rugosidade na superfície do arame [Cetlin, 2002].

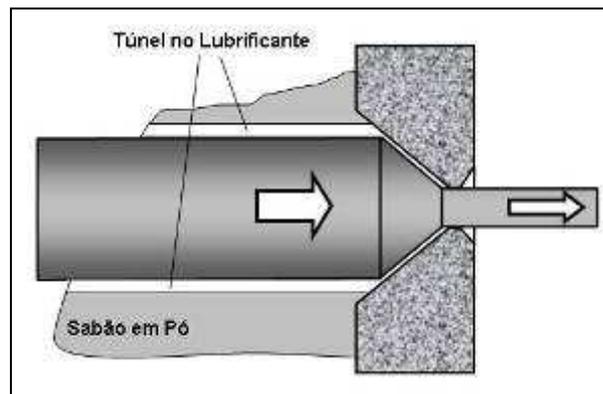


Figura 2 – Formação do Túnel na Lubrificação [Cetlin, 2002]

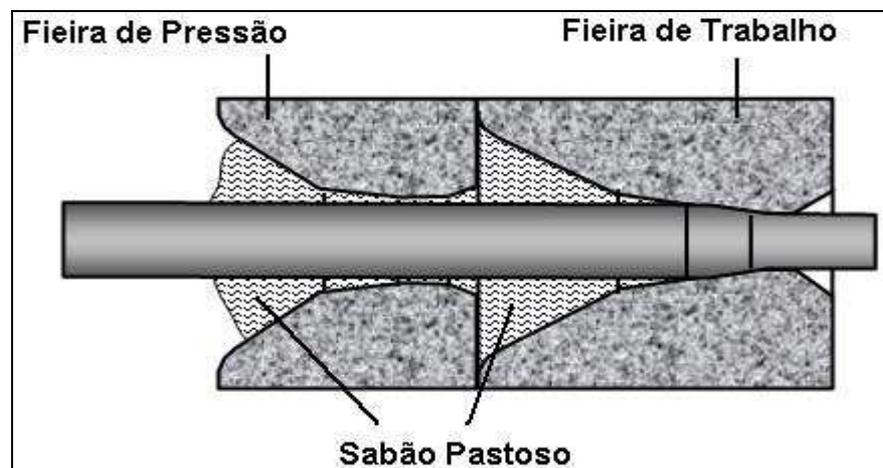


Figura 3 – Sistema de feira pressão com duas feiras [Cetlin, 2002]

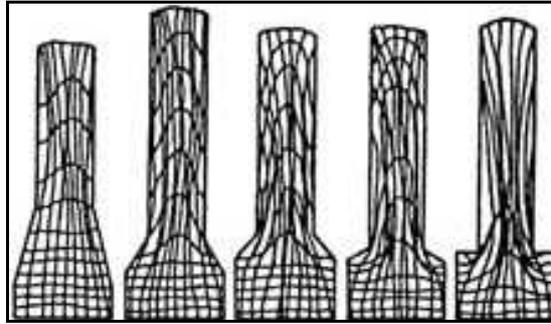


Figura 4 – Efeito da variação do ângulo do cone de trabalho do núcleo da fieira sobre a deformação material, [Button, 2002].

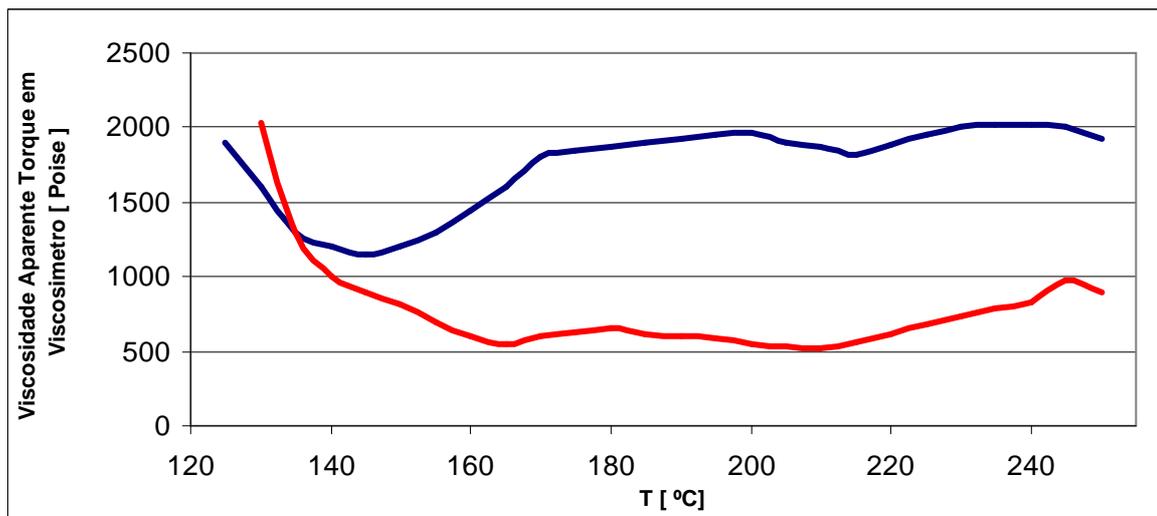


Figura 5 – Viscosidade aparente de sabões a base de cálcio e Sódio em relação a temperatura. [Cetlin, 2002]

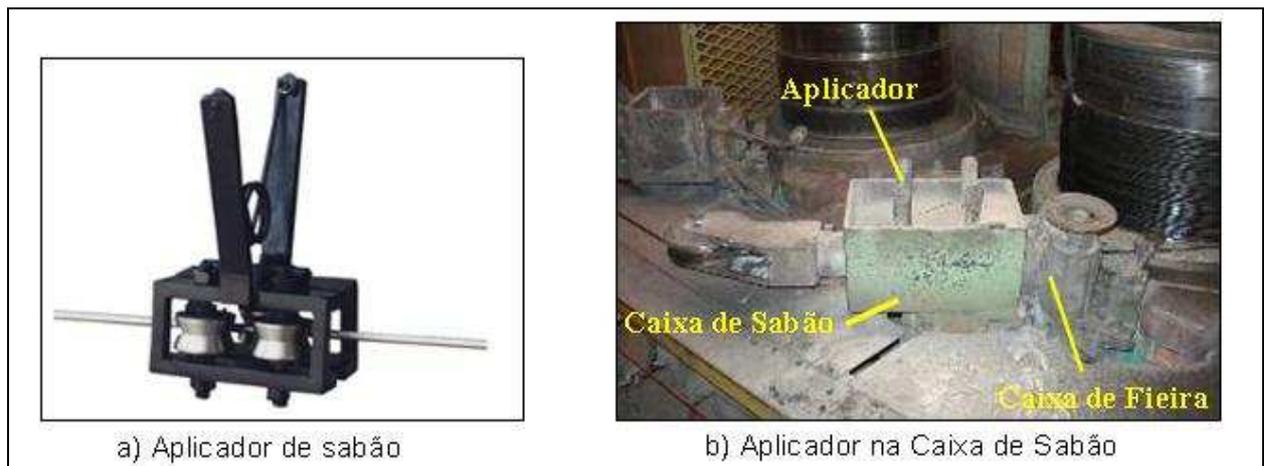


Figura 6 – a) aplicador de sabão e b) aplicador de sabão na caixa de sabão de um passe;

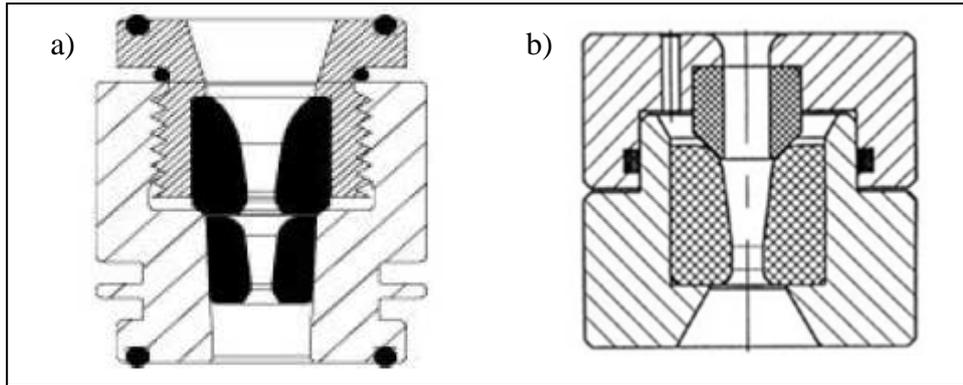


Figura 7 – Fieiras de pressão: a) Desenho da Fieira Paralock e b) Desenho da Fieira Vassena VG402;



Figura 8 – Refrigeração direta da Fieira na caixa de fieira da MF7.



Figura 9 – Caixa de coleta de amostra para Análise de Residual de Sabão;

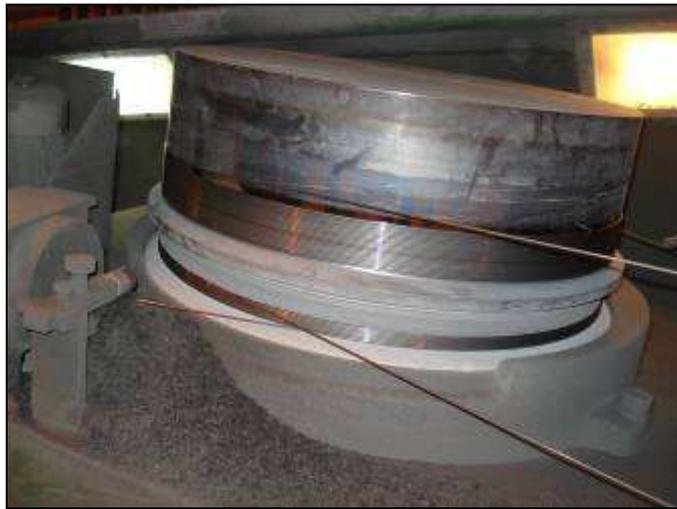


Figura 10 – Bloco Double-Deck do 7º Passe da Máquina MF7.