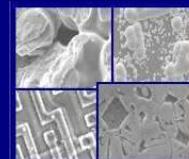




**PUCRS**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



**PGETEMA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO FORÇADA  
PARA SECAR O FIO MÁQUINA NA LAMINAÇÃO A FRIO DE  
VERGALHÕES**

**FÁBIO AUGUSTO COSTA DA ROCHA**  
ENGENHEIRO MECÂNICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

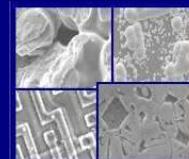
**Porto Alegre**  
**Maio, 2012**



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



PGETEMA

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO FORÇADA PARA SECAR O FIO MÁQUINA NA LAMINAÇÃO A FRIO DE VERGALHÕES**

**FÁBIO AUGUSTO COSTA DA ROCHA**  
ENGENHEIRO MECÂNICO

ORIENTADOR: Profa. Dr. Berenice Anina Dedavid

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre**  
**Maio, 2012**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial ao meu filho Lucas e minha esposa Gisele, minhas fontes de inspiração, e a minha mãe, Conchita, pelo apoio e compreensão que tive em todas as etapas da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, Gisele e Lucas, pelo carinho, compreensão pelo tempo que foi dispensado para a elaboração desse trabalho, pela paciência e confiança que me foi dada. Só tenho que agradecer a essas pessoas, essa família linda que amo muito.

Agradeço a minha querida mãe que me proporcionou grande parte do meu desenvolvimento pessoal e profissional. Uma pessoa incrível que merece tudo de bom que a vida pode proporcionar.

Agradeço aos meus colegas da Gerdau Riograndense, pelo profissionalismo, ajuda, pela amizade e por fazer da Gerdau um excelente local para se trabalhar.

Agradeço à orientação da professora Berenice, pela sua paciência, o incentivo dado ao trabalho, a disponibilidade em me receber em seu laboratório para tirar dúvidas. Uma pessoa muito agradável.

Agradeço ao professor Paulo Renato pelos conselhos técnicos concernentes ao projeto dos sistemas de ar forçado e a todas as pessoas que fizeram parte deste projeto.

Agradeço à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) pela oportunidade de participar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA).

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>4</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>12</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>14</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Produção de Fio Máquina.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Processamento de Fio Máquina.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3. Lubrificante e Lubrificação.....</b>	<b>27</b>
3.3.1. Lubrificação Hidrodinâmica.....	28
3.3.2. Lubrificação Limite .....	28
3.3.3. Lubrificação para Extrema Pressão .....	29
3.3.4. Categoria de Lubrificante .....	29
3.3.5. Lubrificantes para Trefilação.....	31
<b>3.4. Ventilação Industrial .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5. Ventiladores.....</b>	<b>35</b>
<b>4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. Caracterização do Problema .....</b>	<b>39</b>
4.1.1. Análise da Camada de Lubrificante .....	43
<b>4.2. Sistema de Ventilação.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. Bicos Sopradores de Ar.....</b>	<b>46</b>
<b>4.4. Sistemas Secadores.....</b>	<b>47</b>
4.4.1. Cálculo da Potência do Motor .....	51

4.4.2. Instalação dos Equipamentos .....	53
<b>4.5. Materiais Utilizados .....</b>	<b>55</b>
<b>4.6. Procedimentos do Teste.....</b>	<b>56</b>
<b>4.7. Resultados das Análises das Camadas de Lubrificantes.....</b>	<b>57</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
5.1. Construção e Montagem dos Sistemas.....	59
5.2. Teste de Camada.....	63
5.3. Considerações Finais .....	66
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>68</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Exemplo de encruamento. (a) aço normalizado (b) aço encruado.....	19
Figura 3.2. Esquema mostrando as fases do recozimento após o encruamento dos metais.....	20
Figura 3.3. Bobinas de fio máquina.....	22
Figura 3.5. (a) Esquema da passagem do metal pela fieira. (b) Fieiras de trefilação.	24
Figura 3.6. (a) Cassetes laminadores montados na máquina. (b) Detalhe da disposição dos discos de metal duro a 120° e do orifício onde o fio máquina passa. ....	25
Figura 3.7. Vergalhão produzido a partir do fio máquina, com saliências (nervuras) produzidas por laminação a frio com o trio de cassetes da figura.....	25
Figura 3.8. Esquema de funcionamento da redução da área do fio máquina pelos discos de metal duros dispostos a 120 °um do outro .....	26
Figura 3.9. Esquema mostrando a relação entre duas superfícies e o lubrificante. ...	27
Figura 3.10. Cone de trabalho da fieira. ....	32
Figura 3.11. Decapador mecânico com detalhe nos rolos flexionadores. ....	33
Figura 3.12. Detalhe das cavidades. (a) Cavidades côncavas provenientes da decapagem química. (b) Cavidades paralelas provenientes da decapagem mecânica. ....	33
Figura 3.13. Esquema de um sistema de ventilação forçada.....	35
Figura 3.14. Esquema de funcionamento do ventilador centrifugo.....	36
Figura 3.15. Esquema de funcionamento do ventilador axial.....	36
Figura 4.1. (a) Cassete de laminação montado e limpo e, em (b) cassete repleto de lubrificante, após a utilização com fio máquina molhado .....	39
Figura 4.2. (a) Vista do aplicador de lubrificante na laminadora e (b) esquema de funcionamento do aplicador de lubrificante. ....	40

Figura 4.3. Amostra de fio máquina lubrificado na situação ideal, fio máquina seco. Camada de lubrificante de trefilação aderida: 1,33 g/m <sup>2</sup> . .....	41
Figura 4.4. Amostra de fio máquina lubrificado na situação não ideal, fio máquina molhado. Camada de lubrificante de trefilação aderida: 3,67 g/m <sup>2</sup> . .....	41
Figura 4.5. (a) Trio de cassetes de laminação montados e, em (b) cassetes repletos de lubrificantes, após a utilização com fio-máquina úmido. ....	42
Figura 4.6. Pesagem dos corpos de prova colocados sobre um “vidro de relógio”. ...	44
Figura 4.7. Recipiente no aparelho de limpeza por ultrassom. ....	44
Figura 4.8. Ventilador OTAM® selecionado para o projeto do sistema instalado em uma base de aço no chão da fábrica. (a) visão do motor e (b) visão da admissão. ....	46
Figura 4.9. Desenho do bico que será utilizado nas três configurações. ....	46
Figura 4.10. Configuração com 2 bicos a 120° um do outro e incidindo a 90° sobre o fio-máquina.....	47
Figura 4.11. Configuração com 1 bico incidindo a 90° sobre o fio-máquina.....	48
Figura 4.12. Configuração com 1 bico incidindo a 45° sobre o fio máquina.....	48
Figura 4.13. Componentes do sistema A. ....	49
Figura 4.14. Sistema A em corte. ....	49
Figura 4.15. Local de instalação do sistema de ar forçado para secar o fio máquina, entre o decapador mecânico e os <i>pay offs</i> .....	54
Figura 4.16. Detalhe da figura 4.12. ....	55
Figura 4.17. Amostra da situação ideal. ....	57
Figura 4.18. Amostra da situação ruim.....	57
Figura 5.1. Local da laminadora onde foi instalado o sistema de secagem de fio máquina. Em destaque o duto flexível por onde passa o ar.....	60
Figura 5.2. a) Instalação do sistema B na laminadora. B) instalação do sistema A com dois dutos. ....	60

- Figura 5.3. Detalhe do tubo de aço onde foram fixados os bicos sopradores e os mancais (Obs.: bico soprador á 45°).....60
- Figura 5.4. a) Bico soprador utilizados nos sistemas A, B e C. b) Mancal guia para o fio máquina utilizado na entrada e saída dos sistemas A, B e C.....61
- Figura 5.5. Distribuidor conectado ao ventilador para a distribuição do ar nos bicos do sistema A.....61
- Figura 5.6. Amostra de fio máquina do primeiro dispositivo testado, sistema B, apresentando parte da camada expandida. ....63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Especificações do fio máquina sextavado fabricado pela Gerdau. ....	22
Tabela 4.1. Relação entre comprimento do fio e número de corpos de prova (Cps).	43
Tabela 4.2. Cálculo da área do bocal de saída do ventilador OTAM®.....	50
Tabela 4.3. Cálculo da velocidade do ventilador OTAM®. ....	50
Tabela 4.4. Cálculo da velocidade nos bicos dos sistemas A, B e C. ....	50
Tabela 4.5. Massa específica do ar.....	53
Tabela 4.6. Viscosidade dinâmica de alguns materiais comuns. ....	53
Tabela 4.7. Composição química do fio máquina SAE 1013. ....	55
Tabela 4.8. Composição química do fio máquina SAE 1014. ....	56
Tabela 5.1. Resultados dos testes de adesão da camada lubrificante, com o sistema B.....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Paralelo entre os processos de conformação a frio e a quente.....	20
Quadro 3.2. Nomenclatura do fio máquina em diversos países. ....	21
Quadro 5.1. Amostra de fio máquina obtida nos testes do sistema A. No lado direito, o resultado dos testes de adesão da camada lubrificante.....	64
Quadro 5.2. Amostra de fio máquina obtida nos testes do sistema A. No lado direito, o resultado dos testes de adesão da camada lubrificante.....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

D	Diâmetro	mm
P	Potência	W
Q	Vazão	m <sup>3</sup> /s
$\eta$	Velocidade angular	rpm
$\rho$	Peso específico	N/m <sup>3</sup>
R <sub>tot</sub>	Rendimento total	%
P <sub>tot</sub>	Potência total	W
P <sub>u</sub>	Potência útil	W
P <sub>m</sub>	Potência motriz	W
R <sub>h</sub>	Rendimento hidráulico	%
R <sub>m</sub>	Rendimento mecânico	%
R <sub>v</sub>	Rendimento volumétrico	%

## RESUMO

COSTA DA ROCHA, Fábio Augusto. **Desenvolvimento de um sistema de ventilação forçada para secar o fio máquina na laminação a frio de vergalhões.** Porto Alegre. 2012. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A siderurgia nacional vem se modernizando. Logo, seus processos buscam a estabilidade na área de produção. A laminação a frio de vergalhões é um processo que vem evoluindo: o avanço tecnológico permite a tais máquinas, por exemplo, alcançar velocidades de até 17 m/s. Entretanto, altas velocidades trazem consigo a probabilidade de interrupções na produção. Na Gerdau, os laminadores a frio são comuns, e um dos principais motivos de parada identificado pelas unidades de produção espalhadas pelo Brasil é justamente a interrupção das máquinas em virtude de fio máquina molhado pela água da chuva. Tal fato se dá porque o lubrificante possui partículas muito pequenas e, com a passagem do fio máquina molhado, se expande, e com o arraste, se aglomera sobre os cassetes – equipamentos responsáveis pela redução da área do fio máquina – trancando os rolamentos dos rolos laminadores. A solução adotada para a retirada da água do fio máquina foi a instalação de um sistema composto por um tubo com mancais nas pontas mais dois bicos distanciados 120° um do outro. Nesses bicos estão acopladas mangueiras que, por sua vez, estão conectadas a um ventilador centrífugo. A implantação desse sistema garantiu, dessa forma, a estabilidade do processo, mesmo em dias chuvosos.

Palavras-Chaves: Fio máquina, laminação a frio, lubrificante, sistema de secagem.

## ABSTRACT

COSTA DA ROCHA, Fábio Augusto. **Development of a forced ventilation system for drying the wire rod in the cold rolling machines of rebars.** Porto Alegre. 2012. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The national steel industry has been modernized. Indeed, its processes seek stability in the production area. The cold rolling of rebars is a process which is evolving: technological advance allows such machines, for example, reach speeds up to 17 m/s. However, high speeds bring the probability of interruptions in production. At Gerdau, the cold rolling mills are common, and one of the main reasons identified by stopping production units throughout Brazil is just a interruption in machinery because of wire rod wet by the rain water. This fact is because the lubricant and has very small particles with the passage of the wire rod wet, expands, and deposited on the cassettes - the equipment responsible for a reduction of the wire rod - locking the bearings of the rolls. The solution adopted for the removal of water from the wire rod was the installation of a system compound of a tube with bearings at the ends two nozzles spaced 120° from each other. In these nozzles are hoses coupled, in turn, are connected to a centrifugal fan. The implementation of this system guaranteed, thus, the stability of the process, even on rainy days.

Key-words: Wire rod, cold rolling, lubricant, dry system.

## 1. INTRODUÇÃO

As primeiras décadas do século XX foram de avanços para a siderurgia brasileira, impulsionados pelo surto industrial verificado em 1917 e 1930. A década de 30 registrou um grande aumento na produção siderúrgica nacional, principalmente incentivada pelo crescimento da Belgo-Mineira que, em 1937, inaugurava a usina de Monlevade, com capacidade inicial de 50 mil toneladas anuais de lingotes de aço. Ainda em 1937, são constituídas a companhia siderúrgica de Barra Mansa e a Companhia Metalúrgica de Barbará. Apesar disso, o Brasil continuava muito dependente de aços importados (Scaini, 2009). Atualmente, a Gerdau S.A, uma das maiores empresa do país, é líder na produção de aços longos nas Américas e uma das maiores fornecedoras de aços longos especiais no mundo. Possui mais de 40 mil colaboradores e presença industrial em 14 países, com operações nas Américas, na Europa e na Ásia, as quais somam uma capacidade instalada superior a 25 milhões de toneladas de aço. É a maior recicladora da América Latina e, no mundo, transforma, anualmente, milhões de toneladas de sucata em aço. Seus produtos, comercializados para os cinco continentes, atendem os setores da construção civil, indústria e agropecuária (Gerdau, 2011).

Porém, a competição deflagrada entre as indústrias do aço, produtores empenham-se em aumentar a produção e baixar o custo de seus produtos. Uma das alternativas é manter a produção continuamente ativa, evitando paradas por falhas durante o processamento do material.

A produção de arames para concreto, comercializados como vergalhão, foco deste trabalho, está aquecida, devido ao aumento do consumo brasileiro impulsionado pelas políticas públicas, as Olimpíadas, e a Copa (DECONCIC/FIESP, 2011). A construção civil consumirá uma quantidade enorme de aço, na forma de barras, fios e principalmente vergalhões.

O vergalhão CA60 é essencialmente consumido no Brasil, indicado para a produção de vigotas de lajes pré-fabricadas, treliças, armações para tubos, pré-moldados e outras aplicações. Produzido com rígido controle em seu diâmetro por laminação à frio a partir do fio máquina, conforme especificações da norma ABNT NBR 7480.

Para a laminação do CA60 são utilizados três trios de ferramentas (cassetes) dispostos em série. O fio entra no primeiro trio de ferramentas após passar por processo de lubrificação. Neste processo, o lubrificante é aderido ao fio máquina que passa, então, a ser conformado pelos trios de ferramentas com uma velocidade média de 8 m/s. Segundo o layout atual da linha de fabricação, quando está chovendo, o fio máquina passa molhado pelo depósito de lubrificante. O lubrificante à base de sódio, além de expandir em contato com a água, adere demasiadamente ao fio máquina molhado. O lubrificante expandido não atende mais as exigências de lubrificação e, ainda, fica trancado no primeiro trio de cassetes, prejudicando a refrigeração da ferramenta, provocando obrigatoriamente paradas no processo de fabricação. Este problema é bem conhecido pelos fabricantes, no processo de laminação a frio.

Neste trabalho é proposta uma solução de baixo custo para garantir as condições de operação das laminadoras de fio máquina, tal que, as paradas para retirada de lubrificante dos cassetes laminadores sejam reduzidas ou até eliminadas, garantindo o controle da produção diária da linha.

Foram projetados, construídos e testados três sistemas de sopradores de ar, desenvolvidos com a finalidade de arrastar a água acumulada no fio máquina, antes deste ser lubrificado para passar pelos três conjuntos de cassetes de laminação, responsáveis pela conformação final do vergalhão CA60.

A produção foi interrompida para a retirada de amostras lubrificadas que passaram pelo sistema de secagem em dias chuvosos e amostras úmidas. Os resultados foram confrontados e estão apresentados neste trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

Desenvolver um sistema de ventilação forçada para secar o fio máquina na laminação a frio de vergalhões, garantindo as condições de operação dos equipamentos, tal que, as paradas devido à expansão do lubrificante sejam eliminadas.

### **2.1. Objetivos Específicos**

- Testar três sistemas para a secagem de fio máquina com diferentes *layouts* de sopradores de ar, em situação rotineira na linha de produção;
- Qualificar a eficiência do sistema de secagem na produção.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos de conformação mecânica são processos de fabricação que empregam a deformação plástica de um corpo metálico, mantendo sua massa e integridade. A seguir alguns exemplos desses processos (Moreira, 2010):

- Forjamento e laminação;
- Trefilação, extrusão e repuxo;
- Estiramento;
- Dobramento; e,
- Corte por cisalhamento.

O trabalho primário realizado a partir de lingotes para a obtenção de placas e tarugos, assim como, o secundário realizado sobre placas e tarugos para obtenção de peças na forma definitiva ou produtos semi-acabados (arames, fios, estampados e forjados) podem ser realizados a quente ou a frio.

Na conformação a quente o metal é trabalhado aquecido acima de sua temperatura de recristalização e na conformação a frio abaixo da temperatura de recristalização. No trabalho a frio, o metal apresenta-se encruado ou parcialmente encruado, dependendo das forças envolvidas no processo (Schaeffer, 1995). O encruamento nos metais causa alongamento dos grãos na direção de deformação conforme mostra a Figura 3.1 para um aço AISI 1045.

Dentro dos processos de conformação existe também o trabalho a morno, exemplo forjamento, onde ocorre uma recuperação parcial da ductilidade do material. Objetivam aliar as vantagens das conformações a quente e a frio. O grau de endurecimento por deformação é consideravelmente menor do que no trabalho a frio. Em relação ao trabalho a quente o processo a morno apresenta melhor acabamento superficial e precisão dimensional devido à diminuição da oxidação e da dilatação (Corrêa, 2010).

O encruamento de um metal é definido como o endurecimento por deformação plástica a frio. Nos metais ocorre na região da deformação plástica pelo movimento das discordâncias. Durante a deformação do material as discordâncias interagem entre si, com outras imperfeições do metal, ou indiretamente com o campo de tensões internas que funcionam como obstáculos.

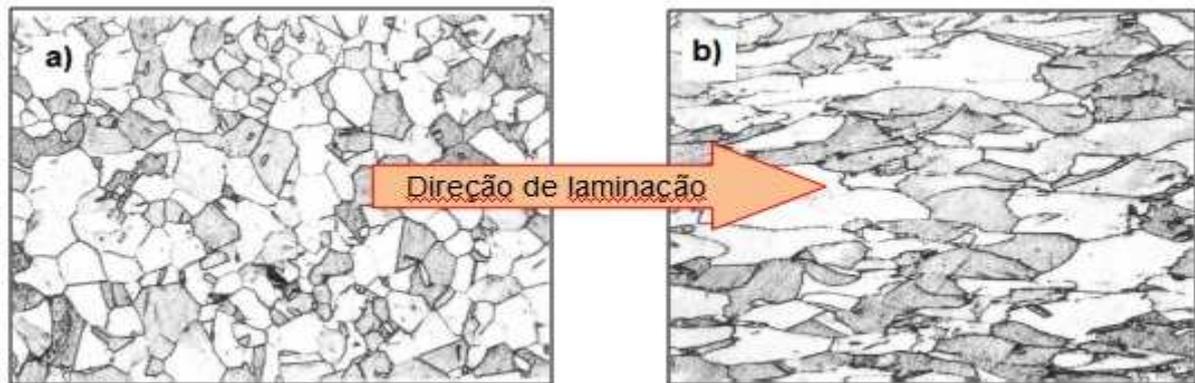


Figura 3.1. Exemplo de encruamento. (a) aço normalizado (b) aço encruado.

Fonte: Schaeffer, 1995.

Estas interações levam a uma redução da mobilidade das discordâncias, e conseqüentemente, tensões maiores para provocar mais deformação plástica.

Metais encruados possuem uma alta energia interna armazenada na forma de defeitos cristalinos. Algumas teorias têm sido propostas para explicar o encruamento, mas todas elas esbarram na dificuldade de determinar como a densidade e a distribuição das discordâncias varia com a deformação plástica do material (Hosford, 2005).

Após o encruamento, o aço deve ser aquecido para que ocorra a recristalização, ou seja, a nucleação de novos grãos livres de deformação para a recuperação da microestrutura (Cetlin, 2005). Durante o recozimento pode ocorrer à recuperação, a recristalização e crescimento de grãos conforme ilustra a Figura 3.2.

O trabalho a quente requer menos energia para deformar o metal, proporciona o surgimento de menos discordâncias na microestrutura, diminui as heterogeneidades da estrutura inicial do lingote, tem o potencial de diminuir porosidades. Os grãos colunares e grosseiros do lingote inicial são quebrados e refinados durante a conformação, dando lugar a grãos equiaxiais. Além disso, estas

variações microestruturais proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade do aço.

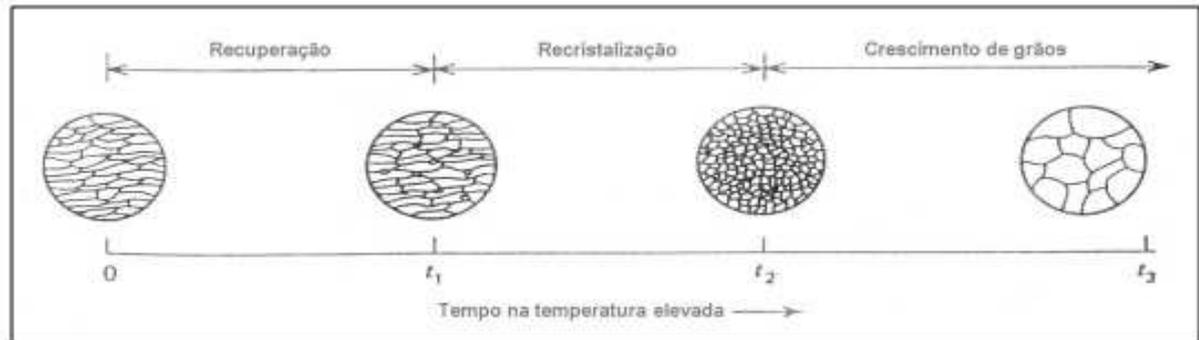


Figura 3.2. Esquema mostrando as fases do recozimento após o encruamento dos metais.

Fonte: Cetlin, 2005.

A estrutura e as propriedades dos metais trabalhados a quente não são tão uniformes ao longo da seção reta como nos metais trabalhados a frio e recozidos. O metal possuirá grãos recristalizados de menor tamanho nesta região (Cimm, 1997).

Além disso, no trabalho a quente as reações superficiais entre o metal e a atmosfera do forno tornam-se problemáticas. A descarbonetação superficial de aços trabalhados a quente pode ser um problema sério e, freqüentemente, recorre-se a laboriosos acabamentos superficiais com o intuito de remover a camada descarbonetada. O Quadro 3.1 mostra um paralelo entre vantagens e desvantagens entre a conformação a quente, morno e a frio.

Quadro 3.1. Paralelo entre os processos de conformação a frio e a quente.

Processo	Trabalho a Quente	Trabalho a Morno	Trabalho a Frio
<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor esforço mecânico</li> <li>- Preserva tenacidade do material</li> <li>- Não há rigidez da peça, pois não ocorre o encruamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Força e potência menor do que no trabalho a frio</li> <li>- Geometrias mais complexas</li> <li>- Necessidade de recozimento pode ser reduzida ou eliminada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhor precisão, tolerâncias mais apertadas</li> <li>- Melhor acabamento superficial</li> <li>- Encruamento aumenta a resistência e a dureza</li> </ul>

<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pior acabamento superficial e tolerâncias</li> <li>- Oxidação da superfície de trabalho acarreta acabamento inferior</li> <li>- Baixa vida útil do ferramental</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rápida oxidação, o que produz um acabamento insatisfatório e escamas na superfície</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Força e potência maior, requerida na operação de deformação</li> <li>- Superfície do material de partida deve ser livre de rebarbas</li> <li>- Ductilidade e encruamento limitam a quantidade de conformação que pode ser feito</li> </ul>
---------------------	--	--	---

Fonte: Unip, 2012.

### 3.1. Produção de Fio Máquina

O fio máquina é um fio de aço produzido a partir da laminação a quente, sendo a sua matéria-prima o tarugo. É utilizado no Brasil e em outros países do mundo como matéria-prima para: arames, molas, eletrodos revestidos, produtos agropecuários, vergalhões para construção civil e outras aplicações. O Quadro 3.2 mostra a nomenclatura do fio máquina em alguns países do mundo.

Quadro 3.2. Nomenclatura do fio máquina em diversos países.

<i>Alemanha</i>	<i>Walzdraht, Drahtrollen, Drahtcoils</i>
<i>Estados Unidos, Inglaterra</i>	<i>Wire rod, wire rod coils</i>
<i>França</i>	<i>Fil machine</i>
<i>Espanha</i>	<i>Alambre laminado</i>
<i>Argentina, Chile, Peru</i>	<i>Alambron</i>

O fio máquina (Figura 3.3) está disponível em aços ao carbono (alto, médio e baixo teor de carbono) e aços ligados, os mais comuns são de aço SAE 1006, 1008, 1010, 1012 e 1045.



Figura 3.3. Bobinas de fio máquina.

Fonte: Gerdau, 2009.

O diâmetro do fio máquina pode variar de 5,5 mm até 33,3 mm podendo ser de seção esférica ou sextavado. Neste ultimo caso, a diagonal pode variar 12,7 mm até 19,1 mm. A norma ABNT NBR 6354 é responsável pelo controle dimensional do produto e a norma ABNT NBR 6330 rege a qualidade superficial. O fio máquina sextavado é utilizado na fabricação de porcas e parafusos sextavados. São fornecidos nas dimensões: 15,87 mm, 17,50 mm e 19,05 mm conforme mostra a Tabela 3.1 (Gerdau, 2005).

Tabela 3.1. Especificações do fio máquina sextavado fabricado pela Gerdau.

<b>Bobinas Sextavadas – Bitolas Padronizadas e Tolerâncias Dimensionais</b>					
<b>Bitolas</b>		<b>Afastamento</b>	<b>Deformação</b>	<b>Diferença Máxima</b>	<b>Raio de Canto</b>
		<b>NBR 13283</b>	<b>Máxima do Sextavado</b>	<b>Entre Diagonais</b>	<b>Máximo</b>
<b>Bitolas</b>	<b>Polegada</b>	<b>± (mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
12,70	½	0,40	0,60	1,12	3
14,29	9/16	0,40	0,60	1,12	
15,87	5/8	0,50	0,75	1,40	
17,50	11/16	0,50	0,75	1,40	4
19,05	¾	0,50	0,75	1,40	

Fonte: Gerdau, 2005.

O trabalho a quente é o início da conformação mecânica para a obtenção do fio máquina. No processo de fabricação do fio máquina, o tarugo é inicialmente aquecido a temperaturas acima de 940 °C ao passar por um forno de reaquecimento conforme é mostrado em esquema da Figura 3.4.

O forno de reaquecimento proporciona a homogeneização da temperatura ao longo do tarugo antes de entrar na etapa denominada de desbaste. Grandes reduções ocorrem durante o desbaste, às dimensões obtidas nesta etapa se equivalem para qualquer bitola a ser obtidas no produto final. Na próxima etapa, denominada de trem médio, começa a aparecer as diferentes regulagens para as diferentes bitolas finais. No bloco acabador, a velocidade de laminação aumenta aproximadamente 72 m/s. Logo após, o material é resfriado nas zonas de resfriamento para ir para a próxima etapa no formador de espiras. O formador de espiras é composto por um tubo com formato de anzol que gira a velocidade compatível com a bitola a ser produzida, formando uma espira de fio. No coletor o fio é acondicionado em rolos e prensado e uma prensa.

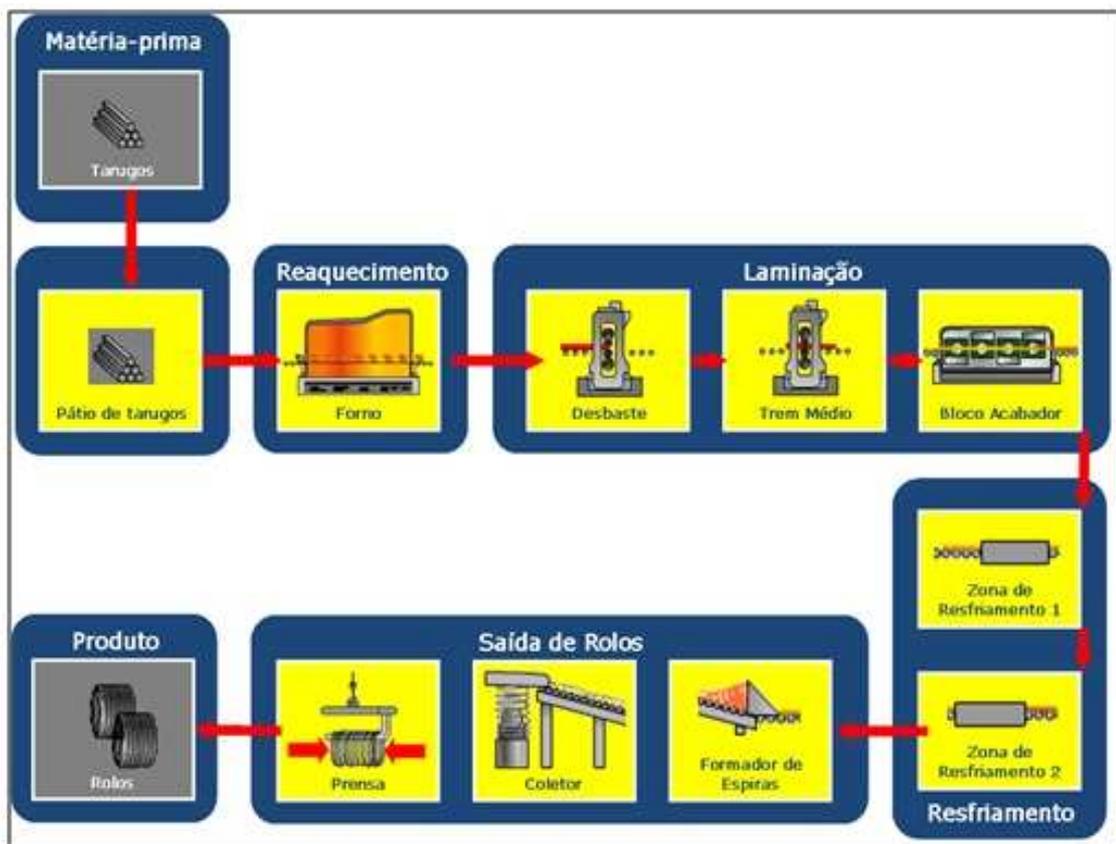


Figura 3.4. Fluxograma de laminação de fio máquina.

Fonte: Gerdau, 2008.

### 3.2. Processamento de Fio Máquina

O fio máquina pode ser processado através da trefilação (o mais antigo de todos os processos siderúrgicos) e pelo processo de laminação a frio.

Na trefilação (Figura 3.5), a redução no diâmetro do fio máquina é conseguida através da passagem do arame por ferramentas denominadas de fieiras, as quais estão imersas dentro de um reservatório de lubrificante. O lubrificante tem a função de diminuir o atrito que é gerado entre o arame e a fieira evitando que o mesmo venha a romper.

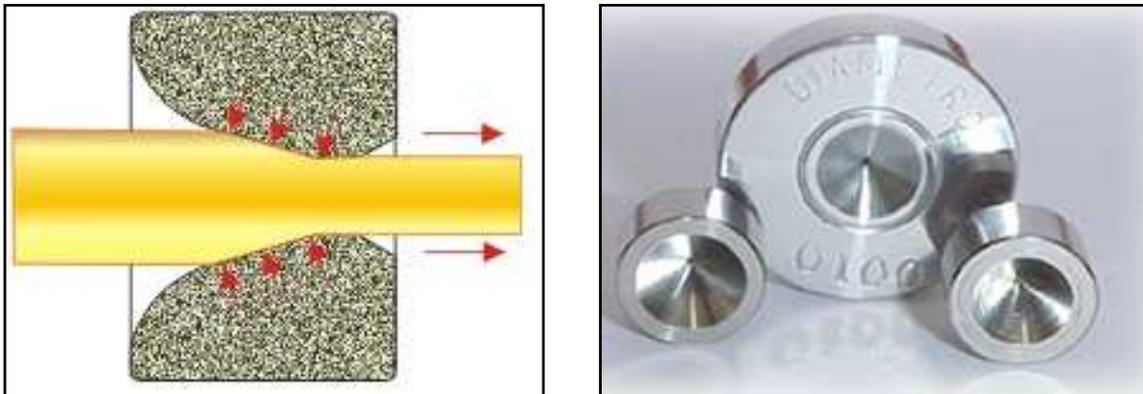


Figura 3.5. (a) Esquema da passagem do metal pela fieira. (b) Fieiras de trefilação.

Fonte: <http://www.diametro-fieiras.com.br/portugues/menu/diamantenatural.htm>.

A laminação a frio é um processo que está sendo utilizado em larga escala para produção de vergalhão e por isso, ainda vem sendo aperfeiçoado continuamente para atingir velocidades acima de 18 m/s. Neste caso, são utilizados cassetes laminadores no lugar das fieiras, que são compostos por dois trios de discos de metal duro que estão dispostos a  $120^\circ$  cada disco em relação ao outro (Figura 3.6). Três discos na entrada do cassete fazem a primeira redução e na seqüência mais três na saída fazem a segunda redução na seção do fio.



Figura 3.6. (a) Cassetes laminadores montados na máquina. (b) Detalhe da disposição dos discos de metal duro a 120° e do orifício onde o fio máquina passa.

Fonte: Gerdau, 2011.

O processo de fabricação do vergalhão CA60 da Gerdau (Figura 3.7) utilizado em concreto armado com tensão escoamento 600 MPa, inicia-se com a soldagem do fio máquina, decapagem mecânica onde a carepa de laminação é retirada através da passagem do fio máquina por rolos em diferentes ângulos. Então, é aplicada uma camada de lubrificante, em seguida é realizada a redução do diâmetro do fio máquina no laminador a frio (Figura 3.8). Nesta etapa o material se chama fio de aço, até o mesmo ser bobinado em rolos (espulas) de vários diâmetros.



Figura 3.7. Vergalhão produzido a partir do fio máquina, com saliências (nervuras) produzidas por laminação a frio com o trio de cassetes da figura.

Fonte: Gerdau, 2010.

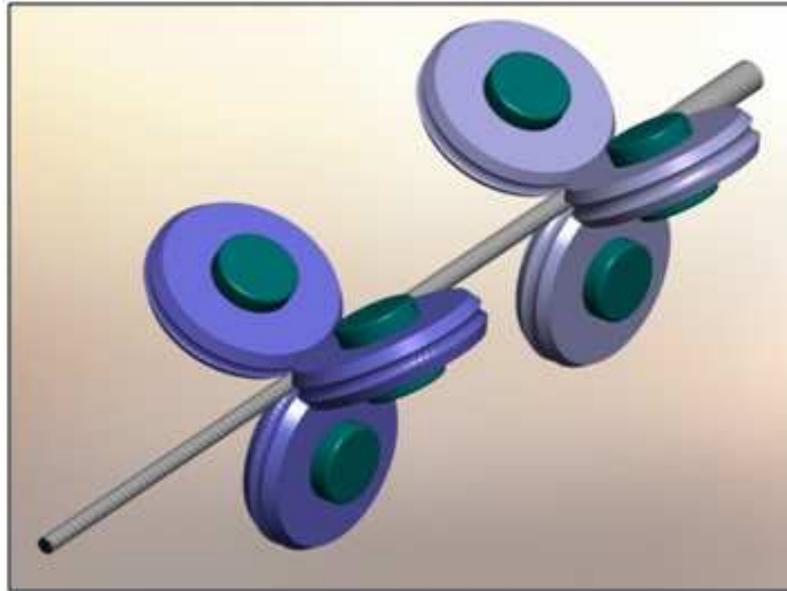


Figura 3.8. Esquema de funcionamento da redução da área do fio máquina pelos discos de metal duros dispostos a 120 ° um do outro.

Segundo Schaeffer (1995) e Cetlin (2005), nos processos de conformação, o escoamento de material é causado pela pressão transmitida pela matriz para a peça conformada. Portanto, as condições de atrito na interface matriz material têm influência no escoamento do metal, na formação de defeitos superficiais e internos, tensões e forças atuantes no processo.

Considerando que os processos de conformação plástica dos metais envolvem o contato entre o metal e as ferramentas de conformação, o atrito deverá estar sempre presente, em maiores ou menores proporções. Sem o atrito não pode haver a conformação do metal. Por exemplo: sem o atrito o metal deslizaria e não entraria entre os rolos da laminadora e não poderia ser conformado. Porém, o atrito quando muito grande pode travar o metal no rolo de laminação impedindo que este passe por ele e seja conformado. As conseqüências do atrito na conformação mecânica segundo Schaeffer (1995) podem ser resumidas em:

- Alteração, geralmente desfavorável, dos estados de tensão presentes durante a deformação;
- Produção de fluxos irregulares de metal durante o processo de conformação;
- Criação de tensões residuais no produto;
- Influência sobre a qualidade superficial (podendo ser benéfica, inclusive);

- Elevação da temperatura a níveis capazes de comprometer-lhe as propriedades mecânicas;
- Aumento do desgaste de ferramentas;
- Facilitar o “agarramento” das ferramentas de conformação com o metal a ser conformado; aumento do consumo de energia necessária à deformação, diminuindo a eficiência.

Para controlar o atrito faz-se uso de lubrificantes que são desenvolvidos para exercer outras funções que agregam entre outras a refrigeração das partes, inibição de processos corrosivos do metal e das ferramentas.

### 3.3. Lubrificante e Lubrificação

Lubrificante é todo ou qualquer material sólido ou líquido de baixa resistência ao cisalhamento, cuja função é a de manter separadas as superfícies da ferramenta de conformação do material trabalhado, reduzindo o atrito (Shirizly, 2000).

O desempenho dos lubrificantes na conformação do fio máquina pode ter um impacto significativo no processo. Os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhante. A barreira lubrificante é um filme que isola completamente a superfície metálica da superfície da ferramenta (cilindro de laminação e da fieira), como ilustra a Figura 3.9.

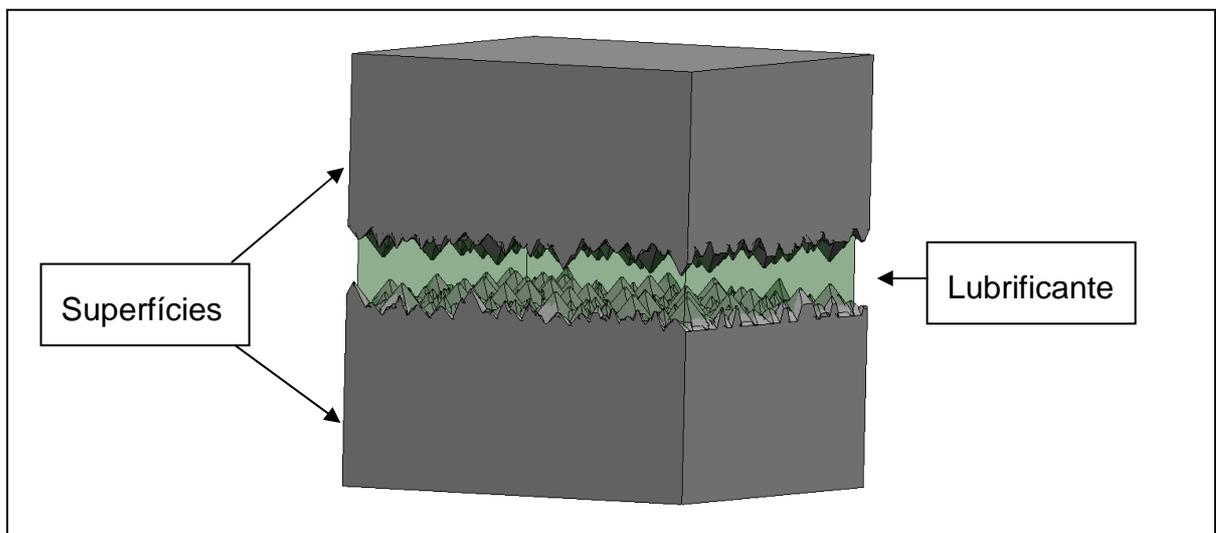


Figura 3.9. Esquema mostrando a relação entre duas superfícies e o lubrificante.

Fonte: Adaptada de Shirizly, 2000.

Parâmetros tais como viscosidade, molhabilidade do lubrificante, assim como a ação de refrigeração podem afetar significativamente a vida da ferramenta de conformação, a qualidade do produto final, a velocidade do processo e, conseqüentemente a produtividade.

Por outro lado, o projeto e o material da ferramenta (cilindros e fieiras), o tipo de aço a ser conformado, tipo de equipamentos, método de aplicação e a velocidade das operações, afeta o desempenho do lubrificante. Os mecanismos lubrificantes podem ser classificados como:

- Lubrificação hidrodinâmica;
- Lubrificação limite;
- Lubrificação EP (para Extrema Pressão).

### **3.3.1. Lubrificação Hidrodinâmica**

Na lubrificação hidrodinâmica o lubrificante age como um filme expresso que separa a superfície da peça da superfície da ferramenta, em condições de baixa pressão. Embora funcione como lubrificação para motores automotivos, contribui pouco na conformação mecânica, pois a eficácia da lubrificação hidrodinâmica diminui com o aumento da força e da temperatura entre as superfícies. Na produção do fio máquina a temperatura e a pressão existente na interface peça-ferramenta ultrapassam o limite de resistência da lubrificação hidrodinâmica, portanto é necessário utilizar lubrificação limite ou lubrificação EP, ou, ainda uma combinação das duas.

### **3.3.2. Lubrificação Limite**

A lubrificação limite é geralmente realizada com aditivos polares e ou surfactantes, que tenham muita boa molhabilidade com a superfície do metal. (Tigrinho, 2008). Esta afinidade promove uma barreira que protege a ferramenta e a peça. Lubrificação limite pode ser feita com derivados gordurosos, alcoóis gordurosos, entre outros, adicionando-se surfactantes que ativa a adsorção do filme lubrificante na superfície no material.

Aditivos polares, também são utilizados para acentuar a molhabilidade do lubrificante, assegurando uma camada contínua na superfície do metal.

### 3.3.3. Lubrificação para Extrema Pressão

Lubrificação para extrema pressão pode ser de dois tipos: mecânica e química. Ambas, porém, podem separar eficientemente a ferramenta da peça controlando o atrito, reduzindo o desgaste da ferramenta, prevenindo defeitos e aumentando os limites de conformação.

Aditivos típicos para a lubrificação mecânica para extrema pressão (EP) são o carbonato de cálcio e o bissulfeto de molibdênio. Os filmes mecânicos têm como inconveniente o desenvolvimento de sujeira no equipamento que às vezes são incompatíveis com o pós-processo. Além disso, ficam impregnados em ferramentas com geometria complexa.

Para a lubrificação EP química são utilizados alguns aditivos que reagem na interface ferramenta-peça, formando sais metálicos agindo como superfície de sacrifício, entre eles o cloro o enxofre e o fósforo.

O cloro é adicionado no lubrificante para formar hidrocarbonetos de cloro que como o calor gerado na interface da ferramenta-peça, durante a conformação, é liberado e reage com o ferro formando um filme de cloreto de ferro de excelente ação lubrificante tipo EP.

O enxofre é adicionado para sulfurizar os óleos minerais ou ésteres gordurosos. Neste caso, a reação química durante a conformação resulta em um filme de sulfeto de ferro. Cada aditivo tem uma faixa de temperatura, com um limite, onde é mais efetivo. Existem algumas operações mais severas que requerem uma combinação de vários lubrificantes para ser mais efetivo.

Os requisitos para lubrificação EP podem ser completamente diferentes para cada metal, ferramenta e operação de conformação.

### 3.3.4. Categoria de Lubrificante

Os lubrificantes para conformação podem ser classificados como (Unisant, 2012):

- Água: apresenta alto calor específico e é o principal constituinte quando se deseja refrigerar e remover contaminantes simultaneamente, com a finalidade de evitar efeitos químicos secundários, ela deve ser pura (destilada) ou pelo menos tratada;

- Óleos minerais puros: geralmente pouco usados. São extensamente utilizados quando agregados a óleos e ácidos graxos, por exemplo, emprega-se óleo mineral com 2 a 3% de óleo graxo para laminar pequenas seções; óleo mineral sulfurado com óleos graxos para estampagem profunda ou extrusão;
- Óleos e ácidos graxos: os ácidos graxos são os mais usados, formando sabões metálicos devido a ação química sobre o metal. Os óleos graxos são saponificados e combinados com óleos minerais, formando graxas utilizadas na trefilação de arames. Essas graxas se misturam geralmente com cal, para proporcionar capaz com pequeno atrito antes de passar o arame pela matriz;
- Ceras: as ceras são razoavelmente bons lubrificantes, conseguindo suportar altas pressões, principalmente quando combinadas com ácidos graxos e sabões. Suas propriedades são boas enquanto seu ponto de fusão não é excedido. São formas mais comumente empregadas, ceras parafínicas, ceras amaciadoras, ceras naturais, etc. São frequentemente empregadas na estampagem profunda, extrusão e laminação;
- Sabão: sabão metálico em pó é frequentemente empregado na estampagem profunda e trefilação de arames. Exemplo: oleato de cálcio, estearato de cálcio, etc.
- Sólidos minerais: podem ser constituídos de agentes ativos e passivos. Os ativos são usados sob a forma de suspensão coloidal, para melhorar as propriedades lubrificantes sob alta pressão e/ou alta temperatura, a grafita e o bissulfeto de molibdênio são exemplos comuns. Os passivos são minerais inertes agregados a outros lubrificantes, que melhoram a adesão ao metal e seu comportamento em condições críticas de trabalho. São geralmente usados a cal, talco, carbonatos, mica, etc.;
- Sólidos metálicos: metais duros podem ser cobertos por metais macios, como o chumbo, cádmio, cobre, índio, etc., para facilitar os processos de trefilação de barras e tubos;
- Vidros: são usados como capas de baixo atrito em operações que alcançam temperaturas suficientemente altas para que o vidro se torne plástico. Pode ser mencionada a extrusão a quente de aços, trefilação de tubos;

- Materiais sintéticos: formam uma proporção crescente de lubrificantes para que sejam empregados na conformação mecânica de metais. Incluem materiais tais como o polietilenglicol e o silicone, ambos possuem grande intervalo de temperaturas de trabalho e a vantagem de se queimar sem deixar resíduos;
- Plásticos: materiais como o polietileno, são frequentemente empregados sob a forma de laminas de alguns microns de espessura, em operações de embutimento profundo e estampagem.

No caso do fio máquina podem ser utilizados filmes sólidos ou lubrificantes sintéticos que serão brevemente descritos a seguir.

### **3.3.5. Lubrificantes para Trefilação**

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 lubrificantes na superfície (Brusius, 2009).

Os lubrificantes sólidos são a base de sabões, talco, mica, cal, grafite, bissulfeto de molibdênio e tungstênio, etc. Os sabões são de uso mais comum no processo de trefilação de arames, que são depositados em uma caixa onde a ferramenta (fieira) fica imersa nesse lubrificante. 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 (Coelho, 1975).

A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob condições de processo, que previna o contato entre as superfícies (Button, 2002). Os sabões devem ser capazes de suportar as temperaturas de trabalho da fieira (Figura 3.10), que atuam de forma direta na viscosidade do lubrificante e as pressões de trabalho exercidas no cone de trabalho do núcleo, que é constante e diretamente proporcional a redução da seção do

arame. Outro fator é a reatividade do sabão com a superfície do arame, quanto maior a polaridade de um lubrificante, maior será a capacidade deste agregar sabão a superfície do arame (Coelho, 1975).

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 (Figura na feira pelo carregamento de lubrificante e manutenção do lubrificante durante a trefilação. A rugosidade do arame trefilado depende basicamente de dois critérios: temperatura de laminação do fio máquina que atua diretamente no óxido de ferro que será formado na superfície do material e o tipo de decapagem. A decapagem química ocasiona a formação de pequenas cavidades côncavas sobre o arame (Figura 3.12.a) o que facilita o arraste do lubrificante. A decapagem mecânica (Figura 3.11) por flexão ocasiona rugosidades paralelas (Figura 3.12.b) oriundas da laminação a quente sobre o arame, o que causa fuga do lubrificante. Durante o processo de trefilação, a rugosidade do arame diminui com o aumento da deformação transversal do material (Brusius, 2009).

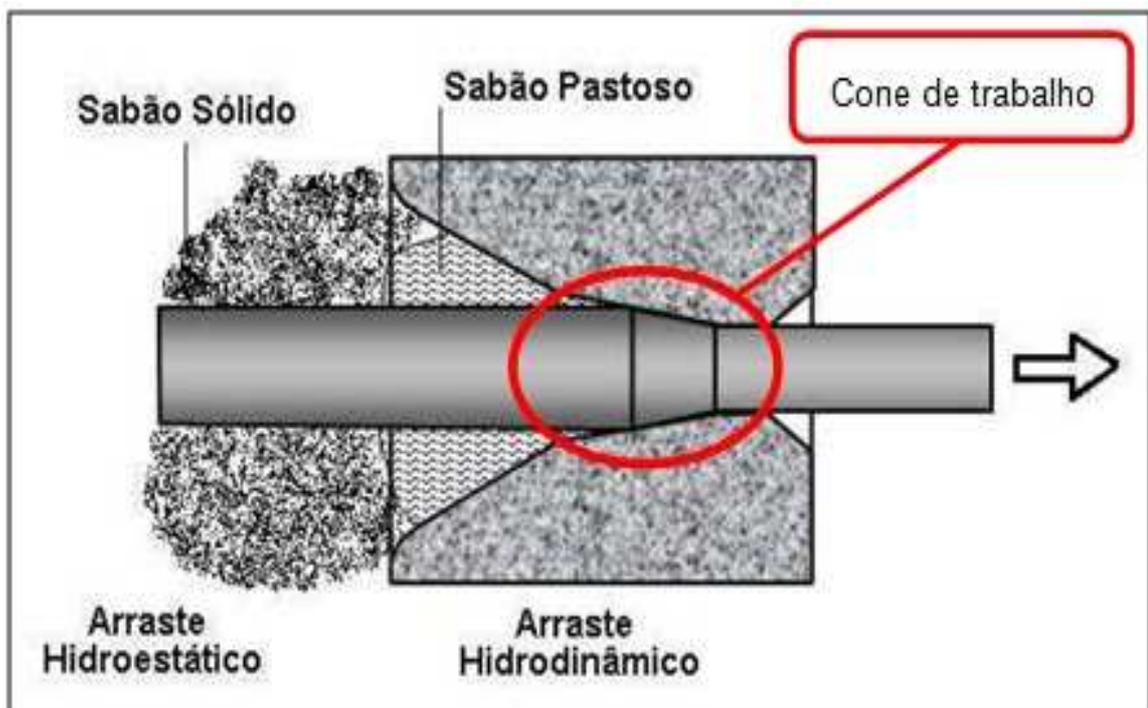


Figura 3.10. Cone de trabalho da fiação.

Fonte: Brusius, 2009.



Figura 3.11. Decapador mecânico com detalhe nos rolos flexionadores.

Fonte: Gerdau, 2011

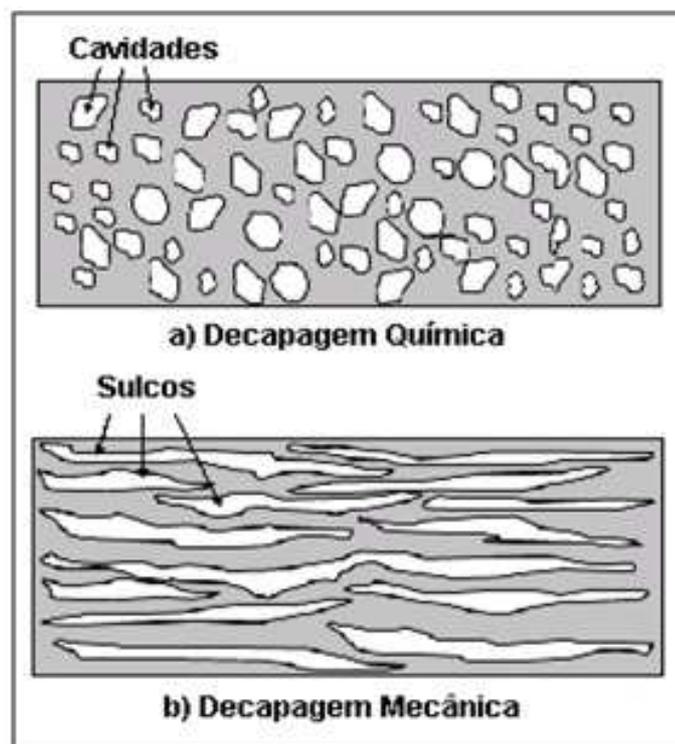


Figura 3.12. Detalhe das cavidades. (a) Cavidades côncavas provenientes da decapagem química.

(b) Cavidades paralelas provenientes da decapagem mecânica.

Fonte: Cetlin, 2002.

O arraste de lubrificante para dentro do cone de trabalho da fieira é de vital importância para se obter uma boa lubrificação. O arraste ocorre em duas partes conforme figura 3.10. 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 formar túneis que prejudicam a lubrificação do arame. Para evitar essa formação de túneis é comum o uso de aplicadores de lubrificante que proporcionam uma agitação constante do lubrificante e ajudam na aderência no arame.

### **3.4. Ventilação Industrial**

A ventilação pode ser feita essencialmente de duas formas: de forma natural através de portas e janelas, ou forçada também chamada de ventilação mecânica. Sendo que para ventilação forçada são utilizados dispositivos como ventiladores, sopradores de ar e exaustores, que provocam o movimento do ar.

Os equipamentos de ventilação são meios artificiais de movimentação do ar, eles buscam transmitir ou mesmo absorver energia do ambiente onde estão instalados, podem até mesmo transportar materiais, atuando num padrão de grande eficiência sempre que utilizado em equipamentos adequadamente projetados (Silva et. al. 1995).

A maioria dos sistemas de ventilação industrial é do tipo forçada ou mecânica, é usada para insuflar ou evacuar ar ou outros gases. Entre as aplicações dos sistemas de ventilação industrial cabe destacar:

- Reatores de processo;
- Secadores;
- Torres de resfriamento;
- Arraste de ar e gases de combustão em fornalhas;
- Transporte pneumático;
- Ventilação para segurança e higiene industrial; e
- Trocadores de calor.

Estes sistemas são responsáveis por uma boa parcela do consumo de energia de uma indústria, por isso, é importante que sejam projetados tendo em vista a sua eficiência energética.

Os sistemas de ventilação forçada são compostos por uma série de dispositivos interligados, entre eles cabe destacar: os dutos ou condutores de ar, os ventiladores, filtros, *hottes*, grelhas e exaustores, e as bocas de insuflação. A Figura 3.13 mostra um esquema de um sistema de ventilação forçada com três bocas de insuflação em seqüência.

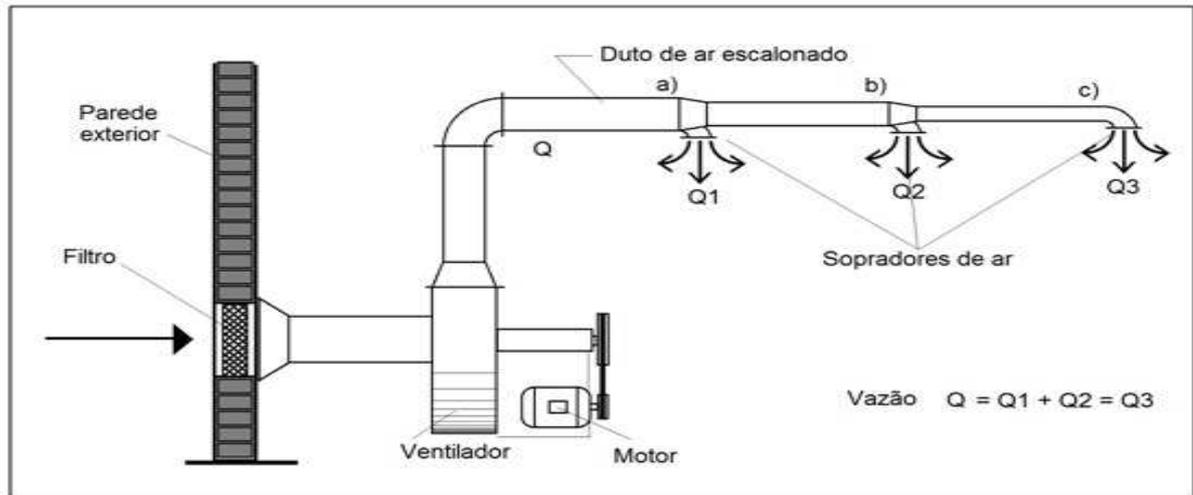


Figura 3.13. Esquema de um sistema de ventilação forçada.

Fonte: [ftp://ftp.demec.ufpr.br/.../sistemas\\_Ventila\\_\\_o\\_VENTILADORES.PDF](ftp://ftp.demec.ufpr.br/.../sistemas_Ventila__o_VENTILADORES.PDF).

Na ventilação forçada os ventiladores são as peças que desempenham o papel principal, movimentando o ar.

### 3.5. Ventiladores

A norma ABNT NBR 14679/01 classifica os ventiladores de acordo com o formato do rotor que podem ser centrífugos ou axiais. Os ventiladores centrífugos (Figura 3.14) são compostos por um rotor com pás, conhecido como impelidor, uma carcaça de conversão e um motor de acionamento. O ar que entra é acelerado pelo rotor e impulsionado para fora pela abertura de descarga.

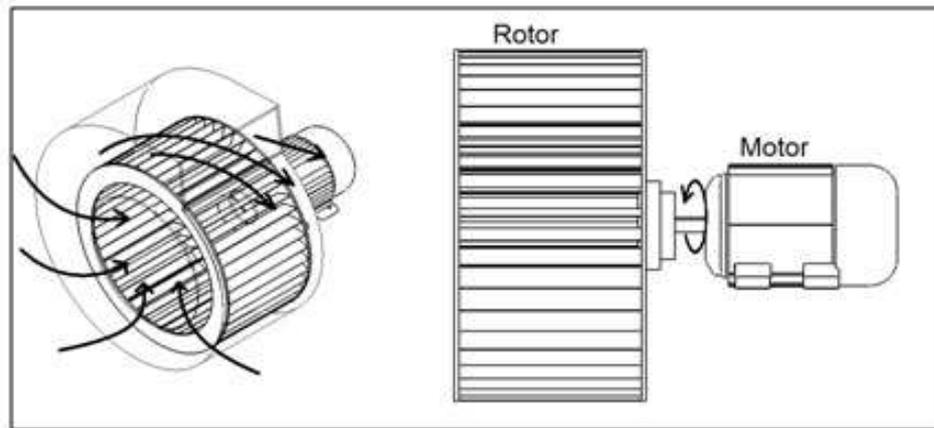


Figura 3.14. Esquema de funcionamento do ventilador centrífugo.

Fonte: SILVA et. al. 1995.

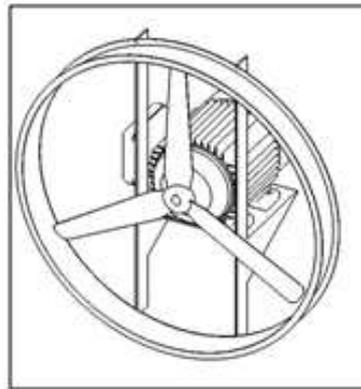


Figura 3.15. Esquema de funcionamento do ventilador axial.

Fonte: SILVA et. al. 1995.

As características de um ventilador irão determinar seu desempenho em determinada aplicação. Essas características são grandezas que estão relacionadas com as condições de funcionamento do ventilador, e são conhecidas como Grandezas Características (Devilla, 2004). São elas:

- Velocidade angular (rotações por minuto),  $n$ ;
- Diâmetro de saída do rotor,  $D$ ;
- Vazão,  $Q$ ;
- Altura de elevação útil ( $H$ );
- Potências útil, total de elevação e motriz ( $P$ );
- Rendimento hidráulico, mecânico e total.

Altura motriz de elevação ( $H_m$ ) é a energia mecânica fornecida pelo eixo do motor. Como esta energia não é totalmente aproveitada pelo rotor para transferir ao ar a energia  $H_t$ , uma parte dela se perde sob a forma de perdas mecânicas,  $H_p$ , nos mancais e na transmissão por correia, assim

$$H_m = H_t + H_p \quad (3.a)$$

A potência total de elevação ( $P_{tot}$ ) é definida como a potência fornecida ao ar pelas pás do rotor. A potência útil ( $P_u$ ) é a potência adquirida pelo ar durante sua passagem pelo ventilador. A potência motriz, mecânica, efetiva ( $P_m$ ) é a potência fornecida pelo motor ao eixo do ventilador.

Assim como a potência, os rendimentos podem ser calculados para cada caso. O rendimento total de um ventilador será dado pela razão entre a potência total em relação à potência motriz. O rendimento total ( $R_{tot}$ ) é estimado através da equação 3.b:

$$R_{tot} = P_u / P_m = \eta \quad (3.b)$$

O rendimento hidráulico ( $R_h$ ) é dado pela equação 3.c e representa a razão entre a potência útil sobre a potência total:

$$R_h = P_u / P_{tot} \quad (3.c)$$

O rendimento mecânico ( $R_m$ ) é determinado utilizando-se a equação 3.d:

$$R_m = P_{tot} / P_m \quad (3.d)$$

O rendimento volumétrico ( $R_v$ ) é estimado através da equação 3.e:

$$R_v = Q / (Q + Q_f) \quad (3.e)$$

Onde:

$Q$  – Volume do fluido realmente deslocado pela ação do ventilador

$Q_f$  – Volume do fluido que fica continuamente circulando no interior do ventilador, denominado vazão de fugas.

Segundo Devilla (2004) os ventiladores são especificados segundo a vazão de ar fornecida (Q) e pressão total aplicada ao ar (pt). A vazão é o volume de ar fornecido pelo ventilador na unidade de tempo. Já a pressão total aplicada ao ar indica a energia total recebida pelo ar e graças a ela é que o ar pode escoar ao longo de tubulações ou dutos. A pressão total pode ser dividida em duas parcelas, ou seja, pressão estática (pe) e pressão dinâmica (pd) conforme a equação 3.f:

$$pt = pe + pd \quad (3.f)$$

A potência motriz é potência mencionada nos catálogos dos fabricantes, é definida pela equação 3.g:

$$P_m = (Q \cdot Pt) / (4500 \cdot \eta) \quad (3.g)$$

A pressão fornecida ao ar deve ser maior que a pressão ocorrida no sistema, no caso de sistemas de secagem as quedas de pressão ocorrem nos dutos de distribuição de ar.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. Caracterização do Problema

Na produção de arames para concreto CA60, comercializados como vergalhão, foco deste trabalho, a partir do fio máquina por laminação a frio é utilizado atualmente um lubrificante de custo reduzido à base de sabão. A função do lubrificante é facilitar a entrada ou o encaixe do fio máquina no primeiro trio de discos laminadores (cassetes de laminação) e também o deslizamento nos blocos trefiladores. Lubrificantes a base de sabão em presença de água, podem modificar sua função como lubrificante.

Existem diversas situações que podem ocasionar paradas no processo de fabricação do vergalhão CA60, entre elas cabe destacar o rompimento da solda, enleio do fio máquina na bobina, quebra dos cassetes de laminação e trancamento de rolamentos. Outra preocupação, constante, está relacionada às condições do tempo no local. Quando a chuva molha o fio máquina durante seu percurso até as laminadoras, a água acumulada no fio impede a lubrificação adequada.



Figura 4.1. (a) Cassete de laminação montado e limpo e, em (b) cassete repleto de lubrificante, após a utilização com fio máquina molhado

A Figura 4.1 (a) mostra um cassete laminador montado aguardando a entrada na máquina para a produção, nota-se que o mesmo encontra-se limpo. A Figura 4.1 (b) apresenta o estado em que cassete fica após trabalhar com fio máquina molhado, nessa condição a eficiência da troca de calor nos discos laminadores fica comprometida devido ao acúmulo excessivo de lubrificante sobre o mesmo.

O fio máquina é lubrificado antes de passar pelo primeiro trio de cassetes na laminadora passando por um depósito de lubrificante, conforme mostra esquema da Figura 4.2.

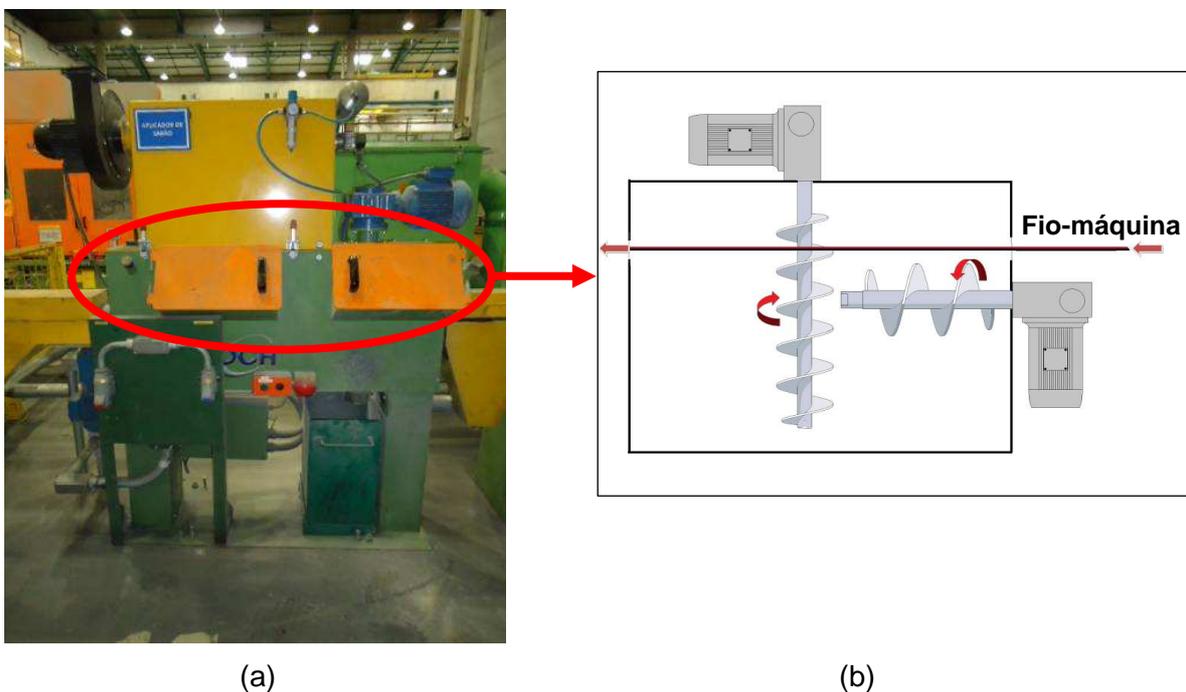


Figura 4.2. (a) Vista do aplicador de lubrificante na laminadora e (b) esquema de funcionamento do aplicador de lubrificante.

No aplicador de sabão existem dois fusos, um horizontal e um vertical, o que trabalha na horizontal é responsável por moer o lubrificante que vem em grãos. O fuso vertical tem a função de aplicar o sabão sobre o fio-máquina que está passando ao lado, trazendo da parte inferior da caixa o sabão moído.

O fio entrando no aplicador de lubrificante molhado carrega consigo uma quantidade excessiva de lubrificante, muito superior a quantidade adequada. Para conhecer qual a quantidade de lubrificante acumulada pelo fio máquina de diâmetro 5,50 mm foram realizadas coletas de amostras em duas situações, a ideal onde o fio máquina é consumido seco e não gera problemas para a produção e a situação ruim

em que o material está molhado e gera um grande número de interrupções no processo. O material foi coletado nos dias 29/06/2011 e 08/07/2011.



Figura 4.3. Amostra de fio máquina lubrificado na situação ideal, fio máquina seco. Camada de lubrificante de trefilação aderida:  $1,33 \text{ g/m}^2$ .



Figura 4.4. Amostra de fio máquina lubrificado na situação não ideal, fio máquina molhado. Camada de lubrificante de trefilação aderida:  $3,67 \text{ g/m}^2$ .

A análise da camada de lubrificante seguiu o padrão adotado pela Gerdau, que por sua vez, segue a norma NBR 10443. O procedimento de análise será explicado no item 4.1.1.

A quantidade de lubrificante aderida no fio máquina molhado é 275% maior do que no fio máquina seco. Como pode ser observado nas Figuras 4.3 e 4.4, nota-se que a textura do lubrificante na Figura 4.4 correspondente ao fio máquina molhado aparenta estar mais expandida e em relação ao da Figura 4.3. Sendo este lubrificante a base de sabão, provavelmente em contato com a água ocorra a expansão do produto, deixando-o mais denso, comprometendo assim, sua característica lubrificante.

Este excesso fica preso nos cassetes laminadores, conforme mostrado na Figura 4.1 (b). Em dias chuvosos ou com umidade alta os problemas se agravam e paradas não programadas são constantes.

Em função das velocidades envolvidas na laminação a frio (média de  $8 \text{ m/s}$ ) os cassetes laminadores precisam ser refrigerados e os discos lubrificadas constantemente. Existe um sistema individual de refrigeração para cada cassete que

garante que a ferramenta trabalhe a uma temperatura média de 22 °C. Além disso, um sistema de lubrificação centralizado realiza a lubrificação constante dos discos durante o processo. O excesso de lubrificante depositados nos cassetes prejudica a troca de calor entre os eixos e os discos, a temperatura do eixo pode subir o suficiente para liquefazer a graxa lubrificante, e como consequência o disco acaba trancando, gerando a interrupção na produção.



Figura 4.5. (a) Trio de cassetes de laminação montados e, em (b) cassetes repletos de lubrificantes, após a utilização com fio-máquina úmido.

Os discos laminadores danificados, devido ao travamento dos rolamentos, não podem ser reutilizados, pois apresentam marcas na superfície e isso pode prejudicar o acabamento superficial do vergalhão, até mesmo comprometer as propriedades mecânicas do mesmo. Em média o custo de recuperação de um cassete laminador danificado pelo acúmulo de lubrificante é de R\$5.000,00, pois é necessário trocar os seis rolamentos, os seis suportes de rolos, mais a limpeza com produto químico específico. A Figura 4.5 (a) mostra discos laminadores novos e (b) discos retirados da máquina após um dia chuvoso.

O número de interrupções por fio máquina molhado é considerável. O lubrificante que adere de maneira desastrosa nos cassetes de laminação é responsável por 60% das paradas do laminador a frio.

Para evitar o acúmulo de lubrificante no fio máquina é necessário que ele entre no aplicador de lubrificante seco. Para isso, foi desenvolvido e testado três sistemas de ventilação forçada para criar uma barreira de ar, que arraste a umidade

do fio-máquina passando a 8 m/s. O uso de ar comprimido é muito comum nessa aplicação mas seu custo é muito alto nesta aplicação, por isso optou-se por um sistema de ventilação forçada.

#### 4.1.1. Análise da Camada de Lubrificante

Amostras retiradas com a parada em meio à produção do CA60 são barras de 600 mm do vergalhão, cortadas logo após a passagem pelo aplicador de lubrificante. Para evitar a contaminação das amostras, foram tomados alguns cuidados, como a utilização de luvas de látex e o descarte das pontas para a análise propriamente dita.

Para as análises foram utilizados os seguintes equipamentos e reagentes químicos:

1. Tesoura de 9”;
2. Balança analítica;
3. Recipiente de vidro “vidro de relógio”;
4. Clorofórmio (CHCl<sub>3</sub>) (P.M. 119,38);
5. Álcool;
6. Aparelho de limpeza por ultrassom;
7. Frasco de vidro para amostras;
8. Micrômetro de 0 – 25 mm.

Para a análise realizada imediatamente após a coleta, a amostra deve ser armazenada em local isento de umidade e atrito com outras superfícies;

O procedimento de análise, para avaliar a quantidade de lubrificante aderida, segue o seguinte protocolo:

- a. Cortar os corpos de prova de acordo com a tabela 4.1;

Tabela 4.1. Relação entre comprimento do fio e número de corpos de prova (Cps).

Bitola (mm)	Comprimento Corpo de Prova (mm)	Nº Corpo de Prova por Amostra
< 5,0 mm	50 mm	8
5,0 a 8,0 mm	50 mm	5
> 8,0 mm	50 mm	3

- b. Realizar as medições sempre em duplicata;
- c. Pesar em balança analítica cada grupo de amostras separadamente, e anotar seu respectivo peso;
- d. Transferir os grupos de amostra para o “vidro de relógio”;



Figura 4.6. Pesagem dos corpos de prova colocados sobre um “vidro de relógio”.

- e. Adicionar clorofórmio ao recipiente, de forma que a solução cubra toda a amostra;
- f. Transferir o recipiente contendo clorofórmio para o aparelho de limpeza por ultrassom, que deve conter água até o nível mínimo;



Figura 4.7. Recipiente no aparelho de limpeza por ultrassom.

- g. Manter a amostra em vibração no aparelho de ultrassom por uma hora;
- h. Retirar as amostras do recipiente, limpar os corpos de prova com algodão ou pano umedecido em álcool;
- i. Agrupar novamente as amostras e pesar em balança analítica;
- j. Medir o diâmetro da amostra e calcular a camada de sabão de acordo com a fórmula abaixo:

$$\text{Camada se Sabão (g/m}^2\text{)} = \frac{(P_o - P_f) \times \phi \times 10^4}{0,51 \times P_f} \quad (4.a)$$

Onde:

$P_o$  – Peso inicial do corpo de prova (g)

$P_f$  – Peso final , após 1h no ultrason (g)

$\phi$  - Diâmetro (cm)

#### 4.2. Sistema de Ventilação

O sistema proposto utiliza sopradores de ar para criar uma cortina de ar forçado sobre o fio-máquina. Um ventilador centrífugo distribui o ar entre os bicos sopradores. O equipamento da marca OTAM® selecionado (Figura 4.7 (a) e (b)) possui rotor de 1000 mm, com pás curvadas para trás, foi construído em chapas de aço SAE 1010 e 1020, reforçado com perfis para dar maior rigidez ao conjunto. A base é dimensionada para suportar os esforços estáticos e dinâmicos que exercitam, e ativam a estrutura do equipamento, assim, todo o conjunto é balanceado estática e dinamicamente. É um ventilador de alta pressão (pressão estática 1350 mmca) e pequena vazão (vazão de 1200 m<sup>3</sup>/h). Trabalha com ar ou gases limpos com velocidade de 6 m/s. Comparando a vazão de 120 l/s de um secador de mãos, muito comum nos shoppings centers, com a vazão do soprador utilizado de 333 l/s tem-se a idéia da dimensão do equipamento instalado (Brakey, 2012).



Figura 4.8. Ventilador OTAM® selecionado para o projeto do sistema instalado em uma base de aço no chão da fábrica. (a) visão do motor e (b) visão da admissão.

### 4.3. Bicos Sopradores de Ar

Nas três configurações propostas para os sistemas A, B e C, testados neste trabalho, foi utilizado um tubo por onde passa o fio máquina. Neste tubo foram instalados os bicos sopradores de ar, projetados para criar uma lâmina de ar sobre o fio máquina, conforme mostra o desenho da Figura 4.9.

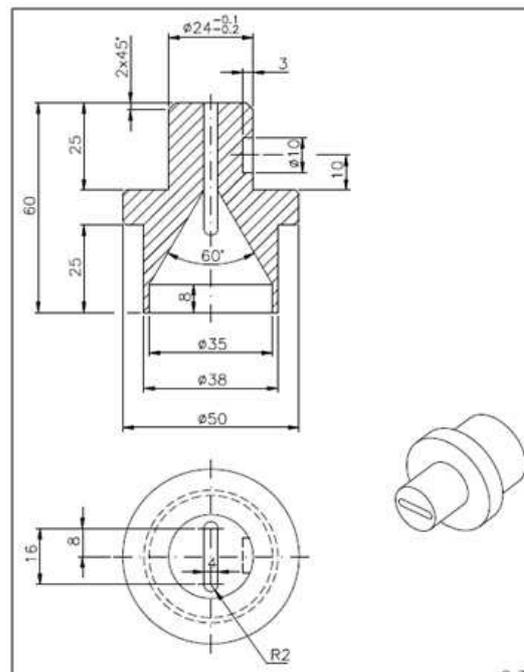


Figura 4.9. Desenho do bico que será utilizado nas três configurações.

O diâmetro da câmara interna do bico sofre uma redução com ângulo de  $60^\circ$ , de 35 mm até chegar numa abertura de 4 mm. O objetivo dessa câmara é aumentar o fluxo de ar sobre o fio máquina (ar forçado) e, assim, arrastar as gotículas de água quando o fio estiver molhado.

#### 4.4. Sistemas Secadores

No sistema A foram utilizados dois bicos sopradores de ar posicionado em direção oposta, em um ângulo de  $120^\circ$  um do outro, perpendicular a direção de passagem do fio máquina, distantes entre si em 100 mm (Figura 4.10). Nos sistemas B (Figura 4.11) e C (Figura 4.12) foram projetados com um único bico soprador, sendo que no sistema B o bico foi posicionado a  $90^\circ$  e, no sistema C a  $45^\circ$  da direção de passagem do fio máquina. Os anexos A, B e C correspondem as Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 respectivamente. Nos anexos temos uma vista “explodida” dos sistemas secadores.

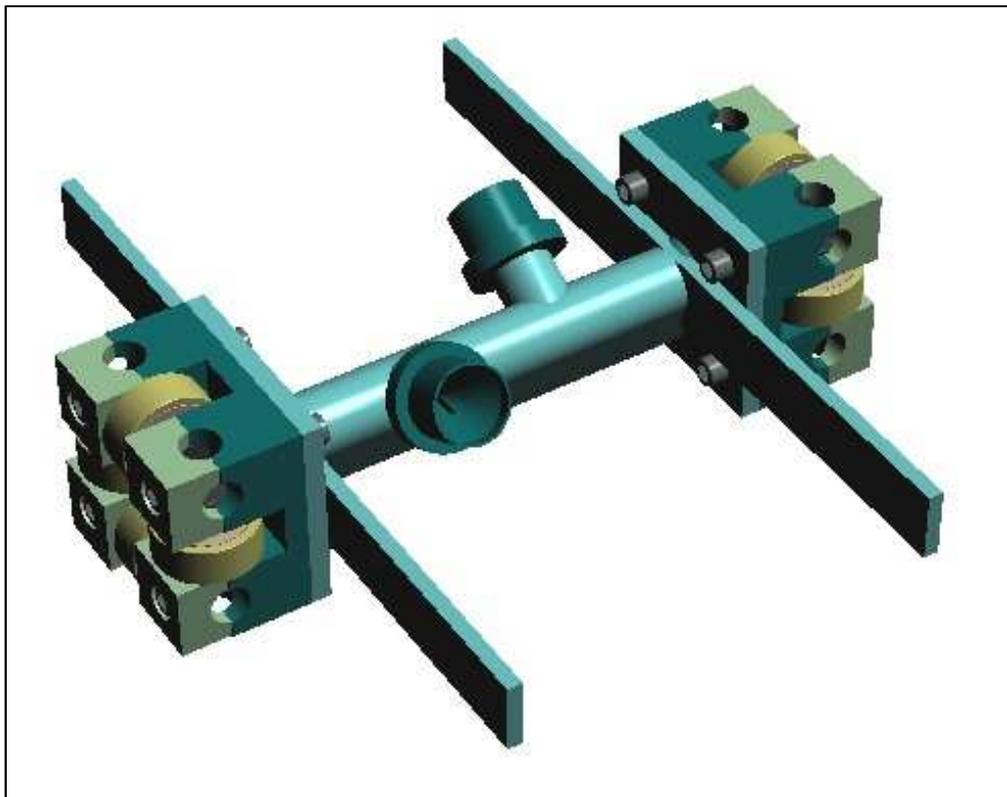


Figura 4.10. Configuração com 2 bicos a  $120^\circ$  um do outro e incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio-máquina.

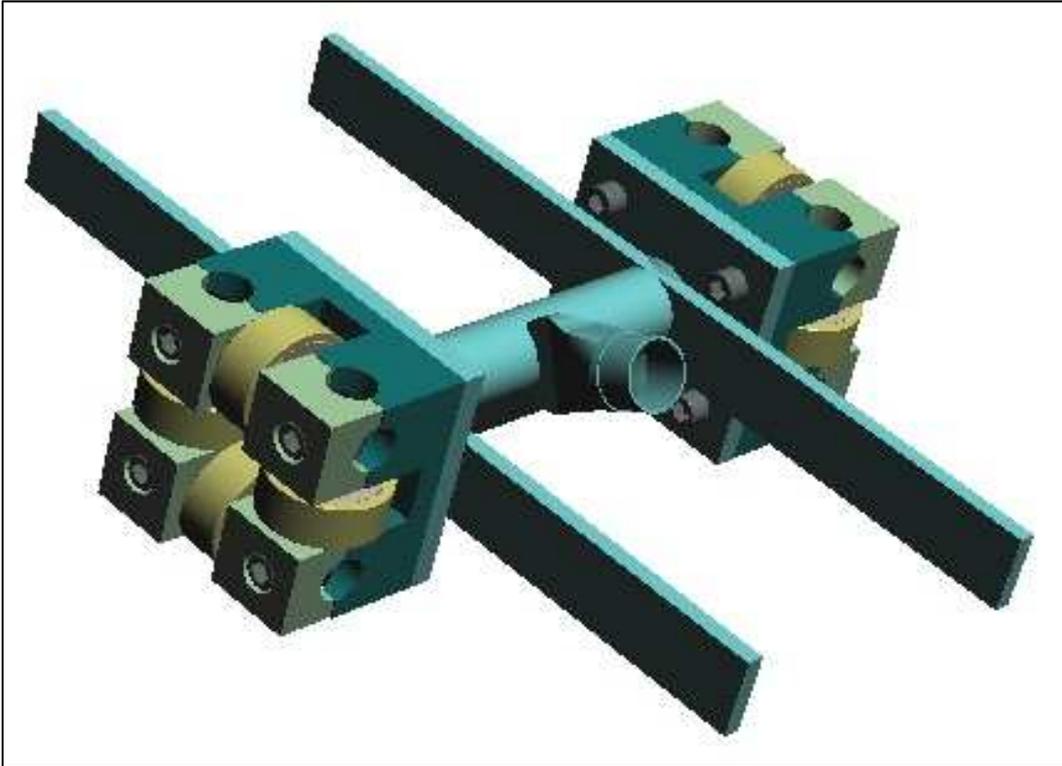


Figura 4.11. Configuração com 1 bico incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio-máquina.

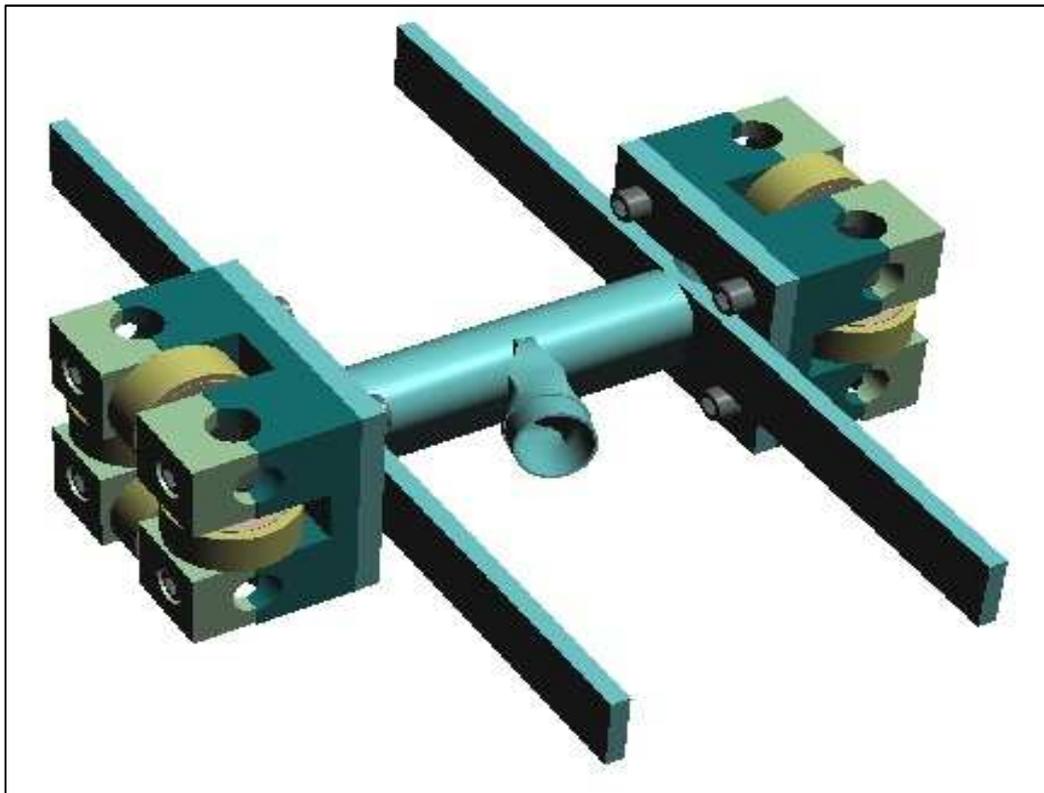


Figura 4.12. Configuração com 1 bico incidindo a  $45^\circ$  sobre o fio máquina.

Nas três configurações dois mancais guias, um preso na frente e outro atrás do tubo têm a função de manter o fio reto neste percurso. O ar soprado para dentro do tubo sai por um rasco longitudinal de 300 mm de comprimento. O ar que sai é direcionado para baixo. A Figura 4.13 mostra a simulação da passagem do fio máquina pelo sistema A, e a Figura 4.14 mostra esse mesmo sistema em corte, dando o detalhe da parte interna do dispositivo.

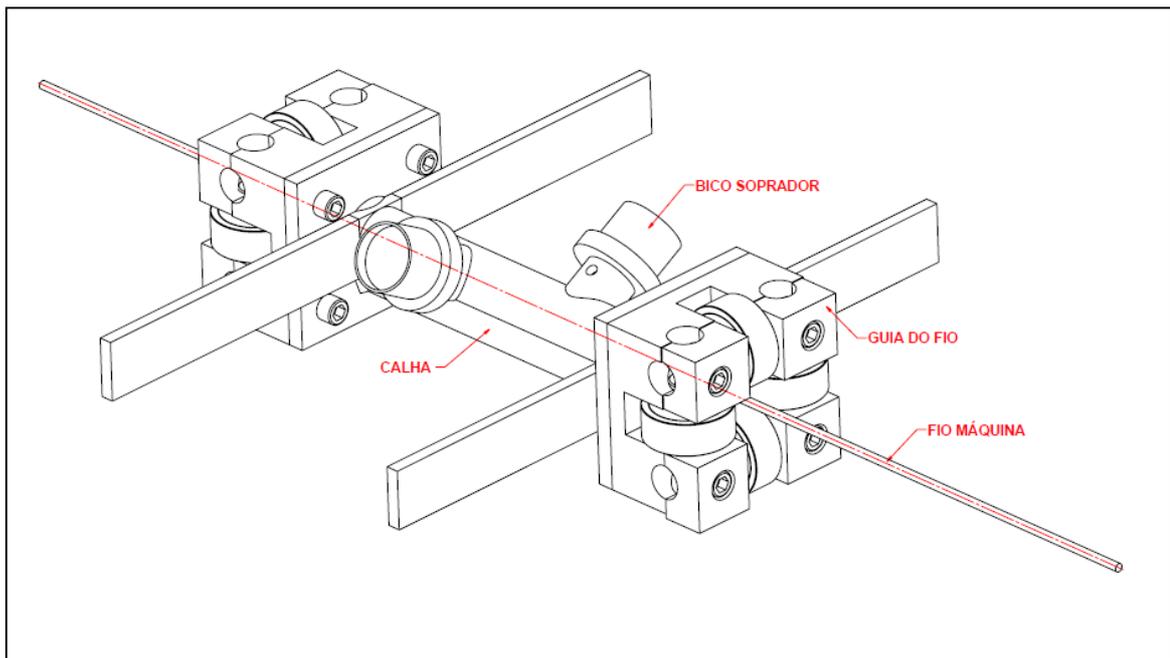


Figura 4.13. Componentes do sistema A.

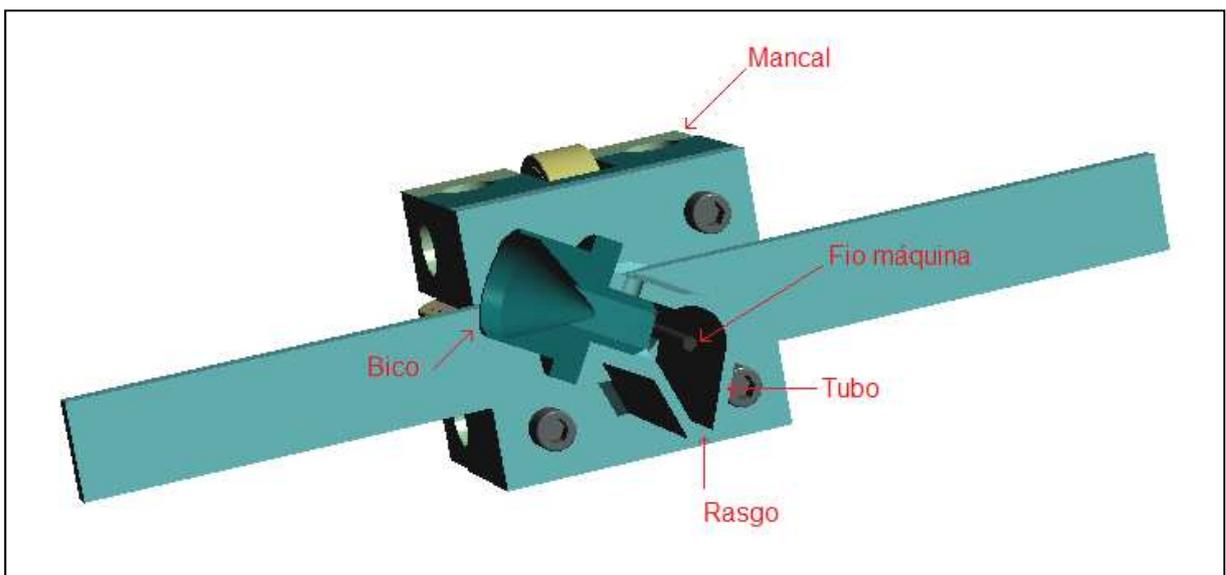


Figura 4.14. Sistema A em corte.

Para cada sistema, a velocidade do ar na saída do bico foi calculada assumindo o escoamento incompressível, a massa específica e a pressão constante na seguinte equação:

$$p_1/\rho + 1/2 V_1^2 = p_2/\rho + 1/2 V_2^2 \quad (4.b)$$

Como não foram consideradas as perdas do sistema, e como os três sistemas o mesmo bico, ou seja, com as mesmas dimensões, a área que será utilizada para cálculos é de 0,064 m<sup>2</sup>. A área foi calculada utilizando-se a fórmula:

Tabela 4.2. Cálculo da área do bocal de saída do ventilador OTAM®.

Diâmetro Bocal (mm)	Cálculo da Área (A)	Área (m <sup>2</sup> )
50,8	$A = \frac{\pi d^2}{4}$	$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3.14(0,0508 \text{ m})^2}{4} = 0,00202 \text{ m}^2$

Tabela 4.3. Cálculo da velocidade do ventilador OTAM®.

Vazão Ventilador (m <sup>3</sup> /s)	Cálculo da Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)
0,333**	$Q = AV$	$\frac{0,333 \text{ m}^3}{s} = 0,00202 \text{ m}^2 \cdot V_{\text{ventilador}} = 164,9 \text{ m/s}$

\*\* Dado de vazão do ventilador fornecido pela OTAM®:  $Q = 333 \text{ l/s} = 0,333 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabela 4.4. Cálculo da velocidade nos bicos dos sistemas A, B e C.

Sistema	Cálculo da Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)
A	$V_{\text{ventilador}} A_1 = V_{\text{bico}} A_2$	$V_{\text{bico}} = \frac{164,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,00202 \text{ m}^2}{0,064 \text{ m}^2} = 5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
B		$V_{\text{bico}} = \frac{164,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,00202 \text{ m}^2}{0,064 \text{ m}^2} = 5,2 \text{ m/s}$
C		

Como são 2 bicos a velocidade em cada é de 2,6 m/s

#### 4.4.1. Cálculo da Potência do Motor

##### Determinação do regime de escoamento

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Onde:

$\rho$  – massa específica

$\mu$  – viscosidade dinâmica

V – velocidade

D – diâmetro

$$Re = \frac{\rho_{ar} \cdot V \cdot D}{\mu_{ar}} = \frac{1,284 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0508 \text{ m}}{17,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2} = 4280$$

$\rho$  – Dado retirado da Tabela 4.5.

$\mu$  – Dado retirado da tabela 4.6.

Como o resultado do número de Reynolds ficou acima de 2300, logo considera-se o regime turbulento. A partir dessa informação é possível determinarmos a perda de carga do sistema.

##### Determinação da perda de carga

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_2^2}{2}$$

Onde:

$h_l$  – perda de carga

$f$  – fator de atrito

L – comprimento

D – diâmetro

$V_2$  - velocidade

Para termos o valor do fator de atrito é necessário determinar a rugosidade relativa ( $\frac{e}{D}$ ). A rugosidade relativa é determinada utilizando o gráfico mostrado no anexo E. Como não há informações sobre o tubo *spiraflex* utilizado, levou-se em consideração a pior situação, ou seja, a maior rugosidade relativa. Foi utilizado o valor de 0,05.

O fator de atrito ( $f$ ) foi determinado utilizando o valor do número de Reynolds calculado, mais o valor encontrado para a rugosidade relativa. Com esses valores, através do diagrama de Moody (Anexo D), foi definido o fator de atrito com o valor de 0,07.

$$h_l = 0,07 \cdot \frac{1,5 \text{ m}}{0,0508 \text{ m}} \cdot \frac{(5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} = 27,9 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

#### Determinação da potência do motor

$$-\dot{W}e = \rho \cdot V_2 \cdot A_2 \cdot \left[ \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + h_l \right]$$

$$-\dot{W}e = 1,284 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \left( \pi \cdot \frac{0,0508 \text{ m}^2}{4} \right) \cdot \left[ \frac{(5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (164,9 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} + 27,9 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right]$$

$$\dot{W}e = 184,1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = 184,1 \text{ W} = 0,184 \text{ kW}$$

Tabela 4.5. Massa específica do ar.

T (°C)	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )
- 10	1,342
- 5	1,316
0	1,293
5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,165

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Densidade>.

Tabela 4.6. Viscosidade dinâmica de alguns materiais comuns.

T (°C)	Viscosidade Dinâmica ( $\frac{Ns}{m^2}$ )
Hidrogênio	$8,4 \times 10^{-6}$
Ar	$17,4 \times 10^{-6}$
Xenônio	$21,2 \times 10^{-6}$

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Viscosidade>.

#### 4.4.2. Instalação dos Equipamentos

Para os testes, os sistemas foram instalados entre os *pay offs* (sistema de desbobinamento do fio máquina) e o decapador mecânico, conforme Figura 4.15. A região que possui espaço suficiente para implantar os três sistemas. Na Figura 4.16 detalhe do local de instalação do sistema de secagem na planta de produção do CA60.

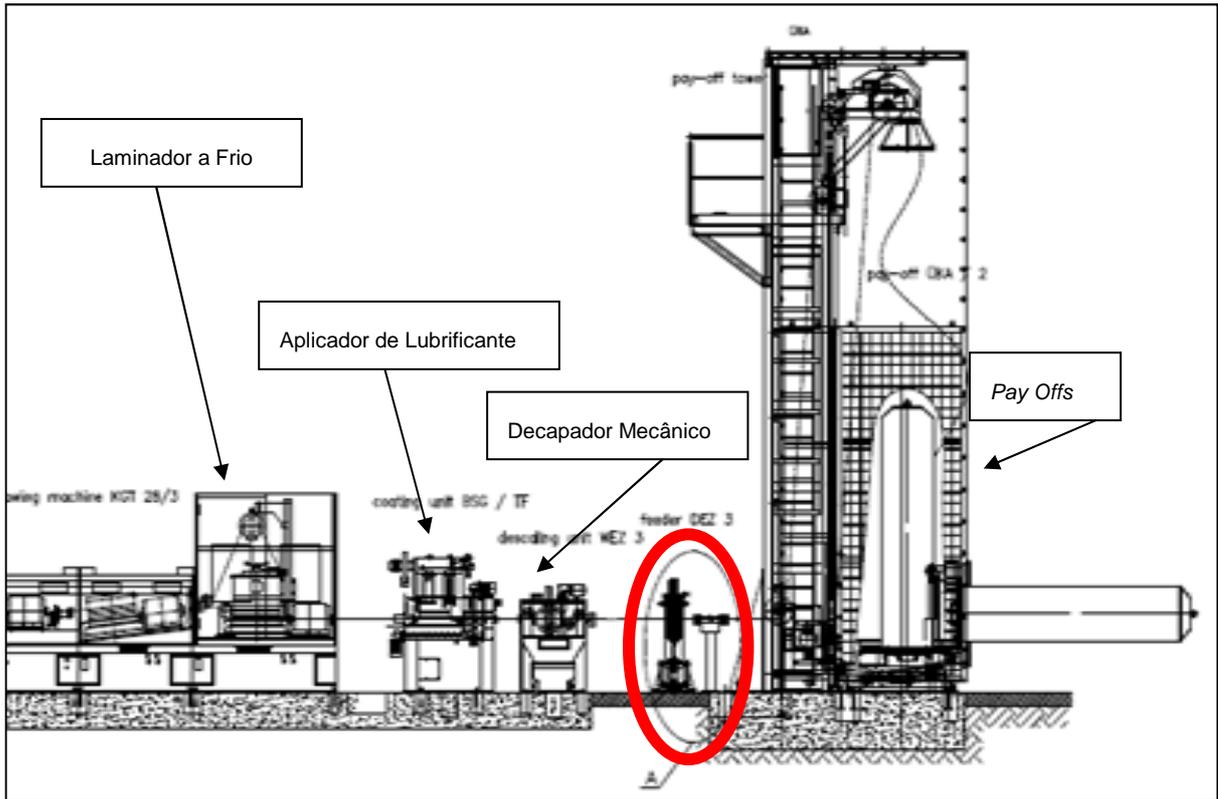


Figura 4.15. Local de instalação do sistema de ar forçado para secar o fio máquina, entre o decapador mecânico e os *pay offs*.

O sistema de ventilação para secagem do fio foi testado durante a fabricação do CA60 3,40 mm que utiliza o fio máquina de 5,50 mm de diâmetro, com material SAE 1013.

A fim de testar a viabilidade dos sistemas projetados para secar o fio máquina que passa com velocidade de 8m/s, foram estabelecidas duas situações, a ideal onde o fio máquina é consumido seco e não há interrupções por acúmulo de lubrificante nos cassetes de laminação, e a situação ruim em que o fio está molhado.

A produção foi interrompida em cada um dos testes para a coleta de amostra do fio logo após a sua passagem pelo tanque lubrificante. As amostras de 50 mm foram cortadas do fio-máquina e foram levadas ao laboratório para a avaliação da camada de lubrificante aderida, conforme descrito no item 4.1.1.

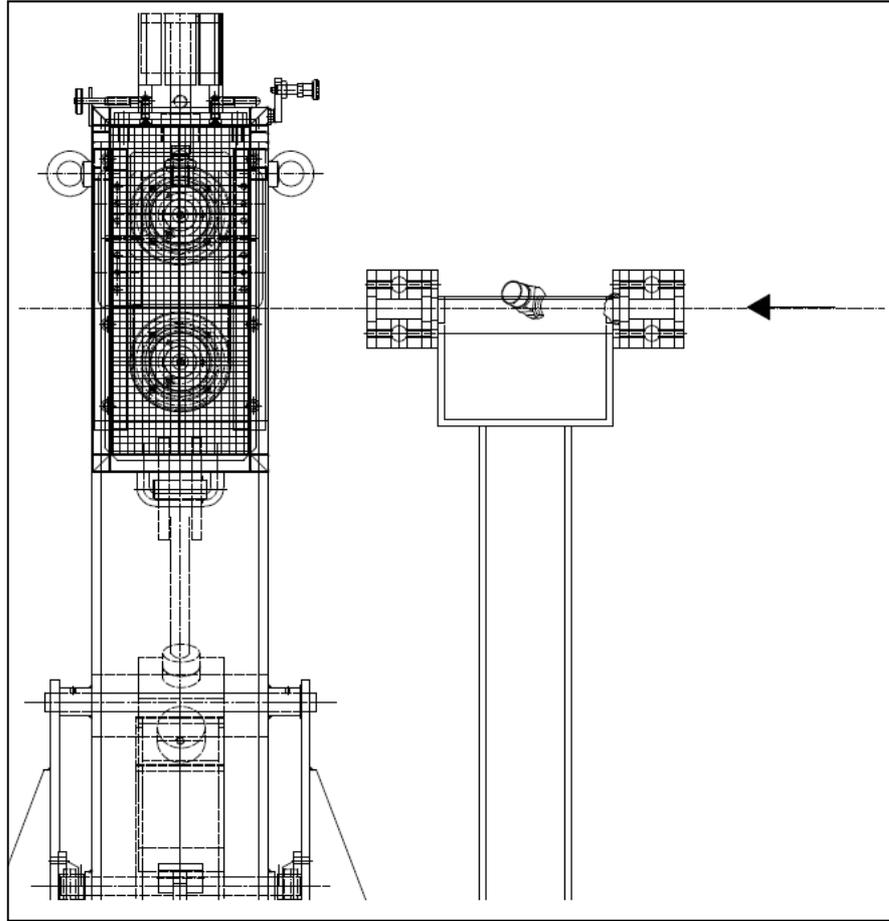


Figura 4.16. Detalhe da Figura 4.12.

#### 4.5. Materiais Utilizados

Esse sistema será testado no fio máquina que estiver sendo consumido no dia do teste. Para a produção dos diferentes diâmetros do CA60 são utilizados os seguintes fios máquina:

- Fio máquina 5.50 mm SAE 1013.

Tabela 4.7. Composição química do fio máquina SAE 1013.

Composição Química (%)											
C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	Sn	V
0,14	1,10	0,25	0,05	0,05	0,5	0,27	0,3	0,08	0,07	0,08	0,03

Tabela 4.8. Composição química do fio máquina SAE 1014.

Composição Química (%)											
C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	Sn	V
0,49	1,4	0,3	0,03	0,03	0,17	0,08	0,09	0,02	0,02	0,02	0,03

#### 4.6. Procedimentos do Teste

As etapas do teste com as três diferentes configurações serão divididas da seguinte forma:

- 1 - Projeto dos sistemas secadores;
- 2 - Análise da viabilidade do projeto;
- 3 - Compra do soprador e sistemas secadores;
- 4 - Preparação mecânica e elétrica do local onde serão instalados os equipamentos;
- 5 - Instalação provisória dos equipamentos para o teste;
- 6 - Teste de um dia com cada configuração;
- 7 - Coleta de amostras;
- 8 - Envio das amostras para o laboratório da siderúrgica Riograndense;
- 9 - Análise dos resultados obtidos no laboratório;
- 10 - Instalação definitiva do sistema que atingiu pelo menos 15% do valor ideal;
- 11 – Reaproveitamento de peças dos sistemas que não conseguiram atingir pelo menos 15% do valor ideal;
- 12 – Descarte na sucata metálica do restante das peças que não são possíveis de se aproveitar.

Primeiramente será testado o secador com a configuração de dois bicos sopradores, sendo necessário instalar um divisor logo na saída do soprador. Para simular o fio máquina molhado será borrifado água sobre o mesmo, caso não esteja chovendo no dia do teste. Depois de feito o teste com o primeiro secador, será testado a segunda e terceira configuração com um bico incidindo a 90° sobre o material e o outro a 45°, respectivamente.

A fim de medir a eficiência do projeto foram estabelecidas duas situações, a ideal onde o fio máquina é consumido seco e não gera problemas para a produção e a situação ruim em que o material está molhado e gera um grande número de interrupções no processo.

#### 4.7. Resultados das Análises das Camadas de Lubrificantes

##### Análise do dia 29/06/2011



Figura 4.17. Amostra da situação ideal.

**Situação ideal:** fio máquina seco.

**Camada de sabão de trefilação:** 1,33 g/m<sup>2</sup>.

##### Análise do dia 08/07/2011



Figura 4.18. Amostra da situação ruim.

**Situação ruim:** fio máquina molhado.

**Camada de sabão de trefilação:** 3,67 g/m<sup>2</sup>.

A análise se baseia na camada de sabão de trefilação aplicado sobre o material.

O material enviado para análise no laboratório da usina foi o fio máquina de diâmetro externo 5,50 mm, sendo o mesmo um aço SAE 1013. Acima seguem os resultados das análises realizadas nos dias 29/06/2011 e 08/07/2011.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os testes dos sistemas projetados e a conclusão da análise das camadas de lubrificante aderidas no fio máquina molhado. Serão expostas, também, algumas considerações quanto à instalação desses sistemas na linha de laminação, quanto a sua atuação durante a fabricação e, por fim, quanto à sua ação efetiva na melhoria da produção.

### 5.1. Construção e Montagem dos Sistemas

O primeiro sistema a ser instalado foi o sistema B, composto por um bico soprador incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio máquina, conforme projeto apresentado na Figura 4.11. O segundo teste ocorreu com o sistema C, o qual contava com o bico a  $45^\circ$  (Figura 4.12). Por último, foi realizado o teste com o sistema A (Figura 4.9), que utiliza dois bicos sopradores a  $120^\circ$  um do outro. Todos os sistemas foram instalados no mesmo local na laminadora e soldados em uma estrutura de sustentação com a mesma configuração, consoante projeto descrito nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11 do capítulo 4.

Cabe destacar que, durante o primeiro teste, houve problemas na estrutura responsável pela fixação dos dispositivos, que não resistiu à vibração existente e caiu, forçando a substituição dos fixadores. A Figura 5.1 mostra o local na laminadora onde os três dispositivos foram instalados para a realização dos testes.

A Figura 5.2 traz em detalhe da estrutura montada para os testes, na qual em (a) observa-se a instalação do sistema B na laminadora e, em (b), a instalação do sistema A (com dois dutos).

Na Figura 5.3, (a) e (b), é exposto o tubo de aço onde foram fixados os mancais com parafusos, colocados os bicos sopradores e o duto flexível *spiraflex* (com diâmetro aproximado de 50 mm), utilizado para a conexão com o ventilador.



Figura 5.1. Local da laminadora onde foi instalado o sistema de secagem de fio máquina. Em destaque o duto flexível por onde passa o ar.



(a)

(b)

Figura 5.2. a) Instalação do sistema B na laminadora. B) instalação do sistema A com dois dutos.



(a)

(b)

Figura 5.3. Detalhe do tubo de aço onde foram fixados os bicos sopradores e os mancais (Obs.: bico soprador á 45°).

Os mancais e os bicos sopradores, mostrados na Figura 5.4, logo abaixo, foram montados por mecânicos nas oficinas da Gerdau.

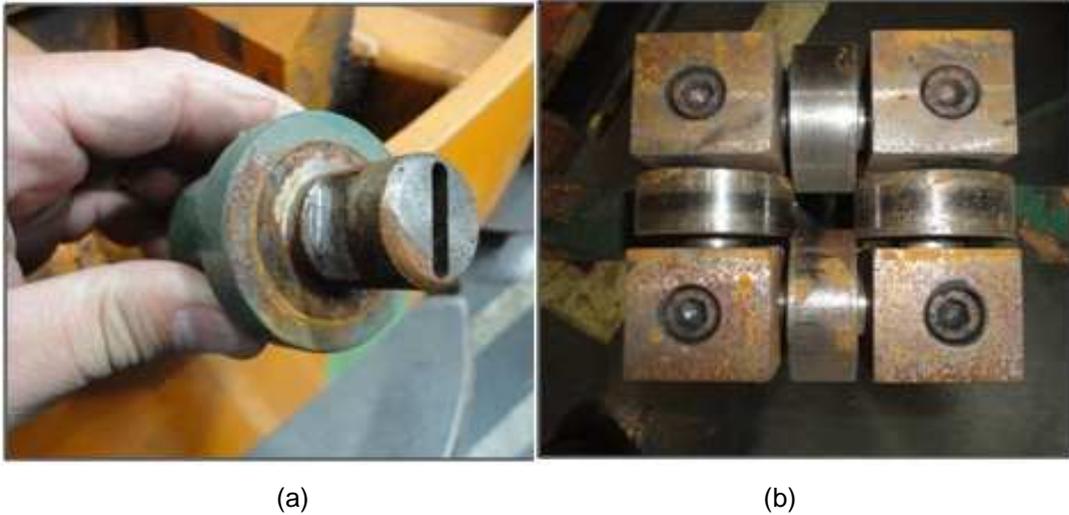


Figura 5.4. a) Bico soprador utilizados nos sistemas A, B e C. b) Mancal guia para o fio máquina utilizado na entrada e saída dos sistemas A, B e C.

O ventilador foi instalado logo atrás da estrutura de suporte do sistema de secagem do fio máquina, conforme projetado anteriormente. Dessa maneira, a admissão do ar ficou para o lado dos *pay offs* do laminador a frio e a descarga em direção aos dispositivos, consoante Figura 5.5. Localizado fora da área de operação da laminadora, o ventilador acabou não ocasionando transtornos para a operação e manejo da laminadora durante a produção e na manutenção do equipamento.



Figura 5.5. Distribuidor conectado ao ventilador para a distribuição do ar nos bicos do sistema A.

Durante os experimentos, observou-se que o sistema A possui algumas vantagens em relação aos sistemas B e C. Esse sistema, possuindo dois bicos sopradores a 90° em relação ao fio máquina e soprando o ar em direções opostas, em um ângulo de 120°, garante uma barreira mais eficiente na remoção da água presente em relação às configurações dos sistemas B e C, compostas por um único bico soprador.

A desvantagem desse modelo, entretanto, é a necessidade de ser feita uma adaptação especial na estrutura, pois são necessários dois dutos, um para cada bico, vindo o primeiro pela frente e o segundo por trás do dispositivo, conforme mostra a Figura 5.2 (b). Com isso, o duto instalado na frente do dispositivo insere-se na área de trabalho reservada para os operadores da laminadora, podendo gerar desconforto e transtorno durante o abastecimento manual da máquina.

Além disso, o sistema A possui um bico e um duto a mais em relação aos sistemas B e C. Dessa forma, tanto o seu custo de fabricação quanto o seu custo de manutenção serão maiores. Aliado a isso, com o tempo de utilização, os bicos e os dutos flexíveis deverão ser substituídos, bem como se fará necessária uma revisão periódica do ventilador. Por fim, os sistemas B e C, além de custarem, cada um, 8% menos que o sistema A, não apresentam a necessidade de se utilizar o distribuidor de ar: um único duto pode ser acoplado diretamente no ventilador (Figura 5.5). Permanecendo na parte posterior da área de operação da laminadora, esse duto, inclusive, não gera transtorno durante as operações (Figura 5.1).

A desvantagem, porém, tanto do sistema B como do sistema C, é a pouca área de vazão relativa a um único orifício do bico soprador para a pressão de ar gerada pelo ventilador. Durante os testes, observou-se nesses sistemas o aquecimento inadequado das suas estruturas – dutos e partes metálicas.

O sistema C, construído conforme projeto da Figura 4.10, do Capítulo 4, é praticamente igual ao B. A diferença está no ângulo de incidência do ar sobre o fio máquina, o qual, neste caso, incide a 45° sobre esse material, criando uma lâmina de ar inclinado. Como desvantagem, observou-se que, além da perda de energia em forma de calor para os seus componentes, o bico no ângulo de 45° dispersa o fluxo de ar ao invés de concentrá-lo sobre um ponto do fio máquina, diminuindo, assim, a possibilidade de secá-lo adequadamente.

Foi levantada, dessa forma, a necessidade de instalação de uma grelha basculante junto ao ventilador, antes do distribuidor, para controlar a vazão do

ventilador; uma válvula que, ao fechar, diminuísse a passagem de ar, aliviando o rotor.

## 5.2. Teste de Camada

Os sistemas foram testados com o fio máquina percorrendo pela laminadora na velocidade de 8 m/s. A camada de lubrificante aderida foi considerada satisfatória: até 15% acima do valor ideal dimensionado pela produção, ou seja, uma camada de até 1,5 g/m<sup>2</sup>.

Em função do grande impacto econômico que uma parada para retirada das amostras representa para a produção, foram combinadas duas paradas por dia para não impactar tanto no desempenho do equipamento. Nos dias dos testes, as amostras foram retiradas num intervalo de 30 minutos entre cada uma.

No total foram três dias de testes, sendo que as amostras foram retiradas durante o turno do dia que inicia às 07h e 17 min e finaliza às 17h e 18min. As retiradas de amostras foram feitas sempre às 11h e 30 min, antes da parada para o almoço da equipe, com a finalidade de minimizar custo e não gerar transtornos para os operadores.

O tempo total, para a retirada de uma amostra incluindo a liberação da máquina para a produção, foi em média de 25 minutos. As amostras foram entregues no laboratório da unidade logo após o corte do fio na laminadora.

Nos testes realizados com o sistema B foram retiradas duas amostras, no dia 04/10/2011, com um intervalo de 30 minutos entre cada uma, e levadas ao laboratório de ensaios físicos da Gerdau Riograndense. A Figura 5.6 mostra a imagem de uma das amostras retiradas durante os testes com o sistema B (com um único bico a 90° com o fio). Observa-se uma camada de lubrificante não uniforme, apresentando-se expandida na parte em destaque.



Figura 5.6. Amostra de fio máquina do primeiro dispositivo testado, sistema B, apresentando parte da camada expandida.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos testes de camada. Observa-se que o sistema B não garantiu a retirada da camada de água do fio máquina. Logo, ao passar pelo aplicador de lubrificante, agregou mais lubrificante do que o necessário – 1,5 g/m<sup>2</sup> (situação ideal).

Tabela 5.1. Resultados dos testes de adesão da camada lubrificante, com o sistema B.

<b>Amostra</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Camada de Lubrificante Resultante (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média dos Resultados (g/m<sup>2</sup>)</b>
FM 5.50 mm	1	2.96	3.03
	2	3.10	

Os resultados foram entregue dia 07/10/2011 e a média das duas amostras retiradas foi de 3,03 g/m<sup>2</sup>, ocasionando a reprovação desse sistema. Cabe salientar que nos dias dos testes com o sistema B o fio máquina apresentava-se completamente molhado, proveniente de dias chuvosos, não sendo necessário simular a situação.

No dia 13/10/2011 foram retiradas duas amostras durante os testes realizados com o sistema A. O resultado da análise da camada aderida foi entregue dia 17/10/2011. No Quadro 5.1, tem-se uma imagem do fio apresentando uniformidade do lubrificante e o resultado da adesão do lubrificante em duas amostras de fio máquina. Como no sistema B, esse material apresentava-se totalmente molhado devido à chuva.

Quadro 5.1. Amostra de fio máquina obtida nos testes do sistema A. No lado direito, o resultado dos testes de adesão da camada lubrificante.

<b>Amostra</b> <b>Fio máquina 5.50 mm – 17/10/2011</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Camada de Lubrificante Resultante (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Média dos Resultados (g/m<sup>2</sup>)</b>
	1	1.63	1.54
	2	1.45	

A média dos resultados do quadro 5.1 mostrou que o sistema A atingiu o mínimo necessário para evitar interrupções no processo, sendo, assim, aprovado.

O terceiro e último sistema testado possuía apenas um bico soprador incidindo sobre o fio máquina a 45°. As amostras foram retiradas no dia 14/10/2011 e o resultado da análise foi entregue no dia 18/10/2011. Nesse caso foi necessário simular a situação de material molhado, borrifando-se água sobre o material. No Quadro 5.2 é mostrada à esquerda uma imagem de uma das amostras de fio máquina com camada de lubrificante expandida e à direita o resultado das análises das camadas.

Quadro 5.2. Amostra de fio máquina obtida nos testes do sistema C. No lado direito, o resultado dos testes de adesão da camada lubrificante.

<p style="text-align: center;"><b>Amostra</b> <b>Fio máquina 5.50 mm – 18/10/2011</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Ensaio</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Camada de Lubrificante e Resultante (g/m<sup>2</sup>)</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Média dos Resultados (g/m<sup>2</sup>)</b></p>
	1	10.22	9.92
	2	9.62	

O último sistema testado, bem como o primeiro, não foi eficiente na retirada da película de água do fio máquina: a camada de lubrificante aderida no teste com o sistema C foi de 9,92 g/m<sup>2</sup>, muito superior à situação ideal (1,5 g/m<sup>2</sup>).

Após a análise dos resultados dos testes de adesão do lubrificante, restou comprovada a pouca eficiência na secagem do fio máquina dos sistemas com um único bico (B e C). Optou-se, assim, pelo aperfeiçoamento do sistema A, adaptando-o para uso definitivo na laminadora.

### 5.3. Considerações Finais

O atual ambiente competitivo – que requer baixo custo, alta qualidade e um grau crescente de customização – tem influenciado as ações dos profissionais de engenharia para o aprimoramento dos processos de fabricação. O avanço tecnológico contribui para o aumento da capacidade de produção e estabilidade dos processos, mas ainda existem variáveis dentro do processo fabril que precisam ser controladas.

Conforme citado na seção 3.2 deste trabalho, a Gerdau possui o processo de fabricação do vergalhão CA60 por meio de laminação a frio. A estabilidade do processo de fabricação desse material depende muito da qualidade do material de entrada, tornando-se indispensável o fio máquina seco para consumo. Esse requisito é de grande importância para evitar interrupções no processo de fabricação resultantes do travamento dos rolamentos, uma vez que, molhado pelas chuvas, contribui ele para a instabilidade do processo.

O foco deste trabalho foi garantir para o processo de fabricação de CA60 o fio máquina seco no momento do consumo, mesmo em dias de chuva. Para isso, foi projetado, fabricado e colocado na produção um sistema composto por um ventilador (conforme apresentado no Capítulo 4 desse trabalho) e um soprador com dois bicos a 120° um do outro, de acordo com o exposto na Figura 5.2(b). Esse sistema contribuiu para a eliminação de paradas devido ao fio máquina molhado, gerando um impacto positivo na produção, com um aumento de 7% na disponibilidade da laminadora. Isso trouxe um ganho de 5% na produção do vergalhão CA60, contribuindo para a eficiência do laminador a frio.

Conclui-se, portanto, que o sistema certamente tem condições de ser utilizado para a secagem do fio máquina que utiliza lubrificante sólido, assim como em outras fábricas do grupo Gerdau.

## 6. CONCLUSÕES

Em relação ao desenvolvimento dos três tipos de sistema secador desenvolvido para retirar a água do fio máquina, conclui-se que:

- O sistema A, com a configuração de dois bicos, dispostos a  $120^\circ$  um do outro, esses incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio máquina que é com sumido a uma velocidade média de 8 m/s apresentou o resultado esperado. Com essa configuração é possível ter uma produção estável sem interrupções por fio máquina molhado, garantindo assim a estabilidade do processo. Esse sistema pode ser replicado para qualquer laminador a frio de vergalhões.
- O resultado do sistema B, configuração com um bico soprador incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio máquina, foi insatisfatório. O sistema não teve a mesma capacidade do sistema A de retirar a água do fio máquina, pois sua configuração teve a desvantagem de ter pouca área de vazão relativa por ter somente um bico soprador.
- O sistema C teve o pior resultado dos três testados. O ângulo de incidência de  $45^\circ$  do bico sobre o fio máquina e somente um bico, propiciou uma perda de energia em forma de calor para seus componentes, assim como o sistema B, e aumentou a dispersão do ar, sendo isso indesejável, ao invés de concentrá-lo sobre o fio máquina, não conseguindo retirar a água do material.

Concluimos neste trabalho que o sistema A apresentou resultados satisfatório dentro da produção do vergalhão CA60, eliminando do processo a água da chuva no fio máquina, variável indesejada no processo de fabricação do vergalhão CA60. Esse trabalho tem grande potencial de ganho para as unidades da Gerdau Aços Longos que possuem esse mesmo tipo de equipamento, por que vai gerar economia de dinheiro com a aquisição de lubrificantes especiais para chuva e produção ininterrupta.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1 - Trocar a geometria do bico de retangular para circular, com a intenção de verificar se com o fluxo de ar melhor distribuído sobre o fio máquina molhado, provavelmente poderíamos utilizar apenas um único bico, e assim, seria resolvido o problema de aquecimento do sistema verificado com os sistemas B e C.

2 - Analisar o tempo de vida útil dos bicos, com a finalidade de criar condições seguras para o gerenciamento da manutenção preventiva do sistema na linha de laminação.

3 – Testar configuração com três bicos sopradores incidindo a 90° sobre o fio máquina.

4 – Aumentar a pesquisa bibliográfica em sistemas de ventilação.

5 - Indicar o sistema para laminadoras em outras fábricas do Grupo Gerdau.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM, Laminação: Seminário da Sociedade Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ed ABM, Porto Alegre, Brasil, p. 484, 1992.

ALTAN, T.; CHANDRASEKHARAN, S.; PALANISWAMY, H.; JAIN, N.; NGAILE, G. Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, issues 4-5, p. 379-388, April 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS A36: Standard Specification for Carbon Structural Steel, 2005.

ASME, Metals Engineering Process. ed Bolz, R.W. New York, USA, 428p.,1958.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6330: Fio máquina de uso geral, destinado à trefilação e laminação a frio, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6354: Fio máquina de aço destinado à trefilação e laminação a frio, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 10443: Tintas e Vernizes — Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas — Método de ensaio, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14679: Sistemas de condicionamento de ar e ventilação - Execução de serviços de higienização, 2001.

BRAKEY EQUIPAMENTOS DE HIGIENE. Desenvolvido por Tudononet. Disponível em: <<http://www.brakey.com.br>>. Acesso: 31/03/2012.

BRESCIANI FILHO, E.; BUTTON, S.T.; GOMES, E.; NERY, F.A.C.; ZAVAGLIA, C.A. Conformação Plástica dos Metais. São Paulo: UNICAMP, 1997.

BRUSIUS, Jr. William. Análise da Lubrificação Seca para Trefilação e Proposta de Padronização de Lubrificantes para Arame de Médio Carbono. Porto Alegre. 2009. 33 folhas. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

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, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. Fundamentos da Conformação. São Paulo. Artliber Editora, 2005.

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica. Trabalho a Quente. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6472-trabalho-a-quente](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6472-trabalho-a-quente)>. Acesso: 04/06/2012.

COELHO, A. R. Z. A; MAGNAVACCA, E. H. Lubrificação a Seco em Arames de Aço Carbono. Wire Industry, p. 651-660, 1975.

CORRÊA, Tiago Bovolini. Conformação Mecânica. Disponível em: <<http://conformacaomecanica-unisc.blogspot.com.br/2007/03/trabalho-morno.html>>. Acesso: 04/06/2012.

DECONCIC, Departamento da Indústria da Construção. Disponível em: <[www.fiesp.com.br/deconcic/default.aspx](http://www.fiesp.com.br/deconcic/default.aspx)>. Acesso: 22/11/2011.

DEVILLA, Ivano Alessandro. Ventiladores. Anápolis. Universidade Estadual de Goiás, 2004.

DOVE, A. B.. Steel Wire Handbook, vol. 1 e 2. The Wire International Association Inc. 3ª ed, 1979.

FILIPOVIC, M., ERIKSSON, C., ÖVERSTAM, H. Behaviour of Surface Defects in Wire Rod Rolling. Steel research int., v.77, n.6, 2006.

GEMINUS ELETRÔNICA, INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Desenvolvido por Dinamicsite. Disponível em: <[www.geminus.com.br](http://www.geminus.com.br)>. Acesso: 30/03/2012.

GERDAU. Disponível em: <[www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto](http://www.gerdau.com.br/produtos-e-servicos/produtos-por-aplicacao-detalhe-produto)>. Acesso: 12/07/2011.

HOSFORD, W. F. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, New York, USA, 425p. 2005.

JEFFERY, B. Stretching Metal's Forming Limits with HSP Lubricants. Magazine of the Fabricator. June 2003.

MORAIS, Willy Ank. Conformação Plástica dos Metais. Disponível em: <http://willyank.sites.uol.com.br/DISCIPLINAS/ConformacaoMecanica/Cap02pag056a062.pdf>>. Acesso: 09/06/2012.

MOREIRA, Marcelo F. Processos de Conformação Mecânica. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/siderurgia3.pdf>>. Acesso: 04/06/2012.

OTAM, Ventilation Group. Desenvolvido por Ozone Comunicação e Design. Disponível em: <[www.otam.com.br](http://www.otam.com.br)>. Acesso: 24/10/2011.

P.C. CAMPBELL; E.B. HAWBOLT; J.K. BRIMACOMBE, Microstructural Engineering Applied to the Controlled Cooling of Steel Wire Rod: Part II. Microstructural Evolution and Mechanical Properties Correlations, November 1991.

RUIZ, M.C., VERDE, J., ANDRÉS, J., VIGURI, J., IRABIEN, A, Environmental assessment of lubricants before and after wire drawing process. Journal of Hazardous Materials, A85, p. 181–191, 2001.

SCAINI. Construindo Confiança. Desenvolvido por Tecnologia do Blogger. Disponível em: < <http://gruposcaini.blogspot.com.br/2009/04/historia-da-siderurgia-siderurgia-no.html>>. Acesso: 04/06/2012.

SCHAEFFER, L. Conformação dos Metais: Metalurgia e Mecânica. Ed. Rigel, Porto Alegre, Brasil, 108 p,1995.

SILVA, J.S e PINTO, F.A.C. Ventiladores e sua Construção. Pré- Processamento de produtos Agrícolas, Instituto Maria, Juiz de Fora, p. 510. 1995.

SHIRIZLY, A., LENARD, J. G. The Effect of Lubrication on Mill Loads During Hot Rolling of Low Carbon Steel Strips. Journal of Materials Processing Technology, v.97, p. 61-68. 2000.

TIGRINHO L.M.V, SANTOS, R.A., CHEMIN FILHO, R.A., MARCONDES, P.V.P. Experimental investigation on the influence of the lubricant type in the punch stretching of extra deep-drawing steel. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng., v.30, n.4, p. 290-294, 2008.

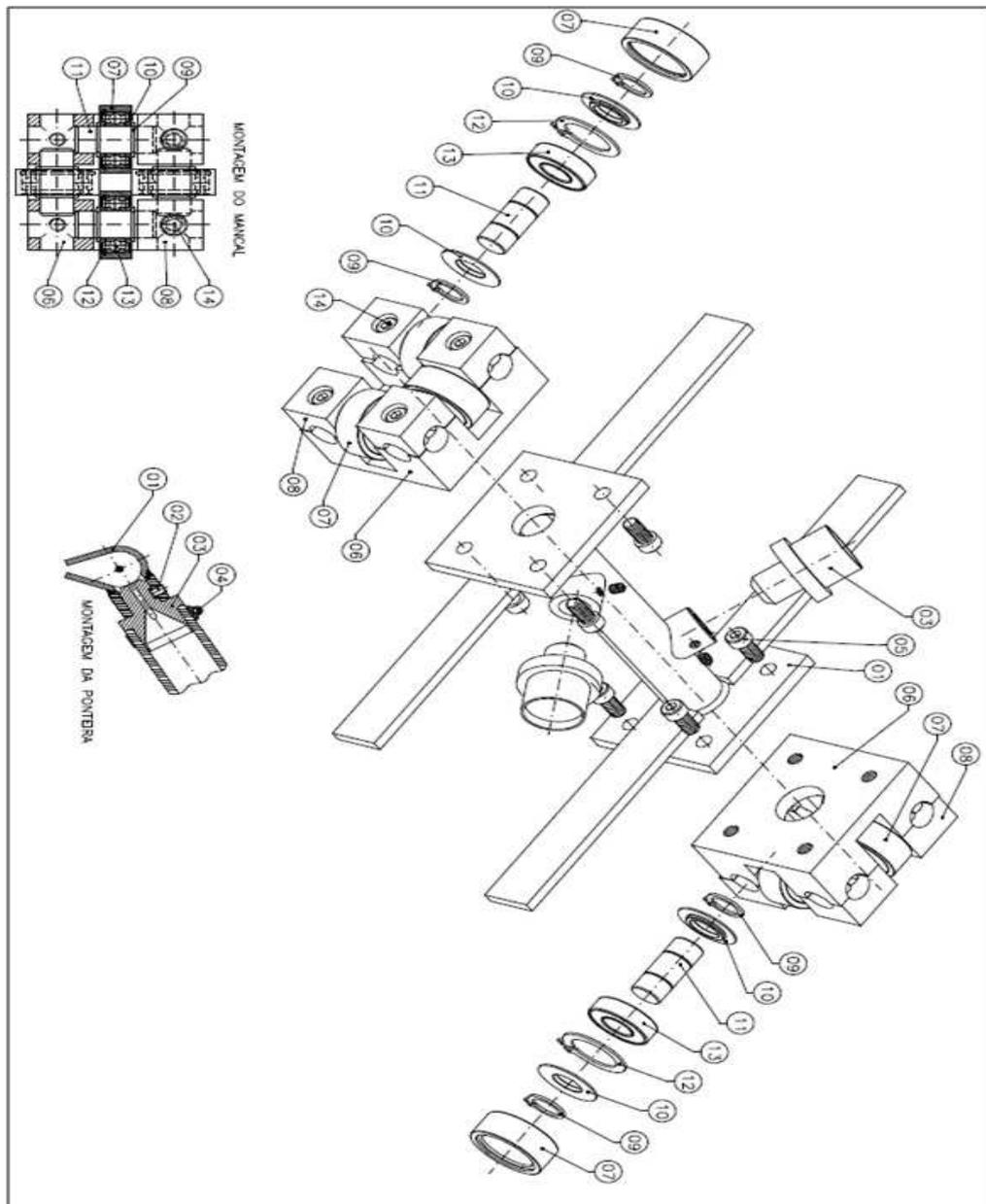
UNIP. Fundamentos da Conformação em Metais. Disponível em: < <http://xa.yimg.com/kq/groups/24008886/28629490/name/FUNDAMENTOS+DA+CONFORMA%C3%87%C3%83O+EM+METAIS.pdf>>. Acesso: 08/06/2012.

V. ODUGUVA; R. ROY. A Review or Rolling System Design Optimization. International Journal of Machine Tools & Manufacture, February 2005.

## ANEXOS

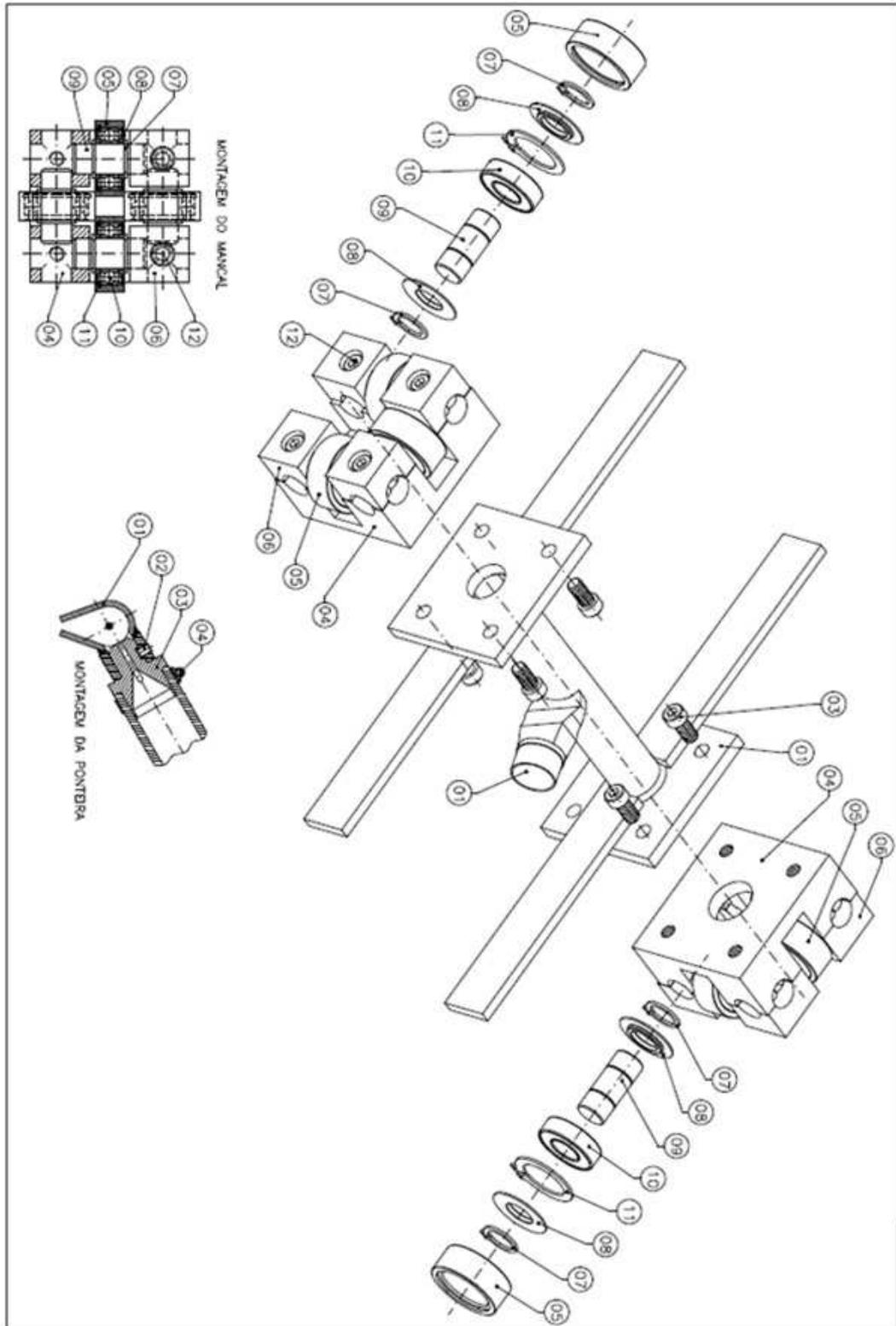
### ANEXO A

Configuração com 2 bicos a  $120^\circ$  um do outro e incidindo a  $90^\circ$  sobre o fio-máquina.



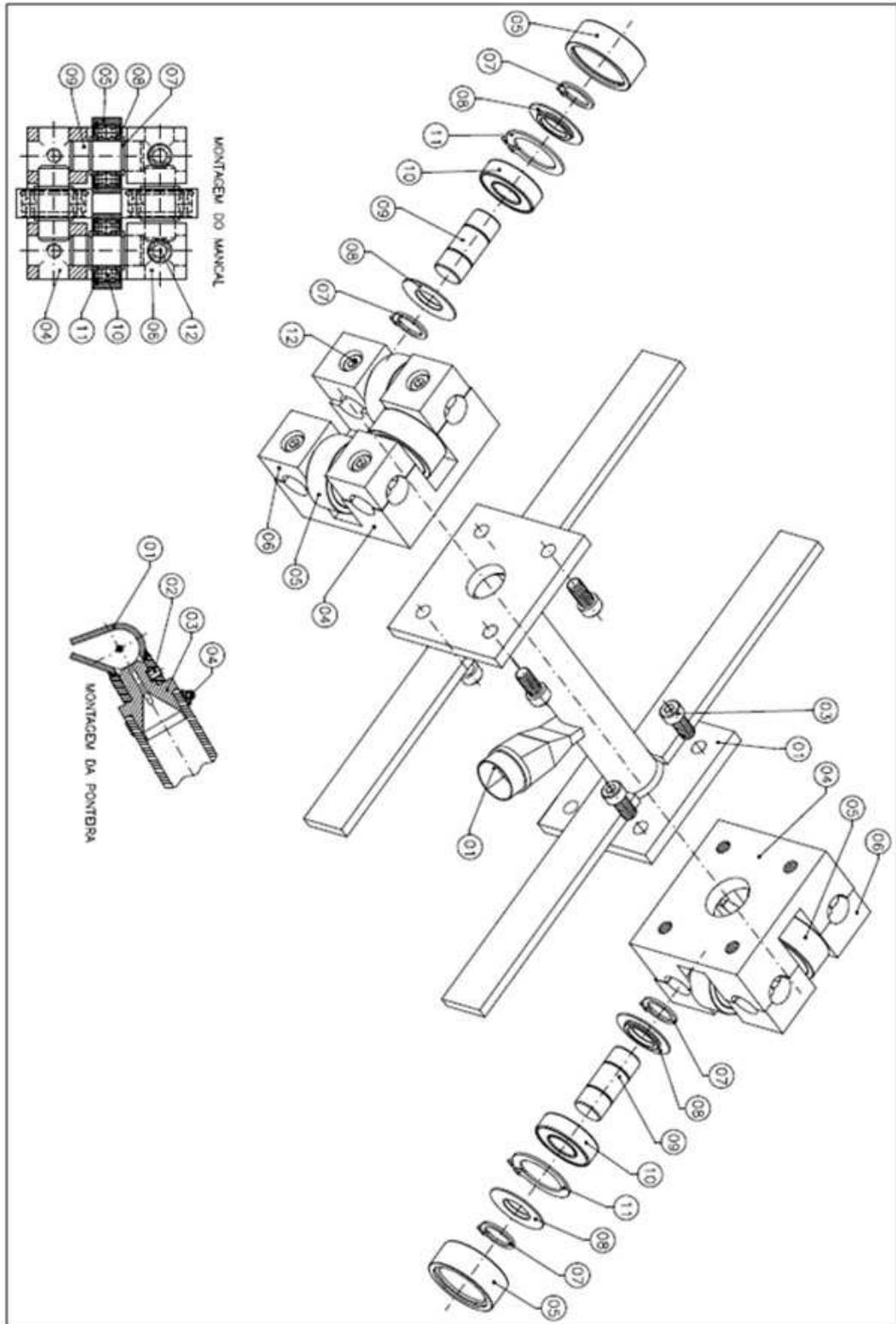
**ANEXO B**

Configuração com 1 bico incidindo a 90° sobre o fio -máquina.



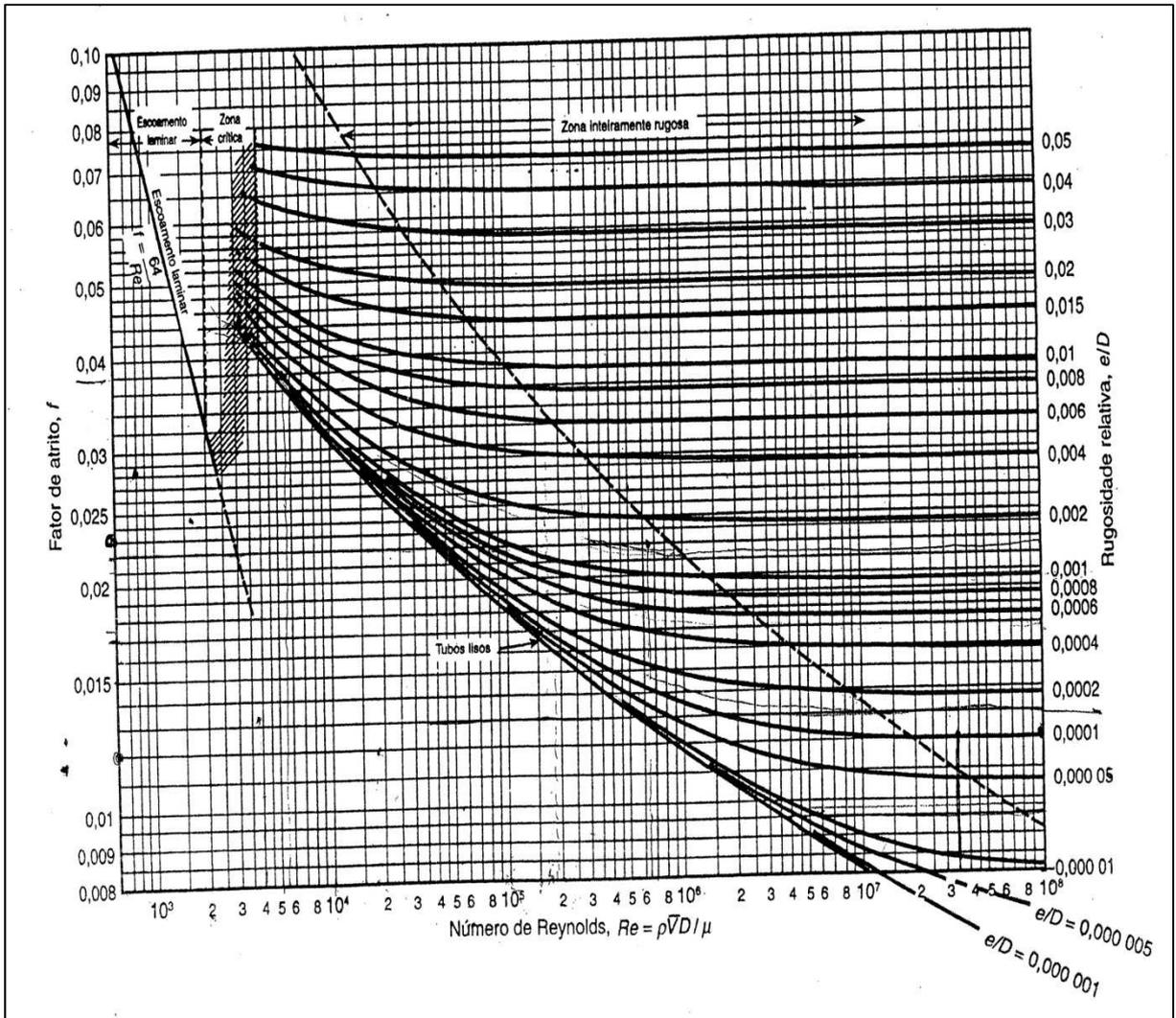
**ANEXO C**

Configuração com 1 bico incidindo a 45° sobre o fio máquina.



## ANEXO D

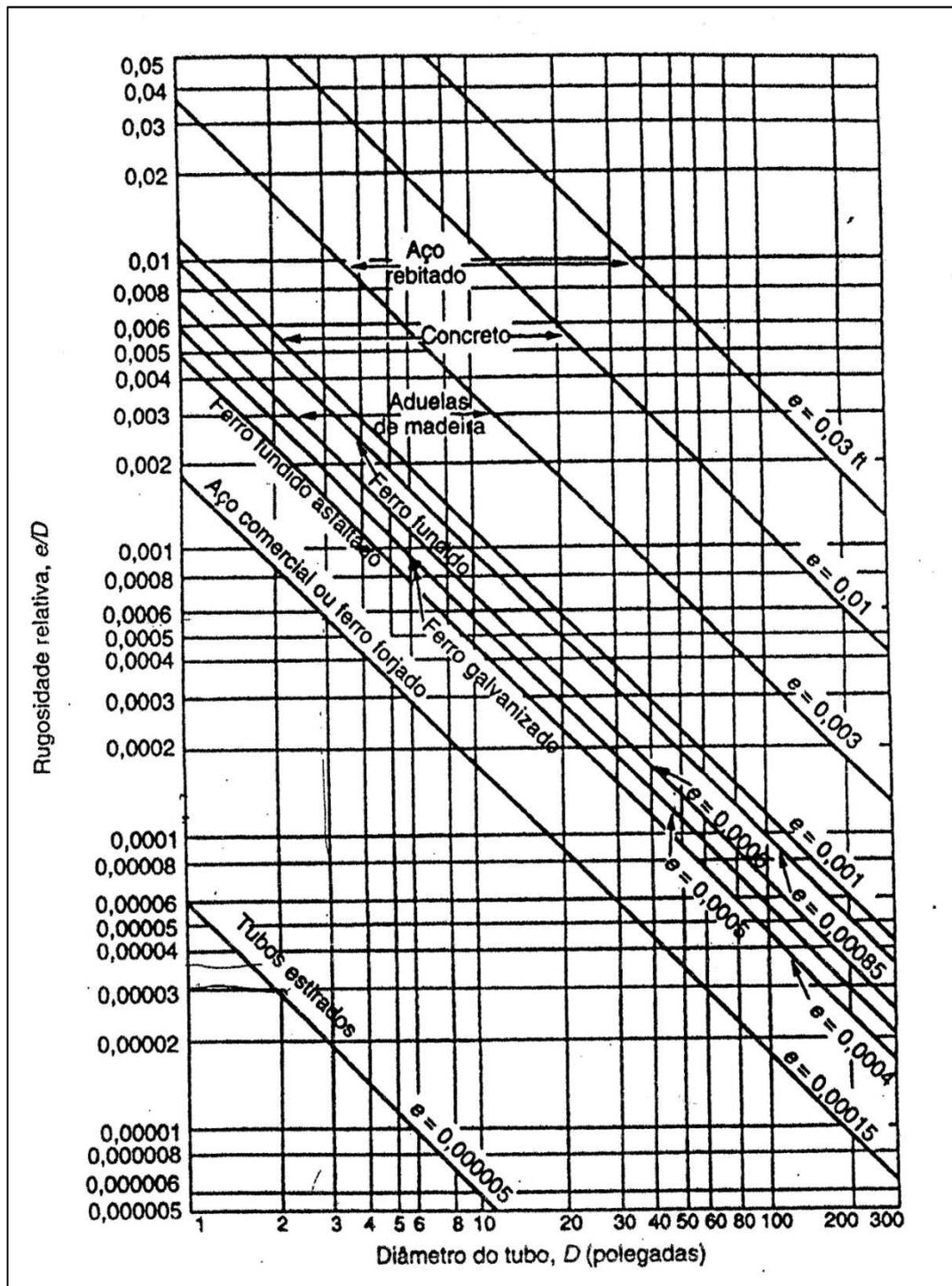
Diagrama de Moody (1944).



Fonte: <http://www.eesc.usp.br/netef/Oscar/Aula10p.pdf>.

## ANEXO E

Rugosidade relativa.

Fonte: <http://www.eesc.usp.br/netef/Oscar/Aula10p.pdf>.