

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Avaliação das causas de rupturas de arames no processo de trefilação do aço
equivalente ao ABNT1005 na unidade industrial da Arcelormittal em Juiz de Fora MG.

Autor: Geraldo M. Mól Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Eric Marchezini Mazzer

Dezembro/2020

Geraldo M. Mól Ferreira

Avaliação das causas de rupturas de arames no processo de trefilação do aço equivalente ao ABNT1005 na unidade industrial da Arcelormittal Juiz de Fora MG.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eric Marchezini Mazzer

Belo Horizonte

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Dezembro/2020

F383a Ferreira, Geraldo Magno Mól.
Avaliação das causas de rupturas de arames no processo de trefilação do aço equivalente ao ABNT1005 na unidade industrial da Arcelormittal em Juiz de Fora MG [recurso eletrônico] / Geraldo Magno Mól Ferreira. – 2020.
1 recurso online (60 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eric Marchezini Mazzer.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

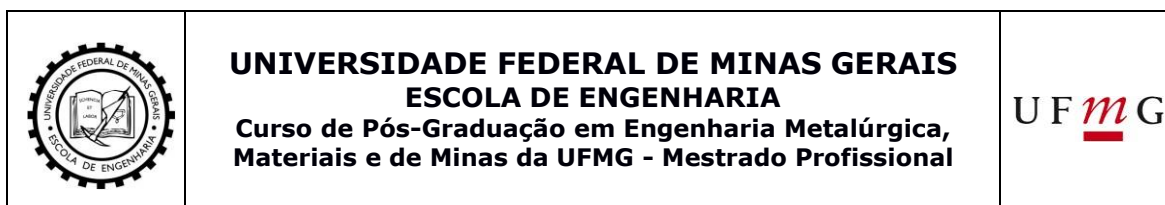
Bibliografia: f. 57-60.

1. Materiais - Teses. 2. Ciência dos materiais - Teses. 3. Arame - Teses. 4. Trefilação de arame - Teses. 5. Boro - Teses. 6. Nitrogênio - Teses. I. Mazzer, Eric Marchezini. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU:620(043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Roseli Alves de Oliveira CRB/6 2121

Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



**AVALIAÇÃO DAS CAUSAS DE RUPTURAS DE ARAMES NO PROCESSO DE
TREFILAÇÃO DO AÇO EQUIVALENTE AO ABNT1005 NA UNIDADE
INDUSTRIAL DA ARCELORMITTAL EM JUIZ DE FORA MG**


GERALDO MAGNO MÓL FERREIRA

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.


Aprovada em 28 de janeiro de 2021.

Por:

Prof. Eric Marchezini Mazzer, Dr. (UFMG)
Orientador



Prof. Pedro Henrique Rodrigues Pereira, Dr. (UFMG)



Prof. Wellington Lopes, Dr. (CEFET)

A meus pais Walter e Rosária,

A meus irmãos Luiz André e Anna Lydia,

Ao meu filho Nauã.

“I know I was born and I know that I’ll die.

The in between is mine, I am mine.”

Eddie Vedder.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre incentivaram e apoiaram à minha educação.

À Arcelormittal, através da Diretoria de Trefilação e Gerência da unidade de Juiz de Fora, pela oportunidade e acreditar no trabalho.

Ao Paulo Afonso (padrinho), Eduardo Diniz e Paulo H. Leonel pelos ensinamentos e incentivos.

Aos colegas da produção e manutenção da trefilaria de Juiz de Fora: Meirelles, Ricardo, Kleber Mateus, Weslei, José Luiz, Kelson, Giancarlo, Welliton, Pablo, Emerson, Vilson (leão), Flávio, Felipe, Roni e Mondega.

À Gerência Técnica em nome de Felix, Ismael e Karina.

À Gerência de Laminação e Aciaria pelo apoio no desenvolvimento dos experimentos.

Ao professor e orientador desse trabalho Eric M. Mazzer por compartilhar seus conhecimentos e ajudar na condução do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTAS DE NOTAÇÕES.....	XII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Processo de trefilação.....	4
3.2 Descarepação.....	10
3.3 Lubrificação na Trefilação.....	13
3.4 Envelhecimento por Deformação.....	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1 Análise da composição da carepa.....	26
4.2 Análise da relação de boro e nitrogênio.....	28
4.3 Análise da influência da temperatura na lubrificação.....	31
5. RESULTADOS.....	33
5.1 Análise das causas de rupturas – PDCA.....	33
5.2 Resultados da análise da composição da carepa.....	39
5.3 Resultados das análises da relação B/N.....	44
6. CONCLUSÃO.....	52
7. RECOMENDAÇÕES.....	56
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Desenho esquemático do processo de trefilação.....	5
Figura 3.2 - Fieiras para o processo de trefilação.....	6
Figura 3.3 - Esquema dos detalhes de uma fieira em corte.....	6
Figura 3.4 - Representação de uma fieira considerando os ângulos.....	7
Figura 3.5 - Representação esquemática da variação das propriedades mecânicas do material trabalhado à frio.....	10
Figura 3.6 - Composição da carepa na laminação.....	11
Figura 3.7 - Relação da % constituinte de carepa <i>versus</i> temperatura.....	12
Figura 3.8 - Esquema da variação da área de cisalhamento com a pressão p	15
Figura 3.9 - Desenho mostrando a formação do filme de lubrificante entre fieira e arame	17
Figura 3.10 - Variação da temperatura dentro e na superfície do arame sob resfriamento constante.....	20
Figura 3.11 - Variação da dureza de um arame de diâmetro 0,30mm em diferentes coeficientes de atrito.....	21
Figura 3.12 - Variações nas propriedades mecânicas de arames com velocidades finais de trefilação de 85m/min em com e sem sistema de resfriamento após as fieiras.....	22
Figura 3.13 - Influência do teor de nitrogênio solúvel na variação percentual do limite de escoamento a 0,1% de deformação (P) e da estrição(Z) em aços perlíticos trefilados a 86% de redução de área e envelhecidos por 5 minutos entre 30 e 300°C.....	23
Figura 5.1 - Histórico do problema <i>versus</i> meta.....	33
Figura 5.2 - Análise de fenômeno- Eficiência por máquina.....	35
Figura 5.3 - Análise de fenômeno- Origem de paradas.....	35
Figura 5.4 - Análise de fenômeno- Estratificação paradas operacionais.....	36
Figura 5.5 - Análise de processos- Diagrama de Ishikawa, rupturas de arames.....	37
Figura 5.6 - Amostra de fio máquina.....	39
Figura 5.7 - Carepa residual após primeiro passe.....	40
Figura 5.8 - Gráfico Pareto das variáveis do D.O.E.....	41
Figura 5.9 - Gráfico das variáveis <i>versus</i> resposta.....	42
Figura 5.10 - Amostra de fio máquina.....	42

Figura 5.11 - Gráfico de correlação entre arrebentamentos (rupturas de arames) e relação B/N.....	43
Figura 5.12 - Gráfico de ocorrências de rupturas <i>versus</i> passes de trefilação.....	44
Figura 5.13 - Gráfico de LR em diferentes relações B/N.....	45
Figura 5.14 - Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação de engenharia.....	46
Figura 5.15 - Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação de engenharia.....	46
Figura 5.16 - Gráfico Da função log tensão <i>versus</i> deformação verdadeira.....	47
Figura 5.17 - Gráfico Da função log tensão <i>versus</i> deformação verdadeira.....	47
Figura 5.18 - Gráfico vazão de água nos blocos de trefilação – MT241.....	50
Figura 6.1 - Gráfico resultado eficiência trefilação fina.....	52
Figura 6.2 - Gráfico produção anual trefilação fina.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1 - Interação das variáveis e seus respectivos níveis do D.O.E.....	27
Tabela V.1 - Resultados das amostras de composição da carepa (wustita e magnetita)....	38
Tabela V.2 - Medições da temperatura e vazão de água- condição atual.....	49
Tabela V.3 - Medições da temperatura e vazão de água- condição após manutenção nos blocos.....	49
Tabela VI.1 - Consumo de energia elétrica fornos de recozimento.....	54

LISTAS DE NOTAÇÕES

D.O.E	<i>Design of Experience</i> (Planejamento de Experiência)
Ns	Nitrogênio Solúvel
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Global dos Equipamentos)
ABNT 1005	Associação Brasileira de Normas Técnicas – Aço Baixo Carbono
JOG	Acionamento da máquina gerando pequeno movimento
β	Semi Ângulo de Entrada
α	Semi Ângulo de Trabalho
γ	Semi Ângulo de Saída
Hc	Altura de Calibração
Dc	Diâmetro de Calibração
R(%)	Redução de Área
θ_f	Bitola Final
θ_o	Bitola Inicial
TH	Temperatura Homóloga
TT	Temperatura de Trabalho
TF	Temperatura de Fusão
σ_e	Tensão de Fluxo
ϵ	Deformação Verdadeira
k	Coefficiente de Resistência
FeO	Óxido de Ferro (Wustita)
Fe ₃ O ₄	Tetróxido de Ferro (Magnetita)
Fe ₂ O ₃	Dióxido de Ferro (Hematita)

RESUMO

A competitividade no mercado força as empresas a se tornarem cada vez mais eficazes em seus processos produtivos. Para tanto é essencial que reduzam interrupções em seus processos. O principal motivo de parada na produção de arames trefilados de bitolas finas (1,24mm à 1,65mm), aço equivalente ao ABNT1005, da Arcelormittal em Juiz de Fora MG é a ruptura de arames. As possíveis causas dessa anomalia são: carepa residual, avarias mecânicas no fio máquina, má lubrificação do arame, redução excessiva, geometria das fieiras fora do padrão e baixa relação entre boro e nitrogênio. Esse trabalho teve como objetivo estudar as principais causas de ruptura de arames no processo produtivo de arames trefilados de bitolas finas, aço equivalente ao ABNT1005, na unidade industrial de Juiz de Fora em MG, além de implementar ações que visam eliminar ou pelo menos minimizar as causas, aumentando assim a eficiência e produtividade do processo. Foi identificado que as principais causas foram: carepa residual no arame, baixa relação de B/N e falha na lubrificação devido a alta temperatura do arame durante o processo. Foi realizado planejamento de experiência no Stelmor (laminação) com o objetivo de se estabelecer os parâmetros ótimos de processo para obtenção de melhor composição de óxidos, que deve ter pelo menos 80% de FeO (wustita). No que tange a relação B/N ficou evidente que quanto menor o quociente entre boro e nitrogênio, maior é a quantidade de rupturas. Foi calculado também o coeficiente de encruamento em diferentes corridas com distintas relação B/N. Verificou-se que a alta temperatura do arame prejudica a lubrificação. Através da implementação das ações houve redução das paradas por ruptura de arames e conseqüentemente aumento de produção. O aumento foi de 3.300t de 2016 (início do trabalho) à 2019, representando crescimento de 21,70%.

PALAVRAS CHAVE: Rupturas de arames, relação entre boro e nitrogênio, carepa e encruamento.

ABSTRACT

Competitiveness in the market forces companies to become increasingly effective in their production processes. Therefore, it is essential to reduce interruptions in your processes. The main reason of production downtime of thin gauge drawn wire (1.24mm to 1.65mm), equivalent to ABNT 1005 steel, from ArcelorMittal in Juiz de Fora is the wire breakage. The possible causes of this anomaly are: residual scale, mechanical damage to the wire rod, poor wire lubrication, excessive reduction, non-standard die geometry and low boron-to-nitrogen ratio. This work aimed to study the main causes of wire breakage in the production process of thin gauge drawn wire, equivalent to ABNT 1005 steel, in the industrial unit of Juiz de Fora in Minas Gerais State, in addition to implementing actions that aim to eliminate or at least minimize the causes, thus increasing the efficiency and productivity of the process. It was identified that the main causes were: residual scale in the wire, low boron-to-nitrogen ratio and failure in lubrication due to the high temperature of the wire during the process. A design of experiments (DOE) was performed in the Stelmor (rolling) in order to establish the optimal process parameters to obtain better oxide composition, which should have at least 80% of FeO (wustite). Regarding the boron-to-nitrogen ratio, it was evident that the lower the ratio between boron and nitrogen, the greater the number of ruptures. The strain-hardening coefficient was also calculated in different runs with different boron-to-nitrogen ratios. It was found that the high temperature of the wire impairs lubrication. Through the implementation of the actions, there was a reduction in downtimes due to wire breakage and, consequently, an increase in production. The increase was 3,300t from 2016 (start of work) to 2019, representing a growth of 21.70%.

KEY WORDS: Wire breakage, ratio between boron and nitrogen, scale and strain-hardening.

1. INTRODUÇÃO

A atual situação político econômica brasileira associada ao aumento dos preços do minério de ferro no primeiro semestre de 2019, fez com que a indústria de produção de aço no Brasil reduzisse as projeções de desempenho para o ano corrente (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada- IPEA).

Estima-se um crescimento de 2,2% de aço bruto no país, o que equivale a aproximadamente 36 milhões de toneladas, sendo que a projeção em dezembro de 2018 era de 2,7%. Ainda segundo esse instituto, a indústria siderúrgica tem operado em 2019 com uma utilização de 64% da capacidade instalada, o que mostra que o mercado interno não avançou o que se esperava (Instituto Aço Brasil).

Esses fatores associados à competitividade no mercado siderúrgico, têm forçado as empresas a buscarem melhores resultados operacionais, de forma a reduzir custos e aumentar a produtividade, garantindo assim margens de lucro maiores. A fim de alcançar esses objetivos se faz necessário diminuir as interrupções nos processos produtivos, aumentando assim sua eficiência operacional e, por consequência, sua produtividade.

Entende-se por eficiência operacional ou *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) como indicador de desempenho de máquinas e/ou processos, o qual é calculado pela multiplicação da taxa de utilização, performance e qualidade, levando-se em conta a produtividade esperada. Esse indicador é de fundamental importância para a gestão na tomada de decisão em busca da melhor utilização da capacidade produtiva de seus recursos, com o objetivo de reduzir custos e aumentar a disponibilidade de produto de forma a garantir vantagem competitiva no mercado.

O objeto de estudo dessa dissertação é o processo de trefilação de arames de aços recozidos da Arcelormittal Juiz de Fora MG, pelo o qual são produzidas bitolas de 1,24 a 1,65mm a partir de fio máquina cujo diâmetro da área de secção transversal é 5,5mm, em aço de baixo teor de carbono, equivalente ao ABNT1005, o que os tornam facilmente trabalháveis em aplicações que exigem dobras ou torções.

O processo de trefilação de arames nessa unidade industrial tem como principal motivo de paradas as rupturas de arames. Esse tipo de interrupção representa 12% do tempo calendário, em torno de 86 horas por mês para cada máquina. Em termos de produção, calcula-se uma perda de 58 toneladas por equipamento. Como o processo é composto por 6 máquinas no total, deixa-se de produzir mensalmente 348 t em virtude desse problema. No que tange ao indicador OEE atinge-se apenas 45%, ou seja, tais máquinas deixam de produzir por 55% do tempo calendário.

Dessa forma a taxa de utilização desse processo é reduzida devido à essas interrupções e, como consequência tem-se uma diminuição significativa do indicador OEE. Além disso, apresenta alto custo fixo de produção em R\$/toneladas produzidas.

A fratura de arames tem causas distintas, a listar: avarias mecânicas (manuseio incorreto por empilhadeira e ponte rolante, contato do fio máquina com o chão), redução inapropriada, alto índice de carepa residual, refrigeração insuficiente, falha de lubrificação, excesso de nitrogênio na composição química do aço e defeitos no fio máquina os quais têm origem na Aciaria ou Laminação, como por exemplo, palhas, escamas e incrustações.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho de dissertação de mestrado tem como objetivo estudar as causas das rupturas de arames do processo de trefilação da unidade da Arcelormittal em Juiz de Fora, cujo grau de aço é o equivalente ao ABNT1005, além de propor soluções e implementá-las a fim de reduzir as interrupções na produção, aumentando dessa forma a disponibilidade dos equipamentos bem como a produção desses produtos, reduzindo assim seus custos.

Os objetivos específicos dessa dissertação são:

- Melhorar o conhecimento técnico dos operadores no processo de trefilação;
- Reduzir consumo de fieiras;
- Aumentar a disponibilidade dos equipamentos de trefilação;
- Aumentar a eficiência do processo;
- Aumentar a produção de arames trefilados;
- Reduzir a exposição dos operadores aos riscos de acidentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de trefilação

O processo de trefilação consiste em puxar o metal através de uma matriz, por meio de uma força de tração a ele aplicada na saída da matriz (DIETER, 1981). De acordo com BUTTON (2006), a trefilação caracteriza-se, independentemente do produto obtido, pelo tracionamento do produto trefilado através de uma matriz que lhe confere a geometria e dimensões desejadas.

A trefilação é uma das operações de conformação mecânica mais antiga e de grande importância industrial, permitindo a produção de barras, arames e tubos, entre outras formas, com excelente acabamento superficial e rígido controle dimensional (HELMAN; CETLIN, 1993).

Por definição, é um processo de fabricação por deformação plástica, no qual a matéria-prima passa pela fieira sendo tracionada na saída da ferramenta, gerando redução na área da secção transversal e aumento no comprimento do material trefilado (DIETER, 1981).

No desenho esquemático apresentado na figura 3.1, observa-se a bobina, a qual tem a função de acumular arame, uma vez que ao sofrer redução o material aumenta seu comprimento. Com isso, evita-se ruptura por tração. Essa bobina tem refrigeração interna por água, a fim de trocar calor com o material trefilado, já que o arame tem sua temperatura aumentada após o passe de redução. Verifica-se a caixa de lubrificação, onde está contido o sabão (que age como lubrificante reduzindo o atrito entre a fieira e o arame), bem como alinhadores de arame. Observa-se também a matriz ou fieira, onde ocorre a redução de área de secção transversal do material.

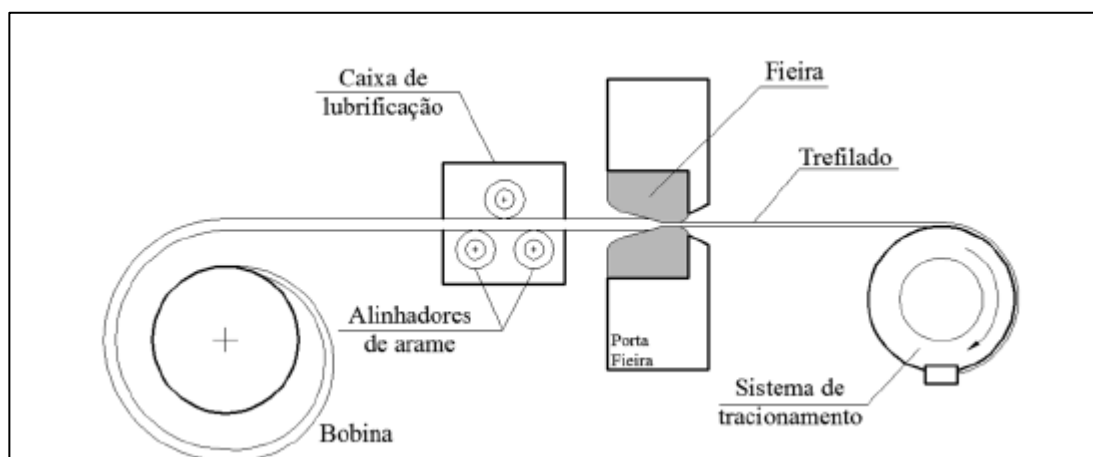


Figura 3.1– Desenho esquemático do processo de trefilação (Adaptado de DOMINGUES, 2011).

A produção de arames tem como matéria-prima o fio máquina cuja bitola varia de acordo com o produto que se deseja na trefilação, respeitando as reduções necessárias de acordo com os passes disponíveis no equipamento.

O processo de trefilação inicia-se na decapagem, podendo ser química ou mecânica. A decapagem tem como objetivo retirar os óxidos de ferro, também conhecidos como carepa, formados durante a laminação do fio máquina no processo de resfriamento das espiras. De acordo com DIETER (1981), a carepa prejudica a trefilação pois impede a penetração do lubrificante na superfície do aço e, por ser abrasiva desgasta precocemente as matrizes.

O processo de apontamento e afiação, que é logo após a passagem do fio máquina no decalaminador, consiste em apontar o arame para que se consiga o diâmetro da redução em cada passe, em seguida prende-se o material em um alicate de tração que irá puxar o arame através do acionamento lento da máquina (jog) Essa atividade é realizada em cada passe do equipamento (PINTO, 2016).

A passagem do arame pela fieira provoca a redução de sua seção transversal e, como a operação é comumente realizada a frio, ocorre o fenômeno de encruamento com alteração das propriedades mecânicas do material do arame (SANTOS, 2005).

As matrizes ou fieiras são compostas por: uma carcaça metálica, normalmente feita de um aço menos nobre e o núcleo, que é onde ocorre a redução, que em geral é um material de alta resistência mecânica, como o carbeto de tungstênio, o qual aumenta a vida útil das fieiras, permitindo maior tempo de produção sem que haja troca por desgaste.

As figuras 3.2 e 3.3 mostram exemplos de matrizes.



Figura 3.2- Fieiras para o processo de trefilação

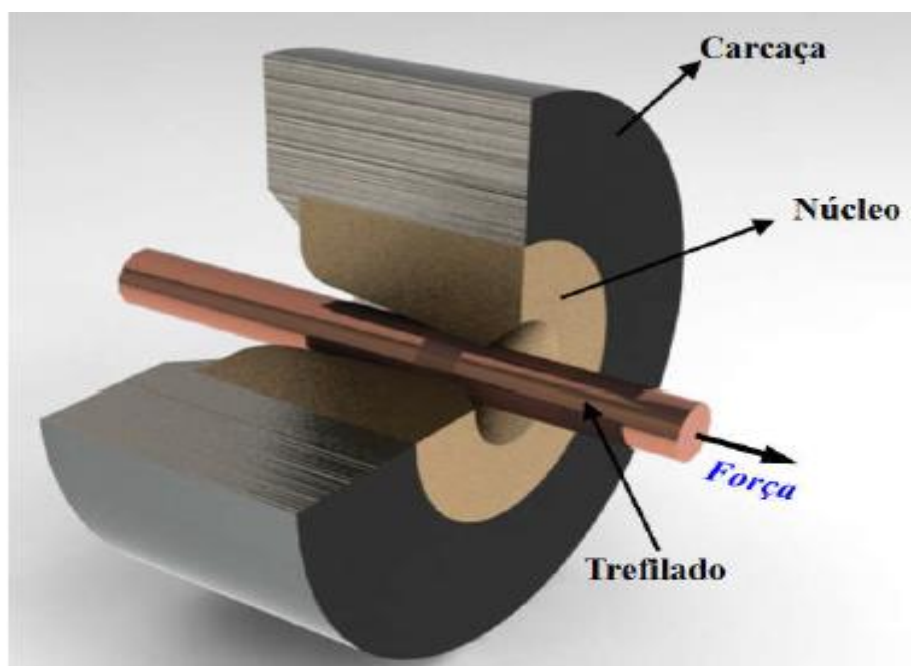


Figura 3.3 – Esquema dos detalhes de uma fieira em corte. (Adaptado de NEVES, 2003).

A figura 3.4 mostra desenho de uma fieira considerando seus ângulos. Onde β é o semiângulo de entrada, α é o semiângulo de trabalho ou semiângulo de trefilação e γ é o semiângulo de saída. H_c é a altura de calibração e D_c é o diâmetro do cilindro de calibração.

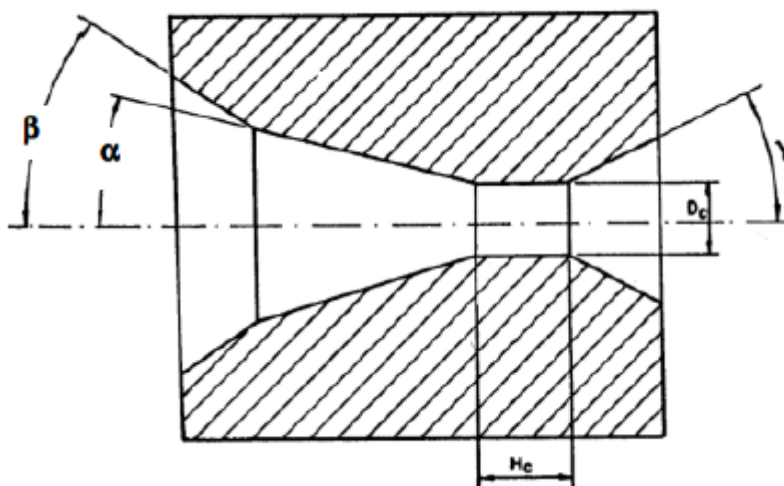


Figura 3.4- Representação de uma fieira considerando os ângulos (BRESCIANI FILHO *et. al.*, 2006)

De acordo com (HELMAN; CETLIN, 2005), o ângulo de entrada tem por objetivo auxiliar na lubrificação do arame, através do arraste de sabão para dentro do núcleo. Ele tem que exceder a dimensão máxima do material a ser trefilado.

Na região do ângulo de trabalho ou de trefilação ocorre a redução. A dimensão desse ângulo dependerá do tipo de material a ser trefilado e da redução desejada (MARTINEZ, 1998).

A região onde se encontra o cilindro de calibração, H_c , é responsável pelo controle dimensional do produto.

A altura do cilindro de calibração deve ser proporcional ao diâmetro e à redução de seção a ser efetuada, sendo que sua seção transversal define a seção transversal do trefilado (SANTOS, 2005). Se a altura do cilindro de calibração for demasiadamente reduzida, favorecerá um aumento considerável do desgaste da fieira. Por outro lado, sendo esta

demasiadamente elevada, necessita-se maior força de tração, o que pode resultar na variação da medida final desejada e, possivelmente, em dano ao núcleo da fieira (PINTO,2016).

O ângulo de saída age como guia do arame evitando desgaste da fieira com o arame, devido a um possível desalinhamento da caixa de lubrificação.

Segundo CORRÊA (2004), as reduções podem ser calculadas pela equação 3.1:

$$R(\%) = \left[1 - \left(\frac{\Phi_f^2}{\Phi_o^2} \right) \right] \times 100, \text{ em que:} \quad (3.1)$$

$R(\%)$ é a redução de área dada em %;

Φ_f é a bitola final, diâmetro de saída após redução;

Φ_o é a bitola de entrada, antes de sofrer a redução no passe.

Através desse processo, o qual é trabalhado a frio, é possível alcançar importantes reduções de área e produtos com diferentes geometrias tais quais: hexagonais, chatos, redondos e ovais.

O que caracteriza um processo trabalhado a quente ou a frio, é a temperatura e a taxa de deformação em que o material é submetido. Materiais trabalhados a quente poderão submeter-se aos fenômenos de recuperação e/ou recristalização ao mesmo tempo em que são deformados, denominados de recuperação e recristalização dinâmicas. Já o trabalho a frio é a deformação realizada sob condições em que os processos de recuperação e recristalização não são efetivos, mantendo o material encruado depois da deformação (DIETER, 1981).

A recuperação dinâmica ocorre em materiais deformados a quente onde há a geração e aniquilação de defeitos cristalinos como discordâncias, lacunas e maclas. À medida em que o material é deformado, ocorre o aumento da densidade das discordâncias, mas como a deformação é a quente, alguns mecanismos são ativados termicamente, como a

escalagem e o deslizamento cruzado, o que fazem com que as discordâncias se rearranjem formando uma estrutura celular (PADILHA, A. F., SICILIANO JR., F., 2005).

Nos materiais trabalhados a frio, à medida em que são deformados, ocorre aumento do encruamento e conseqüentemente da resistência mecânica, devido ao acréscimo da densidade das discordâncias e pelo fato dos mecanismos como escalagem e deslizamento, os quais são ativados termicamente, não estarem presentes nesse processo (DIETER, 1981; MEYERS, 1982).

Através da equação 3.2 a qual determina a temperatura homóloga é possível definir se o material está submetido ao trabalho à quente, morno ou frio.

$$T_H = T_T/T_F \text{ (temperaturas em Kelvin) onde:} \quad (3.2)$$

T_H é a temperatura homóloga;

T_T é a temperatura de trabalho;

T_F é a temperatura de fusão do material.

Os critérios para caracterizar os tipos de deformação são:

- Deformação a frio: $T_H \leq 0,3$;
- Deformação a morno: $0,3 < T_H < 0,5$;
- Deformação a quente: $T_H \geq 0,5$;

No processo a frio, onde ocorre deformação plástica e encruamento do material, observam-se alterações nas propriedades mecânicas do material, como alongamento, limite de resistência e escoamento, além da redução de área ao longo dos passes.

A figura 3.5 mostra que à medida em que a redução aumenta a cada passe, o limite de escoamento e resistência aumentam, devido ao encruamento e densidade das discordâncias. Além disso, o alongamento diminui o que demonstra perda de ductilidade do material.

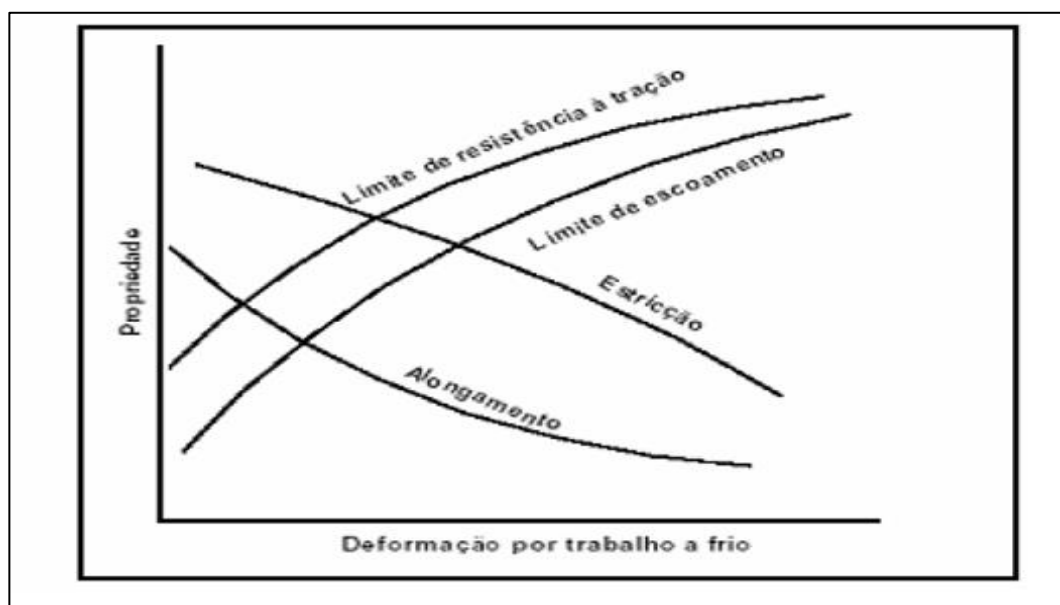


Figura 3.5- Representação esquemática da variação das propriedades mecânicas do material trabalhado a frio (DIETER, 1981).

O aumento da resistência mecânica à deformação plástica pode ser determinado com o uso de curvas de escoamento obtidas experimentalmente em tração uniaxial. Essas curvas, que são a de tensão-deformação verdadeiras, são obtidas pelos pontos a partir do limite de escoamento até a estricção do corpo de prova (início do pescoço), e representam o comportamento plástico do material. Elas normalmente são representadas pela seguinte expressão, conhecida como equação de Hollomon:

$$\sigma e = K * \varepsilon^n \quad (3.3)$$

em que σe é a tensão de fluxo para uma dada deformação plástica ε , K é o coeficiente de resistência, ε a deformação verdadeira e n representa o coeficiente de encruamento (GIORGINI, D.G., 2013).

3.2 Descarepação

A carepa é resultante da reação química que ocorre entre o ferro presente no aço e o oxigênio da atmosfera. No processo de laminação a quente, mais precisamente no equipamento denominado STELMOR (para o caso da ArcelorMittal), as espiras

encontram-se altas temperatura, entre 800°C e 900°C. Quando em contato com o ar, formam-se óxidos de ferro, também chamados de carepa.

Denomina-se por carepa a camada de óxidos de ferro que se formam a altas temperaturas, sendo produtos da oxidação do aço em contato com o oxigênio presente no ar atmosférico. A carepa desse aço é constituída por: Óxido de Ferro (FeO), Tetróxido de Ferro (Fe₃O₄) e Dióxido de Ferro (Fe₂O₃) (PENNA, J. A. CUNHA, H. M., 1977), como mostrado na Figura 3.6.

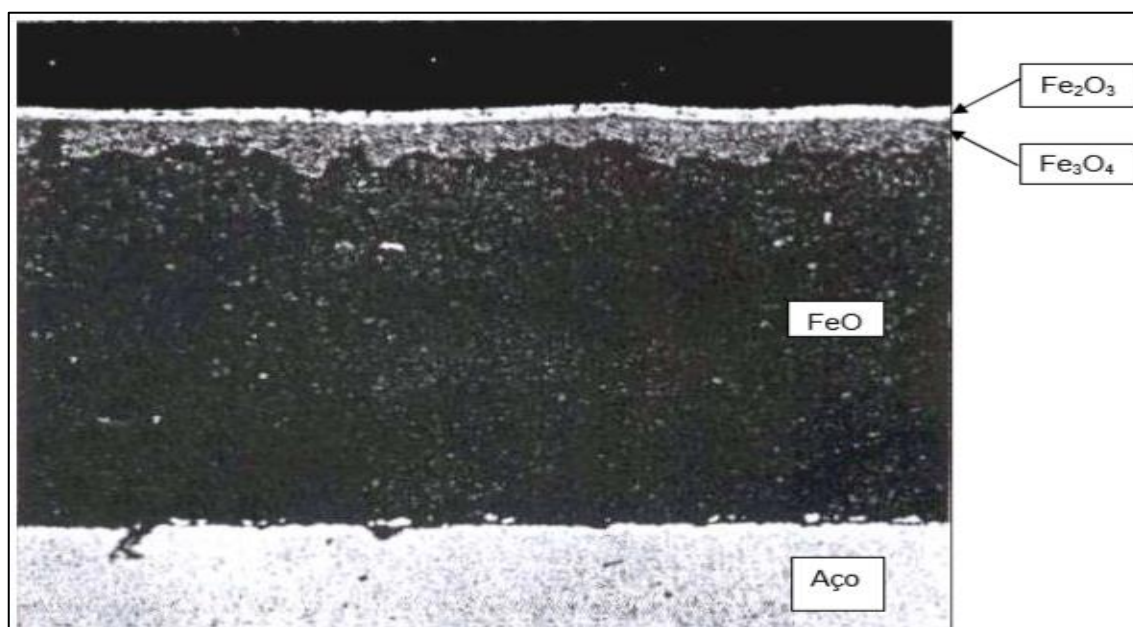


Figura 3.6- Composição da carepa na laminação (CUNHA, 2007)

Segundo Chen et.al, os óxidos formados são:

- Wustita, FeO;
- Magnetita, Fe₃O₄;
- Hematita, Fe₂O₃.

Ainda segundo esses autores, a proporção de formação de cada um desses óxidos depende da temperatura das espiras no STELMOR além da taxa de resfriamento, pois a FeO não é estável durante o resfriamento e pode se transformar em Fe₃O₄. A figura 3.7 mostra as faixas de temperatura no STELMOR versus a proporção (%) de constituinte de carepa.

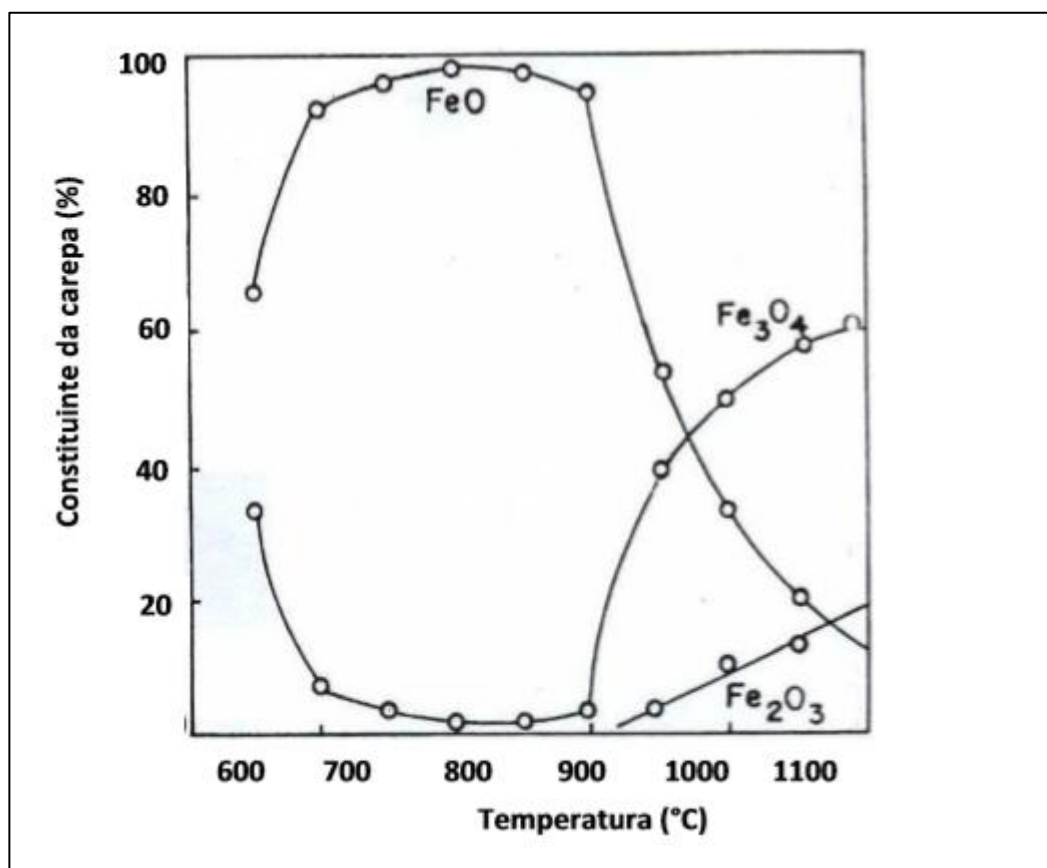


Figura 3.7- Relação da % constituinte de carepa *versus* temperatura (PENNA, J. A. CUNHA, H. M., 1977)

(PENNA, 1977), mostrou em seu trabalho que “quanto mais espessa a camada de wustita, FeO, menos aderente é a carepa ao aço.” De acordo com CUNHA (2007), isso é explicado “pelo aumento de tensões internas durante o crescimento da carepa, quando o as espiras do fio máquina é mantido em altas temperaturas no início do resfriamento no STELMOR.” Essas tensões geram trincas que são mais facilmente removidas no processo de decapagem mecânica, através do dobramento reverso.

Ainda segundo CUNHA (2007) a magnetita, Fe₃O₄, é um óxido muito aderente ao aço e de difícil remoção. Além disso, por possuir alta dureza causa desgaste prematuro das feiras.

A descarepação mecânica tem por objetivo principal retirar a carepa do fio máquina através de um sistema de polias, dispostas a 90° uma das outras, onde o aço é flexionado e o óxido de ferro se quebra devido às trincas geradas.

De acordo com PENNA (1977), uma remoção completa da carepa exigiria um alongamento de 12% do fio máquina, o que na prática é inviável pois seriam necessárias polias muito pequenas o que ocasionariam dobramentos relevantes e conseqüentemente quebra do fio máquina e paradas no processo produtivo. Assim, PENNA (1977), sugeriu em seu trabalho alongamentos de 6 a 8% entre as polias.

A equação 3.4 para se calcular a dimensão da polia é:

$$A(\%) = \frac{d}{(D + d)}, \text{ onde:} \quad (3.4)$$

A é o alongamento;

d é o diâmetro do fio máquina;

D é o diâmetro da polia.

Dessa forma, é preciso compreender a composição da carepa através dos parâmetros de processos de resfriamento das espiras no STELMOR, laminação, assim como se o diâmetro das polias do decalaminador e fio máquina atendem as premissas para alongamento ideal entre 6 e 8%, uma vez que a carepa residual pode causar rupturas de arame, devido à falha de lubrificação, além de desgastar fieiras precocemente o que aumenta as paradas por troca dessas matrizes.

3.3 Lubrificação na Trefilação

Uma vez que na conformação plástica dos metais existe contato entre as matrizes e o material trabalhado que está em movimento, então conclui-se que há atrito, em maior ou menor grau. Diferentemente de outros parâmetros, como redução e ângulos de fieiras, o quais podem ser medidos diretamente, o coeficiente de atrito não é diretamente mensurável.

O atrito é considerado um dos fatores mais importantes e críticos no processo de trefilação. Esse atrito, causado pelo contato da fieira com o material trabalhado, é muito elevado, e influencia, conseqüentemente, na qualidade superficial do arame durante o processo de conformação (BYON et.al., 2010).

As forças de atritos entre superfícies metálicas são ocasionadas pelas forças de atração entre pequenas regiões em contato com as superfícies deslizantes. Devido às irregularidades destas superfícies, elas chegam a constituir uma solda no estado sólido em virtude de uma deformação plástica localizada. As forças de atrito têm origem na resistência de cisalhamento destas uniões. Estas forças podem também se originar como resultado de um processo de “sulcar” que as saliências do metal mais duro realizam sobre a superfície do metal mais macio (HELMAN; CETLIN, 1993).

Em razão das forças de atrito, que provocam aquecimento e desgastes, mesmo que as superfícies sejam cuidadosamente trabalhadas, quando examinadas ao microscópio haverá saliências e reentrâncias que ocasionam interação e intertravamento superficial (MARTINEZ, 1988).

O atrito é considerado prejudicial aos processos de conformação pois provocam os seguintes efeitos indesejáveis: má qualidade na superfície do arame, aumento do desgaste das feiras e alteração nas propriedades mecânicas devido à elevação da temperatura durante a redução, produção de fluxos irregulares, alteração na estrutura de tensão da deformação, aumento do consumo de energia necessária à deformação, dentre outras (HELMAN; CETLIN, 2005).

Na literatura encontra-se vários modelos para equacionar o efeito do coeficiente de atrito na conformação mecânica. O mais usual é o modelo de Coulomb-Amontons o qual considera inicialmente uma superfície em contato efetivo com outra superfície, cuja área é dada por A_s .

Como dito anteriormente, o deslizamento entre as superfícies necessitará de um esforço de cisalhamento suficiente para romper este contato, conforme equação 3.5.

$$F = K.A_s \quad (3.5)$$

Na equação 3.4 K é a resistência ao cisalhamento e A_s é área de contato entre as superfícies.

Segundo (HELMAN; CETLIN,2005), há aumento linearmente proporcional da área de contato do material até um limite devido ao encruamento, representado por A_n , como pode ser visto na Figura 3.8.

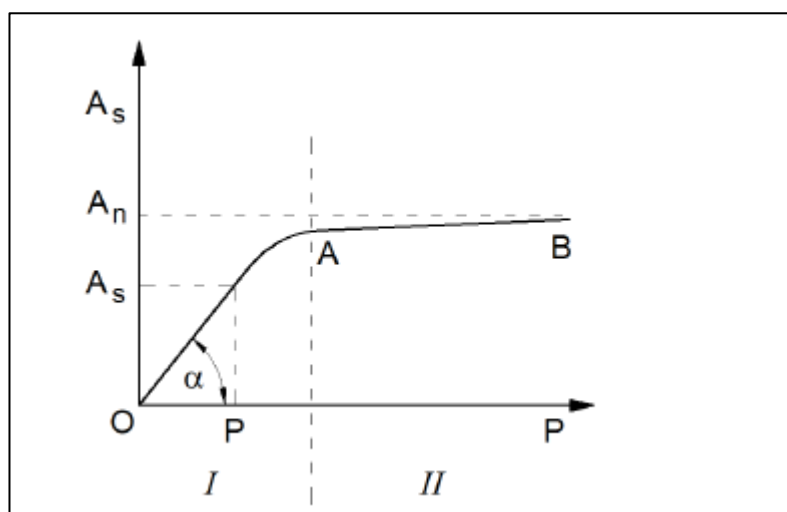


Figura 3.8- Esquema da variação da área de cisalhamento com a pressão p . (adaptado de HELMAN; CETLIN, 2005).

Na figura 3.8, através da relação entre catetos, tendo α como referência, deduz-se a equação 3.6.

$$A_s = P \cdot \text{tg}\alpha \quad (3.6)$$

Se substituir a equação 3.5 na equação 3.6 tem-se a equação 3.7.

$$F = K \cdot \text{tg}\alpha \cdot P \quad (3.7)$$

Na região I da figura 3.8, admite-se que:

$$K \cdot \text{tg}\alpha = \text{constante} = \mu \quad (3.8)$$

Sendo assim, a equação 3.7 resume-se a equação Coulomb:

$$F = \mu \cdot P \quad (3.9)$$

Dividindo-se a equação 3.8 pela área nominal (A_n), obtém-se equação de Amontons:

$$\tau = \mu \cdot p \quad (3.10)$$

Na equação anterior τ é a tensão cisalhante entre as superfícies e p é a pressão exercida de uma superfície sobre a outra.

Este modelo considera que o coeficiente de atrito de proporcionalidade μ é constante durante o processo, o qual depende apenas do tipo de lubrificante e propriedades dos materiais (fieira e arame). Tal modelo não leva em conta outros parâmetros como velocidade e geometria das matrizes.

Vale ressaltar que, de acordo com (HELMAN; CETLIN, 2005), nas situações reais não existe uma superfície de contato perfeita, cuja resistência ao cisalhamento seja K .

Sendo assim, admite-se que a tensão de cisalhamento deve ser multiplicada por um parâmetro de atrito m , menor do que a unidade, e que independe da pressão aplicada. A equação 3.11 relaciona a tensão cisalhante necessária ao movimento relativo à tensão de limite de escoamento sob cisalhamento do material em contato (k).

$$\tau = m \cdot k \quad (3.11)$$

A utilização de um desses modelos dependerá da pressão exercida nas áreas entre arame e fieira, além da eficiência dos lubrificantes. Exemplificando, em processos onde a penetração e arraste do lubrificante à interface de contato do arame e matriz, tal qual em forjamento a quente em matriz fechada, o modelo que utiliza o parâmetro de atrito m é melhor indicado, pois apresentará resultados mais confiáveis. Por outro lado, em processos onde a lubrificação é eficiente e a pressão entre as superfícies é reduzida o modelo de Coulomb pode ser aplicado (OZEL *et al.*, 2011).

Para evitar tanto o desgaste da fieira quanto do arame, utiliza-se materiais com baixa resistência ao cisalhamento chamados de lubrificantes (CETLIN; HELMAN, 2010). A função do lubrificante é criar uma camada de filme no arame minimizando assim a força

de atrito, contrária à direção da força de tração, garantindo assim boa qualidade superficial e temperatura adequada, o que reduz desgaste prematuro do núcleo das fieiras.

No processo de trefilação à seco são usados como lubrificante sabão de cálcio e ou sódio. A escolha da composição química do sabão depende principalmente de: velocidade, reduções, geometria das fieiras e tipo de material a ser trefilado.

De acordo com (WRIGHT, 2011), a camada de filme que os lubrificantes criam sobre a superfície do arame pode ser potencializada por dispositivos de melhoria de pressão, como fieira de pressão e misturadores de sabão nas caixas, estes fazem com que o lubrificante se movimente dentro da caixa, evitando assim a formação de túneis, garantindo boa lubrificação, como mostrado na figura 3.9.

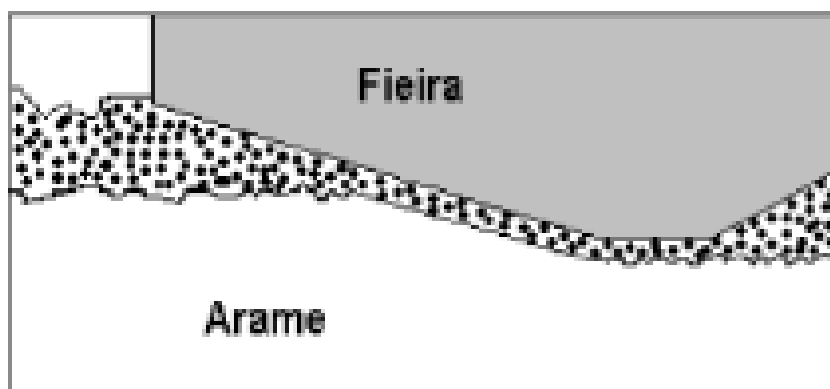


Figura 3.9- Desenho mostrando a formação do filme de lubrificante entre fieira e arame (Adaptado BRUSIUS (2009)).

Um dos parâmetros mais importante do sabão é seu ponto de fusão, ele é determinante na escolha do melhor lubrificante a ser utilizado no processo, levando-se em conta, claro, parâmetros de trefilação como redução, tipo de material trefilado e fieira, velocidade e refrigeração. A baixa temperaturas, o sabão não atinge seu ponto de amolecimento, o qual é a transição do estado sólido para pastoso, o que interfere significativamente na formação do filme. Nesse caso o arame ficará com aspecto brilhante, haverá presença de arranhões e linhas longitudinais ao longo do arame, o que provocará rupturas do material trefilado (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009). Por outro lado, se a temperatura for alta demais

irá modificar as propriedades físico-química do sabão impossibilitando também uma boa lubrificação, nesse caso percebe-se a formação de “charutos” ou a petrificação do sabão.

3.4 Envelhecimento por Deformação

O envelhecimento por deformação é o processo no qual os metais sofrem variações em suas propriedades tendo como consequência aumento da resistência e redução da ductilidade, através das interações entre os átomos de soluto intersticiais e deslocamentos durante ou após a deformação plástica. Quando essas variações ocorrem após a deformação plástica, esse fenômeno é chamado de envelhecimento estático ou envelhecimento após deformação e de envelhecimento dinâmico quando ocorrem durante a deformação (LESLIE, 1981).

O envelhecimento por deformação é amplamente utilizado como mecanismo de endurecimento. Na indústria automobilística, por exemplo, é utilizado o envelhecimento controlado, através do ajuste da composição química e de parâmetros do tratamento de secagem da pintura a que as chapas estampadas são necessariamente submetidas, a fim de aumentar a resistência do material (DEHGHANI; JONAS, 2000).

No processo de trefilação em aços de baixo carbono, é importante também o controle do envelhecimento que ocorre, inevitavelmente, devido ao aumento de temperatura decorrente entre o atrito do metal e fiação. Nesse caso, como dito anteriormente, o envelhecimento provocará aumento da resistência e queda da ductilidade e conseqüentemente acarretará a formação de trincas no material e desgaste prematuro da ferramenta. O controle do envelhecimento é feito através da adição de pequenas quantidades de elementos químicos formadores de carbonetos e nitretos ou pela diminuição da taxa de resfriamento após a laminação do fio-máquina, de forma a reter a menor quantidade possível de carbono em solução sólida supersaturada (BORATTO *et al.*, 1994).

O chamado “nitrogênio livre” no aço é uma das causas primárias de envelhecimento, seja estático quanto dinâmico, pois os átomos de nitrogênio ancoram nas discordâncias reduzindo sua mobilidade aumentando assim a resistência (COE *et al.*, 2006).

Assim como o nitrogênio, o carbono também age como obstáculo para a movimentação das discordâncias. Os átomos de carbono e nitrogênio, em temperaturas abaixo de 150°C, se difundem para as discordâncias geradas durante a deformação, formando as “atmosferas de Cottrell” e dificultando seu movimento. Uma vez que o carbono possui menor solubilidade na ferrita que o nitrogênio, a esta temperatura o fenômeno é principalmente afetado pela presença de nitrogênio em solução sólida. Em temperaturas mais altas (150 a 250°C) ocorre a decomposição da cementita, que fornece átomos de carbono para o ancoramento das discordâncias situadas nas interfaces ferrita-cementita (CASTRO, 1998).

3.4.1 Efeito da temperatura no envelhecimento

Sabe-se que durante o processo de trefilação ocorre o aumento da temperatura do aço devido à redução e atrito entre metal e ferramenta, o que pode provocar o efeito do envelhecimento que por sua vez altera as propriedades mecânicas do aço (BUONO *et al.*, 1998).

No processo de trefilação, a temperatura central do arame atinge aproximadamente 100°C, enquanto na região superficial pode estar na faixa de 200 a 450°C. É sabido que quanto maior a resistência do aço à deformação maior será a temperatura. De todo modo, o aumento de temperatura da camada superficial é proporcional ao coeficiente de atrito entre arame e fieira, que por sua vez depende diretamente do lubrificante e porcentagem de carepa residual. Além disso, quanto maior o diâmetro do arame, maior será o aumento da temperatura, devido à redução ser maior (FUJITA *et al.*, 1976).

A figura 3.10 mostra a variação da temperatura no centro e superfície do arame sob resfriamento constante. Observa-se que quanto maior o diâmetro do arame maior será a temperatura da superfície, pois essa está relacionada à redução e coeficiente de atrito, como dito anteriormente. Além disso, em torno de 1s, as temperaturas de superfície e centro se convergem, ou seja, se igualam, independentemente do diâmetro do arame.

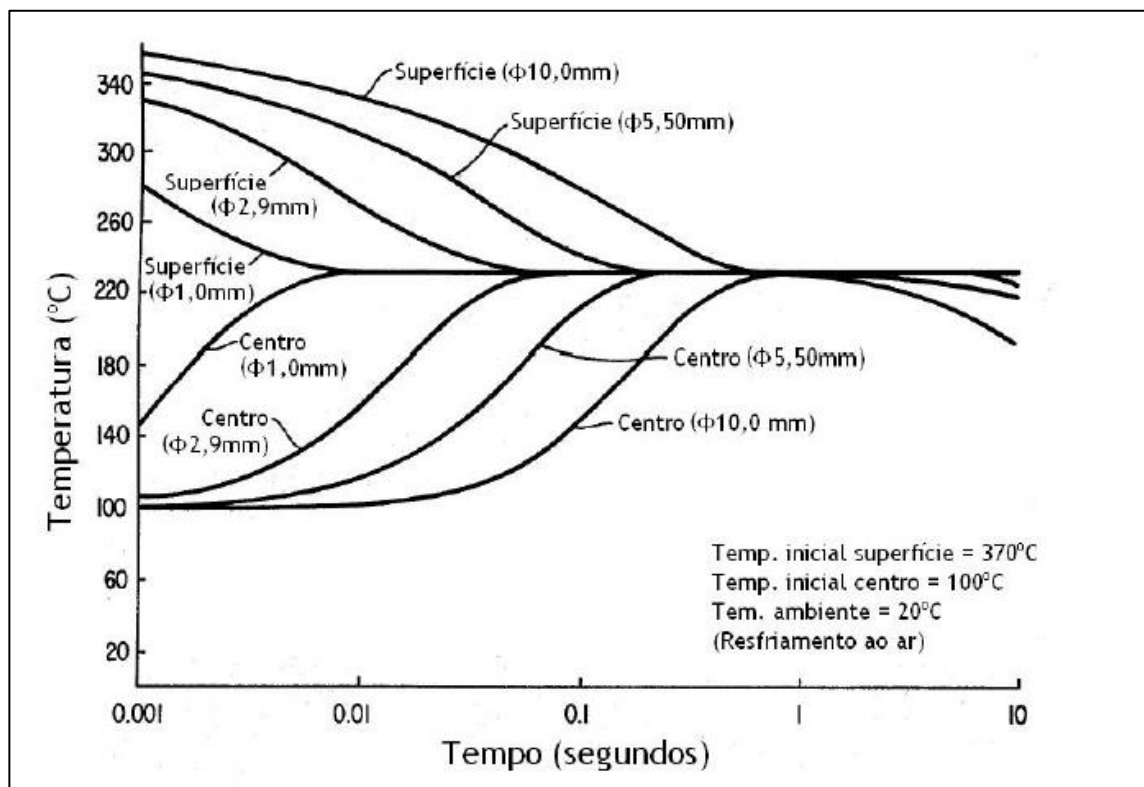


Figura 3.10- Variação da temperatura dentro e na superfície do arame sob resfriamento constante (FUJITA *et al.*, 1976).

Já a Figura 3.11 relaciona o coeficiente de atrito, f (assim descrito no gráfico da figura), com a dureza, em diferentes graus de aço, cujo diâmetro de arame para ambos foi 0,30mm. Observa-se que mesmo no grau 1090, o qual a resistência à deformação é maior que o 1080, possui menor variação de micro dureza, pois seu coeficiente de atrito é menor (0,091) ao aplicado no aço 1080, 0,098. Portanto, TARUI *et al.*, 1999, mostrou a forte influência do coeficiente de atrito na distribuição da dureza do aço no processo de trefilação e quão importante é o controle desse parâmetro.

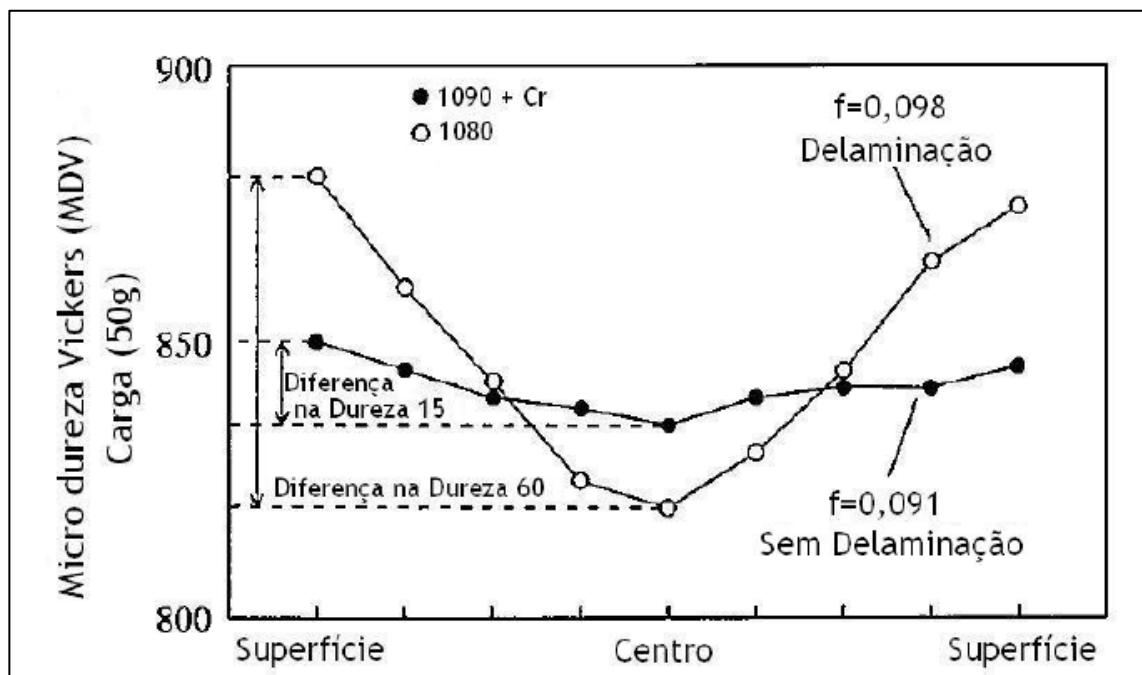


Figura 3.11- Variação da dureza de um arame de diâmetro 0,30mm em diferentes coeficientes de atrito (TARUI, *et al.*, 1999).

No trabalho de (YAMADA *et al.*, 1983), foram realizados vários testes com sistema de resfriamento após a fiação e comparados com resultados sem esse sistema. Verificou-se que com o sistema de resfriamento houve melhora significativa nas propriedades mecânicas do arame, conforme mostra Figura 3.12.

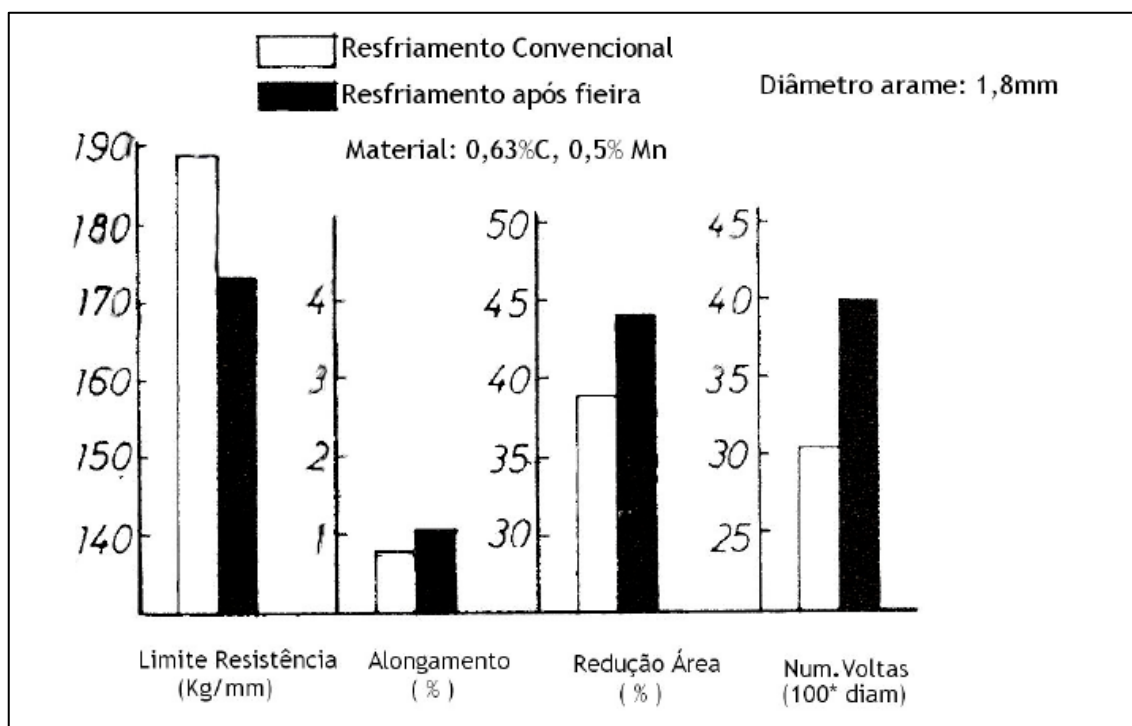


Figura 3.12- Variações nas propriedades mecânicas de arames com velocidades finais de trefilação de 85m/min em com e sem sistema de resfriamento após as feiras (YAMADA *et al.*, 1983).

Os resultados da Figura 3.12 mostraram que através do resfriamento do arame após a feira ocorreram mudanças nas propriedades mecânica do aço. Por exemplo, houve redução no limite de resistência e aumento no alongamento, o que explica a influência da temperatura no processo de trefilação, o que está, por sua vez, associado ao fenômeno de envelhecimento.

3.4.2 Influência do teor nitrogênio e efeito do boro

Conforme já foi dito anteriormente, o nitrogênio livre ancora nos contornos das discordâncias reduzindo sua mobilidade durante a conformação mecânica, alterando as propriedades mecânicas do aço. BUONO (1995), cita resultados de DIAS *et al.* (1989) à respeito do teor de nitrogênio solúvel, Ns, no aumento do limite de escoamento e na redução de área de estricção, Z, durante o processo de envelhecimento de aços perlíticos trefilados a 86% de redução de área, conforme pode ser visto na Figura 3.13.

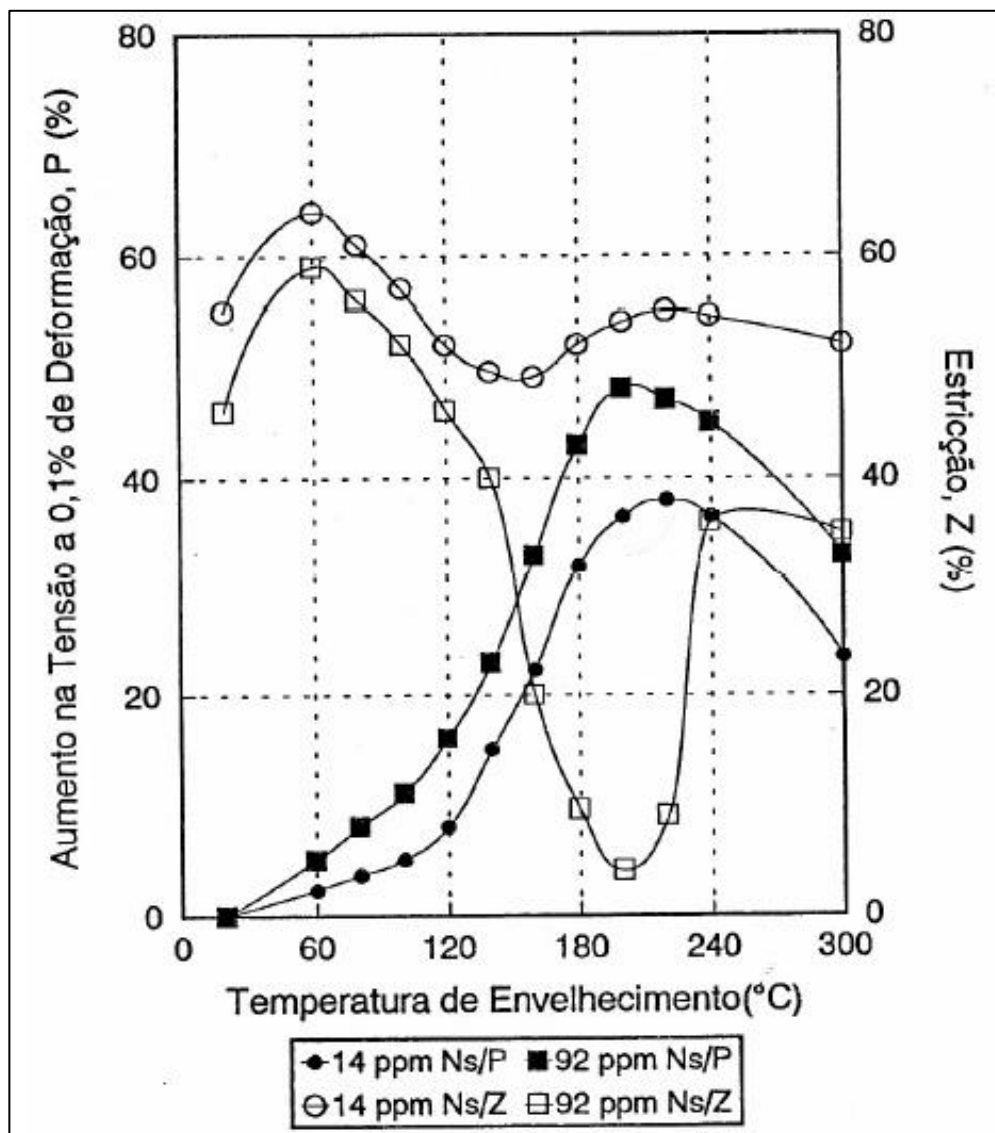


Figura 3.13: Influência do teor de nitrogênio solúvel na variação percentual do limite de escoamento a 0,1% de deformação (P) e da estrição(Z) em aço perlítico trefilados a 86% de redução de área e envelhecidos por 5 minutos entre 30 e 300°C (GONZALEZ *et al.*(1989) citado por BUONO, 1995).

A figura 3.13 acima mostra que independentemente da temperatura de envelhecimento, quanto maior o teor de Ns (nitrogênio solúvel) maior será a tensão de deformação, dado por P, e menor a área de estrição (Z). Isso demonstra o quanto o nitrogênio atua sobre o fenômeno de envelhecimento, o qual altera as propriedades mecânicas do aço e consequentemente na trefilabilidade.

A fim de minimizar o teor de Ns, é comum adicionar elementos de liga para neutralizar o nitrogênio solúvel. Um desses elementos é o boro, pois ele tem maior tendência em formar nitretos que óxidos e carbonetos, além de não serem prejudiciais ao arame, uma vez que são pequenos. Outro fator que torna o uso do boro mais atrativo que outros elementos como, vanádio, alumínio e titânio, é seu baixo custo (COE *et al.*, 2006).

Outro ponto importante a ser destacado é a eficiência estequiométrica do boro, uma vez que para reagir com 1 mol de nitrogênio é necessário 1 mol de boro. A quantidade de elemento formador de nitreto necessária para ligar com o nitrogênio livre é dependente do peso atômico do nitrogênio, do peso atômico do elemento formador de nitreto e os coeficientes da reação química balanceada (COE *et al.*, 2006). Portanto a fórmula que define a quantidade necessária do elemento formador de nitreto para estabilizar o nitrogênio do aço (ppm) é dada pela equação 3.12:

$$Q_{FN} = \frac{(QN * PM_{FN} * Coeficiente\ FN)}{(PM_N * Coeficiente\ N)}, \text{ onde:} \quad (3.12)$$

Q_{FN}: Quantidade necessária do elemento formador de nitreto para estabilizar o nitrogênio do aço (ppm).

Q_N: Quantidade de nitrogênio livre a ser removido do aço (ppm).

PM_{FN}: Peso molecular do elemento formador de nitreto (g/mol).

Coeficiente FN: Coeficiente do elemento formador de nitreto resultante da equação da reação balanceada.

PM_N: Peso molecular do nitrogênio (g/mol).

Coeficiente N: Coeficiente do nitrogênio resultante da equação da reação balanceada.

Aplicando a fórmula acima, para cada 1ppm de nitrogênio a ser neutralizado, considerando a equação de reação $N+B \longrightarrow NB$, obter-se-á 0,77ppm de boro, ou seja, para cada 1ppm de N são necessários 0,77ppm de B. Por outro lado, se o elemento formador for o titânio seriam necessários 3,42ppm desse elemento e, se fosse o nióbio 6,64ppm.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de trefilação de arames a serem recozidos da unidade industrial da Arcelormittal Juiz de Fora, objeto de estudo desse trabalho, consiste na conformação mecânica do fio máquina, cujo grau de aço é o equivalente ao ABNT 1005, com bitola 5,5mm. As máquinas trefiladoras são da fabricante alemã KOCH com 14 passes de redução, incluindo o *dead block*, chegando a velocidade final de 23m/s e produzindo arames com bitola final de 1,65; 1,30; 1,24 e 1,15mm, dispostos em rolos de 40 e 300kg.

4.1 Análise da composição da carepa

Conforme descrito anteriormente no capítulo 3, subitem 3.2, na decapagem mecânica, que é o caso do processo em estudo, é importante que a carepa possua pelo menos 80% de FeO, wustita, pois esse óxido é mais fácil de ser extraído nos roletes do decalaminador.

Sendo assim, serão analisadas amostras do fio máquina e caso a porcentagem de wustita (FeO) seja inferior a 80% será conduzido um planejamento de experiência (D.O.E, *design of experience*) no laminador STELMOR objetivando aumento da % de wustita bem como a espessura da carepa.

Para o estudo da composição dos óxidos, serão analisadas no laboratório da gerência técnica da unidade industrial da Arcelormittal, 10 amostras do fio máquina, a fim de se verificar a composição da carepa bem como sua espessura. Para tanto, cada amostra será preparada da seguinte forma:

1. Corte da secção transversal;
2. Prensagem e montagem da amostra na baquelite;
3. Lixamento à base de água, uso de 3 lixas, a fim de remover imperfeições;
4. Polimento em duas etapas: primeiro com feltro grosso e depois fino, usando alumina para umedecer o feltro. O objetivo dessa etapa é dar acabamento a amostra e torná-la espelhada;
5. Secagem com ar comprimido e depois com ar quente, em seguida limpeza com algodão seco;

6. Ataque com reagente nital 2% (ácido nítrico e álcool) em torno de 4 segundos, para que o reagente contorne os grãos de ferrita, colora de preto a perlita e divida as camadas de óxidos;
7. Lavagem com água para evitar que o reagente continue atuando;
8. Secagem com ar comprimido;
9. Análise da amostra no microscópio ótico da marca LEICA, onde foram ampliados em 500 vezes e usada escala milimetrada e própria tabela de conversão da máquina para determinar espessura total da carepa bem como de cada óxido.

De acordo com a figura 3.7, citada no subitem 3.2 desse trabalho, o qual foi extraída da dissertação de (CUNHA, 2007) observa-se que mais de 80% de wustita é formada quando a temperatura do aço está entre 850 e 900°C. O autor ainda cita que é importante que as espiras não sofram resfriamento brusco, pois isso pode acarretar na quebra da wustita e formação de magnetita em seu lugar, prejudicando assim a extração de carepa o que pode ocasionar rupturas no arame e desgaste prematuro das fieiras.

Sendo assim, o D.O.E terá duas variáveis em dois níveis, totalizando 4 experimentos (2^n , onde $n=2$). As variáveis escolhidas para o experimento são: temperatura e % de abertura do 4º ventilador do STELMOR, tendo os níveis de 860 e 880°C para temperatura e 50 e 100% para o 4º ventilador, sendo que 100% significa que está completamente aberto, ou seja, soprando (resfriando) as espiras. O controle de temperatura é feito pela cabine central do laminador chamado púlpito RH, através da temperatura desejada as válvulas de água do TTR (estação de tratamento térmico) abrem e fecham considerando-se a vazão e tempo de abertura e fechamento.

A tabela IV.1 apresenta as interações das variáveis e seus níveis a serem testados. Para cada condição experimental será utilizado uma corrida ou 50 tarugos que se transformarão em fio máquina no laminador. Em cada fio máquina será coletada 100mm de espira após o descarte habitual das espiras “quentes”, que são aquelas que não sofreram tratamento térmico devido ao *delay* da abertura das válvulas no TTR, ou seja, esse descarte é inerente ao processo de laminação.

Tabela IV.1- Interação das variáveis e seus respectivos níveis do D.O.E- Fonte:Autor.

	Temperatura do formador de espiras (°C)	Abertura do Ventilador 1	Abertura do Ventilador 2	Abertura do Ventilador 3	Abertura do Ventilador 4	Abertura do Demais Ventiladores
Condição 1	860	0	0	0	50	100
Condição 2	860	0	0	0	100	100
Condição 3	880	0	0	0	100	100
Condição 4	880	0	0	0	50	100

Para cada amostra será analisada a espessura da carepa bem como a composição dos óxidos, conforme procedimento citado anteriormente. As análises dos resultados serão realizadas no *software* estatístico MINITAB 18, o qual permitirá estudar a influência de cada variável, seu nível e as interações, se são significativas ou não.

4.2 Análise da relação de boro e nitrogênio

Segundo BUONO (1995) os átomos de nitrogênio livres ancoram os contornos das discordâncias reduzindo sua mobilidade aumentando a resistência e reduzindo a capacidade do aço em se alongar. Para reduzir esse efeito adiciona-se boro com o objetivo de se formar nitreto de boro.

A fim de se verificar se há correlação entre rupturas de arame e relação B/N, será analisada durante um mês de produção em uma mesma máquina (MT238) todas interrupções do processo relacionadas as rupturas relacionando-as com a composição química da corrida. Os dados serão plotados no MINITAB 18 onde realizar-se-ão as análises estatísticas.

Caso o coeficiente de correlação seja forte, próximo de 1,0, será solicitado à aciaria da unidade da Arcelormittal em Juiz de Fora que a relação B/N seja modificada com base na equação 3.12 apresentada no subitem 3.4.2:

$$Q_{FN} = \frac{(Q_N * PM_{FN} * \text{Coeficiente } FN)}{(PM_N * \text{Coeficiente } N)}, \text{ onde:} \quad (4.1)$$

A reação do boro com nitrogênio é:



Sendo que:

$Q_N = 1 \text{ ppm}$;

$PM_{FN} =$ massa molar do boro, 10.811g/mol;

Coeficiente $FN = 1$;

$PM_N =$ massa molar do nitrogênio, 14.0g/mol;

Coeficiente $N = 1$;

Substituindo-se os valores na equação 3.10 obtém-se 0,77 ou aproximadamente 0,80. Em outras palavras, são necessários 0,80ppm de boro para neutralizar cada ppm de nitrogênio livre.

As corridas processadas com relação B/N na faixa determinada, 0,80 a 1,20, serão processadas em uma única máquina, MT238, serão computadas as ocorrências de rupturas de arame e as amostras serão segregadas para avaliação qualitativa.

4.2.1 Determinação do grau de encruamento

Foram coletadas amostras de arames trefilados em duas corridas distintas (diferentes relações B/N) no último passe para ensaios de tração a fim de verificar se há diferenças nas propriedades mecânicas bem como determinar o grau de encruamento.

Com os dados obtidos do ensaio, determinar-se-á a tensão e a deformação verdadeira, através das seguintes fórmulas, do limite de escoamento até a estrição:

$$\sigma v = \sigma * (\varepsilon + 1), \text{ em que:} \quad (4.2)$$

σv é a tensão verdadeira;

σ é a tensão de engenharia (obtida no ensaio);

ε é a deformação de engenharia (obtida no ensaio).

$$\varepsilon v = \text{Ln}(\varepsilon + 1) \quad (4.3)$$

Como dito anteriormente, o grau de encruamento inicia-se no limite de escoamento. Para se definir esse ponto, será traçada uma reta paralela à curva da tensão *versus* deformação de engenharia e plotada no ponto onde a deformação é 0,2%.

O grau de encruamento é obtido através da equação de Hollomon considerando os pontos que se iniciam no limite de escoamento a estrição:

$$\sigma v = K x \varepsilon^n \quad (4.4)$$

$$\text{Ln}(\sigma v) = \text{Ln}(K x \varepsilon^n) \quad (4.5)$$

$$\text{Ln}(\sigma v) = \text{Ln}(K) + \text{Ln}(\varepsilon^n) \quad (4.6)$$

$$\text{Ln}(\sigma v) = \text{Ln}(K) + n\text{Ln}(\varepsilon) \quad (4.7)$$

Adotando $Y(x) = A + B(x)$, basta usar a função logarítmica da tensão e deformação verdadeira e plotar os dados em um gráfico de dispersão. A equação da linha de tendência ou de regressão será equivalente a equação 4.7. Sendo assim, n será o coeficiente angular da equação da reta.

4.3 Análise da influência da temperatura na lubrificação

Conforme mencionado anteriormente, a aderência do sabão ao arame é de extrema importância para o processo de trefilação, pois reduz o atrito gerado entre o aço e o núcleo da ferramenta, evitando desgaste prematuro das fieiras e rupturas de arames.

A temperatura do arame durante o processo de trefilação é fundamental para manter as propriedades físico-química do lubrificante. Dessa forma, será analisada a influência da temperatura do arame durante a trefilação assim como a vazão de água usada no resfriamento dos blocos.

Para analisar a influência da temperatura à aderência do sabão ao arame, serão realizadas análises de camada residual de sabão no último passe de trefilação em duas condições: uma com a vazão de água atual dos blocos e outra após intervenção da manutenção, com as respectivas temperaturas.

Para tanto, será escolhida uma máquina, MT241, a qual opera a 23m/s e produz rolos de 300kg cuja bitola é 1,24mm. Será medida a temperatura da última espira do arame em cada bloco. De acordo com os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes de sabão, a temperatura máxima que o arame pode chegar na última espira do bloco é de 80°C, ou seja, após sofrer a troca térmica com a bobina, sua última espira, a que irá entrar na sequência na próxima engraxadeira e fieira, tem que ter no máximo 80°C. Para se realizar a medição da temperatura será usado um pirômetro manual.

Para verificar a de água nos blocos, será utilizado um balde de capacidade de 60l e um cronômetro. A válvula de água será aberta em sua totalidade e se medirá o volume de água até 30s. O valor medido será multiplicado por 2 para se ter a vazão em l/min. O fabricante da máquina, KOCH, define como 18l/min a vazão mínima de água nos blocos, assim esse será o referencial.

Os sabões utilizados na trefilação de arames finos, objeto de estudo desse trabalho, são à base de cálcio, nos três primeiros passes, e sódio do 4° ao 13° passe.

A fim de se determinar a influência da temperatura na lubrificação do sabão será realizado o teste de camada residual nas duas condições citadas acima. Esse teste consiste em verificar a quantidade de lubrificante restante no arame trefilado, último passe (14°), por m² de material. Tal método consiste nos seguintes passos:

1. Coleta de 10 amostras consecutivas de arame trefilado no último passe com 80mm de comprimento cada;
2. Medição do diâmetro do arame;
3. Armazenagem das amostras em recipiente seco e vedado, a fim de se evitar a umidade, já que há lubrificante à base de sódio o que pode contaminar os resultados;
4. Medição da massa das amostras em balança de precisão (M1 em gramas);
5. Banho das amostras em solução de 50% de ácido clorídrico (HCl);
6. Aguardar até o término da efervescência;
7. Retirar as amostras e secar em ar comprimido seguido de algodão seco;
8. Medição da massa das amostras após o banho e secagem (M2 em gramas);
9. Os dados de P1, P2, bitola e comprimento serão inseridos em planilha de Excel para cálculo da camada residual de sabão, cuja fórmula é:

$$CRS = \frac{[(M1 - M2) \times 10^6]}{n \times c \times \pi \times \theta}, \text{ em que:} \quad (4.8)$$

CRS= camada residual de sabão, dado em g/m²;

M1= peso das amostras antes do banho, dado em g;

M2= peso das amostras após o banho e a secagem, dado em g;

n= número de amostras;

c= comprimento das amostras, em mm;

π = constante Pi;

θ = diâmetro ou bitola das amostras (mm).

5. RESULTADOS

5.1 Análise das causas de rupturas – PDCA

A fim de se conhecer as causas das rupturas de arames no processo de trefilação da unidade da Arcelormittal em Juiz de Fora, foi realizado o PDCA.

Conforme dito anteriormente, o processo é composto por 6 máquinas de trefilar, cuja bitola do fio máquina é sempre 5,5mm e grau de aço equivalente ao ABNT1005 e essas máquinas produzem arames de bitolas: 1.10, 1.15, 1.24, 1.30 e 1.65mm, tendo 1.24mm como principal produto.

O gráfico da figura 5.1 apresenta resultados da eficiência do processo de trefilação bem como a meta. O problema que motivou o trabalho foi a eficiência do processo abaixo da meta orçada. Observa-se pelos dados da figura 5.1 que em nenhum dos meses analisados a meta foi alcançada, tendo uma média no período de aproximadamente 47%. Isso significa que 53% do tempo disponível as máquinas desse processo ficaram paradas, por diversos motivos. Em outras palavras, em um mês de 30 dias, 720 horas, cada máquina ficou parada por 382 horas.

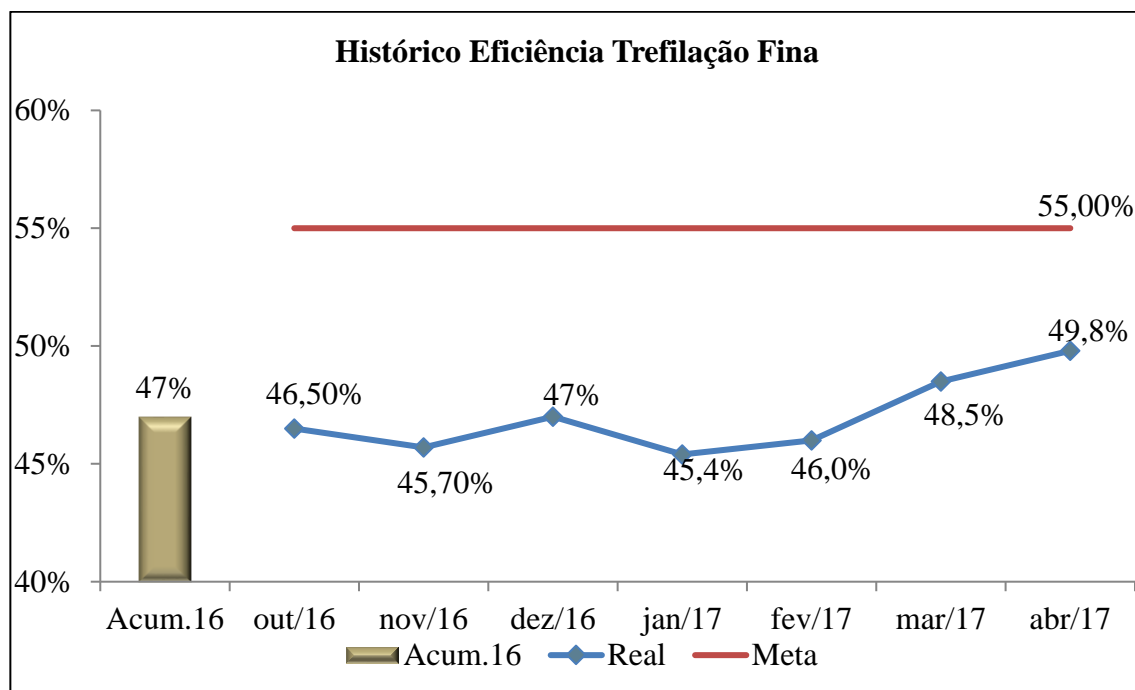


Figura 5.1- Histórico do problema *versus* meta.

É necessário relacionar a perda de eficiência com a de produção para mensurar possíveis ganhos em termos financeiros. Para tanto, deve-se considerar a produtividade das máquinas, cuja fórmula é deduzida a seguir:

$$Pr = m \div t \quad (5.1)$$

Onde Pr é a produtividade dada em Kg/hr, m é a massa e t é o tempo.

Pela fórmula de densidade e isolando-se m, tem-se que:

$$m = \rho * V, \text{ em que } V \text{ é o volume} \quad (5.2)$$

Substituindo a equação 5.2 em 5.1, tem-se que:

$$Pr = \rho * V/t \quad (5.3)$$

Sabe-se que o volume é dado por:

$$V = A * l \quad (5.4)$$

A área de secção transversal, A, é dado por:

$$A = \pi * \frac{\Phi^2}{4}, \text{ onde } \Phi \text{ é a bitola do arame final} \quad (5.5)$$

Inserido essas variáveis na equação 5.3, resulta-se:

$$Pr = (\rho * \pi * \Phi^2 * l) / (4 * t) \quad (5.6)$$

O comprimento, l, dividido pela unidade de tempo, podem ser substituídos pela velocidade (v), que por sua vez é dado em m/s.

$$Pr = (\rho * \pi * \Phi^2 * v) / 4 \quad (5.7)$$

Dessa forma, substituindo os valores de densidade (7.860Kg/m³), π (3,14) e as conversões de unidade de medida (mm² para m² e 1 hora para segundos), chega-se a seguinte fórmula geral para produtividade:

$$Pr = \Phi^2 * v * 22,2 \quad (5.8)$$

Considerando a bitola final 1,24mm, essa compõe maior porcentagem de *mix* de produtos, a velocidade final 23m/s e o tempo de parada por máquina 382 horas (53% do tempo disponível, considerando mês de 30 dias), equivale a perda de 300t por máquina, totalizando 1.800t em todo processo.

Através da análise de fenômenos foi observado que todos os equipamentos apresentaram eficiência abaixo da meta, conforme figura 5.2. Logo o problema não está localizado em uma máquina específica.

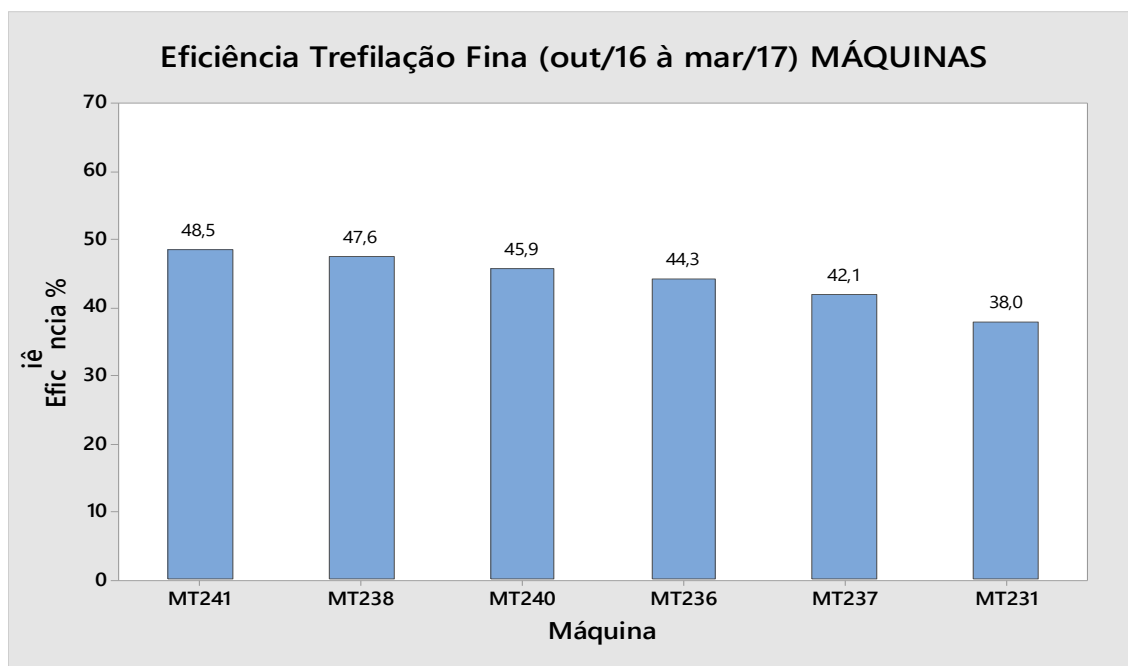


Figura 5.2- Análise de fenômeno- Eficiência por máquina.

Ainda na fase de análise de fenômenos, verificou-se através do gráfico de Pareto, figura 5.3, que 75% das paradas têm como origem as operacionais.

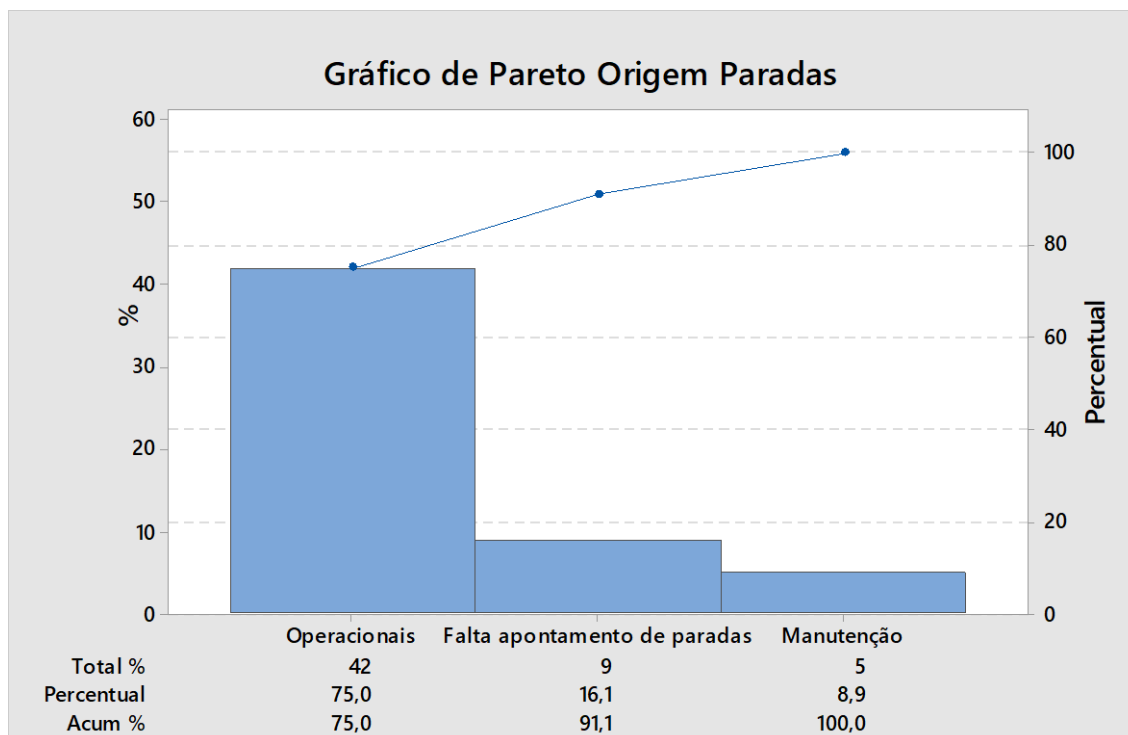


Figura 5.3- Análise de fenômeno- Origem de paradas.

A estratificação das paradas operacionais mostrou que 33% do total são causadas por arrebitamentos ou rupturas de arames, conforme figura 5.4 (identificadas como AR). Seguida por TF (troca de feiras) 19%. Sendo assim, a principal causa de interrupções no processo de trefilação e, conseqüentemente perda de eficiência, são as rupturas de arames.

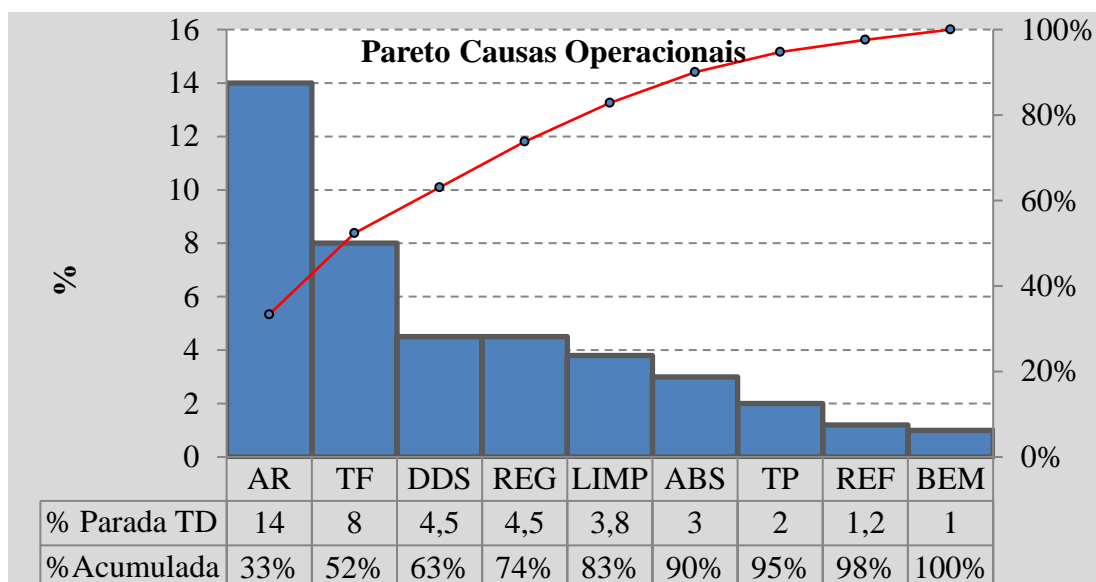


Figura 5.4- Análise de fenômeno- Estratificação paradas operacionais.

Em seguida foi realizado o diagrama de Ishikawa, através de *brainstroming* feito com a equipe operacional e manutenção, permitindo melhor compreensão das ocorrências de rupturas de arames, conforme figura 5.5.

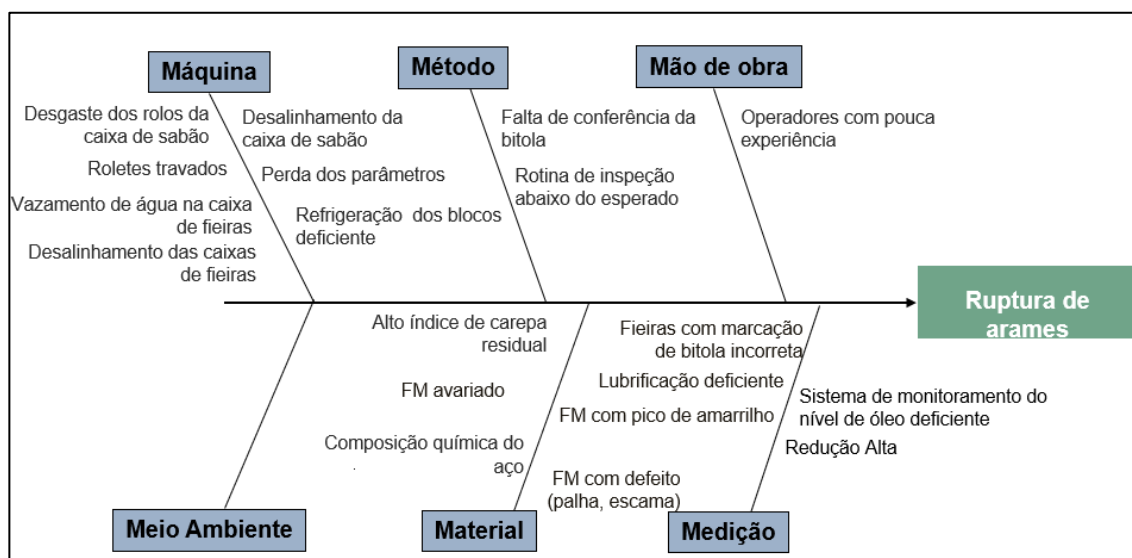


Figura 5.5- Análise de processos- Diagrama de Ishikawa, rupturas de arames.

Em seguida foram selecionadas algumas causas primárias do diagrama de Ishikawa objetivando verificar se de fato elas ocorrem além de melhor compreensão de seus efeitos no processo, tais causas foram objeto de estudo do presente trabalho. Essas foram:

- Refrigeração dos blocos deficientes;
- Alto índice de carepa residual;
- Composição química do aço;
- Lubrificação deficiente.

As demais causas foram tratadas à parte através do plano de ação do PDCA.

5.2 Resultados da análise da composição da carepa

Os resultados da composição dos óxidos da carepa bem como sua espessura estão apresentados na tabela V.1. Os parâmetros de processo dessas amostras foram: temperatura do Stelmor em 820°C e todos ventiladores 100% abertos.

Tabela V.1- Resultados das amostras de composição da carepa (wustita e magnetita). Fonte: autor.

Amostra	Wustita- FeO- (μm)	Magnetita- Fe_3O_4 - (μm)	Total (μm)
1	5	7	12
2	4	6	10
3	5	6	11
4	6	7	13
5	5	5	10
6	4	6	10
7	5	6	11
8	6	7	13
9	4	7	11
10	5	6	11

Observa-se que a média da espessura da wustita, FeO, foi 4,9 μm , com desvio padrão em torno da média igual a 0,74, demonstrando baixa variabilidade. Portanto, considerando-se as médias dos resultados da medição de espessura tanto para a wustita quanto para o total, esse óxido representa apenas 44% do total. Segundo (CUNHA, 2007), para decapagens mecânicas é importante que a wustita esteja presente em pelo menos 80% do total.

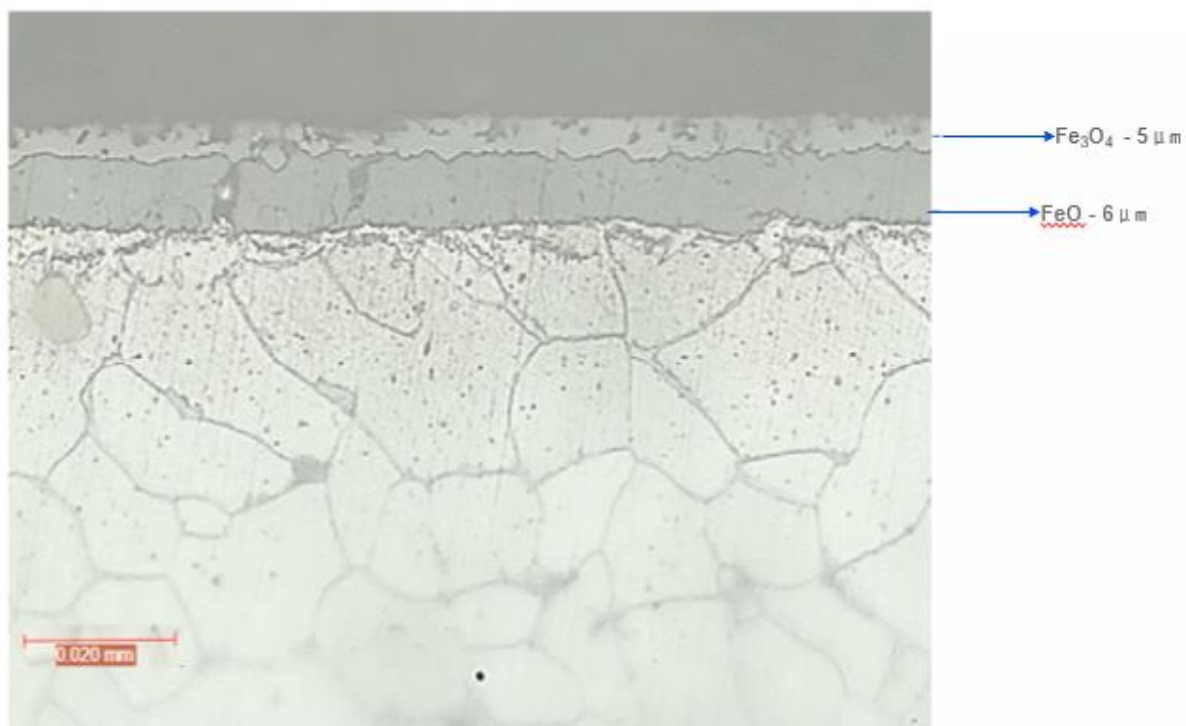


Figura 5.6- Amostra de fio máquina, ataque nital 2%, ampliando 500x. Fonte: autor.

A Figura 5.7 mostra a ocorrência de carepa residual após a decapagem e o primeiro passe de trefilação, evidenciando os resultados realizados em laboratório. Os pontos mais escuros são os óxidos que permaneceram no arame, alguns exemplos estão destacados pela seta na figura 5.7. O ideal seria que todas as espiras estivessem completamente brancas, pois assim estariam com o filme de sabão aderido. Isso significa que boa parte do aço trefilado não está adequadamente lubrificado, o que pode ocasionar rupturas e desgaste das feiras.

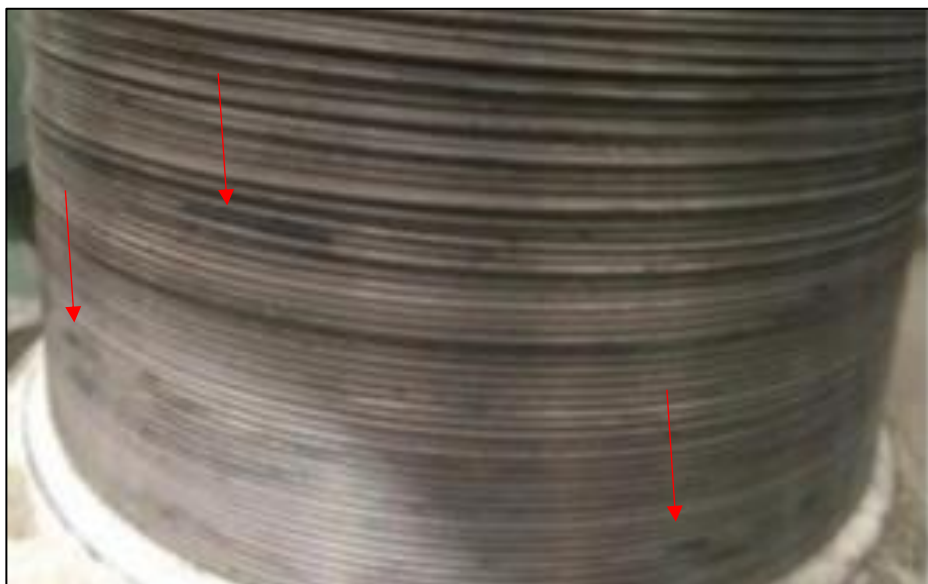


Figura 5.7- Carepa residual após primeiro passe. Fonte: autor.

Portanto, foi desenvolvido o D.O.E (*design of experience*) a fim de se determinar os parâmetros ótimos do processo de resfriamento das espiras no STEMOR, no laminador da unidade industrial de Juiz de Fora.

As variáveis do processo estudadas foram a temperatura das espiras na entrada do STEMOR, 860 e 880°C, e abertura do 4° ventilador, 50 e 100%, conforme definido no item 4.1. Tais variáveis foram definidas com base nos resultados do trabalho de (CUNHA, 2007) o qual concluiu que quanto maior a temperatura do STELMOR maior será a espessura da carepa e porcentagem de FeO.

As variáveis e níveis se interagem formando 4 condições de experimentos, 2². Para cada condição do experimento foram processadas 50 peças ininterruptamente. Foram coletadas amostras de cada condição e analisadas em laboratório para definir a % de wustita na carepa, essa foi a variável resposta. Os resultados foram plotados no Minitab 14, software estatístico.

Os resultados da figura 5.8 mostraram que a variável abertura do 4° ventilador foi mais significativa do que a temperatura, cruzou a linha de referência, ao nível de 0,05. Observa-se ainda que não houve interação significativa entre as variáveis.

O fato de a variável temperatura não ter sido significativa na obtenção de maior % de FeO, não implica dizer que seja desprezível. Os níveis utilizados já foram relativamente altos, fundamentados na literatura, além de serem próximos um ao outro, 860 e 880°C.

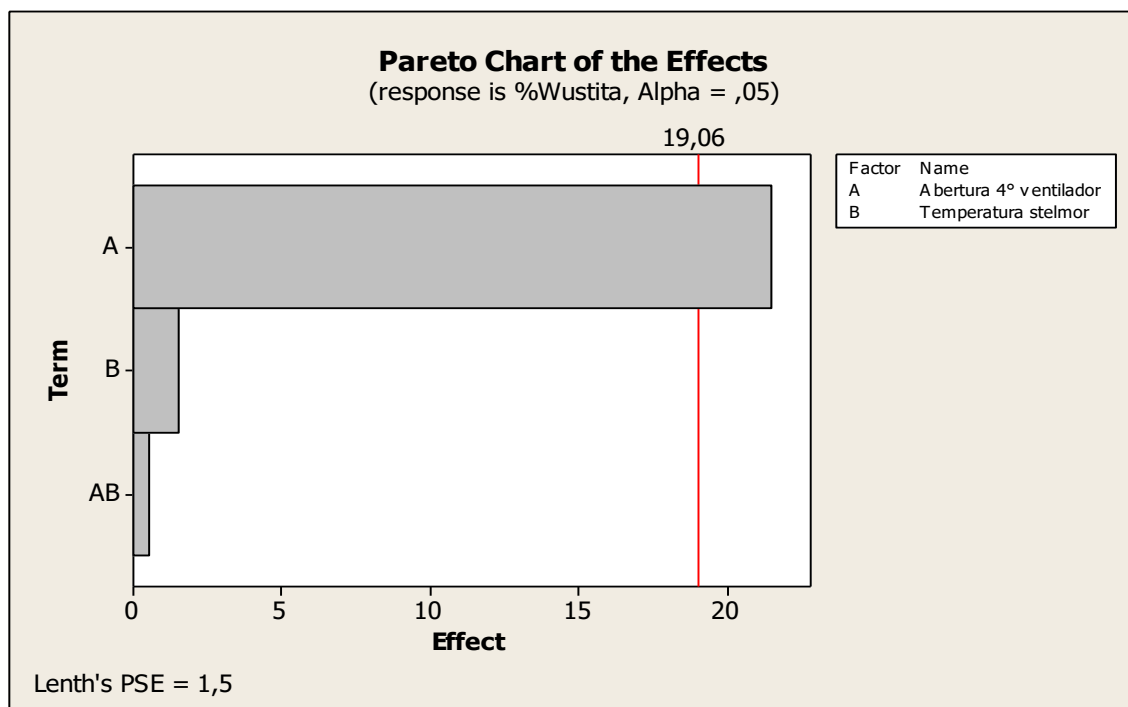


Figura 5.8- Gráfico Pareto da variáveis do D.O.E. Fonte: autor.

Os resultados da % de wustita, que é a espessura do FeO pelo total de carepa na amostra, são mostrados na figura 5.9. Nota-se pela inclinação da reta a significância das variáveis na quantidade de wustita. A abertura do ventilador em 50% obteve mais de 75% de FeO, independentemente se a temperatura é 860 ou 880°C. Isso deve-se ao fato das espiras ficarem mais tempo expostas a essas temperaturas possibilitando a formação de mais wustita.

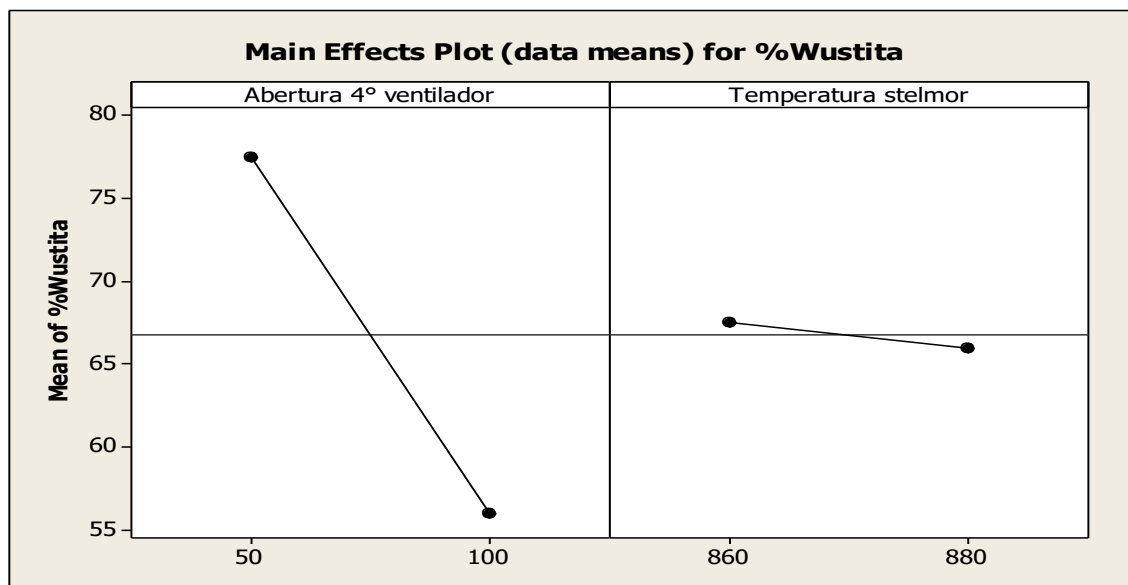


Figura 5.9- Gráfico das variáveis *versus* resposta. Fonte: autor.

A figura 5.10 exibe a composição de óxidos na condição 4 do D.O.E, temperatura 880°C e abertura de 50% do 4º ventilador, evidenciando aumento significativo da wustita. Nessa condição a porcentagem de FeO foi 75%, anteriormente esse óxido era em torno de 44%.

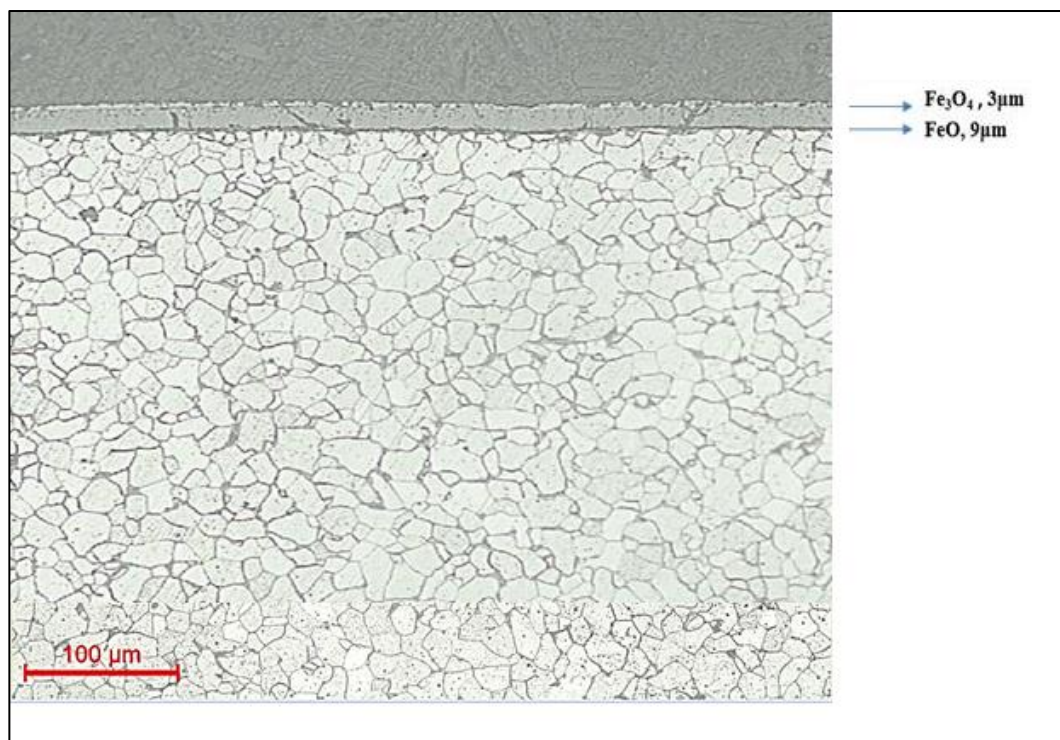


Figura 5.10- Amostra de fio máquina, ataque nital 2%, ampliando 500x. Fonte: autor

5.3 Resultados das análises da relação B/N

Verifica-se no gráfico da figura 5.2 uma forte correlação entre as ocorrências de ruptura de arames e relação de B/N, em que o coeficiente de determinação R^2 foi 0,962, ou seja, 96.2% dos dados observados podem ser explicados pelo modelo apresentado.

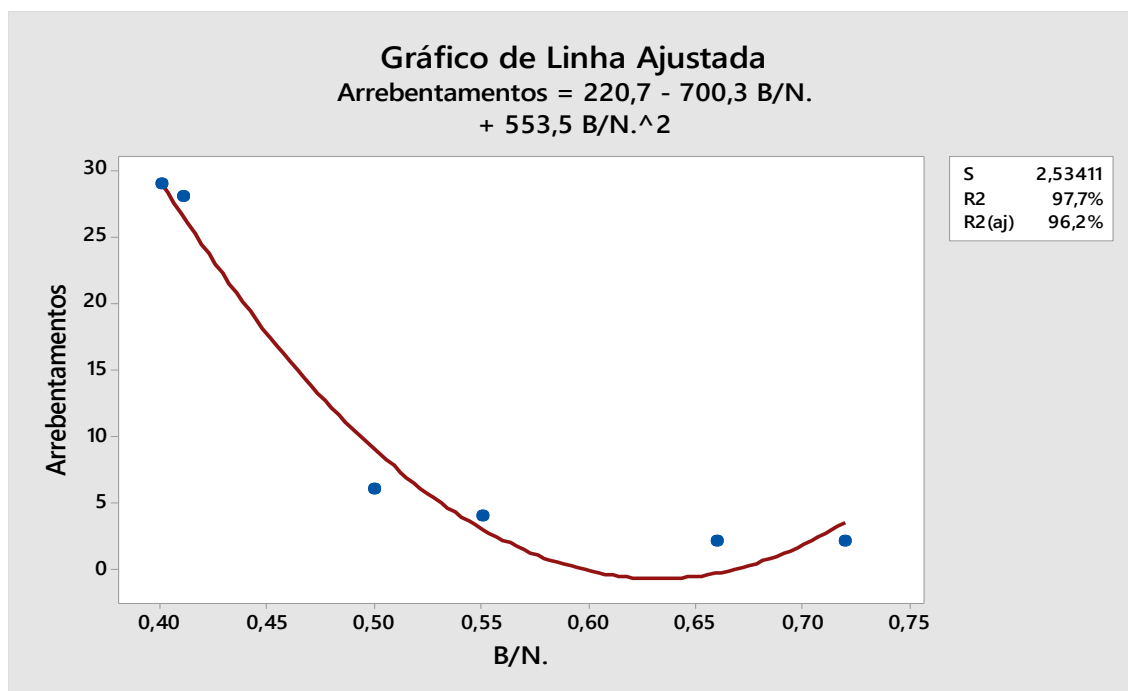


Figura 5.11- Gráfico de correlação entre arrebitamentos (rupturas de arames) e relação B/N. Fonte: Autor.

Tal modelo demonstra que quanto menor a relação B/N maior será a quantidade de rupturas de arames e o contrário é válido, quanto maior a relação B/N menor é a ocorrência de arrebitamentos. Exemplificando, nas corridas que tiveram relação B/N de 0,40 tiveram 29 rupturas de arames e em corridas cuja relação B/N foi de 0,72 as ocorrências de arrebitamentos foram de apenas 3.

A figura 5.12 apresenta as ocorrências de rupturas de arame por passe de trefilação dessas amostras. Verifica-se alta incidência de rompimento no último passe, 47, representando 64% do total. Ressalta-se que todas são provenientes de fio máquina cuja relação B/N era 0,40 e 0,45. Isso pode ser explicado pelo aumento da densidade de deslocamentos ocasionado pelas reduções nos passes de trefilação e, como há mais nitrogênio livres

nessas peças, as quais impedem seus deslocamentos devido ao ancoramento, aumentam assim o limite de resistência e reduzem a ductilidade, provocando ruptura do arame.

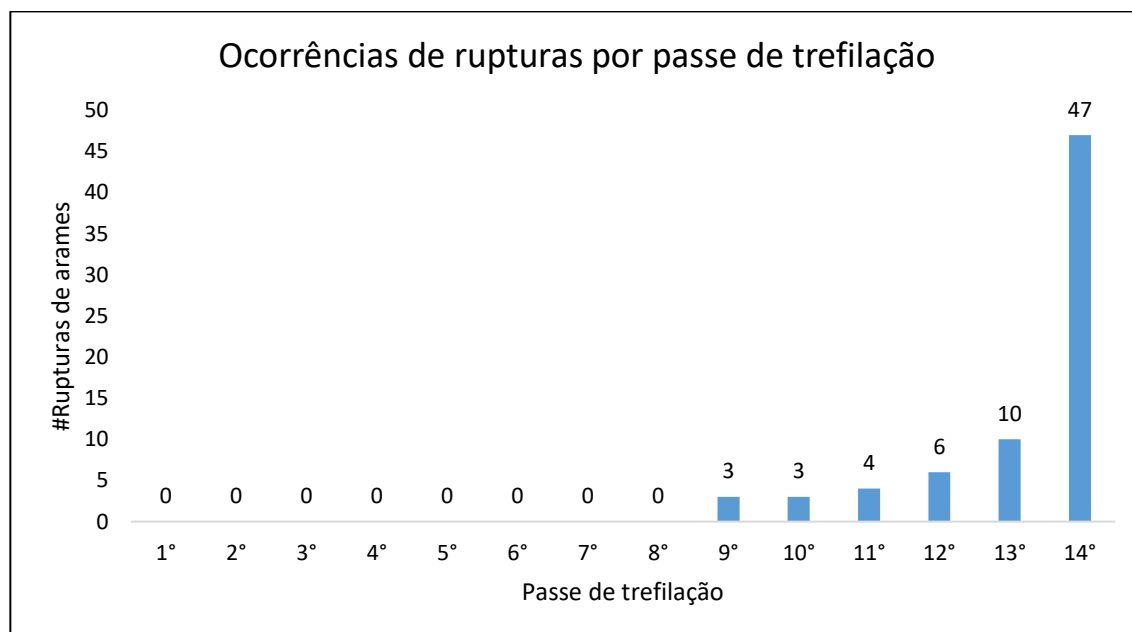


Figura 5.12- Gráfico de ocorrências de rupturas *versus* passes de trefilação. Fonte: Autor.

Conforme discutido anteriormente, o envelhecimento altera as propriedades mecânicas do aço. Os resultados do gráfico da figura 5.13 demonstram essa situação. Foram coletadas 30 amostras de arames de bitola 1,24mm com relação B/N abaixo de 0,80 e outras 30 de mesma secção de área transversal com relação B/N acima de 0,80. Todas sofreram ensaio de tração no próprio laboratório da unidade industrial.

Verifica-se diferença significativa no limite de resistência entre os dois grupos de amostras. Quando a relação B/N está abaixo de 0,80 o limite de resistência, LR, é maior em comparação com as amostras cuja relação B/N é acima de 0,80. Para o quociente B/N menor que 0,80 a média de LR foi 1.027Mpa com desvio padrão de 9,8. Em contrapartida, a amostragem da relação acima de 0,80 obteve média de 899MPa e desvio padrão de 8,00.

Isso significa que em aços onde a relação B/N é menor que 0,80 há nitrogênios livres que ancoram nos contornos das deslocações impedindo seu deslocamento, aumentando a resistência.

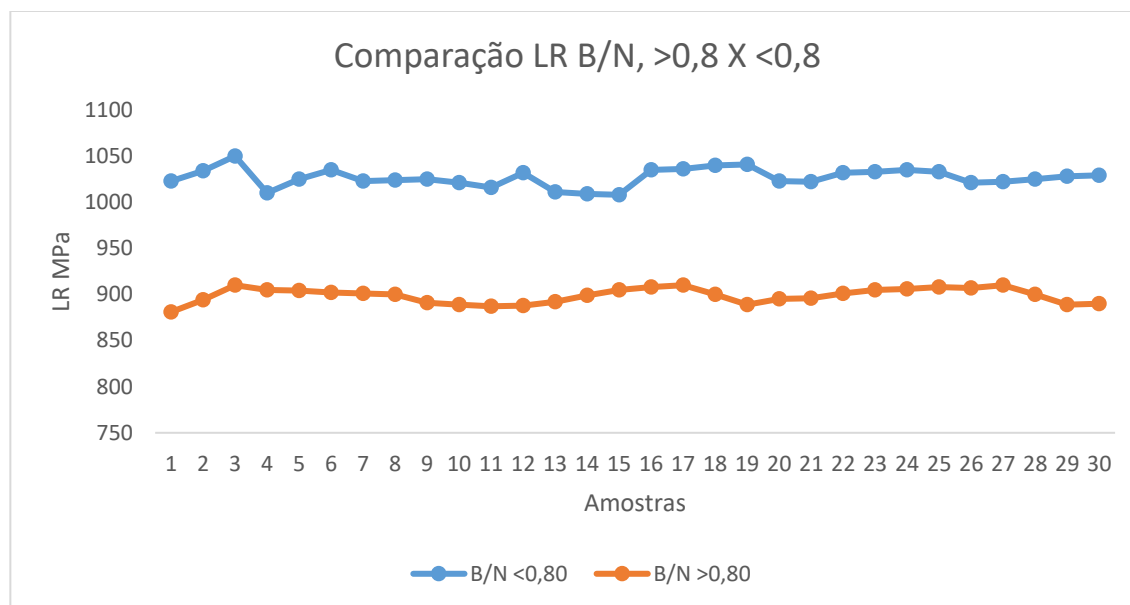


Figura 5.13- Gráfico de LR em diferentes relações B/N. Fonte: Autor.

5.3.1 Resultados do grau de encruamento

As figuras 5.14 e 5.15 apresentam os gráficos da tensão *versus* deformação de engenharia das amostras das corridas A e B, cuja relação B/N é 0,92 e 0,70, respectivamente. Observa-se que o limite de escoamento na corrida “A” é 900 Mpa enquanto na corrida onde a relação B/N é menor foi 937 Mpa. Além disso, fica claro através dos gráficos que o alongamento da corrida “A” é maior que o da corrida “B”, o que implica dizer que ela é mais dúctil.

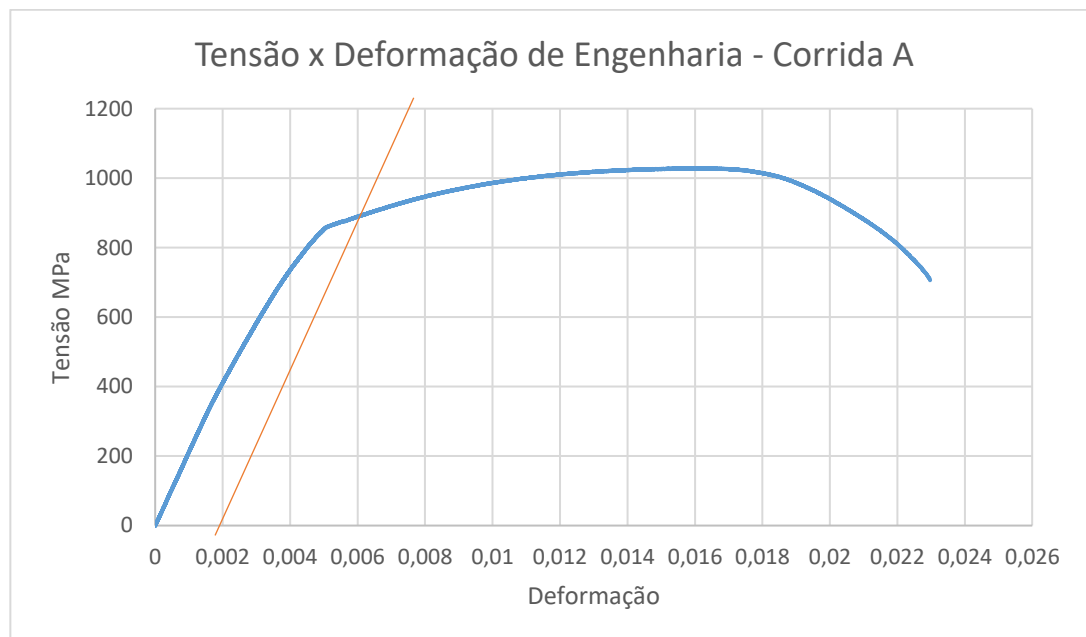


Figura 5.14- Gráfico de tensão *versus* deformação de engenharia. Fonte: Autor.

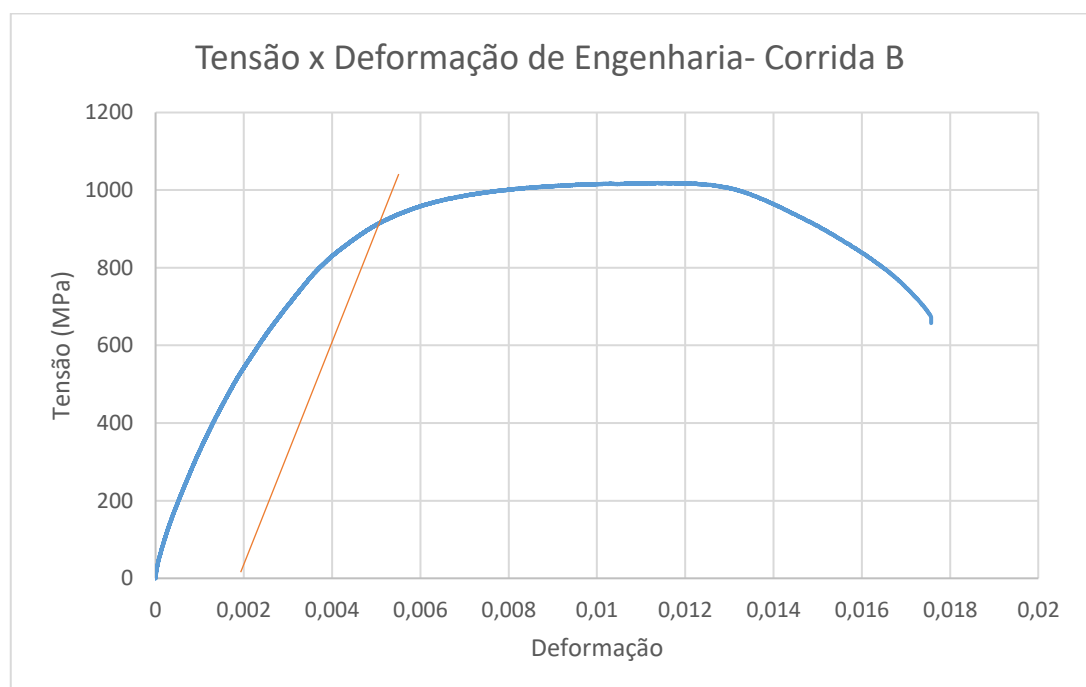


Figura 5.15- Gráfico de tensão *versus* deformação de engenharia. Fonte: Autor.

Uma vez definidas a tensão e deformação verdadeira das respectivas corridas, foi possível definir o grau de encruamento através da função logarítmica entre os pontos do limite de escoamento ao de estricção, em que n (grau de encruamento) é o coeficiente angular da reta de regressão linear.

As figuras 5.16 e 5.17 apresentam os gráficos da função logarítmica da tensão e deformação verdadeira, para ambas corridas, A e B, respectivamente.

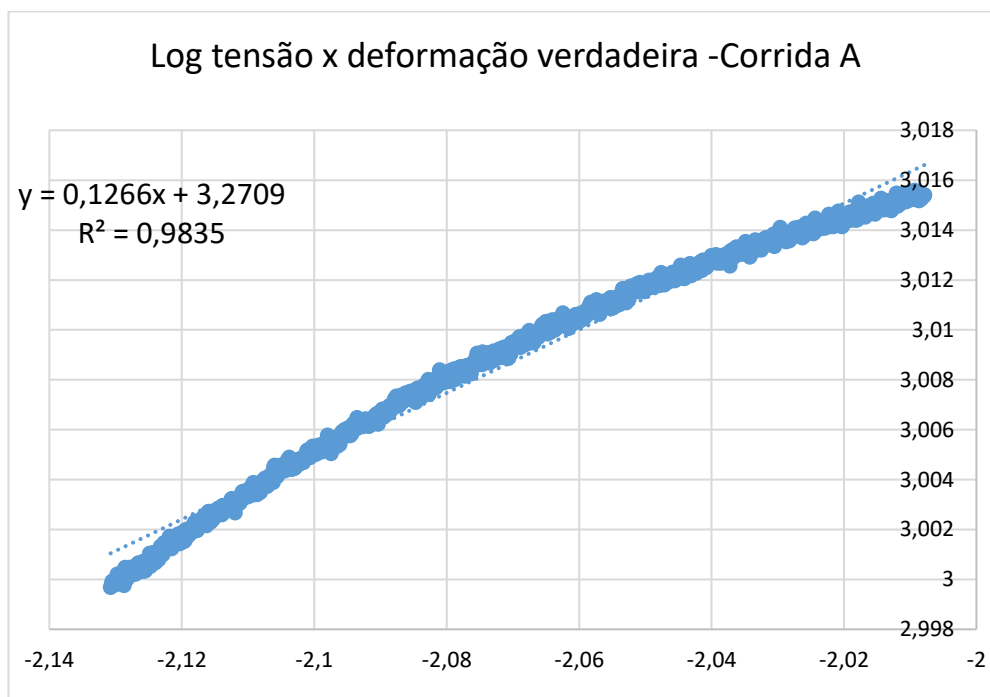


Figura 5.16- Gráfico Da função log tensão *versus* deformação verdadeira. Fonte: Autor

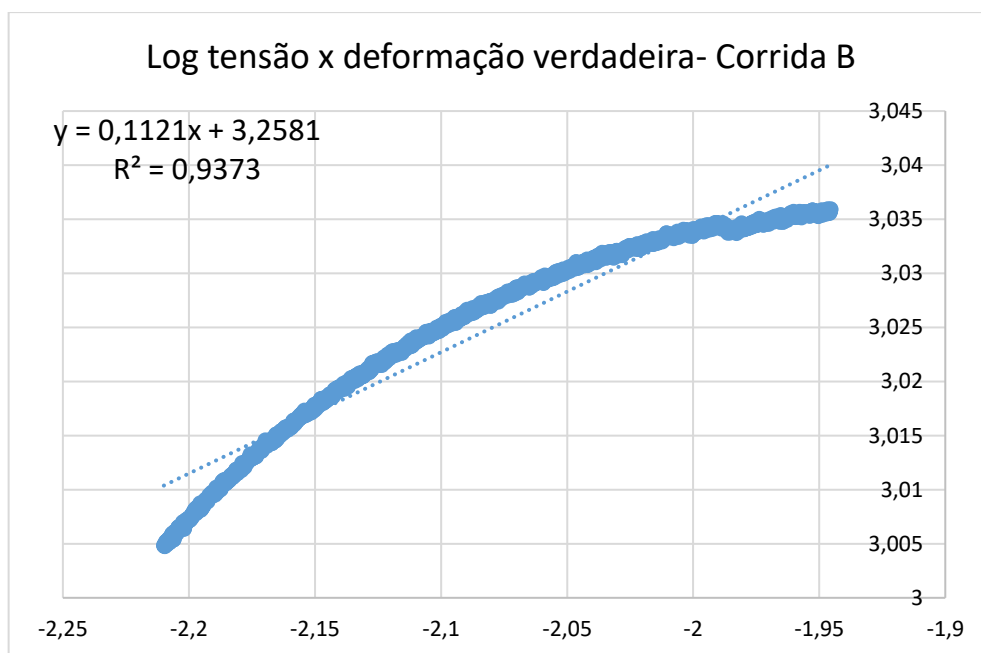


Figura 5.17- Gráfico Da função log tensão *versus* deformação verdadeira. Fonte: Autor.

Em ambos os gráficos o coeficiente de regressão linear, R^2 , foi acima de 0,90. Isso implica dizer que mais de 90% dos dados podem ser explicados pelas suas respectivas retas de regressão linear.

O grau de encruamento é definido como o coeficiente angular da reta, ou seja, na equação $Y(x) = A + BX$, n é igual a B . Sendo assim, para a corrida A o grau de encruamento foi 0,1266. Já o valor de n para a corrida B é 0,1121.

Os resultados do grau de encruamento mostraram pequena diferença entre as amostras analisadas, o que há possibilidade de ser explicada pela relação B/N. A corrida B, possui átomos de nitrogênio livres, pois sua relação B/N é 0,70, a quantidade mínima para que não haja átomos de N livres é 0,80. Conforme mencionado anteriormente, os átomos de N livres ancoram nas discordâncias reduzindo sua mobilidade durante a deformação. Já a corrida A, possui relação B/N igual a 0,92 e coeficiente de encruamento 0,1266, o que demonstra que essa amostra possui maior ductilidade que a anterior.

Além disso, durante o processo de produção dessas corridas foram observadas as quantidades de rupturas de arames no último passe. Na corrida B houve 5 rupturas, enquanto na corrida A apenas 1.

Dessa forma, fica evidente a influência da relação B/N no processo de trefilação. Quanto maior essa relação maior será o grau de encruamento e conseqüentemente mais dúctil é o material, facilitando assim a deformação e reduzindo as rupturas de arames.

5.4 Resultados da análise da influência da temperatura na camada residual de sabão

A tabela V.2 apresenta os resultados da temperatura do arame na entrada e saída dos blocos assim como a vazão de água usada no resfriamento na condição atual do equipamento, ou seja, anterior à intervenção da manutenção.

Tabela V.2- Medições da temperatura e vazão de água- condição atual. Fonte: autor.

	Blocos												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura entrada da bobina (°C)	75,4	73,9	97,6	100,4	118,8	123,5	97,8	121,6	122	104,8	95,4	112,8	115,3
Temperatura saída da bobina (°C)	44,1	45,5	81,9	80,4	114	104,3	101	117,7	118	98,2	112,6	103,4	111,9
Vazão de água (L/min)	24	10	14	18	13	15	12	10	9	20	6	16	10

Foram coletadas 10 amostras de 80mm, na condição acima, do arame no último passe de trefilação, cuja bitola era 1,23mm, e realizado o procedimento descrito em 4.3. A camada de sabão residual encontrada nessa condição foi 1,66g/m².

De acordo com o fabricante da máquina, a vazão de água ideal (para que haja troca térmica suficiente entre o bloco e arame) é de 18l/min. As medições apresentadas na tabela V.2 mostram que, dos 13 blocos 9 tem vazão abaixo do ideal, o que prejudica a troca térmica, justificando a temperatura elevada (acima de 80°C, definida como ideal pelo fabricante do sabão).

Dessa forma, foi realizado manutenção nos blocos da máquina MT241, objetivando aumentar a vazão de água e, conseqüentemente, reduzir a temperatura do arame durante o processo. A tabela V.3 apresenta os resultados de temperatura e vazão de água após a intervenção da manutenção.

Tabela V.3- Medições da temperatura e vazão de água- condição após manutenção nos blocos. Fonte: autor.

	Blocos												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura entrada da bobina (°C)	72,3	74,2	92,5	102,3	109,1	112,7	99,5	104,0	102,5	96,7	89,2	96,1	99,4
Temperatura saída da bobina (°C)	46,4	42,0	77,3	78,8	92,5	90,2	82,4	83,2	80,3	79,8	77,4	83,3	92,0
Vazão de água (L/min)	22	13	16	18	16	16	17	15	16	20	13	16	10

Verificou-se aumento significativo na vazão de água dos blocos, o que provocou redução na temperatura do arame trefilado. A figura 5.18 compara as medições da vazão de água antes e depois da manutenção nos blocos de trefilação da máquina MT241.

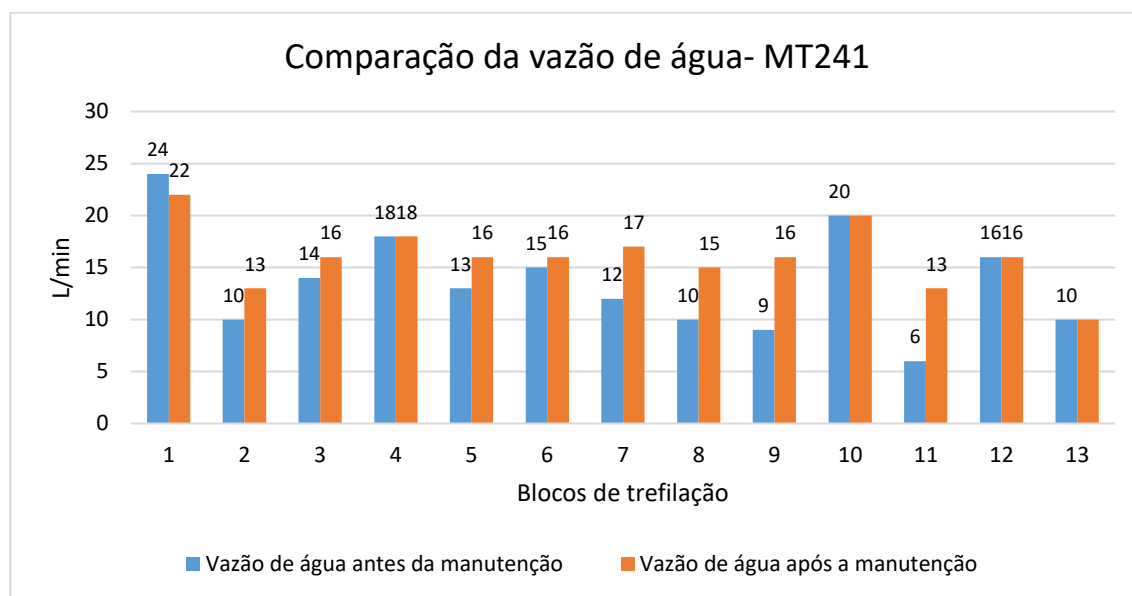


Figura 5.18- Gráfico vazão de água nos blocos de trefilação – MT241. Fonte: Autor.

O valor encontrado da camada residual de sabão na condição após a manutenção dos blocos foi de $2,98\text{g/m}^2$, ou seja, 79,5% a mais de sabão presente no arame no último passe comparado com a condição anterior a manutenção ($1,66\text{g/m}^2$).

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho observou-se forte influência da carepa, baixa relação B/N e alta temperatura de trefilação como causas principais de rupturas de arame no processo de trefilação.

Verificou-se que a condição de resfriamento no Stelmor (laminação) das espiras não estava em condições ideais para a formação de maior proporção de FeO (wustita). Com isso, a decapagem do aço estava abaixo da ideal, resultando em maior quantidade de carepa residual, prejudicando a lubrificação e reduzindo a vida útil das feiras.

Após a realização do planejamento de experiência (D.O.E) realizado na laminação, foram determinados os parâmetros ótimos de processo, que garantiram 75% de FeO. Anteriormente ao trabalho, a quantidade de wustita era em torno de 45%. Dessa forma, houve melhora significativa na decapagem. Os parâmetros ótimos foram definidos como padrões na laminação e passaram a ser produzidos nessas condições: temperatura das espiras no stelmor entre 860°C e 880°C e 4° ventilador aberto em 50%.

Foi identificado forte correlação entre ruptura de arames e relação B/N. Quanto menor a relação maior é a quantidade de arrebentamentos. Isso é explicado pela ancoragem de nitrogênios livres o que reduz a mobilidade das discordâncias aumentando a fragilidade do arame.

Além disso, o coeficiente de encruamento em amostras de corridas com relação boro e nitrogênio abaixo de 0,80 foi menor que o encontrado em corridas com B/N maior. Isso significa que quanto menor o quociente entre B e N menor será a capacidade do arame em se deformar, ou seja, o arame é menos dúctil e mais susceptível a rupturas.

Sendo assim, as corridas passaram a ser produzidas com relação B/N entre 0,80 e 1,20, o que contribui para a redução das rupturas de arames no processo de trefilação.

Foi identificado que a temperatura do arame durante a trefilação estava acima de 80°C em diversos passes. Esse fato está diretamente associado a baixa vazão de água nos blocos, devido a corrosão da tubulação e entupimento de mangueiras. A alta temperatura afeta a aderência do sabão ao arame, haja visto que em altas temperaturas a camada residual de sabão foi 1,66g/m².

Com a intervenção da manutenção, houve melhora significativa na vazão de água, o que permitiu maior troca térmica entre bloco e arame. O resultado do CRS (camada residual de sabão) nessa condição foi de 2,98g/m², aumento de 79,5% de sabão no arame comparado com a condição anterior a manutenção.

Após a aplicação dos itens discutidos acima no processo de trefilação das 6 máquinas, houve aumento significativo na eficiência e produtividade. O gráfico da figura 6.1 apresenta os resultados desde o início do trabalho, em outubro de 2016 até abril de 2020.

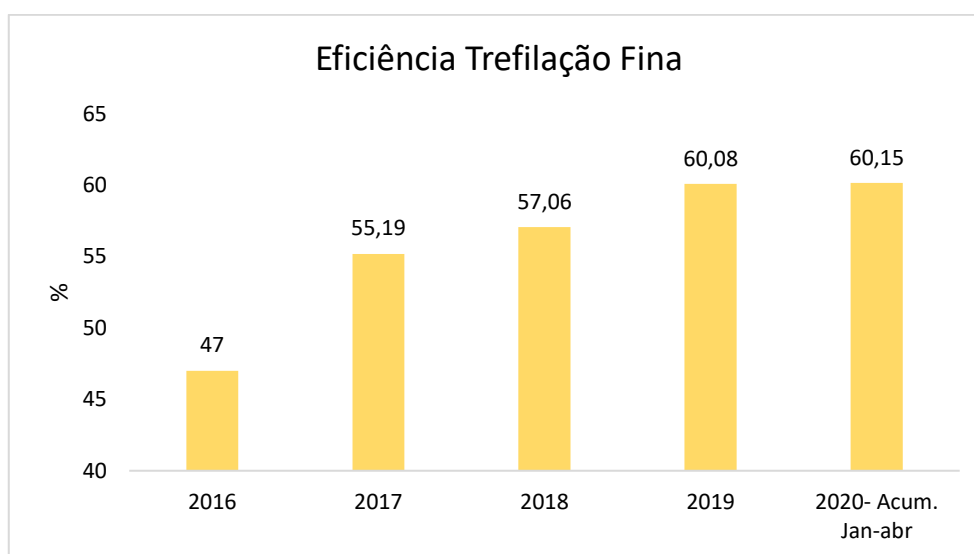


Figura 6.1- Gráfico resultado eficiência trefilação fina. Fonte: MES Arcelormittal JF.

Os resultados do gráfico acima mostram aumento de 28% de eficiência desde o início do trabalho, em outubro de 2016, até abril de 2020. Esse crescimento da eficiência do processo produtivo da trefilação fina, deve-se à redução das paradas por ruptura de arame e troca de fieiras, já que algumas ações, como melhoria na refrigeração dos blocos, contribuiriam também para o aumento da vida útil das ferramentas, reduzindo sua troca.

O aumento da eficiência implica em maior disponibilidade de tempo para se produzir e o objetivo a ser alcançado é o aumento de produção. O gráfico da figura 6.2 demonstra a produção anual de 2016 a 2019.

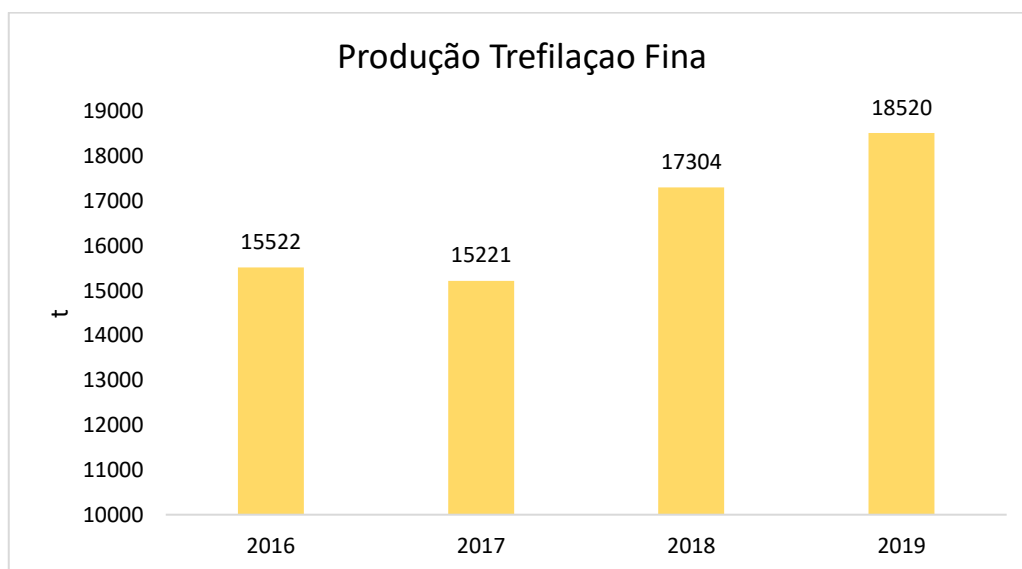


Figura 6.2- Gráfico produção anual trefilação fina. Fonte: MES Arcelormittal JF.

Observa-se aumento da produção em 2.083t de arames trefilados de 2018 em relação a 2017, representando aumento em 13,70%. Em 2019, a produção anual foi 18.520t, aumento de 7% em relação a 2018 e 21,70% em relação a 2017. Pode-se dizer que o ganho de produção do trabalho, através das reduções de paradas por rupturas de arames, foi de 3.300t (2019 *versus* 2017).

Vale ressaltar que o presente trabalho também alcançou outros objetivos específicos propostos:

- reduziu à exposição dos operadores a acidentes, através da diminuição das intervenções devido a rupturas de arames;
- possibilitou o desenvolvimento da equipe operacional, gerando mais conhecimento sobre o processo;
- redução do consumo de energia elétrica dos fornos de recozimento. O aumento de produção de arames trefilados permitiu aumentar a utilização dos fornos. Assim, o consumo de energia elétrica em Kwh/t diminuiu com o aumento da produção. A tabela VI.1 apresenta os resultados desse indicador de 2017 a 2019, em que se observa redução

significativa. Porém, é importante destacar que outros trabalhos específicos foram realizados para a redução do consumo de energia elétrica, o que impossibilita mensurar a contribuição do aumento da produção de arames trefilados nesse indicador de consumo.

Tabela VI.1- Consumo de energia elétrica fornos de recozimento. Fonte: SIG Arcelormittal.

Consumo energia elétrica fornos	2107	2018	2019
Kwh/t acum.	236,41	227,62	226,13

7. RECOMENDAÇÕES

O trabalho apresentado mostrou que é de suma importância o controle de parâmetros de processo tais quais: composição de carepa, relação B/N e vazão de água. Esse último, não há controle *on line*, a verificação tem que ser feita em manutenções preventivas e demanda tempo. Assim, recomenda-se a instalação de fluxostato interligando-o ao sistema de medição *on line* (PIMS) para verificação da vazão.

Embora tenha sido citado na referência bibliográfica a influência da temperatura no envelhecimento causando endurecimento do aço, esse trabalho não aprofundou sobre o tema. Sugere-se estudo sobre a influência da temperatura nas propriedades mecânicas nesse processo.

Outro tema que pode servir como base de futuros trabalhos é a análise da geometria das feiras considerando o plano de passe. Recomenda-se o desenvolvimento de simulador levando em conta a redução, a lubrificação, temperatura do arame, a geometria da feira (ângulos) e relação B/N, tendo como variável reposta o coeficiente de encruamento. Esse merece ser estudado qual é o seu limite até a ruptura do arame. Dessa forma, através dos parâmetros seria possível simular, com certo grau de confiança, a possibilidade de rupturas. Isso ajudaria a antecipar problemas e melhorar a eficiência, conseqüentemente aumentar a produtividade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, M. L., *Análise da Lubrificação na Superfície e nas Propriedades de Arames de Alto Teor de Carbono Trefilados*. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

BORATTO, F. J. M., WEIDIG, C., RODRIGUES, P. C. M., GONZALES, B. M. (1993). *Wire Journal International* 26, 86.

BRUSIUS, Jr; W. *Análise da Lubrificação Seca para Trefilação Proposta de Padronização de Lubrificante para Arame de Médio Carbono*. 2009. 27.p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

BUONO, V.T. L. (1995). Tese de Doutorado, *Estudo da Cinética de Envelhecimento após Deformação em Aços Perlíticos Trefilados através de Propriedades Físicas e Mecânicas*, CPGEM-UFMG, Belo Horizonte-MG, 251p.

BYON, S. M.; LEE, S. J.; LEE, D. W.; LEE, Y. H.; LEE, Y. Effect of Coating Material and Lubricant on Forming Force and Surface Defects in Wire Drawing Process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University, Korea, v. 21, p. 104-110, September, 2010. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 20/09/2019.

CALLISTER, W.D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CASTRO, C.S.B. *Envelhecimento após deformação em fio máquina de aço perlítico*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1998. 81p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

COE, C.L., GORDON, A.T. *Method for making strain aging resistant steel*. US2006/0124208. 2006.

CHOO, W.Y., BAE, C.M. *Drawing behavior of pearlitic steel wire rods controlled by Boron addition in medium carbon steel*. ISIJ International, Vol. 42, p 47 – 51, 2002.

CORRÊA, E.C.S. *Aspectos do Encruamento de Metais Previamente Deformados a Frio*. 2004. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CUNHA, D. S., *Desenvolvimento de Fio Máquina para a Fabricação de Arames para Soldagem MIG, com Carepa adequada ao Processo de Descarepação Mecânica*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

DIAS, J. F., GONZALEZ, B. M., CETLIN, P. R. e COELHO, A. R. Z. (1989). *Anais do 43º Congresso Anual da ABM*, São Paulo-SP 1, 337-346.

DIETER, G. E. *Metalurgia Mecânica*. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A, 1981.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V., Berlim. *DIN - 2391 Part 2*; Technical delivery conditions. Berlim, 1994. 8p.

FUJITA, T. *Method of cooling steel wire*. US3973426. KOBE STEEL. 10 ago. 1976.

GIORGINI, D. G. *Otimização do processo de trefilação através da proposição de um modelo de previsão da força de trefilação adequado às condições reais da V & M do Brasil*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

GONZALEZ, B. M., DIAS J. F., CETLIN, P. R. e COELHO, A. R. Z. (1989). *Anais das Jornadas Metalúrgicas*, Buenos Aires, Argentina 49-51.

HELMAN, H.; CETLIN, P.R. *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.

KARIMI TAHERI, A., MACCAGNO, T. M., JONAS, J. J. (1995a). *ISIJ International* 35, 1532-1540.

MARTINEZ, G.A.S., *Comportamento da Lubrificação no Tribo-sistema de Trefilação a Altas Velocidades*. São Paulo: UNICAMP, 1988.

MEYERS, M.A.; CHAWLA, K.K. *Princípios de Metalurgia Mecânica*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1982.

NEVES, F.O. *Análise das tensões residuais em tubos trefilados de aço inox ABNT 304*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PADILHA, A.F., SICILIANO, Jr. F., *Encruamento, recristalização, crescimento de grãos e textura*, ed. ABM Livros, 2005, p.13-161.

PENNA, J. A. CUNHA, H. M. *Formação de carepa e descarepação mecânica de fio máquina*. XXXII Congresso Internacional da ABM, Contribuição Técnica nº 1422, Julho, 1977.

REIS, L. C., *Estudo do Efeito do Boro e das Condições de Trefilação na Delaminação de Aços Perlíticos*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

SANTOS, C. A. *Simulação Numérica da Trefilação axissimétrica do aço inoxidável 420 Considerando o Efeito do Caminho de Deformação*. 2005. 234 páginas. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2005.

TARUI, T., TAKAHASHI, J., TASHIRO, H., MARUYAMA, N., NISHIDA, S., OCHIAI, I., OHASHI, S. *Strengthening of steel wire of tire cord*. Nippon Steel Technical Report, n°64, pp. 45 – 49, 1995.

WRIGHT, R. N., *Wire technology: process engineering and metallurg*. Burlington: Elsevier Inc., 2011. 337 p.

YAMADA, Y., KAWAKAMI, H. NAKAMURA, Y., TSUJI, K. *Strain aging of high carbon steel wires*. Wire, p 122 – 124, 1983.

IPEA analisa o impacto da indústria extrativa mineral no PIB. IPEA- Instituto Pesquisa Econômica Aplicada.

https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=34778, acesso em 02/04/20.

Ociosidade da indústria e queda no consumo de aço são ameaças à siderúrgicas. ABM Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

<https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/ociosidade-da-industria-e-queda-no-consumo-de-aco-sao-amecas-as-siderurgicas> , acesso em 09/04/2020.