

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NO REAQUECIMENTO DE TARUGOS NA  
LAMINAÇÃO DE FIO-MÁQUINA

**Jonas Cordeiro da Silva**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre  
2012

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

**OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NO REAQUECIMENTO DE TARUGOS NA  
LAMINAÇÃO DE FIO-MÁQUINA**

**JONAS CORDEIRO DA SILVA**  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre  
2012

II

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr. (Coordenador do PPGEM no Ano 2012)  
Coordenador do PPGEM

Dedico à minha família pelo incentivo aos estudos bem como todo apoio para tal. Dedico à minha esposa e filha por representarem todo o sentido e razão da constante necessidade de evolução na minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À empresa parceira do trabalho que proporcionou acesso às informações e instalações para desenvolvimento do Mestrado;

Ao Orientador, Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha pelos conselhos e orientação em momentos decisivos do presente trabalho;

Aos professores do departamento do PPGEM que através das aulas ministradas contribuíram no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus colegas que contribuíram no desenvolvimento dos experimentos e do trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
3.1 PROCESSO DE LAMINAÇÃO.....	3
3.2 HISTÓRICO DA LAMINAÇÃO .....	5
3.2.1 <i>Evolução dos sistemas de acionamento.....</i>	<i>6</i>
3.3 MECÂNICA DA LAMINAÇÃO .....	8
3.4 CLASSIFICAÇÃO DOS LAMINADORES .....	10
3.4.1 <i>Quanto a temperatura de trabalho.....</i>	<i>10</i>
Laminação a frio .....	10
Laminação a quente.....	11
3.4.2 <i>Quanto ao arranjo ou disposição das gaiolas.....</i>	<i>12</i>
Contínuo     12	
Aberto       13	
Aberto - contínuo (ou misto).....	14
3.5 TIPO DE GAIOLAS DE LAMINAÇÃO .....	15
3.5.1 <i>Gaiolas duo .....</i>	<i>15</i>
3.5.2 <i>Gaiolas trio .....</i>	<i>17</i>
3.5.3 <i>Gaiolas universais.....</i>	<i>18</i>
3.5.4 <i>Fluxo do processo de laminação.....</i>	<i>19</i>
3.6 MATÉRIAS-PRIMAS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO .....	20
3.7 REAQUECIMENTO PARA LAMINAÇÃO A QUENTE.....	21

3.7.1	<i>Tipos de fornos de reaquecimento</i> .....	22
	Empurrador 23	
	Soleira móvel .....	23
	Vigas móveis.....	24
3.8	CALIBRAÇÃO.....	25
3.9	ENERGIAS NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO .....	26
3.10	BALANÇO ENERGÉTICO DE FORNOS DE REAQUECIMENTO .....	28
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
5.1	ANÁLISE INICIAL .....	43
5.2	ANÁLISE DE FMEA - PLANO DE AÇÃO .....	44
5.3	RESULTADOS DO DOE .....	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Ilustração do processo da laminação (BRESCIANI et al 1997).....	3
Figura 3.2 - Seção transversal de um tarugo evidenciando porosidades na seção de entrada do laminador e seção de saída com grãos homogêneos após sofrer conformação durante a laminação Fonte: SILVA, 2010.....	4
Figura 3.3 - Forças e relações geométricas nas laminações (BRESCIANI et al, 1997).....	9
Figura 3.4 - Arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais. (CODA 2006).....	12
Figura 3.5 - Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais. (CODA 2006) .....	13
Figura 3.6 - Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006).....	14
Figura 3.7 - Entrada do material em uma gaiola de laminação usada em trens abertos, a sequência de passes está lado a lado, da esquerda para a direita. (SILVA 2009). .....	14
Figura 3.8 - Arranjo de um trem aberto - contínuo. (CODA 2006) .....	15
Figura 3.9 - Exemplo de gaiola duo horizontal. (CODA 2006) .....	16
Figura 3.10 - Exemplos de laminadores DUO (BRESCIANI et al 1997).....	16
Figura 3.11 - Exemplo de gaiola duo vertical. (CODA 2006) .....	17
Figura 3.12 - Configuração de gaiolas duo horizontais não-reversível (a) e reversível (b). (VILELA 2007).....	17
Figura 3.13 - Configuração de gaiola trio. (VILELA 2007) .....	18
Figura 3.14 - Configuração de gaiola universal. (VILELA 2007) .....	19
Figura 3.15 - Fluxo simplificado do processo de laminação a quente (SILVA 2010).....	19



Figura 3.16 - Representação esquemática da planta da empresa parceira (RODRIGUES, 2012) .....	20
Figura 3.17 - Forno de reaquecimento para laminação tipo Empurrador. (GUIDE 1994).....	23
Figura 3.18 - Forno de reaquecimento para laminação tipo Soleira Móvel (GUIDE 1994) ....	24
Figura 3.19 - Forno de reaquecimento para laminação de vigas móveis (GUIDE 1994) .....	25
Figura 3.20 - Curva de tensão deformação a quente para o aço UNS20MnCr5. (FERNANDES 2005).....	28
Figura 3.21 - Exemplo de um balanço energético de forno. No interior da figura $Q_t$ , significa calor total e $\eta$ o rendimento do forno e do recuperador de calor (HAUCK, 2000).....	29
Figura 4.1 - Desenho esquemático do corte longitudinal de um forno do reaquecimento do tipo Soleira Móvel utilizado no trabalho .....	31
Figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho .....	32
Figura 4.3 - Esquema representativo da metodologia utilizada no trabalho .....	33
Figura 4.4 - Formulário modelo de FMEA utilizado.....	38
Figura 4.5 - Região ideal de conformação de acordo com %C do aço em massa. Fonte: ROCHA, 2011. ....	39
Figura 4.6 - Deformação relativa até a ruptura de um aço 0,12% de carbono. Fonte: ROCHA, 2011 .....	40
Figura 5.1 - Correlação do consumo de gás com a produção diária.....	43
Figura 5.2 - Gráfico do consumo de gás teórico com a produção diária.....	44
Figura 5.3 - Resultado DOE, influência isolada do fator de controle TZ1 em relação à corrente elétrica das gaiolas, mantendo-se TZ2 fixo em 1170°C.....	46
Figura 5.4 - Resultado DOE, influência isolada do fator de controle TZ2 em relação à corrente elétrica das gaiolas, mantendo-se TZ1 fixo em 1130°C.....	47

Figura 5.5 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D6 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	48
Figura 5.6 - Gráfico de contorno para a variação da corrente do motor na gaiola D6 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento. ....	48
Figura 5.7 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D7 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	49
Figura 5.8 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D7 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	49
Figura 5.9 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D9 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	50
Figura 5.10 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D9 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	51
Figura 5.11 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D10 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	51
Figura 5.12 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D10 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	52
Figura 5.13 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M1 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	53
Figura 5.14 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M1 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	53
Figura 5.15 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M2 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	54
Figura 5.16 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M2 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	54
Figura 5.17 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M3 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	55

Figura 5.18 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M3 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	55
Figura 5.19 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M4 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	56
Figura 5.20 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M4 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Quantidade de calor necessária para aquecer aço em relação à temperatura de enforamento e desenforamento, adaptada de DETR - <i>Department of Environment, Transport and Regions</i> .....	34
Tabela 4.2 - Eficiência de combustão do forno em função da temperatura do ar de combustão e da temperatura dos gases de exaustão, adaptado de DETR - <i>Department of Environment, Transport and Regions</i> .....	35
Tabela 4.3 - Perdas consideradas normais de acordo com tipo de forno, largura e comprimento, adaptação de DETR - <i>Department of Environment, Transport and Regions</i> ...	36
Tabela 4.4 - Valores dos fatores de controle para os ensaios .....	42
Tabela 4.5 - Matriz de planejamento do experimento fatorial .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

D1	Gaiola do laminador do estudo, primeira gaiola da desbaste;
D6	Gaiola do laminador do estudo, segunda gaiola da desbaste, realiza o sexto passe de redução;
D7	Gaiola do laminador do estudo, terceira gaiola da desbaste, realiza o sétimo passe de redução;
D8	Gaiola do laminador do estudo, quarta gaiola da desbaste, realiza o oitavo passe de redução;
D9	Gaiola do laminador do estudo, quinta gaiola da desbaste, realiza o nono passe de redução;
D10	Gaiola do laminador do estudo, sexta gaiola da desbaste, realiza o décimo passe de redução;
M1	Gaiola do laminador do estudo, primeira gaiola do trem médio ou intermediário, realiza o décimo primeiro passe de redução;
M2	Gaiola do laminador do estudo, segunda gaiola do trem médio ou intermediário, realiza o décimo segundo passe de redução;
M3	Gaiola do laminador do estudo, terceira gaiola do trem médio ou intermediário, realiza o décimo terceiro passe de redução;
M4	Gaiola do laminador do estudo, quarta gaiola do trem médio ou intermediário, realiza o décimo quarto passe de redução;
P1	Primeiro pirômetro de medição de temperatura do laminador do estudo;
P2	Segundo pirômetro de medição de temperatura do laminador do estudo;
P3	Terceiro pirômetro de medição de temperatura do laminador do estudo;
P4	Quarto pirômetro de medição de temperatura do laminador do estudo;
TZ1	Temperatura da zona 1 do forno de reaquecimento do estudo;
TZ2	Temperatura da zona 2 do forno de reaquecimento do estudo;
SAE	Society of Automotive Engineers;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
NBR	denominação de norma da ABNT;
DOE	Design of Experiments - projeto dos experimentos;

$\Delta h_{aço}$	Diferença de entalpia no aço no processo de aquecimento;
$\eta_{forno}$	Rendimento do forno;
$Q_{perdido}$	Quantidade de calor perdido em todas perdas do processo de aquecimento;
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> - Método de análise de falhas suas causas e efeitos.

## RESUMO

Este trabalho refere-se à otimização energética na produção de fio-máquina, onde os aços estudados foram os de baixo carbono. O trabalho foi desenvolvido com o apoio de uma empresa parceira que cedeu as instalações e acesso às informações necessários ao desenvolvimento da dissertação. O objetivo geral do trabalho foi reduzir o consumo de energia de reaquecimento de tarugos para laminação de vergalhões e fio-máquina em rolos. Os objetivos específicos foram: descrever os preceitos teóricos a respeito do processo de reaquecimento; realizar um levantamento do estado da arte em relação à influência das variáveis de enformamento nas propriedades do material e em relação ao consumo de energia em fornos de reaquecimento; melhorar o conhecimento existente na empresa parceira do estudo a respeito do processo de enformamento e otimizar o processo de enformamento na empresa. Para desenvolvimento da trabalho foi necessário o acompanhamento das energias envolvidas: energia de deformação e energia de reaquecimento. Quanto maior a temperatura de laminação, menor será a energia necessária para deformar o material, porém, maior será a energia de reaquecimento, ocorrendo maior consumo de combustível. Para analisar o consumo das energias, foi feito o acompanhamento da corrente elétrica das principais gaiolas para duas bitolas, depois, foi alterada a temperatura e medida novamente a corrente elétrica e o consumo do gás natural. Esta sequência de testes e medições visou identificar oportunidades para redução da temperatura de laminação e a influência na corrente elétrica das gaiolas do laminador. Uma das premissas, da realização deste trabalho, é que sejam alcançados os objetivos estabelecidos com a manutenção da qualidade do material e de suas propriedades mecânicas. Após a realização dos testes, constatou-se que é possível laminar com temperatura 20°C abaixo dos valores praticados atualmente, porém, a grande limitação é a última gaiola do trem médio de laminação, que trabalha, nestas condições, com a corrente elétrica no limite de desarme, sendo muito grande o risco de parada eminente do laminador. Recomenda-se implantar um investimento para aumentar a potência do acionamento desta gaiola. Com a redução em 20°C nas temperaturas de ajuste do forno economiza-se, nas condições do estudo, 0,36 Nm<sup>3</sup>/t.

Palavras-chave: Enformamento, Laminação, Forno de reaquecimento, Energia.

## ABSTRACT

This master dissertation refers to energy optimization in the production of wire rod from low-carbon steels. The work was supported by a partner company that gave access to the facilities and information necessary for the development of the dissertation. The general objective of this work was to reduce the energy consumption of billet reheating for rolling rebar and wire rod in coils. The specific objectives were: to describe the theoretical precepts about the reheating process; to describe the state of the art regarding the influence of variables in reheating process and its relation to energy consumption; improve knowledge exist in the partner company about the process and optimize the reheating process of the company. For development work was necessary monitoring of the energies involved, deformation energy and reheating energy. If the temperature of the process is higher, the energy required to deform the material is lower, however, the energy of rewarming is higher, causing higher fuel consumption. To analyze the deformation energy, the electrical current was monitored at two main cages for two different products, then the temperature was changed and the electric current was measured again as well as the consumption of natural gas. This sequence of tests and measurements aimed at to identify opportunities to reduce the process temperature and the influence of electrical current in rolling cages. One of the assumptions of the present study is to achieve the goals maintaining the quality of the material and its mechanical properties. After the tests, we found that it is possible laminar temperature 20°C below than the values currently practiced, however, the major limitation is the M4 cage that works, on these conditions, with the electrical current in the trip limit, being very great risk of imminent stop of the rolling mill. It is recommended to increase the power of the drive cage. With the reduction at 20°C in temperature adjustment of the oven, it saves 0.36 Nm<sup>3</sup>/t.

Key words: Rolling Mill, Reheating Furnaces, Energy Reduction.



# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente há grande necessidade de otimização dos processos industriais, buscando-se o aumento da competitividade das empresas. Neste sentido, deve-se buscar sempre a redução de custos, aumento ou manutenção da qualidade dos produtos, isso sem se descuidar dos aspectos e impactos ambientais dos processos e da segurança do trabalho dos colaboradores na organização.

Dentro desta perspectiva, este trabalho buscou a otimização do processo de enformamento, com o objetivo de reduzir o consumo de gás natural e por consequência, redução do impacto ambiental da atividade.

O trabalho foi desenvolvido na laminação de uma empresa parceira. Esta unidade produz vergalhões e fio-máquina em rolos. O processo de enformamento é parcialmente a quente e o forno de reaquecimento utiliza como combustível o gás natural.

Existem alguns pontos importantes que foram avaliados durante a realização do trabalho, como por exemplo, o fato de que determinados tipos de aço possuem limitações do tempo de enformamento, tanto no tempo mínimo de permanência, quanto no tempo máximo.

Outra limitação é dada pelo tipo de forno, tipo de queimadores, materiais refratários empregados, enfim pela tecnologia existente. O trabalho foi realizado com os equipamentos e condições de trabalho existentes, mas poderá indicar melhorias tecnológicas.

Em relação às propriedades mecânicas do produto, é evidente que, além da curva de enformamento, as variáveis do processo de laminação terão influência no resultado.

Diante destas premissas e restrições espera-se uma redução de consumo de gás combustível e manutenção ou melhoria da qualidade dos produtos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

- Redução do consumo de energia de reaquecimento de tarugos para laminação de vergalhões e fio-máquina em rolos.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Descrever os preceitos teóricos a respeito do processo de reaquecimento;
- Levantamento do estado da arte em relação à influência das variáveis de enformamento nas propriedades do material e em relação ao consumo de energia em fornos de reaquecimento;
- Melhoria no conhecimento existente na empresa em relação ao processo de enformamento;
- Otimização do processo de reaquecimento de tarugos na empresa.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Processo de Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram a mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários (Figura 3.1). Dessa forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior do que a distancia entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua seção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. (BRESCIANI et al. 1997).

Os cilindros de laminação fazem parte de um conjunto chamado gaiola ou cadeira de laminação. As gaiolas são compostas pelos cilindros, seus mancais de apoio, estrutura de fixação dos mancais e das guias e acessórios. Alguns autores consideram também parte da gaiola o acionamento, composto por eixos, acoplamentos, motor e caixas redutora e de pinhões.

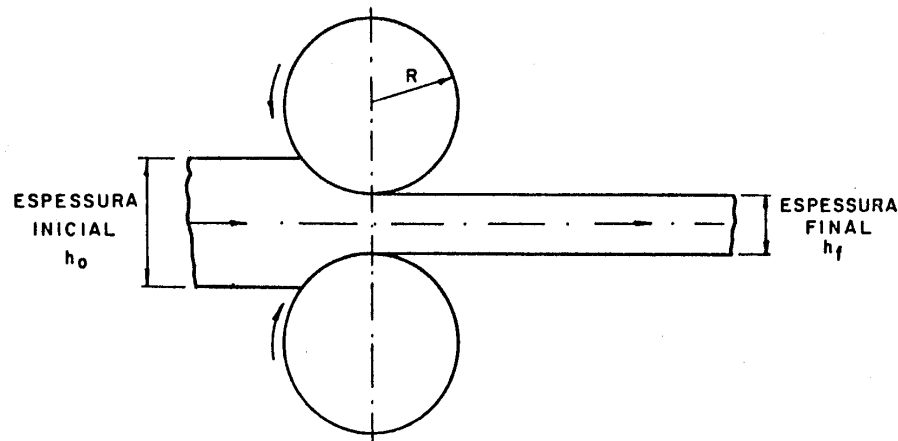


Figura 3.1 - Ilustração do processo da laminação (BRESCIANI et al 1997)

A laminação tem como objetivo básico dar forma a barra, melhorar a estrutura interna, propriedades mecânicas e qualidade superficial (DIETER 1981).

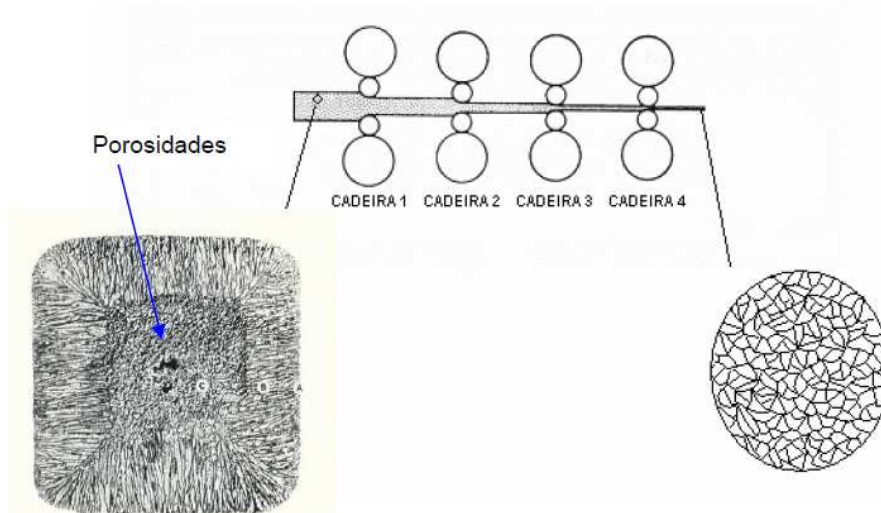


Figura 3.2 - Seção transversal de um tarugo evidenciando porosidades na seção de entrada do laminador e seção de saída com grãos homogêneos após sofrer conformação durante a laminação Fonte: SILVA, 2010.

Laminação é um processo de conformação no qual o material sofre esforços que proporcionam a sua deformação plástica. A deformação plástica de metais é um dos inúmeros processos de manufatura de produtos até a forma e tamanho desejado e consiste em aplicar forças compressivas em magnitude apropriada sobre o material a ser conformado.(WUSATOWSKI 1969).

O processo de laminação é o mais amplamente utilizado para transformação de metais, pois proporciona aumento de produtividade. O processo de laminação pode ser classificado, dependendo da temperatura de trabalho, como laminação a quente ou a frio. Em ambos os casos, o objetivo principal é a redução da seção do material, conferindo-lhe a forma e as propriedades mecânicas desejadas. (DIETER 1981).

Durante o processo de laminação, o material a ser conformado passa mais de uma vez entre os cilindros que giram em sentidos opostos. A cada passagem do material entre os cilindros, a sua espessura é reduzida e o seu comprimento é aumentado. (VILELA 2007). Em alguns casos, pode ocorrer o alargamento da seção transversal, porém, na maioria das vezes, este alargamento é indesejado, pois implica em tensões trativas que podem nuclear defeito.

Conceitualmente, laminação é um processo de conformação mecânica executado por compressão direta, sem retirada de material, visando obter deformações plásticas no

material conformado. Isto significa alterações permanentes na forma e propriedades de um corpo sólido, mantida a sua massa (volume constante). (CODA 2006).

As matérias-primas do processo de laminação podem ser tarugos, placas, blocos ou pré-formas, provenientes do lingotamento contínuo ou, ainda, lingotes provenientes de lingotamento convencional.

### 3.2 Histórico da Laminação

Os primórdios da laminação são bastante antigos. A mais antiga ilustração de um laminador é uma gravura de Leonard da Vinci, em torno de 1486, o qual se destinava, provavelmente, a laminação a frio de barras chatas de ouro ou prata para cunhagem de moedas. A primeira referência de laminação a quente data de 1590, para dividir barras de ferro, em Danford, Kent, Inglaterra. (ARAUJO 1997).

Segundo NOVAES, antes do princípio do século XVI, tem-se notícia de pelo menos dois laminadores incorporando as ideias básicas de laminação. Em 1553 um francês de nome Brulier laminou chapas de ouro e prata, obtendo espessura uniforme para a confecção de moedas. Laminadores desse tipo foram usados em 1581 na casa da moeda Papal, em 1587 na Espanha e em 1599 em Florença.

Ainda segundo NOVAES:

Durante o mesmo período, o chumbo começou a ser utilizado em telhados, calhas e outras finalidades. Salomon de Caus da França, em 1615 construiu um laminador manual para laminar tiras de chumbo e estanho usados na confecção de órgãos de tubo.

Não há registros de algum desenvolvimento na primeira metade do século XVII, mas sabe-se que em 1665 um laminador estava em operação em "Parish of Bitton" perto de Bristol e afirma-se que de 1666 em diante foram laminadas barras chatas finas de ferro para corte longitudinal (*slitting*).

Na Inglaterra, em 1682, já haviam grandes laminadores para laminação a quente de materiais ferrosos. ROBERTS mostra relato histórico de 1697 que descreve um laminador

de barras, construído por John Hanbury, em Pontypool, no país de Gales, acionado por roda d'água. Pouco antes de 1720 Hanbury começou a produzir folhas de flandres e por mais de 150 anos, o país de Gales foi a maior fonte desse produto.

Cilindros de ferro fundido coquilhado foram usados em 1697, por John Hanbury em Pontypool, Inglaterra e John Payne, em 1728, obteve patente para um laminador com cilindros com canais para redondos. Christopher Polhem, em 1746, no seu Patriotiska Testamente, já mencionava a laminação de quadrados e redondos em Stiernsundsbruk, Suécia.(ARAUJO 1997).

As primeiras cadeiras do tipo Trio surgiram na Inglaterra em 1817. Zores, na França, em 1848, desenvolveu as primeiras vigas. A utilização do laminador Trio para trilhos e perfis começou em Johnstown, Pensilvania, com John Fritz, em 1855. (ARAUJO 1997).

Os laminadores em linha (tipo Belga) para produzir redondos finos fizeram a sua primeira apresentação em 1883. (ARAUJO 1997).

A ideia de um laminador contínuo com gaiolas alternadamente horizontais e verticais, patenteadas por John Hazledine em 1798, foi reapresentada por George Bedson de Manchester, Inglaterra, em 1862, juntamente com a utilização de dobradeiras. Alguns anos mais tarde, nos Estados Unidos, Charles H. Morgan construía o seu laminador contínuo com cadeiras horizontais e guias de torção entre elas. (ARAUJO 1997).

A obtenção de barras retas para concreto armado no leito de resfriamento foi atingida por V. E. Edwards em 1906, com o sistema de calhas oscilantes com bordas dentadas. (ARAUJO 1997).

### 3.2.1 Evolução dos sistemas de acionamento

NOVAES afirma que os primeiros laminadores eram acionados por força humana, normalmente por meio de um volante ou manivela, acoplada a um ou aos dois cilindros de laminação.

Com uma potência tão limitada, só era possível a laminação de materiais *macios* como ouro, prata, estanho ou chumbo.

Posteriormente, foram utilizadas *rodas d'água* para acionar os cilindros de laminação. Essa forma de acionamento já era utilizada em 3000AC pelos Chineses (CHILIKIN 1970).

O maior moinho romano, localizado na região de Provença, França, era operado por 16 rodas d'água e moía 28 toneladas de milho por dia, quantidade suficiente para alimentar 80.000 pessoas. A energia gerada era a equivalente à de 1.000 escravos (BERNSTEIN 2002).

Essa prática se mostrou muito conveniente aos laminadores e se tornou muito comum. Supõe-se que o primeiro laminador a ser acionado por um sistema de *roda d'água* tenha sido um laminador de tiras construído em Dartford em Kent, Inglaterra, em 1590 por Godefroi de Bochs sob uma patente concedida, em 1588 a Bevis Bulmer (ROBERTS 1978).

Por volta de 1790, James Cockshutt e Richard Crawshay construíram um Laminador Tandem Quádruplo próximo a Sheffield na Inglaterra. Esse laminador era acionado por duas rodas d'água independentes, uma para cada um dos cilindros de trabalho. Havia um aro formado de pesadas pedras, dispostos em segmentos, montados a essas rodas d'água, de modo a funcionar como um volante. (NOVAES 2010).

Em 1798 uma máquina a vapor "*Bouton & Watt*" foi usada para acionar um laminador de folhas de flandres. A partir do início do século XIX, houve um progresso acelerado no desenvolvimento de máquinas a vapor (NOVAES 2010).

Até o final do século XIX a principal forma de acionamento de equipamentos industriais eram o vapor e a água. Apesar dos avanços na construção de máquinas elétricas de corrente contínua na década de 1870, a energia elétrica era utilizada quase que somente para a iluminação (CHILIKIN 1970).

A invenção do motor de corrente alternada trifásico iniciou um novo estágio de desenvolvimento em acionamentos elétricos e ampliou a utilização da energia elétrica na indústria. O desenvolvimento dos acionamentos elétricos tem sido sempre no sentido de levar o acionamento o mais próximo possível do mecanismo de trabalho e na eliminação de tantos elos de transmissão quanto possível.

O desenvolvimento de aplicações de controle de velocidade com máquinas de corrente contínua permitiu o aumento de flexibilidade e a melhoria de operação dos equipamentos industriais.

O instituto britânico *Iron and Steel Institute*, publicou em 1946 o primeiro relatório do sub-comitê de pesquisa em laminação. Na seção III, esse relatório descreve, com razoável grau de detalhes, o desenvolvimento de um laminador piloto para o aprimoramento da tecnologia de laminação a frio.

Esse laminador foi desenvolvido no departamento de metalurgia da Universidade de Sheffield, Inglaterra, e equipado com o mais atualizado sistema de acionamento elétrico e controle, pelo "Iron and Steel Industrial Research Council".

Segundo Novaes, os dispositivos de controle eletromecânicos deste laminador, fabricados pela Brown Boveri, apesar de bastante criativos, eram muito rudimentares para permitir um controle.

### 3.3 Mecânica da Laminação

A laminação pode ser considerada um processo de compressão direta pelo fato dos cilindros atuarem, com esforço de compressão, diretamente sobre a peça. A intensidade de deformação plástica na direção da largura da peça depende de sua forma inicial e da intensidade da deformação da seção transversal. Essa mecânica da deformação indica que a peça entra no espaço entre os cilindros com uma velocidade menor do que a velocidade com que sai, pois se pode admitir a hipótese da constância do volume na deformação plástica (Lei das Vazões Constantes). Sobre as relações geométricas no processo de laminação, BRESCIANI et al explica: "como a velocidade periférica dos cilindros é constante, existe uma linha na superfície de contato, ou um ponto no arco de contato: se for considerada a projeção em perfil - onde a velocidade da peça se iguala a velocidade do cilindro (e no qual a tensão de laminação, ou seja, a pressão aplicada pelos cilindros a peça é máxima)". Esse ponto é denominado ponto neutro (figura 3.3)

Já sobre a definição do ângulo de contato, BRESCIANI et al, explica que o ângulo formado pelo arco de contato, tendo como vértice a projeção do eixo do cilindro, é o chamado ângulo de laminação, ou ângulo de contato, ou ainda ângulo de ataque. Esse



ângulo tem um valor máximo, acima do qual os cilindros não conseguem mais arrastar a peça sob ação das forças de atrito atuantes na superfície de contato. A tangente desse ângulo deve ser menor ou igual ao coeficiente de atrito na interface peça-cilindro para que possa ocorrer a laminação.

As forças de atrito atuam tangencialmente ao arco de contato, e no sentido de movimentação da peça até o ponto neutro, pois o cilindro gira a uma velocidade periférica menor do que a peça. A partir desse ponto, a situação de velocidade relativa se inverte e as forças de atrito passam a atuar no sentido contrário.

Segundo BRESCIANI et al, a carga da laminação, ou força normal à superfície de contato, aumenta até o ponto neutro e, a partir daí, diminui. Essa força decorre da resistência à deformação oferecida pelo material da peça nas condições mecânicas de processamento (temperatura, velocidade e estado de tensão). A reação às forças atuantes na superfície da peça são as forças exercidas sobre os cilindros com a denominação de forças de separação. A carga de laminação dividida pela área de contato define a pressão sobre os cilindros, ou seja, a tensão de laminação.

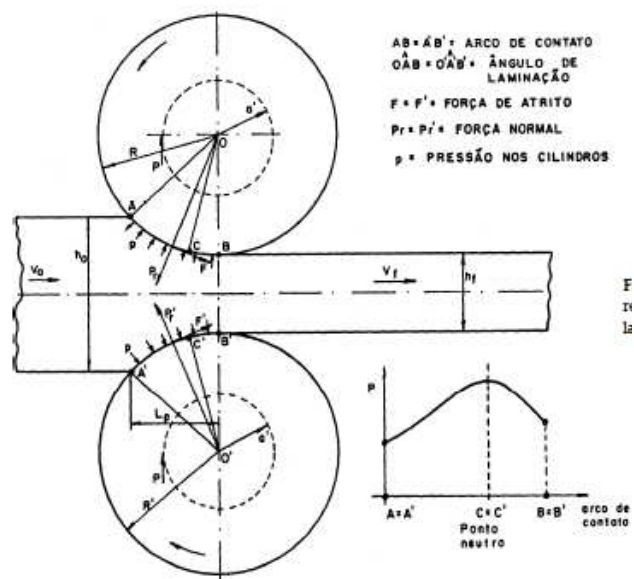


Figura 3.3 - Forças e relações geométricas nas laminações (BRESCIANI et al, 1997)

### 3.4 Classificação dos laminadores

#### 3.4.1 Quanto a temperatura de trabalho

##### Laminação a frio

Laminação a frio é um processo de transformação mecânica de metais no qual o metal é deformado por meio da passagem através de cilindros em uma temperatura abaixo da temperatura de recuperação do material e normalmente sem reaquecimento do material, este entrando no processo, muitas vezes, na temperatura ambiente. No processo a frio não ocorre o processo de recuperação da microestrutura do material deformado, o processo de recuperação é um dos processos de restauração da microestrutura do material. Segundo OLIVEIRA, os processos de restauração associados à deformação a quente podem ser dinâmicos, quando ocorrem durante a deformação, ou estáticos, quando se manifestam após a deformação.

O processo de laminação a frio provoca um aumento no limite de escoamento e na dureza do metal. O material fica encruado e é possível a obtenção de dimensões de estreitas tolerâncias e melhor acabamento superficial.

Segundo NOVAES, a laminação a frio desenvolveu-se com a demanda por material com características mecânicas bem determinadas e as exigências cada vez maiores de uniformidade de bitola.

Antes do trabalho a frio, é necessário remover a camada de óxidos por meio de decapagem, com o objetivo de obter-se boa superfície no produto acabado. O trabalho a frio tem como consequência um aumento da dureza e da resistência a tração, ao mesmo tempo em que reduz a ductilidade e o tamanho de grão do aço. A profundidade até onde a estrutura é alterada depende da seção, tamanho da peça e redução em área. (ARAÚJO 1997)

BRESCIANI et al, explica: como a temperatura de trabalho (geralmente temperatura ambiente) situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência a deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de seção transversal.

Um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, pode se tornar necessário em função do programa de redução estabelecido e das propriedades exigidas do produto final.

A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior (obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos, denominadas de carepa) e de estrutura do metal encruada com ou sem recozimento final. A laminação a frio também permite um melhor controle dimensional das peças e evita defeitos causados pela incorporação da carepa, casca de óxidos que se forma no processo de laminação a quente.

### Laminação a quente

É o processo de conformação do aço no qual o material é laminado a altas temperaturas, normalmente entre 1000 e 1200°C. Essa faixa de temperatura é determinada pelo fenômeno de recristalização que ocorre no aço durante a deformação. Recristalizar significa recuperar a estrutura cristalina que existia antes da deformação, trata-se de uma transformação de fases que se dá por nucleação e crescimento. (PADILHA 2005).

A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes. A laminação a quente, portanto, comumente se aplica em operações, onde são necessárias grandes reduções de seções transversais. (BRESCIANI et al 1997).

Na laminação a quente os tarugos de aço são colocados em fornos de rea aquecimento e aquecidos acima da temperatura de austenitização. (VIANA 2007).

A laminação a quente permite o menor emprego de esforço mecânico, refina a estrutura do aço, elimina porosidades e deforma mais profundamente que a laminação a frio. (VILELA 2007).

### 3.4.2 Quanto ao arranjo ou disposição das gaiolas

#### Contínuo

O arranjo contínuo possui uma série de gaiolas duo com cilindros girando no mesmo sentido dispostos ao longo de um mesmo eixo de laminação e com pequeno afastamento entre as gaiolas. O material é trabalhado sucessivamente entre vários pares de cilindros, cuja velocidade periférica aumenta proporcionalmente para compensar a diminuição da seção. (ARAUJO 1997).

Na laminação contínua, as gaiolas são postas uma próxima à outra, gerando grandes benefícios de qualidade, custo e produção. A pequena distância entre os cilindros leva a perdas pequenas de temperatura durante o passe, o que reduz o consumo de energia e o consumo de cilindro. Neste tipo de laminação grandes seções de tarugos podem ser usados (WUSATOSKI 1970).

O arranjo contínuo pode ser composto apenas por gaiolas horizontais, neste caso a operação se dá com torções do material laminado, ou por gaiolas horizontais e verticais intercaladas. (CODA 2006).

A figura 3.5 apresenta o arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais.

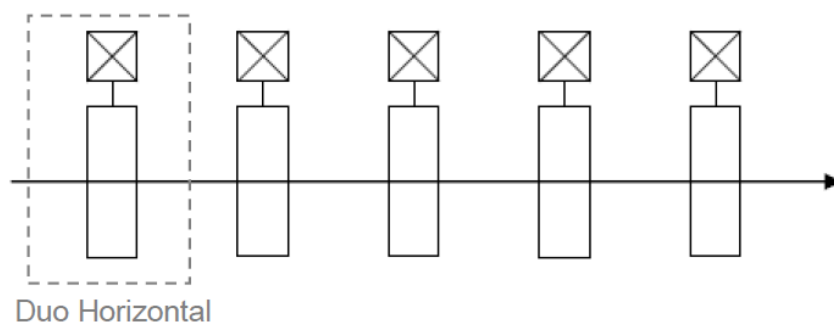


Figura 3.4 - Arranjo de um trem contínuo composto apenas por gaiolas horizontais. (CODA 2006)

A figura 3.5 mostra uma representação esquemática de um laminador, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal, cada quadrado com um "X" no seu interior o motor de acionamento e a seta indica o sentido de laminação. Em um trem com esta

configuração, faz-se necessária a torção do material para evitar alargamento excessivo e possível nucleação de defeitos nesta região.

A figura 3.6 apresenta o arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais intercaladas.

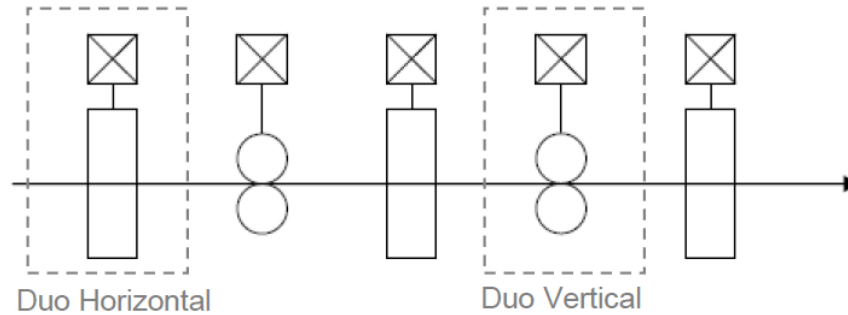


Figura 3.5 - Arranjo de um trem contínuo composto por gaiolas horizontais e verticais. (CODA 2006)

Neste caso da figura 3.6, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal, cada conjunto de dois círculos representa uma gaiola duo vertical, cada quadrado com um "X" no seu interior representa o motor de acionamento e a seta indica o sentido de laminação. Em um trem com tal configuração, não é necessária a torção do material, pois as gaiolas estão dispostas de forma a conformar alternadamente a região do alargamento.

### Aberto

O arranjo aberto possui uma série de gaiolas trio ou duo – reversíveis ou não – com acionamento único. Em alguns casos, a ponta da peça laminada, ao sair de um passe, é “dobrada” para entrar no passe seguinte do mesmo lado do laminador de onde saiu. Em outros casos a ponta não é “dobrada” e a ponta oposta é que entra no passe seguinte do mesmo lado do laminador. (ARAUJO 1997).

A figura 3.7 apresenta o arranjo de um trem aberto com mais de uma gaiola.

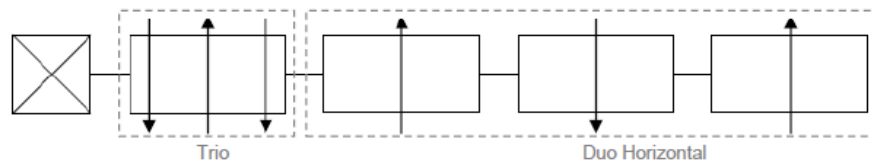


Figura 3.6 - Arranjo de um trem aberto. (CODA 2006)

Na figura 3.7, o primeiro retângulo representa uma gaiola trio, os últimos três retângulos representam cada um uma gaiola duo horizontal, o quadrado com um "X" no seu interior representa o motor de acionamento e as setas indicam o sentido de laminação. Um trem com a configuração apresentada na figura 3.7, resulta uma maior perda de temperatura do material laminado, o que nem sempre é desejado. Além disso, a movimentação do material pode causar defeitos superficiais no produto. A Figura 3.7 mostra dois cilindros de laminação de um trem aberto e a sequência de passes.

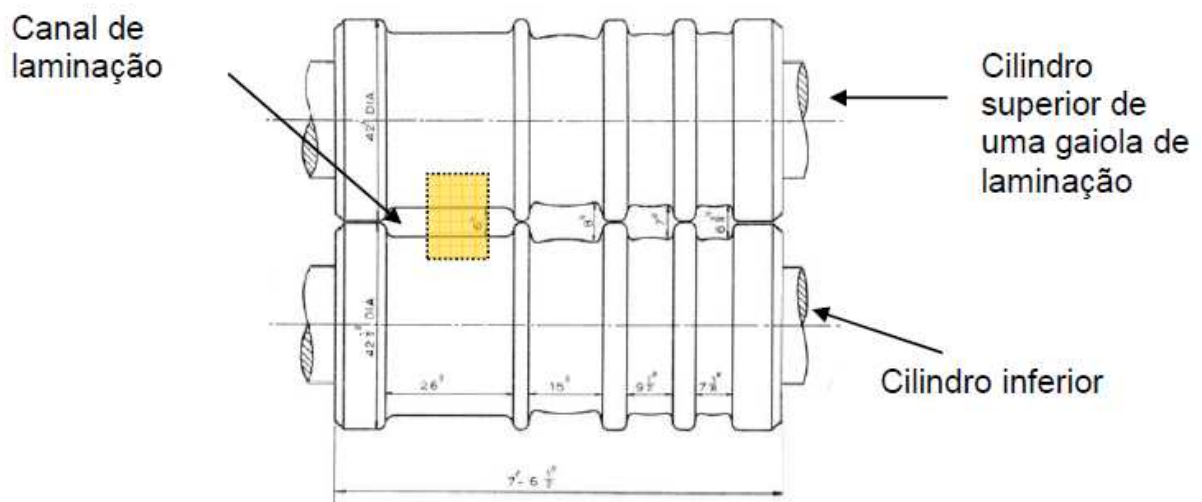


Figura 3.7 - Entrada do material em uma gaiola de laminação usada em trens abertos, a sequência de passes está lado a lado, da esquerda para a direita. (SILVA 2009).

Aberto - contínuo (ou misto)

A figura 3.9 apresenta o arranjo de um trem aberto - contínuo (misto).

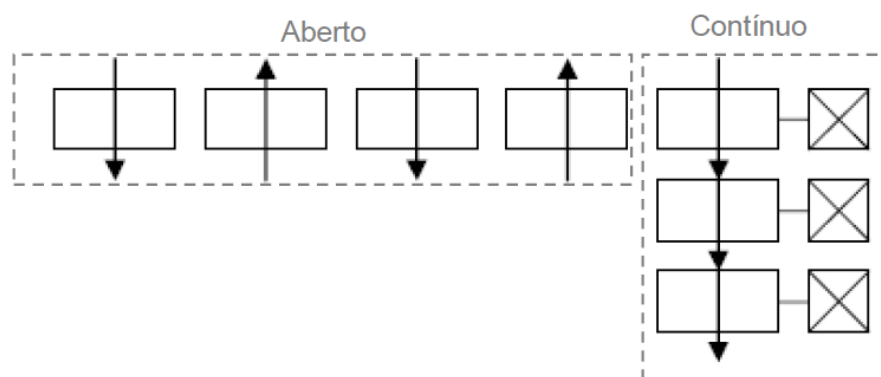


Figura 3.8 - Arranjo de um trem aberto - contínuo. (CODA 2006)

A figura 3.9 apresenta esquematicamente a configuração de um trem de laminação com arranjo aberto - contínuo composto de uma sequência de quatro gaiolas duo dispostas uma ao lado da outra (trem aberto), seguida de uma sequência de três gaiolas duo dispostas em linha (trem contínuo). Nesta figura, cada retângulo representa uma gaiola duo horizontal, cada quadrado com um "X" no seu interior representa o motor de acionamento e as setas indicam o sentido de laminação. A configuração apresentada pode ocorrer em laminadores que passaram por alguma reforma/investimento, onde se optou por manter as gaiolas antigas (aberto) e adicionar as gaiolas do trem novo (contínuo) ou onde não há espaço físico disponível para o layout de um trem contínuo.

### 3.5 Tipo de gaiolas de laminação

As gaiolas ou cadeiras são componentes principais de um trem laminador independentemente de sua configuração/arranjo. Estes equipamentos possuem a função de comportar os cilindros de laminação e podem apresentar diferentes configurações, a saber:

- gaiolas duo, gaiolas trio e gaiolas universais.

#### 3.5.1 Gaiolas duo

Trata-se de dispositivos compostos de dois cilindros paralelos horizontais ou verticais utilizados em arranjos de trem aberto, contínuo e aberto - contínuo.

A figura 3.10 apresenta a configuração de uma gaiola duo horizontal.

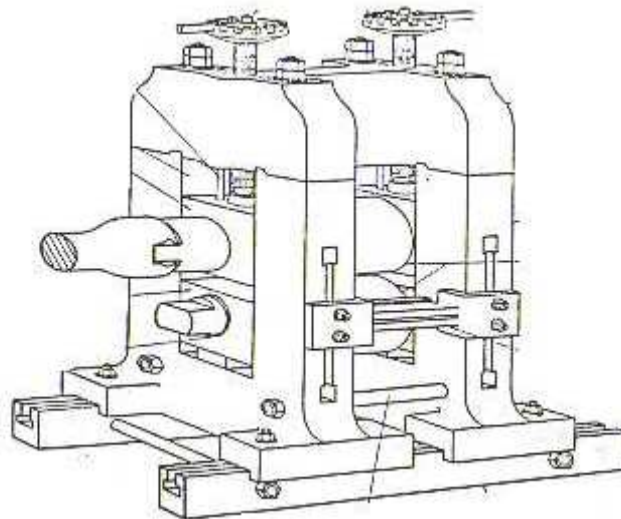


Figura 3.9 - Exemplo de gaiola duo horizontal. (CODA 2006)

A Figura 3.10 mostra exemplos de laminadores duo aberto (a) e contínuo (b)

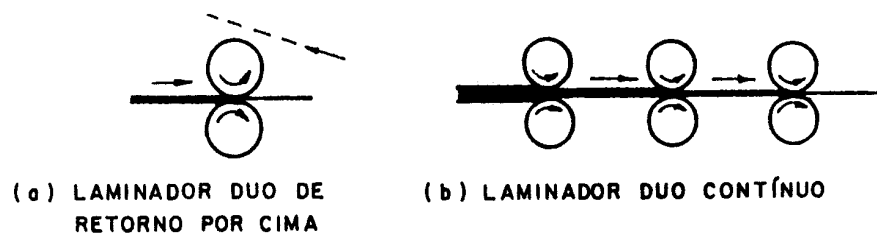


Figura 3.10 - Exemplos de laminadores DUO (BRESCIANI et al 1997)

A Figura 3.11 apresenta a configuração de uma gaiola duo vertical.



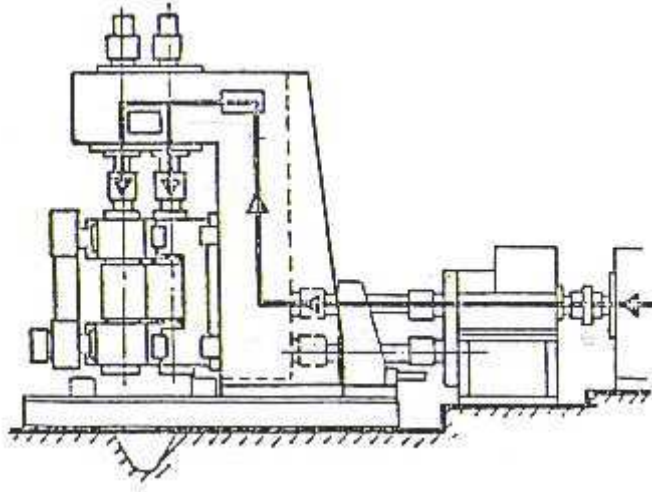


Figura 3.11 - Exemplo de gaiola duo vertical. (CODA 2006)

Na posição horizontal, o sentido de rotação pode, em alguns casos, ser alterado (reversível ou não-reversível). A Figura 3.12 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola duo horizontal não-reversível (a) e de uma gaiola duo horizontal reversível (b).

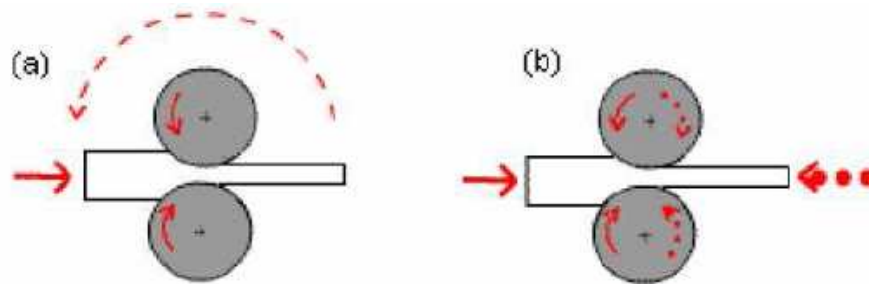


Figura 3.12 - Configuração de gaiolas duo horizontais não-reversível (a) e reversível (b). (VILELA 2007)

Em uma gaiola duo horizontal não-reversível (a) o material possui apenas um sentido de laminação, já em uma gaiola duo reversível (b), o material pode ser laminado em dois sentidos.

### 3.5.2 Gaiolas trio

As gaiolas do tipo trio são compostas de três cilindros paralelos horizontais, com sentidos alternados em cada par. Apresenta a vantagem de não ser necessária a reversão do sentido de rotação dos cilindros. Entretanto, exigem grande precisão de calibração já que

os canais não podem ser regulados independentemente. É necessária a utilização de mesas elevatórias ou basculantes. São usadas em trens abertos de perfis ou barras (grandes e médios) e como gaiola desbastadora de trens de perfis e barras (pequenos).

A Figura 3.13 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola trio.

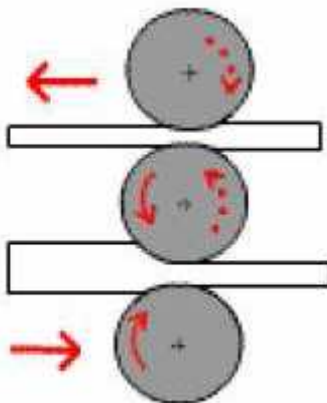


Figura 3.13 - Configuração de gaiola trio. (VILELA 2007)

Percebe-se pela configuração apresentada na Figura 3.13 que, em uma gaiola trio, o material pode ser laminado em dois sentidos sem que seja necessária a inversão da rotação dos cilindros e o ajuste de luz.

### 3.5.3 Gaiolas universais

A configuração de uma gaiola Universal é composta de um par de cilindros na horizontal e outro na vertical. Os quatro cilindros, geralmente, possuem acionamento independente, mas sincronizado. Podem ser usadas na produção de perfis pesados tais como vigas de abas paralelas. Também podem ser utilizadas para laminação de tubos de seção retangular e barras de seção redonda. (VILELA 2007)

A Figura 3.14 apresenta esquematicamente a configuração de uma gaiola universal.

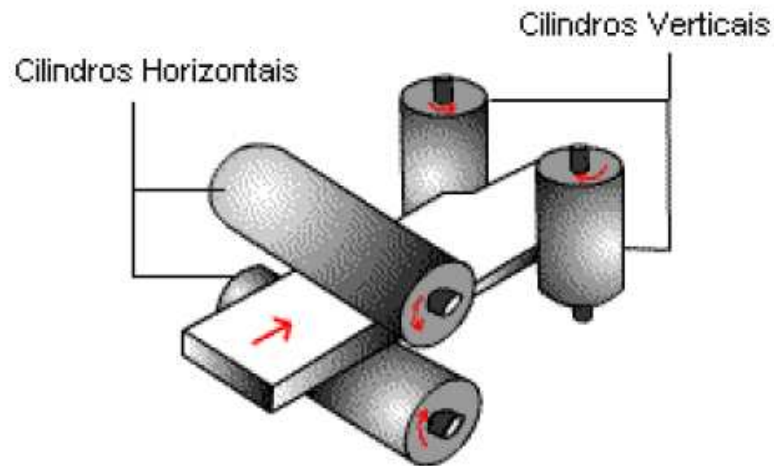


Figura 3.14 - Configuração de gaiola universal. (VILELA 2007)

Percebe-se pela configuração apresentada que esta é uma configuração indicada para a laminação de perfis.

### 3.5.4 Fluxo do processo de laminação

A Figura 3.15 apresenta o fluxo simplificado de um processo típico de laminação a quente.

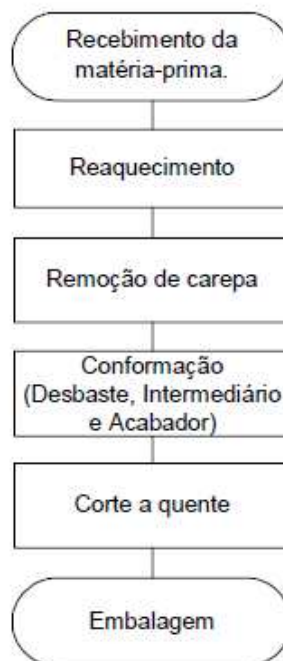


Figura 3.15 - Fluxo simplificado do processo de laminação a quente (SILVA 2010)

O processo de laminação tem início com a preparação e recebimento da matéria-prima e encerra-se com o enfeixamento e despacho do produto para as etapas subsequentes do processo na usina. Cabe ressaltar que o processo de laminação, compreendido como um processo de conformação, se restringe unicamente as etapas de desbaste, intermediário e acabador. Há casos em que não se usa descarepador após a etapa de reaquecimento, e casos que não se efetua corte a quente do produto, e casos em que os produtos são laminados em rolos. A Figura 3.16 representa o fluxo da planta industrial utilizada no trabalho e seus principais equipamentos.

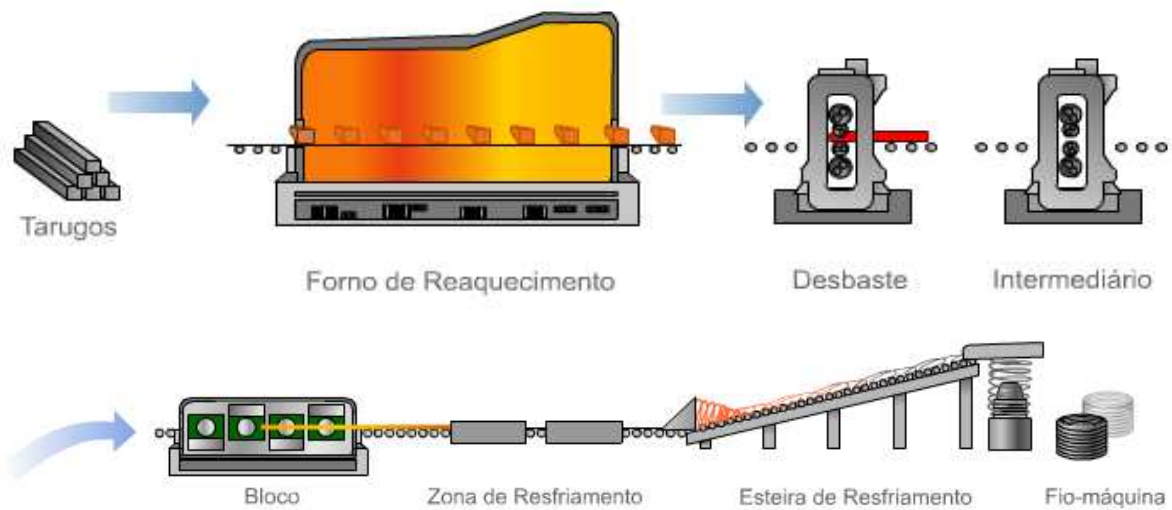


Figura 3.16 - Representação esquemática da planta da empresa parceira (RODRIGUES, 2012)

### 3.6 Matérias-primas do processo de laminação

As matérias-primas utilizadas no processo de laminação podem ser tarugos, placas ou blocos provenientes do processo de lingotamento contínuo ou lingotes provenientes do lingotamento convencional. As etapas seguintes relatam sobre um processo cuja matéria-prima é o tarugo proveniente do lingotamento contínuo.

O fluxo do processo de laminação para um produto com origem em lingotamento contínuo tem início com o recebimento da matéria-prima que pode ter sido preparada anteriormente ou ter vindo diretamente do lingotamento.

A preparação da matéria-prima se dá através do condicionamento do tarugo via processo de remoção total ou parcial da superfície. Esta preparação faz-se necessária

quando o tarugo apresenta sua superfície comprometida devido a presença de defeitos com origem do processo de solidificação.

O tipo de inspeção e condicionamento é definido em função do tipo de aço, sua aplicação, rota de produção e eventos de qualidade durante o lingotamento.

### 3.7 Reaquecimento para laminação a quente

Segundo VIANA, os fornos utilizados na indústria atualmente para o processo de laminação são os fornos contínuos, dotados de controles automáticos, quando se deseja obter elevada produtividade associada a um produto de qualidade.

A etapa de aquecimento do tarugo é de fundamental importância para o processo de laminação a quente uma vez que proporciona menor emprego de esforço mecânico durante as etapas de conformação.

O aquecimento dos tarugos antes da laminação a quente exerce um papel importante tanto para o bom desenvolvimento da laminação quanto para a qualidade dos produtos laminados. (BLAIN 1964)

A etapa de aquecimento da matéria-prima é necessária para que o aço apresente uma alta plasticidade, tanto no início, quanto no fim do processo de laminação. Tem que ocorrer de forma segura, homogênea e econômica.

O aquecimento consiste no aquecimento do tarugo até uma faixa de 1000 a 1200°C. Essa operação é realizada em fornos de aquecimento e os tarugos devem ser aquecidos uniformemente em toda a seção e em todo o comprimento, para evitar rupturas internas ou uma variação tanto na seção quanto na microestrutura do produto acabado. Uma zona mais fria em uma região da peça pode levar a quebra dos cilindros de laminação.

O aquecimento dos tarugos é realizado em fornos contínuos que devem atender requisitos e objetivos específicos em termos de taxa de aquecimento por razões de produtividade e propriedades metalúrgicas. Nestes fornos o material é aquecido gradualmente a medida que avança no forno.

Estes fornos apresentam um bom funcionamento se algumas condições forem satisfeitas, a saber: (HAUCK 2000)

- Garantia de uma temperatura de desenformamento adequada ao processo de laminação, com boa homogeneidade térmica;
- Controle adequado da temperatura e do ambiente do forno a fim de assegurar a formação e remoção da carepa de forma otimizada ao processo;
- Garantia da uniformidade de temperatura dos materiais durante o processo de laminação;
- Minimização das diferenças de temperatura provocadas pelo resfriamento localizado na região de contato dos *skids* com os tarugos;
- Controle adequado da pressão interna dos fornos visando uma melhor distribuição de temperaturas e evitando-se a entrada de ar frio nas câmaras de combustão.

### 3.7.1 Tipos de fornos de reaquecimento

Dentre alguns aspectos que definem a especificação de um forno de reaquecimento, podem ser citados:

- a) forma e tamanho da matéria-prima a ser aquecida;
- b) temperatura de enformamento e desenformamento da matéria-prima;
- c) homogeneidade desejada da matéria-prima quando desenformada;
- d) taxa de desenformamento;
- e) propriedades metalúrgicas (máxima diferença de temperatura aceitável durante o aquecimento, a máxima taxa de aquecimento admissível, descarbonetação e carepa).

Estes aspectos influenciarão na escolha do tipo de forno que poderá ser do tipo empurrador (*pusher*), de vigas móveis (*walking beam*) ou soleira móvel (*walking hearth*).

## Empurrador

Caracteriza-se pelo fato de que para cada peça carregada uma é descarregada, por isso este tipo de forno não pode ser completamente esvaziado. Este tipo de forno apresenta aquecimento superior e inferior e com isto apresenta algumas vantagens, como, por exemplo: redução do tempo de residência, rápido aquecimento e encharque, baixa diferença de temperatura entre as faces, dentre outras. (GUIDE 1994)

A Figura 3.17 apresenta esquematicamente a estrutura de forno do tipo empurrador.

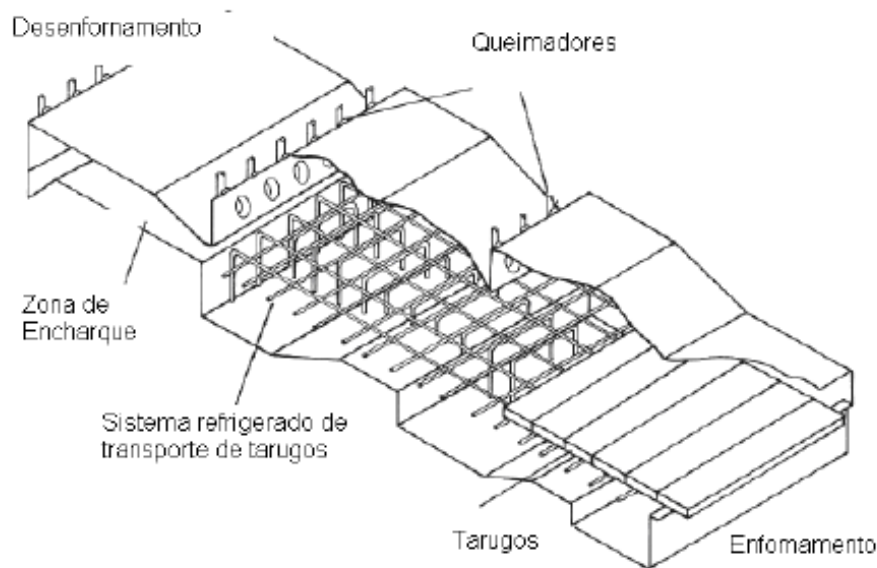


Figura 3.17 - Forno de reaquecimento para laminação tipo Empurrador. (GUIDE 1994)

Percebe-se a principal característica deste tipo de forno: não há espaço entre o material, o que prejudica o aquecimento pelas laterais do tarugo.

## Soleira móvel

Caracteriza-se pelo fato de que o reaquecimento é realizado por aquecedores presentes na parte superior do forno. Apresenta soleiras fixas e móveis que são responsáveis pela movimentação das peças no forno desde o enfornamento até o desenformamento.

A principal desvantagem deste tipo de forno é que o material não pode ser aquecido a partir da superfície inferior, apenas da superior. Este problema pode ser minimizado através do espaço que é deixado entre os tarugos. Caso este espaço seja muito pequeno, as

diferenças de temperatura entre núcleo e superfície podem ser inaceitáveis, impactando em aumento no tempo de residência dos tarugos no forno a fim de homogeneizar a temperatura. (GUIDE 1994)

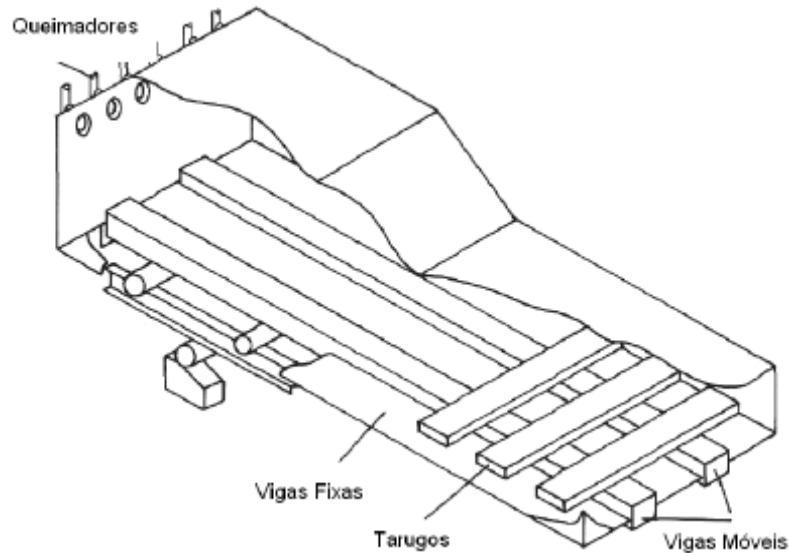


Figura 3.18 - Forno de reaquecimento para laminação tipo Soleira Móvel (GUIDE 1994)

Pela Figura 3.18 é possível identificar as soleiras fixas e móveis responsáveis pela movimentação dos tarugos dentro do forno. Além disso, é possível ver o espaço deixado entre os tarugos no intuito melhorar a homogeneidade do aquecimento.

### Vigas móveis

Este tipo de forno superou todas as dificuldades presentes no forno empurrador e permitiu o aquecimento do material através do uso de queimadores tanto na parte superior quanto na parte inferior do forno. Este fato permitiu a redução do tempo de permanência e do comprimento do forno além de melhorar o controle das taxas de aquecimento, proporcionar aquecimento uniforme com material aquecido homogeneamente no desenformamento e flexibilidade operacional. (GUIDE 1994)

A Figura 3.19 apresenta esquematicamente a estrutura de forno do tipo vigas móveis.



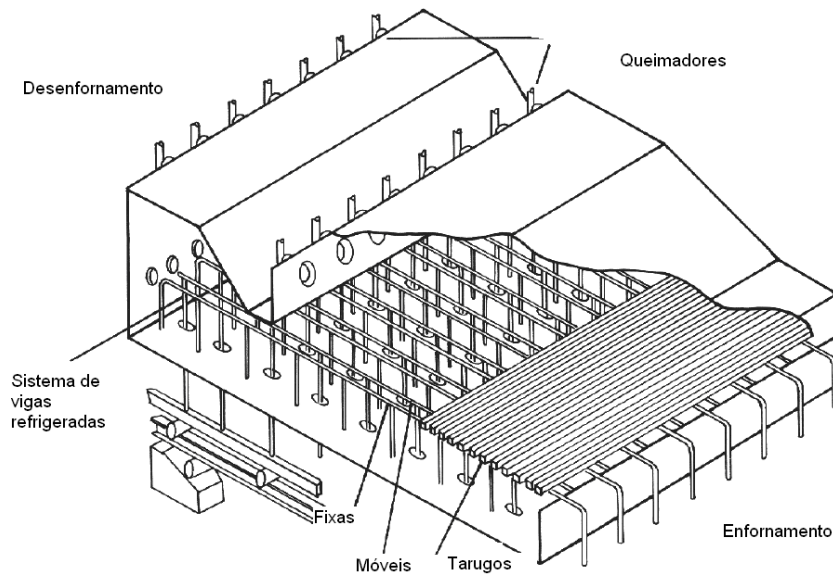


Figura 3.19 - Forno de rea aquecimento para laminação de vigas móveis (GUIDE 1994)

Pela Figura 3.19 é possível perceber que este forno apresenta o aquecimento similar ao de um empurrador com aquecimento superior e inferior, porém, a maior parte da estrutura do forno encontra-se abaixo do nível da laminação. As vigas que sustentam o material são refrigeradas com água o que acarreta uma grande desvantagem em termos de perdas de energia quando comparado ao soleira móvel (aumento de cerca de 15% da energia específica). (GUIDE 1994)

### 3.8 Calibração

A calibração consiste na distribuição da deformação total desejada no material em um conjunto de deformações intermediárias. Estas deformações intermediárias são denominadas passes de laminação, e os diferentes conjuntos de passes são denominados de sequência de calibração. (VIANA 2009).

Uma boa calibração implica em uma distribuição uniforme das reduções de área, pois um passe de laminação, utilizado corretamente, deve considerar as limitações de potência do equipamento, e os limites percentuais de redução de área que o material pode sofrer, já quando aplicado uma redução excessiva pode-se ultrapassar o limite de resistência a ductibilidade a quente, o que faz que o material se rompa ocasionando trincas no produto. Em média costuma se aplicar as maiores reduções nos desbastes em torno de 28% (CODA 2001).

Outra questão fundamental para uma boa calibração é o cálculo correto do material de entrada e saída de cada passe já que um passe mal calculado poderá fazer com que entre material em excesso em um passe o que gera defeitos no material ou até mesmo quebrar o equipamento.

### 3.9 Energias no processo de laminação

As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas, tornando-se necessária uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes para fornecer a potência requerida. Fica assim fácil de compreender por que em modernas instalações de laminação gastam-se milhões de dólares de investimento e tempo de projeto uma vez que esses requisitos são multiplicados para as sucessivas bancadas (ou cadeiras) de laminação contínua (DIETER 1981).

Muitos parâmetros influenciam o processo de laminação, mas alguns merecem destaque especial:

- Reaquecimento do tarugo: tempo e temperatura de forno;
- Calibração: determinam o percentual de redução por passe e a velocidade de deformação.

A laminação a quente determina: baixa resistência a deformação, possibilidade de substanciais mudanças de forma, sucessivas regenerações e crescimento de grãos (material não encrua). A temperatura normal de início de laminação para aços está entre 1100°C e 1200°C. (CODA 2006). Visto isso, o aquecimento dos aços é uma etapa fundamental na qualidade do produto final da laminação, busca-se com o reaquecimento dos aços transferir para a carga a quantidade de calor necessária de modo à facilitar os processos de conformação mecânica subsequentes. (BEUREN 2000).

Na fase de aquecimento dentro de um processo de reaquecimento, devem ser consideradas três variáveis básicas:

- Velocidade de aquecimento;
- Temperatura máxima de aquecimento;

- Tempo de permanência da peça na temperatura máxima.

Estas variáveis devem ser executadas dentro de padrões rígidos, variadas de acordo com as características microestruturais do aço (BEUREN 2000).

A temperatura de aquecimento é mais ou menos fixa, sendo determinada pela natureza do processo, das propriedades e das estruturas finais desejadas, da composição química do aço e principalmente do seu teor de carbono.

A influência do tempo de permanência do aço à temperatura de aquecimento é mais ou menos idêntica à máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo tempo à temperatura considerada de austenitização, tanto, mais completa a dissolução do carbono de ferro ou outras fases presentes tais como carbonetos complexos e formados com os elementos de liga do aço, entretanto maior o crescimento de grão resultante (CHANDLER 1995).

Para LIM et al, a temperatura de reaquecimento é o fator mais relevante no controle da temperatura de laminação. A temperatura de reaquecimento pode ser determinante para o aparecimento de defeitos superficiais no material laminado e também é a principal determinante na energia de deformação a ser aplicada na laminação da barra, por consequência, a temperatura de reaquecimento tem influência nos esforços mecânicos dos componentes dos equipamentos do laminador. Com base nesta grande influência da temperatura de reaquecimento, os testes foram planejados variando as temperaturas de controle do forno de reaquecimento.

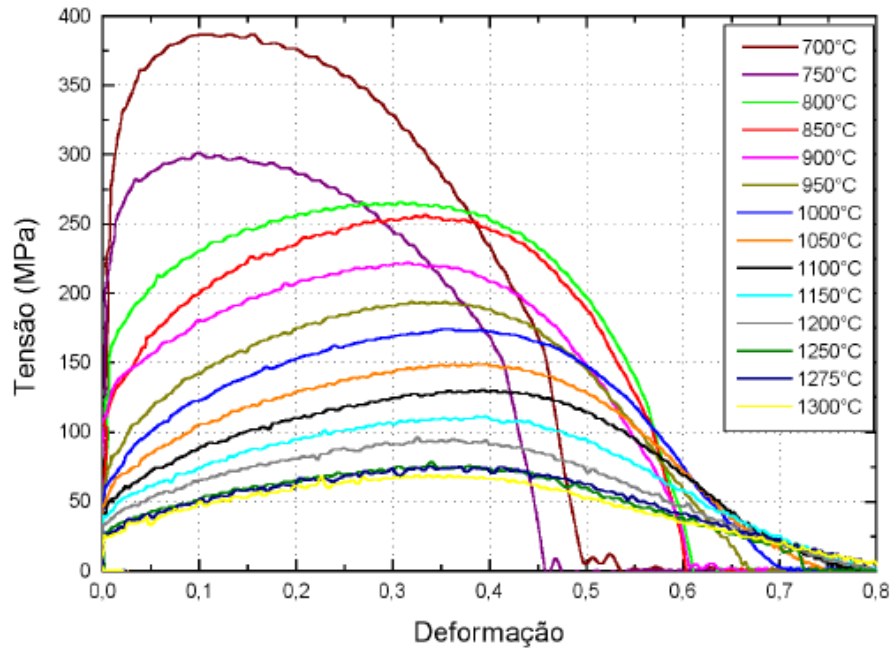


Figura 3.20 - Curva de tensão deformação a quente para o aço UNS20MnCr5. (FERNANDES 2005)

A Figura 3.20 demonstra que, para se obter um mesmo valor de deformação no material, é necessária uma tensão maior conforme a temperatura do material diminui. Ou seja, o aumento da temperatura favorece a deformação e reduz as chances de surgimento e/ou propagação de defeitos. Este comportamento é válido para a maioria dos tipos de aço, não somente para o caso mostrado da Figura 3.20.

Segundo SILVA, mesmo que as diferenças de temperatura de laminação entre uma condição e outra sejam pequenas, há uma maior resistência à conformação para temperaturas mais baixas, o que pode favorecer o surgimento ou a propagação de pequenos defeitos. Ou seja, esforços maiores são exercidos sobre um material que está sob uma condição de ductilidade reduzida.

### 3.10 Balanço Energético de Fornos de Reaquecimento

Olhando-se de maneira ideal, todo calor adicionado no forno deveria ser transferido para os tarugos, mas, na prática uma grande quantidade do calor adicionado no forno, através da queima de combustível, é perdida de diversas formas. O desempenho térmico de um forno, ou rendimento, corresponde à quantidade efetiva de calor que é transferida para os tarugos em relação à quantidade de energia fornecida através de calor da chama.

O balanço térmico de um forno representa uma das maneiras de se avaliar o desempenho térmico de um forno. Para isto, são avaliadas todas as parcelas que contribuem para a geração e a dissipação de calor.

HAUCK explica em detalhes como se calcular o balanço térmico de um forno e apresenta a figura 3.21.

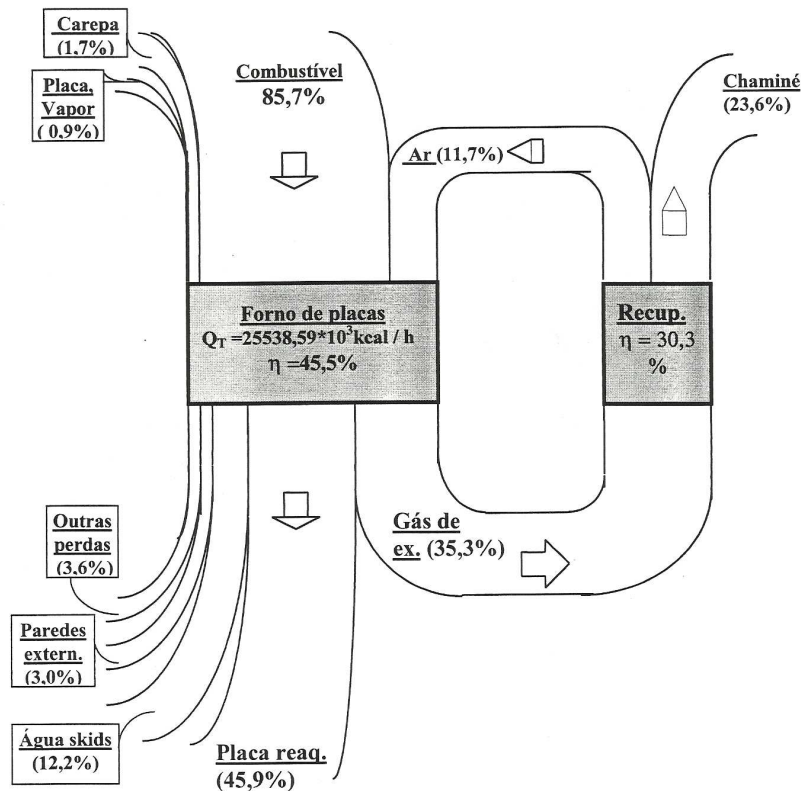


Figura 3.21 - Exemplo de um balanço energético de forno. No interior da figura  $Q_T$ , significa calor total e  $\eta$  o rendimento do forno e do recuperador de calor (HAUCK, 2000)

Na Figura 3.21, a largura de cada banda é proporcional à participação de cada componente no cômputo geral do balanço.

Pode-se notar que, para melhorar o rendimento térmico de um forno, deve-se trabalhar nas principais frentes:

- Diminuir perdas: pelas paredes e água;
- Aproveitar melhor o calor sensível dos gases de exaustão, por exemplo, através da eficiência térmica do recuperador de calor;

- Controlar excesso do ar de combustão para reduzir perdas pelos gases de exaustão que saem pela chaminé.

Para reduzir as perdas, de forma geral, os principais itens que devem ser bem controlados no forno são: relação estequiométrica das chamas nos queimadores; pressão de ar de combustão nas câmaras dos queimadores; vazão e pressão de ar e gás na entrada dos queimadores; vazão e quantidade de água existente nas regiões refrigeradas do forno; qualidade e espessura dos isolamentos refratários; bom projeto e manutenção do recuperador de calor.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho da dissertação foi desenvolvido nas instalações de uma empresa parceira que também cedeu acesso ao histórico de dados referente ao forno, os consumos de gás natural e produções diárias. Os experimentos foram desenvolvidos na planta industrial que utiliza um forno do tipo soleira móvel (como da Figura 3.18 e da Figura 4.1).

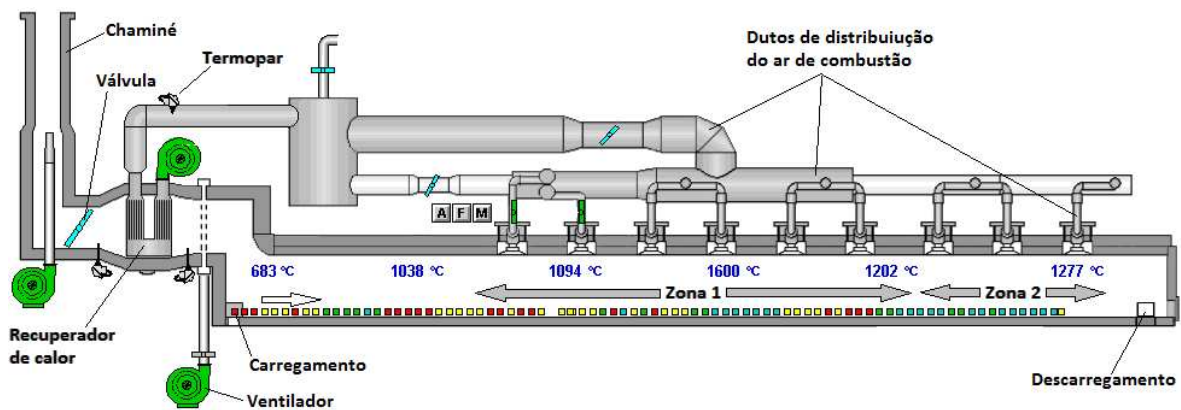


Figura 4.1 - Desenho esquemático do corte longitudinal de um forno do reaquecimento do tipo Soleira Móvel utilizado no trabalho

O laminador da empresa parceira possui 10 gaiolas de laminação e um bloco acabador, produz material somente em rolos. A Figura 4.2 representa um esquema do fluxo que as barras laminadas seguem e os pontos de medição de temperatura ao longo do laminador. A primeira gaiola (D1) é do tipo Trio e faz 5 passes, as outras gaiolas do desbaste 2 (D6, D7, D8, D9, D10) e do trem médio (M1, M2, M3, M4) estão em linha. Os pontos P1, P2, P3 e P4 representam os pirômetros de medição de temperatura da barra que está sendo conformada.

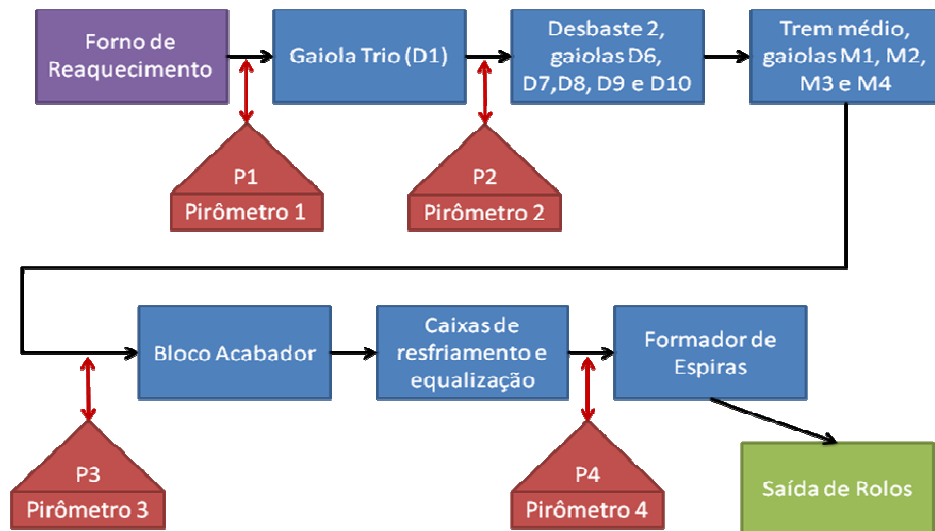


Figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho

Utilizou-se no estudo o tipo de aço, o tipo de produto e bitolas com maior volume de produção na planta industrial da empresa parceira. Os experimentos foram desenvolvidos em fios-máquina fabricados de aço equivalente ao aço SAE1013 e nas bitolas 5,50mm e 6,30mm. O processo utilizado foi a laminação a quente de tarugos que possuem seção quadrada inicial de 120mm e massa variando entre 480kg e 520kg.

Nas operações de desbaste e trem médio, são usados cilindros de ferro fundido e nas operações acabadoras são usados roletes de carboneto de tungstênio.

A metodologia do trabalho ocorreu conforme esquema da figura Figura 4.3, primeiramente foi realizada uma análise prévia do desempenho do forno quantificando os ganhos possíveis deste equipamento, e a que distância se está trabalhando de uma condição teoricamente ideal. A análise prévia é um diagnóstico da situação atual e foi dividida em 4 passos. Posteriormente, foram realizados experimentos para se analisar a influência dos parâmetros de temperatura do forno no consumo de energia elétrica do laminador.



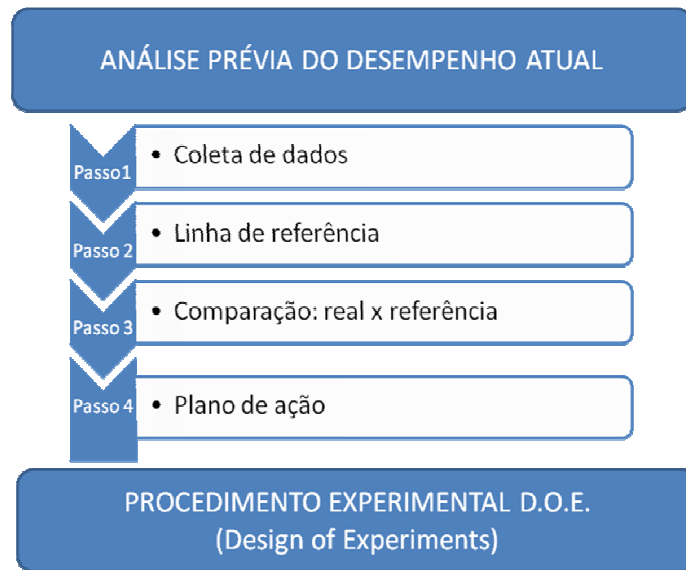


Figura 4.3 - Esquema representativo da metodologia utilizada no trabalho

A análise de desempenho atual do forno foi realizada de acordo com o procedimento indicado por DETR (*Department of Environment, Transport and Regions*) contidos no documento: *Energy Consumption Guide*. Esta análise serve para os principais tipos de forno de reaquecimento usados na indústria siderúrgica: Empurrador, de Vigas Móveis e de Soleira Móvel (apresentados no item 3.71). Os passos da análise foram:

Passo 1) Coleta de dados e avaliação inicial - os dados foram coletados numa empresa siderúrgica parceira do trabalho que cedeu as informações e instalações para realização de todos os testes. A base de dados utilizada foi de janeiro de 2008 até o mês de junho de 2011, foi considerada a produção diária e o correspondente consumo, portanto, foram considerados 1270 pontos. A partir destes dados, foi avaliado o desempenho atual em  $\text{Nm}^3/\text{t}$  (consumo de gás natural dividido por tonelada de aço aquecida) correlacionando com a produção por dia. Foram retiradas, através de regressão algébrica (pelo software Microsoft Excel), as equações de uma reta e de uma curva logarítmica referente ao desempenho atual;

Passo 2) Uso da equação *Benchmark* ou linha de referência - neste passo é traçada uma reta considerada referência de consumo para cada produção diária e as curvas obtidas no passo 1 (desempenho atual) são comparadas com a linha de referência. Esta reta de referência é obtida através da aplicação da equação 1, indicada pelo método:

$$\text{Consumo} = \frac{\Delta h_{\text{aço}}}{\eta_{\text{forno}}} \times \text{Pr odução} + \frac{Q_{\text{perdido}}}{\eta_{\text{forno}}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Consumo - refere-se ao consumo de energia por tonelada produzida, o autor utiliza a unidade GJ/t, no entanto, devido a familiaridade da unidade, utilizou-se kWh/t.

$\Delta h_{\text{aço}}$  - é a quantidade de calor necessária para aquecer o aço da temperatura de enforamento até a temperatura de desenforamento. A Tabela 4.1, indicada pelo método, é uma forma simplificada de se calcular. Porém, a unidade apresentada está em GJ/t, para se obter o resultado final em kW/t, este valor deve ser convertido.

$\eta_{\text{forno}}$  - rendimento do forno. Obtido pela Tabela 4.2.

$Q_{\text{perdido}}$  - quantidade de calor perdido em todas perdas do processo de reauecimento. De acordo com a O valor utilizado foi  $\eta_{\text{forno}} = 71,2\%$ , considerando-se a temperatura média dos gases de exaustão de  $800^{\circ}\text{C}$  e interpolando a temperatura média de pré-aquecimento do ar de combustão que é de  $450^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 4.3.

Tabela 4.1 - Quantidade de calor necessária para aquecer aço em relação à temperatura de enforamento e desenforamento, adaptada de DETR - *Department of Environment, Transport and Regions*

Valores de entalpia para o aço (GJ/t)						
Temperatura média de descarregamento do aço (°C)	Temperatura média de enforamento (°C)					
	10	50	200	400	600	800
1200	0,811	0,793	0,719	0,605	0,468	0,264
1220	0,824	0,806	0,732	0,618	0,481	0,277
1240	0,837	0,819	0,745	0,631	0,494	0,29,
1260	0,850	0,832	0,758	0,644	0,507	0,303
1280	0,863	0,845	0,771	0,657	0,520	0,316
1300	0,876	0,858	0,784	0,670	0,533	0,329

Sobre a Tabela 4.1, o autor apresenta algumas observações:

- Os valores apresentados são uma média para os aços de baixo carbono;
- Pode-se usar interpolações;
- O calor consumido na formação de carepa é desconsiderado.

O valor utilizado foi  $\Delta h_{aço} = 0,719$  GJ/t, considerando-se temperatura média de descarregamento do aço de 1200°C e temperatura média de enformamento de 200°C.

Tabela 4.2 - Eficiência de combustão do forno em função da temperatura do ar de combustão e da temperatura dos gases de exaustão, adaptado de DETR - *Department of Environment, Transport and Regions*

Valores de eficiência de combustão do forno (%)							
Temperatura dos gases de exaustão (°C)	Temperatura de pré-aquecimento do ar de combustão (°C)						
	20	200	300	400	600	800	1000
600	65,5	71,7	75,3	78,9	-	-	-
700	61,0	67,2	70,8	74,4	-	-	-
800	56,3	62,5	66,1	69,7	77,4	-	-
900	51,6	57,8	61,4	65,0	72,7	-	-
1000	46,8	52,7	56,6	60,2	67,9	75,3	-
1100	42,0	48,2	51,8	55,4	63,1	70,5	-
1200	37,0	43,2	46,8	50,4	58,1	65,5	73,4
1300	32,0	38,2	41,8	45,4	53,1	60,5	68,4

Para o uso da Tabela 4.2, deve-se levar em conta algumas considerações:

- A temperatura de pré-aquecimento do ar de combustão deve ser medida no queimador e não na saída do recuperador;
- A temperatura dos gases de exaustão é medida na saída do forno;
- Os valores de rendimento apresentados foram calculados para o gás natural, utilizando-se um poder calorífico médio e com uma combustão com 9,5% de excesso de ar.
- Pode-se usar interpolações;
- Pode-se usar a mesma tabela para outros combustíveis, porém o erro poderá ser de até 6% (segundo o autor).

O valor utilizado foi  $\eta_{forno} = 71,2\%$ , considerando-se a temperatura média dos gases de exaustão de 800°C e interpolando a temperatura média de pré-aquecimento do ar de combustão que é de 450°C.

Tabela 4.3 - Perdas consideradas normais de acordo com tipo de forno, largura e comprimento, adaptação de DETR - *Department of Environment, Transport and Regions*

<b>Valores de perdas de energia do forno (GJ/h)</b>						
<b>Largura do forno (m)</b>	<b>Comprimento do forno (m)</b>					
	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Fornos Empurradores com queimadores no teto e Fornos de Soleira Móvel</b>						
10	1,1	1,5	2,0	2,9	3,8	4,7
12	1,3	1,8	2,6	3,4	4,4	5,5
14	1,4	2,0	2,7	3,9	5,1	6,3
16	1,6	2,3	3,0	4,4	5,7	7,1
18	1,8	2,6	3,3	4,8	6,4	7,9
20	2,0	2,8	3,7	5,3	7,0	8,7
<b>Fornos Empurradores com queimadores no teto e laterais e Fornos de Vigas Móveis</b>						
10	1,2	1,9	2,4	3,5	4,6	5,6
12	1,6	2,2	2,8	4,0	5,3	6,5
14	1,8	2,5	3,2	4,5	5,9	7,3
16	2,0	2,8	3,5	5,1	6,6	8,1
18	2,2	3,1	3,9	5,6	7,3	8,9
20	2,4	3,3	4,3	6,1	7,9	9,7

O valor utilizado para  $Q_{perdido}$  foi de 0,85 GJ/h, obtido por meio de interpolação, utilizando-se as dimensões do forno do estudo de 5m x 16m.

O resultado da equação 1 é obtido através das constantes das tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, que levam em consideração o calor necessário para aquecer o aço, o tipo de forno, suas dimensões e suas perdas aceitáveis e correlaciona a energia de reaquecimento com a produção diária. Portanto, tomando-se a equação 1, em função da produção diária, se obtém uma reta de referência. Esta reta representa o consumo de energia esperado para o tipo de forno estudado, nas condições de operação.

Passo 3) Avaliando-se o potencial de ganho através da comparação das curvas obtidas nos passos anteriores, foi possível a avaliação do potencial de ganho para cada produção. A comparação com a reta de referência, ou até mesmo com as equações obtidas no passo 1, possui ainda outro benefício: permite uma gestão do desempenho periódico

(diário ou semanal). Consumos acima das retas indicam a provável existência de algum desvio operacional naquele dia ou semana;

Passo 4) Definição e execução de ações - neste passo, foi utilizado o método FMEA para se chegar às ações.

FMEA é uma técnica analítica utilizada por um engenheiro/time como uma maneira de garantir que, até a extensão possível, os modos potenciais de falha e suas causas/mecanismos associados tenham sido considerados e localizados. Na sua forma mais rigorosa, o FMEA é um sumário do conhecimento do engenheiro/time de como um produto ou processo é desenvolvido. Esta abordagem sistemática confronta e formaliza a disciplina mental que um engenheiro passa em qualquer processo de planejamento de manufatura (SAKURADA, 1997).

Segundo Sakurada, FMEA é um método qualitativo que estuda os possíveis modos de falha dos componentes, sistemas, projetos e processos e os respectivos efeitos gerados por esses modos de falha. O modo de falha é a expressão utilizada para caracterizar o processo e o mecanismo de falha que ocorre nos itens. O efeito é maneira como o modo de falha se manifesta. Cada item pode ter diferentes modos de falha. Um determinado modo de falha vai se tornar mais ou menos vidente, dependendo da função que o item está desempenhando naquele caso específico. O efeito, por sua vez, segue a mesma sistemática.

A seguir, tem-se a descrição de cada um dos campos do formulário de FMEA utilizado:

Identificação do sistema: Identificação do nome do sistema ou o título de identificação do FMEA;

Participantes: Nome das pessoas da equipe FMEA que estão presentes na reunião.

Página e datas: Número da página, datas de início (dia/mês/ano) das reuniões para o desenvolvimento do FMEA e data atual.

Componente: Nome dos componentes do sistema.

Função: intenção, propósito, meta ou objetivo do componente.

Modo potencial de falha: O problema, a preocupação, a oportunidade de melhoria, a falha

Efeitos potenciais de falha: São as consequências que surgem no sistema causadas pelos modos de falha.

Para a realização do FMEA, foram feitas reuniões na empresa parceira do trabalho com representantes da equipe responsável pelo forno, realizando a análise do modo de falha que foi denominado: "Consumo Excessivo de Energia". Foi utilizado o formulário conforme Figura 4.4:

Sistema: _____				Página ____ de ____		
Participantes: _____ _____				Data de início: ____/____/____ Data de revisão: ____/____/____		
Componente	Função	Modo de Falha	Efeitos potenciais de Falha	Causas Potenciais / Mecanismos de Falha	Ações recomendadas	Responsabilidade e data de conclusão limite

Figura 4.4 - Formulário modelo de FMEA utilizado

Foram levantados os seguintes mecanismos de falha (causas potenciais) e para cada um destes, foram sugeridas ações de melhoria, que serão apresentadas no item 5.1:

- Perdas para o meio (falta de isolamento);
- Perdas devido aberturas;
- Ajustes operacionais e manutenção periódica;
- Gestão e acompanhamento periódico;
- Ineficiência dos equipamentos;

Feita a análise inicial descrita nos passos anteriores, avaliando-se o forno, foi iniciado a fase de experimentos no forno e no laminador. Os experimentos realizados no laminador avaliaram quantitativamente a influência das temperaturas de enformamento na corrente elétrica das gaiolas de laminação. Desta forma, busca-se a influência da energia de reaquecimento na energia de deformação do aço e a otimização destas energias.

A determinação da temperatura ideal de laminação depende de uma complexa combinação de vários parâmetros. De um modo geral, procura-se trabalhar com temperaturas extremamente altas onde a tensão de escoamento dos materiais é extremamente baixa e a ductibilidade alta. Os inconvenientes de se trabalhar em temperaturas muito altas são o alto consumo de combustível para reaquecimento e a alta taxa de oxidação e decarbonetação do aço. O valor superior da temperatura está limitado ao surgimento de fases líquidas e o limite inferior está definido em função do aparecimento de trincas e aumento da tensão necessária para deformação, isto ocorre devido à perda de plasticidade do material.

Para aços ao carbono a Figura 4.5 mostra as regiões ideais de conformação em função da concentração de carbono.

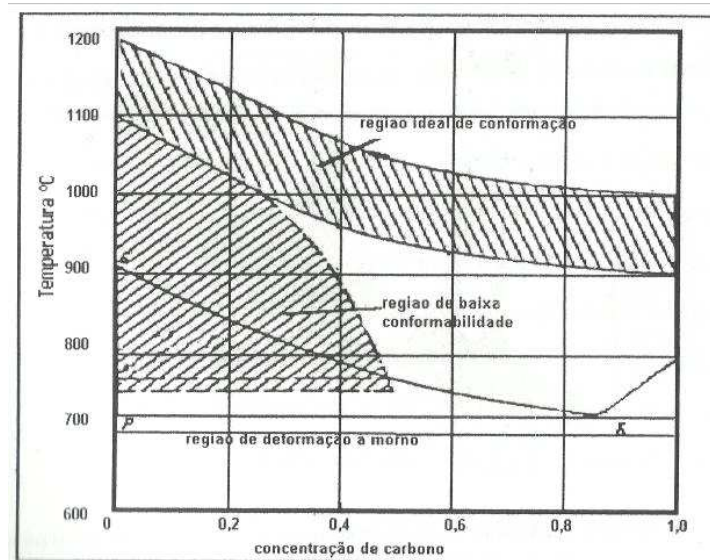


Figura 4.5 - Região ideal de conformação de acordo com %C do aço em massa. Fonte: ROCHA, 2011.

A figura 4.6 mostra a variação da ductibilidade de uma liga de aço com 0,12% em massa de carbono com a variação da temperatura. Observa-se que na temperatura de

aproximadamente 900°C ocorre uma redução da ductibilidade, o que é prejudicial para o processo de laminação e propicia a formação de trincas.

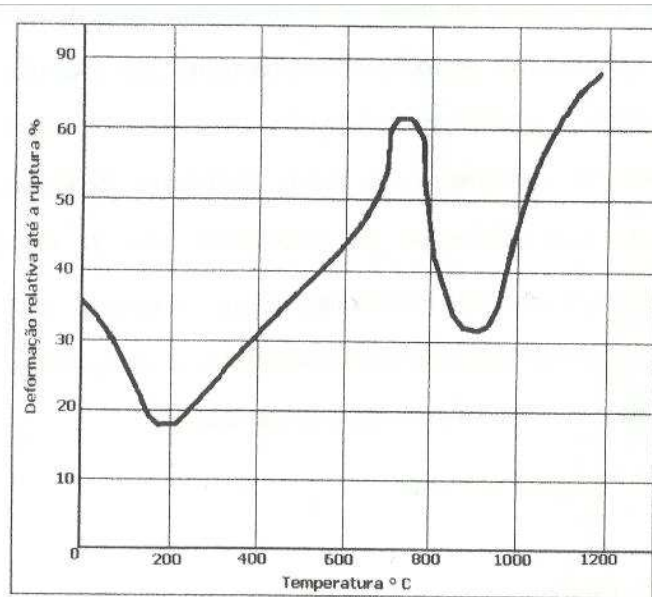


Figura 4.6 - Deformação relativa até a ruptura de um aço 0,12% de carbono. Fonte: ROCHA, 2011

Os experimentos foram desenvolvidos segundo o método DOE 2<sup>k</sup>, com os seguintes parâmetros:

- Fatores de controle: Temperatura da Zona 1 do Forno e Temperatura da Zona 2 do Forno (vide figura 4.1);

- Variáveis de resposta: temperatura de desenformamento, temperatura após o 5° passe (P1 na figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho), temperatura da barra após gaiola D1 (P2 na figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho), temperatura da barra antes do bloco acabador (P3 na figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho), temperatura da barra após as caixas de resfriamento e equalização (P4 na figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho). Corrente elétrica das gaiolas: D6, D7, D9, D10, M1, M2, M3 e M4 (vide figura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho);



- Fatores de Ruídos: temperatura de enformamento, operador, calibração das gaiolas, desgaste dos cilindros, nível de tração das gaiolas;

- Níveis de Fatores: -1 = padrão, +1 = 50°C acima do padrão;

- Aleatorização: dado pelo *software* Minitab (padrão randômico);

A fim de averiguar se não houve variação significativa nas propriedades mecânicas do fio-máquina foram tomadas amostras durante a realização dos testes.

Foi medida a temperatura média de enformamento dos tarugos através de pirômetro manual a laser, modelo Minipa MT-350, range de temperatura de -30°C a 550°C, exatidão de +/-2°C. As temperaturas do forno são medidas através de termopares e enviadas ao *software* de controle do forno que é ligado ao software de controle central da linha que armazena as informações. As outras temperaturas ao longo do laminador são medidas por pirômetros óticos do fabricante Ircon, modelo Modline Plus 2 cores, série R-14C05, com faixa de medição de 700 a 1400°C e precisão de +/-3°C (0,75% da escala). As correntes elétricas dos motores são medidas pelos inversores ou conversores de cada motor e enviadas ao *software* de controle central que controla e armazena a informação. Então através do *software* de controle central da linha é possível realizar a leitura de todas as informações pertinentes ao experimento.

Os limites do DOE foram estabelecidos da seguinte forma: o limite inferior da temperatura da barra não deve ser próximo da região de menor deformação relativa de ruptura, indicado na figura 4.3, 900°C. De acordo com a figura 4.3, para as deformações aplicadas (eixo y) no laminador onde foram desenvolvidos os estudos, a temperatura mínima deve ser de 950°C. Este limite inferior pode ser confirmado também, observando-se a Figura 4.5 que demonstra que nestas temperaturas, para um aço SAE1013 já se estaria trabalhando numa região de baixa conformabilidade. Como esta temperatura é de laminação e não de desenformamento, ela não deve ser atingida em nenhum ponto do laminador, como segurança, para não se causar nenhum dano a nenhum equipamento nem ao material. Assim foi estabelecido o critério de se usar a temperatura padrão do laminador para o aço (nível -1 dos fatores de controle do DOE), como limite inferior. Como limite superior, adotou-se um critério de se utilizar 50°C acima do atual padrão existente para cada zona de aquecimento do forno.

Os experimentos foram organizados combinando-se os limites das variáveis (TZ1 e TZ2 na Tabela 4.4) e lendo-se as correntes elétricas dos motores e demais temperatura como resposta, seguindo a matriz de planejamento do experimento (Tabela 4.5).

Tabela 4.4 - Valores dos fatores de controle para os ensaios

Fator de Controle	Mínimo (-1)	Máximo (+1)
Temperatura Zona 1 (TZ1)	1130 °C	1180 °C
Temperatura Zona 2 (TZ2)	1170 °C	1220 °C

Foram feitos experimentos com todas as combinações possíveis dos fatores de controle acima, de acordo com o método de execução de experimentos 2<sup>2</sup>, descrito por vários autores que estudam as técnicas de planejamento e análise de experimentos (DEVOR et al. 1992). A matriz de planejamento do experimento utilizada foi a exposta na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 - Matriz de planejamento do experimento fatorial

N do teste	Fatores de controle		Ordem do teste
	TZ1	TZ2	
1	-1 (1130°C)	-1 (1170°C)	1
2	+1 (1180°C)	-1 (1170°C)	4
3	-1 (1130°C)	+1 (1220°C)	3
4	+1 (1180°C)	+1 (1220°C)	2

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise inicial

Da análise inicial do desempenho atual do forno de reaquecimento foram obtidos os gráficos da Figura 5.1 e da Figura 5.2. No gráfico da Figura 5.1 foram obtidas duas relações, uma por regressão linear e a outra por regressão logarítmica a partir dos dados reais de produção. Estas duas equações representam funções do consumo de gás natural em função da produção diária. Estas mesmas funções foram usadas para se comparar a energia proporcionada pelo gás natural, comparando-se com a reta de referência na Figura 5.2.

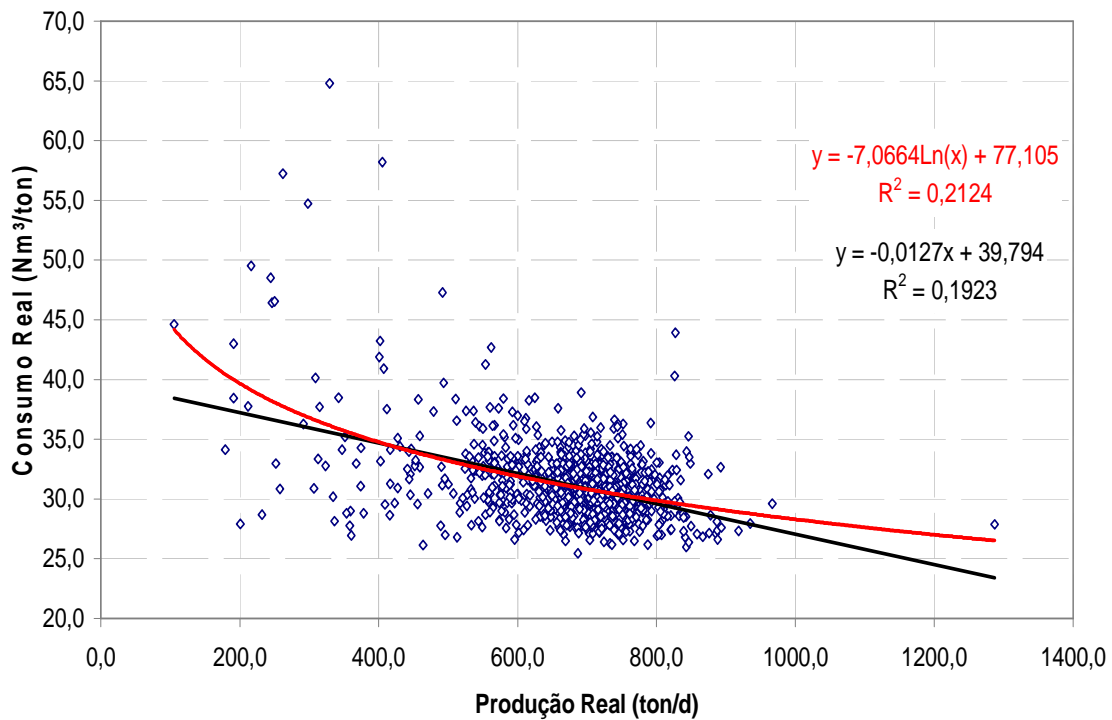


Figura 5.1 - Correlação do consumo de gás com a produção diária

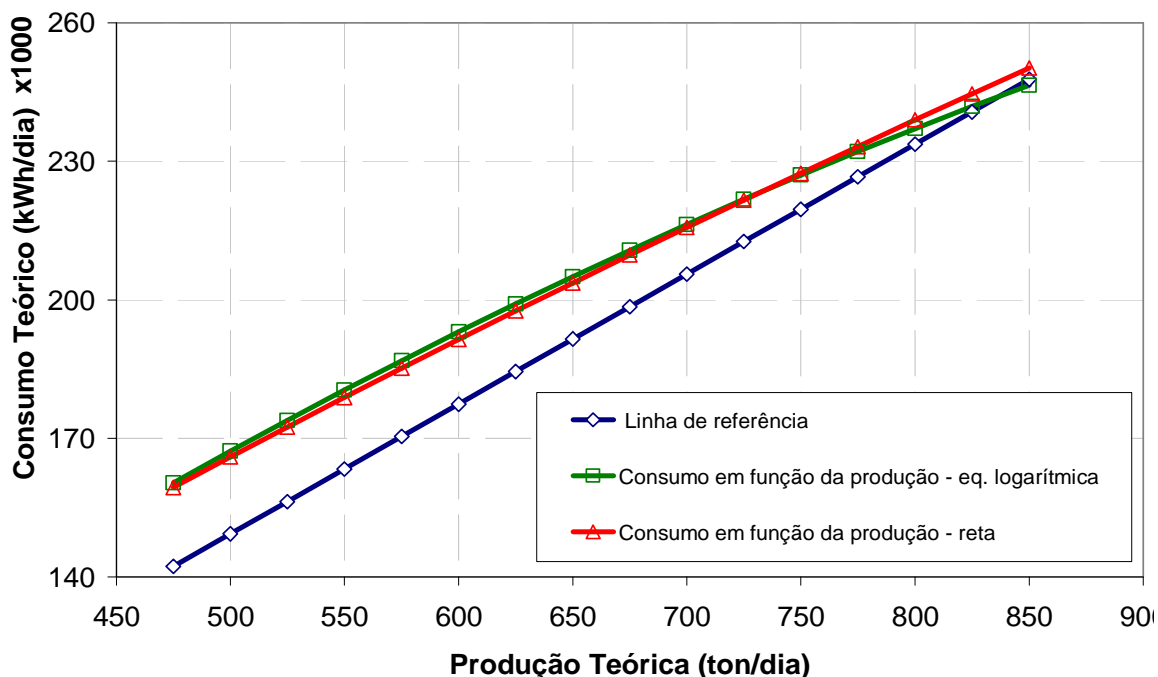


Figura 5.2 - Gráfico do consumo de gás teórico com a produção diária

Da Figura 5.2, o desempenho da fábrica parceira ao projeto, no segundo trimestre de 2011 (consumo em função da produção) se aproxima muito da linha de referência para produções diárias acima de 750t, o que indica um ótimo desempenho para estas produções.

Analisando-se a Figura 5.2 percebe-se que o desempenho da empresa parceira, no segundo trimestre de 2011, para produções diárias acima de 750t (nível atual), está muito próximo do ótimo, pois as linhas que representam o consumo real se aproximam da linha de referência.

## 5.2 Análise de FMEA - plano de ação

Pelo método de análise, no passo 4, quando foi feito um FMEA com o objetivo de definir algumas ações para redução do consumo de energia do forno de reaquecimento. Para a realização do FMEA foram feitas reuniões com o pessoal envolvido na operação do forno, engenheiros de processo e de manutenção, após isso, as informações foram compiladas. Ações sugeridas:

- a) Modo de falha - Perdas para o meio (falta de isolamento);
- Realizar a troca e recuperação completa dos refratários do forno;

- Pintar parede externa do forno com tinta alumínio diminuindo a emissividade das paredes;

b) Perdas devido aberturas;

- Consertar vazamentos de água, entradas de ar no selo de água de vedação do forno;

- Reduzir ainda mais o tempo de abertura e tamanho das portas de enformamento e desenformamento;

c) Ajustes operacionais e manutenção periódica;

- Implantar controle periódico de ajuste da relação estequiométrica, tamanho e formato de chama (atender padrão existente);

d) Gestão e acompanhamento periódico;

- Instalar câmeras e integrá-las ao CFTV (Circuito Fechado de Televisão) de forma a intensificar o controle e ajuste da chama;

- Usar gráfico apresentado na Figura 5.2 para gestão e controle diário e por turno do desempenho do consumo;

- Acompanhar sistematicamente através de termografia externa e videoscopia interna do forno a fim de antever danos no refratário;

- Revisar, calibrar e aferir todas as válvulas de controle de vazão do ar de combustão e do gás natural. Manter revisões periódicas

- Desenvolver um sistema de retro-alimentação da temperatura medida na linha de laminação para se ajustar com precisão o valor médio da temperatura de desenformamento, em condições *on-line*.

e) Ineficiência dos equipamentos;

- Reformar recuperador de calor reserva e trocar pelo atual.

### 5.3 Resultados do DOE

Para analisar o efeito isolado de cada um dos fatores de controle, foram feitos os gráficos da Figura 5.3 e da Figura 5.4. Estes gráficos servem para ver a influência de apenas uma variável isolada, independente da outra. É como se a outra variável permanecesse fixa em qualquer outro valor dentro dos limites estabelecidos pelo DOE. Então, a Figura 5.3 demonstra a influência da variação do fator de controle TZ1 (temperatura da zona de aquecimento), mantendo fixo TZ2 no valor mínimo de DOE (1170°C). Já a Figura 5.4, demonstra a variação da corrente, alterando-se TZ2 (temperatura da zona de encharque), mantendo-se TZ1 no valor mínimo do DOE (1130°C). Desta forma, comparando-se as duas figuras é possível identificar qual temperatura possui maior influência. Não é apresentado o valor absoluto da corrente elétrica, mas o percentual em relação à corrente nominal de cada gaiola.

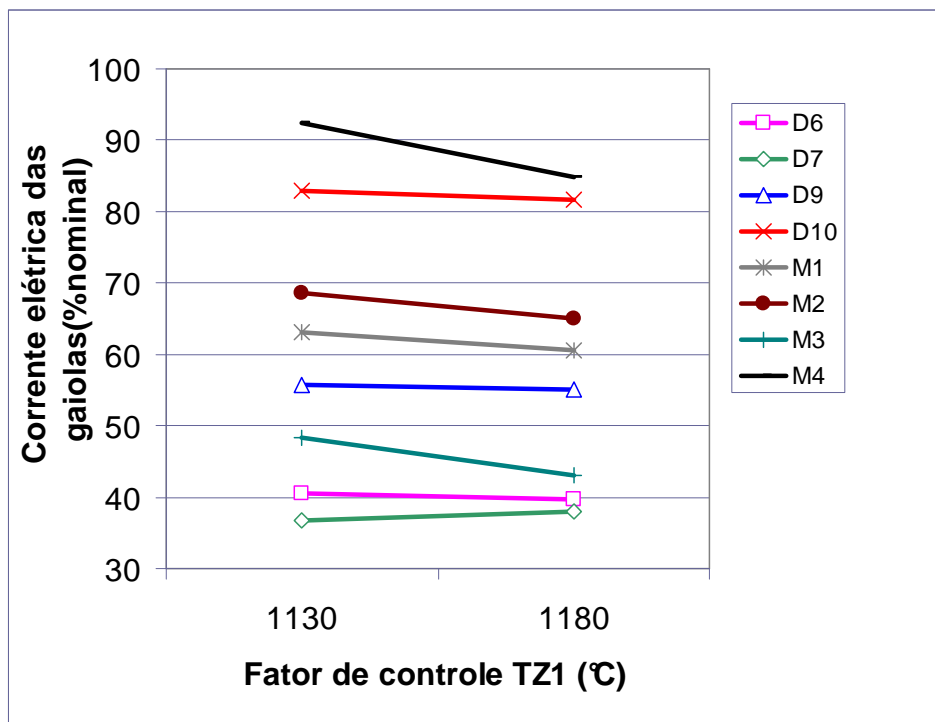


Figura 5.3 - Resultado DOE, influência isolada do fator de controle TZ1 em relação à corrente elétrica das gaiolas, mantendo-se TZ2 fixo em 1170°C.

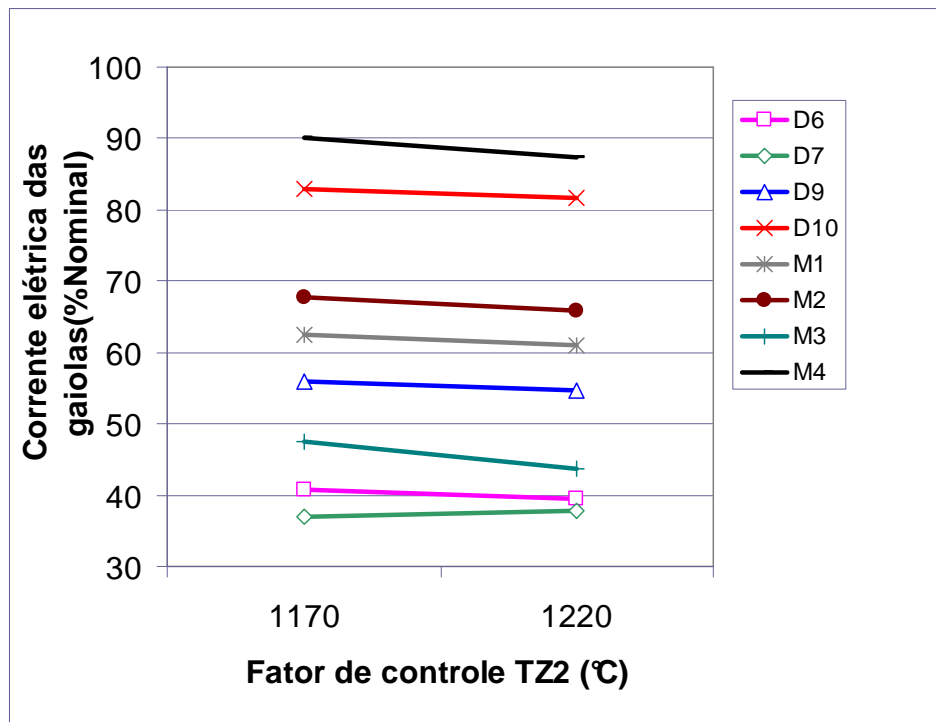


Figura 5.4 - Resultado DOE, influência isolada do fator de controle TZ2 em relação à corrente elétrica das gaiolas, mantendo-se TZ1 fixo em 1130°C.

Para analisar o efeito conjugado dos dois fatores de controle foram usados os gráficos de superfície e os gráficos de contorno apresentados na Figura 5.5 até a Figura 5.20. Não é apresentado o valor absoluto da corrente elétrica, mas o percentual em relação à corrente nominal de cada gaiola.

Pode-se notar que, se analisadas separadamente, dos dois fatores de controle, TZ1 e TZ2, a temperatura da zona 1 é a variável com maior influência nas correntes das gaiolas (vide Figura 5.3 e Figura 5.4). Isto se deve ao fato de que a zona 1 é maior que a zona 2 e por consequência, o tempo de permanência dos tarugos na zona 1 é maior.

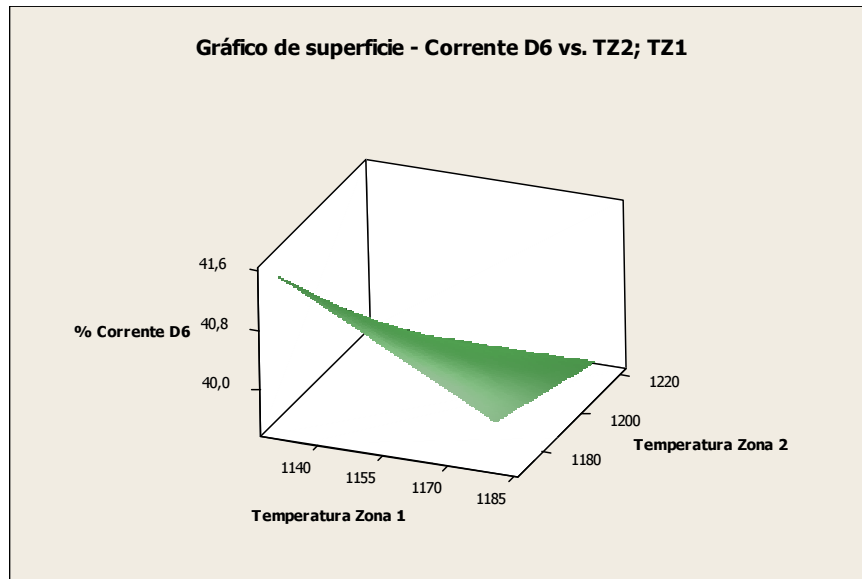


Figura 5.5 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D6 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

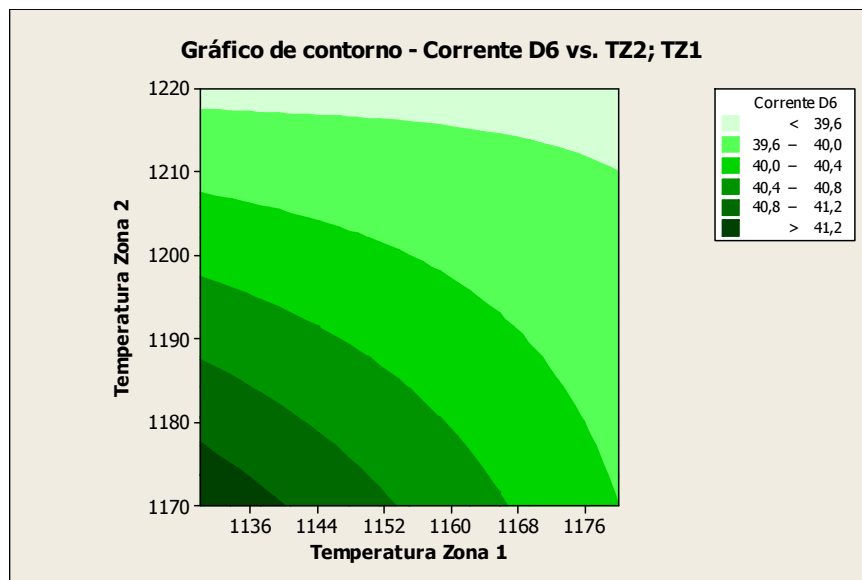


Figura 5.6 - Gráfico de contorno para a variação da corrente do motor na gaiola D6 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

Através da análise das figuras 5.5 e 5.6, conclui-se que quando foi ajustada a menor temperatura, para os dois fatores de controles, de aquecimento do tarugo, as correntes elétricas de quase todas as gaiolas resultou em maiores valores, e o inverso também foi verdadeiro. No entanto, a variação da corrente não foi muito grande, variou de 41,2% (para



as menores temperaturas) até 39,6% (para maiores temperaturas), o que leva à conclusão que o nível de variação de temperatura do DOE é pouco significativo para esta gaiola (D6).

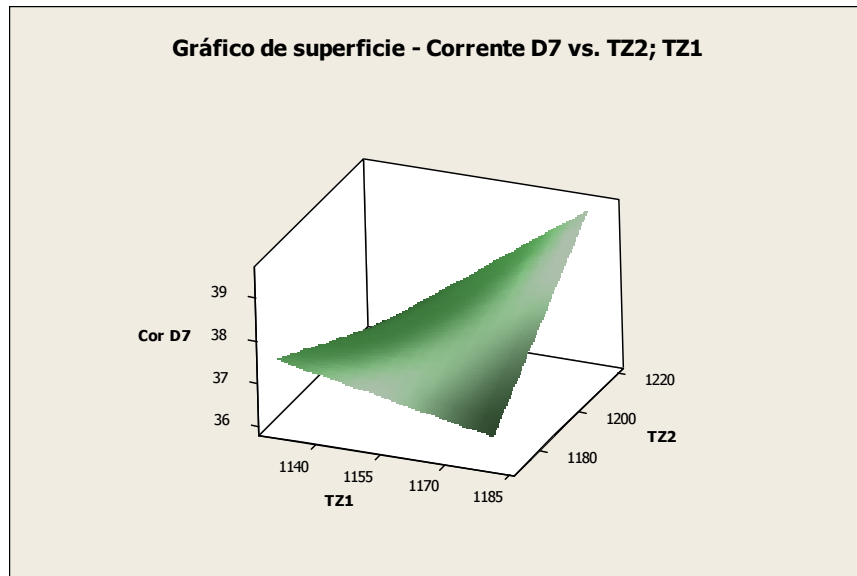


Figura 5.7 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D7 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de aquecimento.

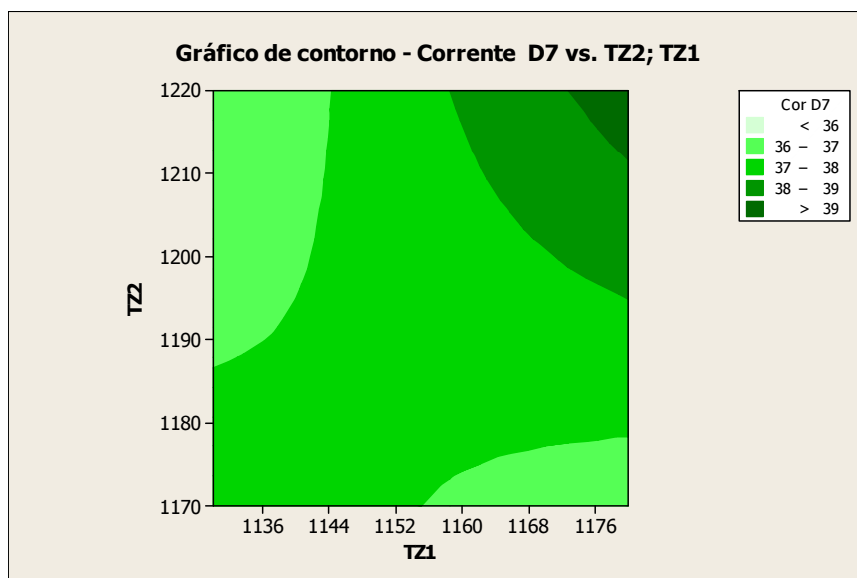


Figura 5.8 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D7 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de aquecimento.

Analisando-se as figuras 5.7 e 5.8, percebe-se que a gaiola D7 não diminui a corrente elétrica com o aumento das temperaturas do forno de aquecimento das zonas 1 e

2 (TZ1 e TZ2) como ocorre com a D6, mas, a variação da corrente elétrica também não foi grande, variou de 36% até 39%, isto provavelmente se deve ao fato de alguma variação pontual ou justamente por causa das oscilações de corrente serem muito pequenas para as amplitudes de variação das temperaturas TZ1 e TZ2 empregadas, então, como os valores são muito próximos, pode-se dizer que a corrente ficou praticamente igual também para a gaiola D7. Cabe a observação que se for analisado na figura 5.8 somente a região junto aos eixos, as correntes diminuiram, como ocorreu na gaiola D6, com o aumento da temperatura, mas as variações foram pequenas.

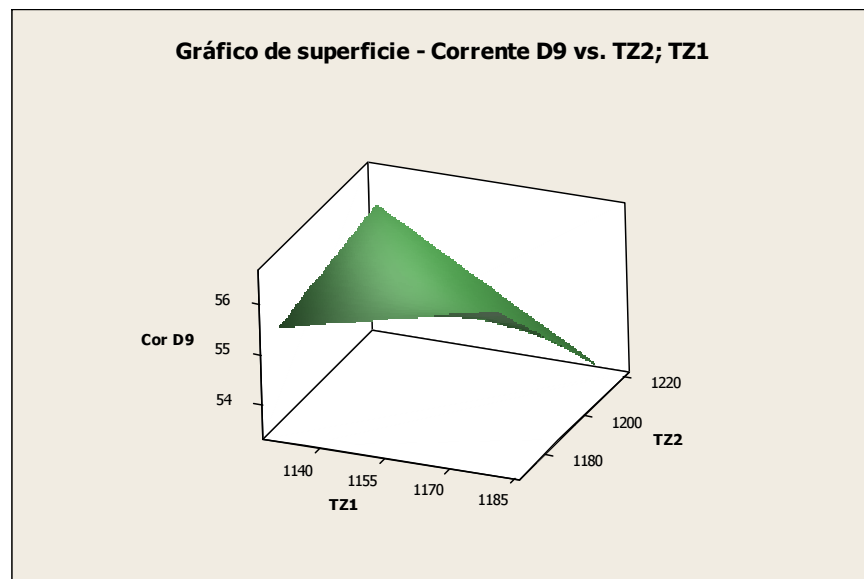


Figura 5.9 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D9 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

Para a gaiola D9 (figuras 5.9 e 5.10) a corrente elétrica não varia com a variação de TZ2 (região junto ao eixo vertical da figura 5.10), mas para valores maiores da temperatura do forno da zona 1 (TZ1) a corrente elétrica reduz de 56% para 53,5%, como ocorreu nas gaiolas D6 e D7 a variação não foi muito grande.

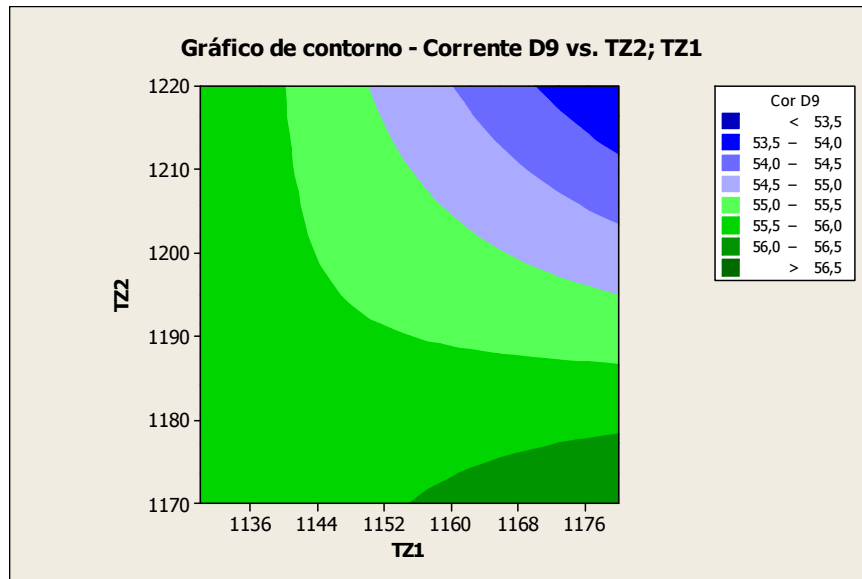


Figura 5.10 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D9 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reauecimento.

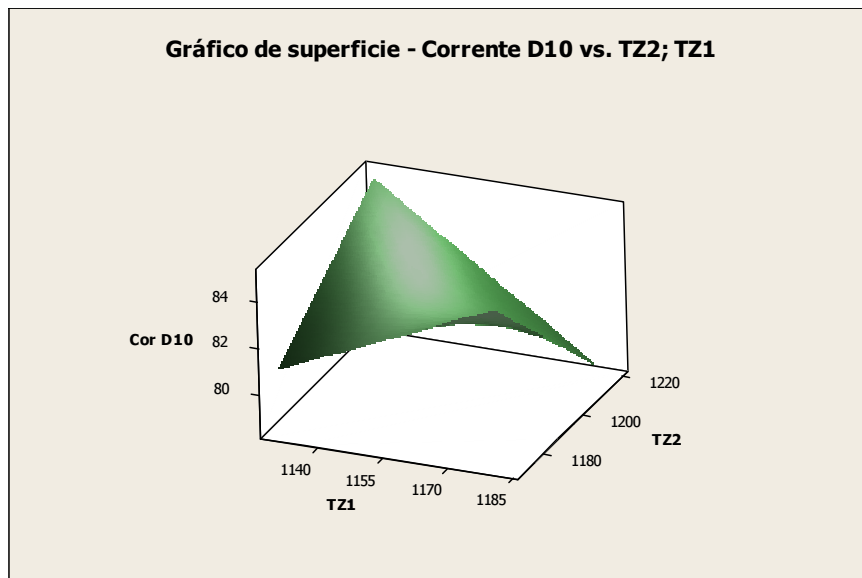


Figura 5.11 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D10 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reauecimento.

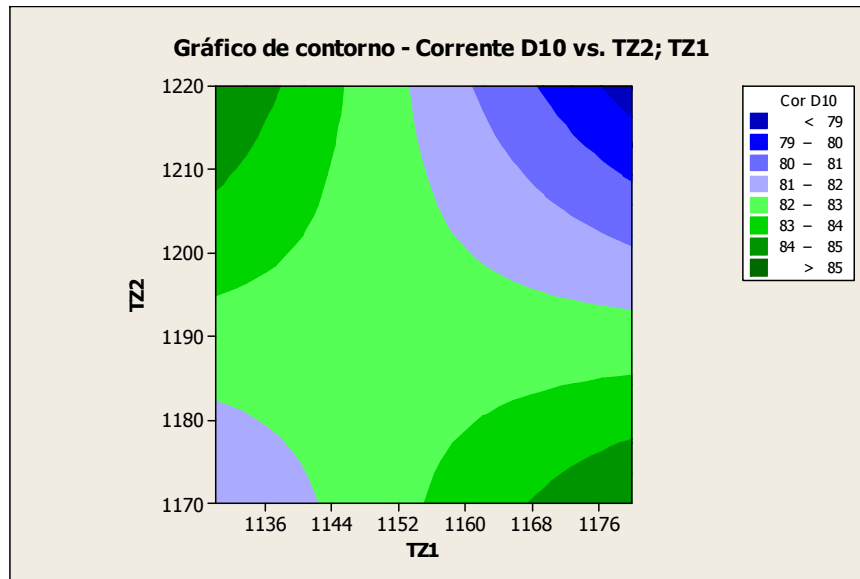


Figura 5.12 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola D10 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

O comportamento da corrente elétrica da gaiola D10, observado pelas figuras 5.11 e 5.12, é quando as duas temperaturas, TZ1 e TZ2, estão no seu valor máximo, ocorrem as menores correntes elétricas, mas da mesma forma como ocorreu nas outras gaiolas do desgaste analisadas (D6, D7 e D9) as variações das correntes não foram grandes, para D10 a corrente variou de 79% para 85%.

O desenho do comportamento da corrente elétrica da gaiola M1 em relação à variação das temperaturas TZ1 e TZ2, observado na figura 5.13, é praticamente um plano. Pela figura 5.14, nota-se que a corrente elétrica diminui com o aumento das temperaturas, a variação foi de 60% (quando TZ1 e TZ2 estão no valor máximo) e 63% (quando TZ1 e TZ2 estão no mínimo).

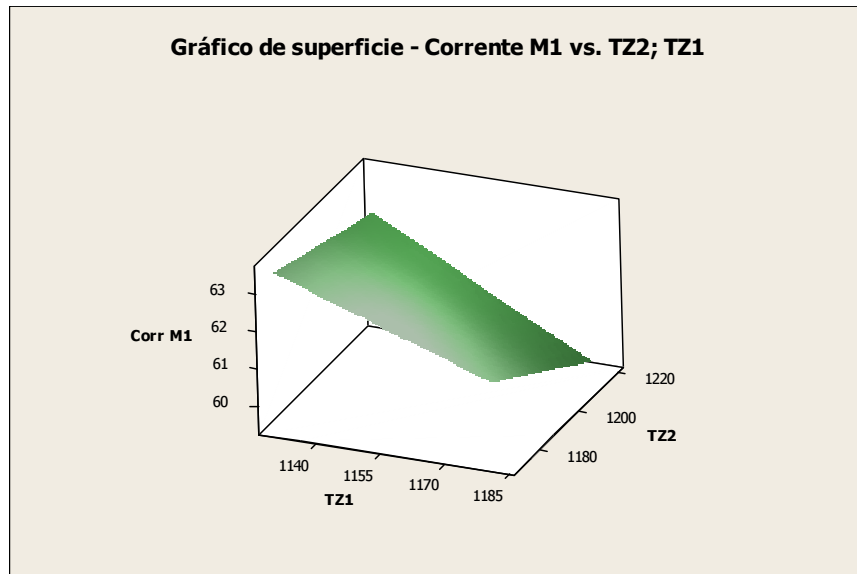


Figura 5.13 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M1 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

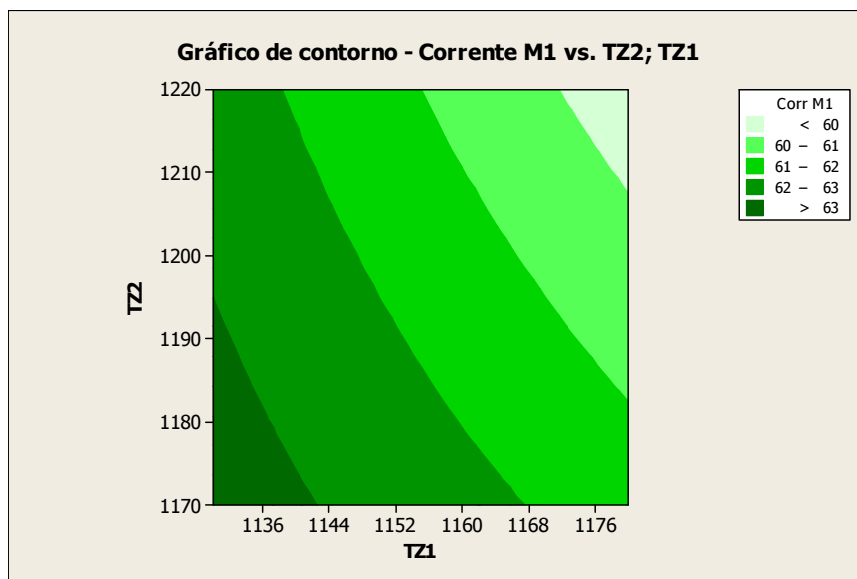


Figura 5.14 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M1 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

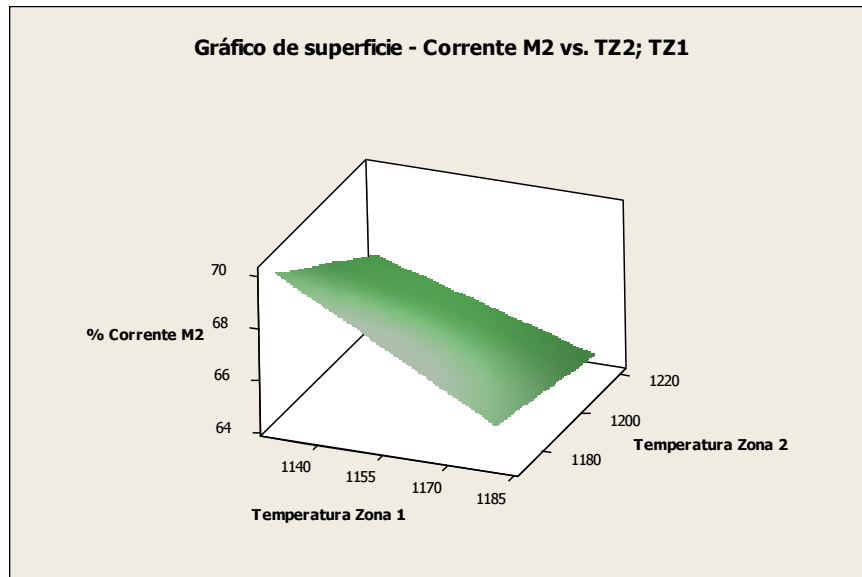


Figura 5.15 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M2 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

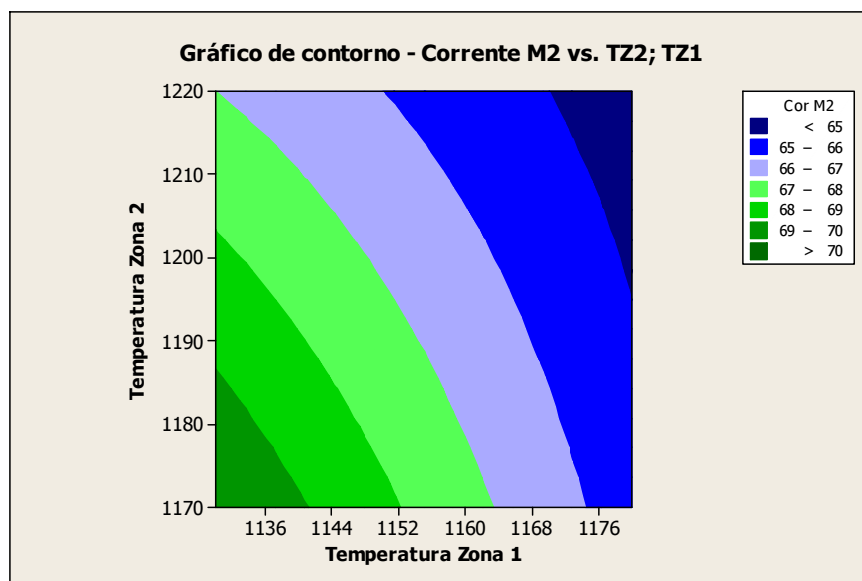


Figura 5.16 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M2 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

Pela análise das figuras 5.15 e 5.16, percebe-se que a corrente elétrica da gaiola M2 diminui com o aumento das temperaturas TZ1 e TZ2, o comportamento é praticamente linear, a corrente variou de 65% até 70%.

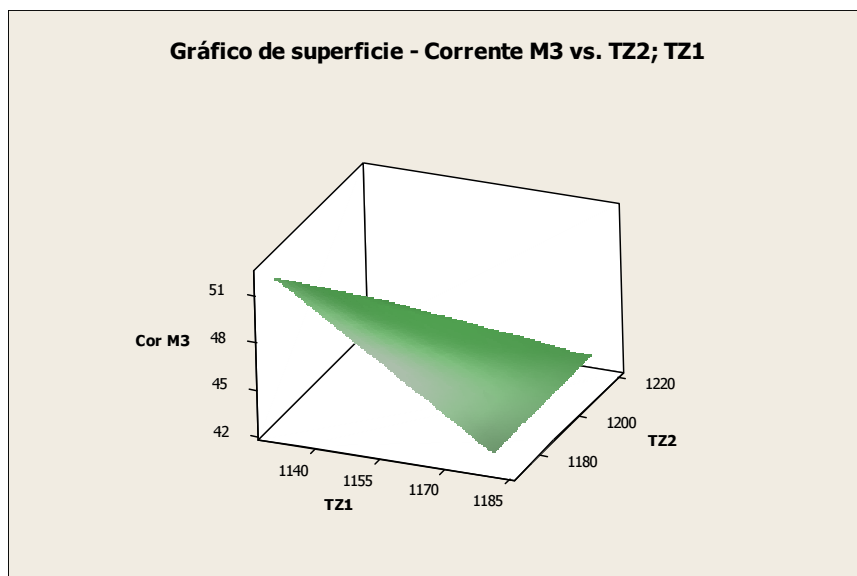


Figura 5.17 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M3 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

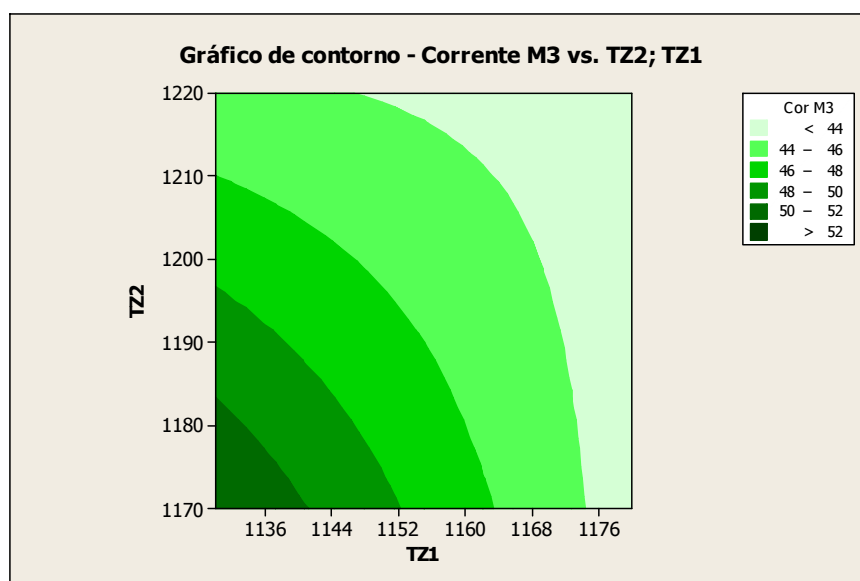


Figura 5.18 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M3 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

O comportamento da corrente elétrica da gaiola M3 foi bem parecido com o comportamento das gaiolas M1 e M2 no entanto a superfície (figura 5.17) não foi um plano, mas da mesma forma que as outras gaiolas do trem médio, a corrente elétrica

diminuiu com o aumento das temperaturas TZ1 e TZ2. As variações da corrente elétrica foram de 44% para 52% (figura 5.18).

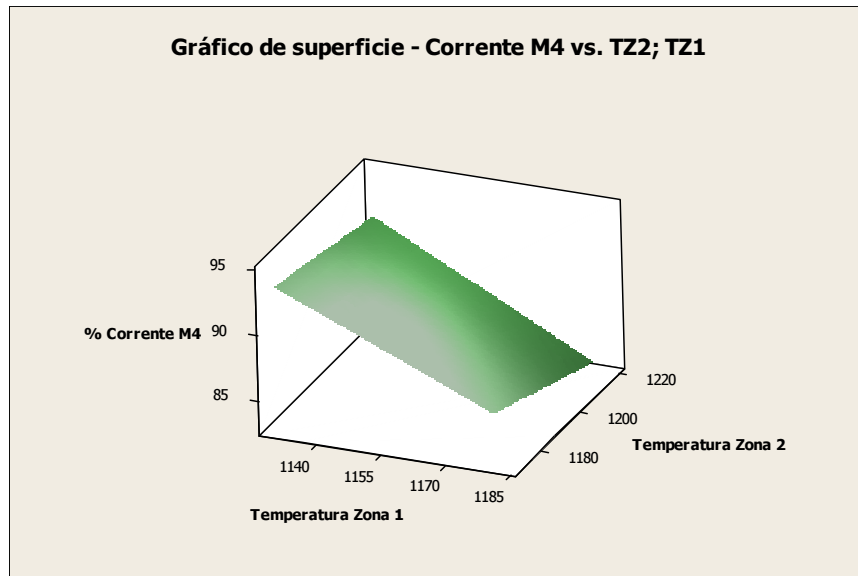


Figura 5.19 - Gráfico de superfície para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M4 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

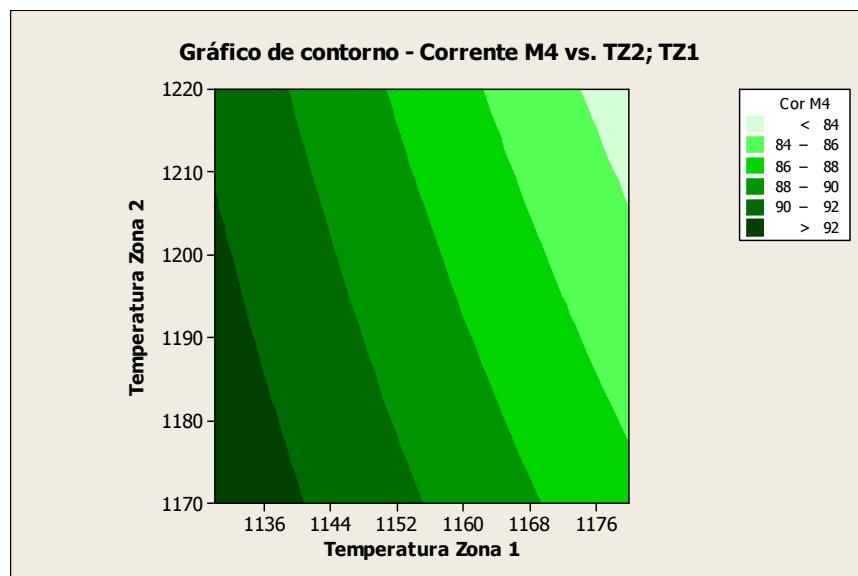


Figura 5.20 - Gráfico de contorno para a variação da corrente elétrica do motor na gaiola M4 em função das temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas no forno de reaquecimento.

A variação da corrente elétrica da gaiola M4, com em relação às temperaturas do forno (figuras 5.19 e 5.20), são da mesma forma que as outras gaiolas do trem médio, a



variação da corrente elétrica é inversamente proporcional às temperaturas do forno, isto é, quanto maior as temperaturas em que os tarugos são reauecidos, menor é a corrente elétrica das gaiolas. No entanto, as correntes elétricas de trabalho da gaiola M4, para qualquer nível de temperatura nos fatores de controle do DOE, são muito altas, para temperaturas maiores a corrente elétrica foi de 84% da nominal e para as menores temperaturas foi de 92% da corrente nominal. O ideal é que se sempre haja uma folga na corrente elétrica das gaiolas e que esta varie abaixo de 90% da nominal. Correntes elétricas muito altas significam torque maior na gaiola e por consequencia maior esforço nos componentes mecânicos.

De forma geral, analisando-se as figuras de 5.5 a 5.20, o que pode ser notado é que as gaiolas D6, D7, D9, D10, M1 e M2 sofrem muito pouco com as variações de temperatura provocadas, já as gaiolas M3 e M4 variam muito mais a corrente elétrica com as variações de temperatura, isto ocorreu principalmente na gaiola M4. Além disso, esta gaiola trabalha no limite de sua corrente, pois frequentemente apresentou correntes maiores, sendo, desta forma, mais sensível às variações da temperatura da barra. Esta gaiola trabalhando nas temperaturas mínimas do experimento, apresentou correntes elétricas médias acima de 92 % da corrente nominal e picos acima de 110%, sendo que se trabalhar muito tempo neste patamar, ocorre desarme deste motor e parada da linha de produção, gerando inúmeras perdas. Então, ficou comprovado que se está trabalhando já numa condição limite da temperatura devido a gaiola M4, havendo talvez oportunidades de ganhos para aços com menor teor de carbono, pois possuem menor resistência à deformação e usam a mesma temperatura padrão.

Portanto, sem alterações do equipamento existente (motor da M4, principalmente) não há oportunidades de ganho de economia de energia através da simples e direta redução da temperatura de desenformamento ou alteração das curvas. Devem-se buscar ganhos com outras ações visando eliminar desperdícios e perdas de energia através das ações sugeridas anteriormente no item 5.1.

## 6 CONCLUSÕES

- É possível laminar nas temperaturas mínimas dos testes (TZ1 em 1130°C e TZ2 em 1170°C) para os produtos fio-máquina de bitola 5,50mm e 6,30mm fabricados de aços de baixo carbono, porém, a grande limitação é a gaiola M4 (figuraFigura 4.2 - Fluxo esquemático de produção da planta industrial usada no trabalho), que trabalha, nestas condições, com a corrente elétrica no limite de desarme, sendo muito grande o risco de parada eminente do laminador. Recomenda-se implantar um investimento para aumentar a potência do acionamento desta gaiola;
- Havendo investimento para aumento da potência do acionamento da gaiola M4, as temperaturas de regulagem do forno, para os produtos estudados, é de TZ1-1130°C e TZ2 - 1170°C. Estas temperaturas representam uma redução em 20°C nas temperaturas TZ1 e TZ2 utilizadas como padrão na empresa dos testes. Com esta redução de 20°C a economia, nas condições do estudo, é de  $0,36 \text{ Nm}^3/t_{\text{laminada}}$ ;
- Alterando-se as variáveis de controle do forno, dentro dos limites estudados, não houve mudanças significativas nas propriedades mecânicas do produto;
- A análise para encontrar a temperatura ideal de laminação é muito mais complexa do que se imaginava no início do trabalho, pois envolve muitas variáveis, que neste trabalho, foram consideradas como ruído, mas que são muito importantes, tais como a calibração, que influencia muito na energia de deformação e por consequência da corrente elétrica da gaiola;
- O desempenho do forno de reaquecimento da planta industrial do estudo, baseando-se nos dados fornecidos (figura 5.2), tratando-se em consumo de gás, até o primeiro semestre do ano de 2011 se mostrou muito bom. Apesar disso, ainda há algumas oportunidades de ganhos que estão indicadas no plano de ação no item 5.2: troca e recuperação de refratários; consertar vazamentos no selo d'água e vedações do forno; reduzir tempo de abertura e tamanho das portas do forno; controle periódico de ajuste da

relação estequiométrica dos queimadores; instalar câmeras para monitorar interior do forno; realizar termografia e videoscopia para monitoramento preditivo dos refratários do forno; revisar, calibrar e aferir todas as válvulas de controle do forno, manter controle periódico; reformar recuperador de calor reserva e substituir pelo atual;

- A Temperatura da Zona 1 (TZ1) tem maior influência nas correntes das gaiolas do que a Temperatura da Zona 2 (TZ2) devido ao tamanho desta zona ser muito maior e os tarugos permanecerem mais tempo nesta região.

## **7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliação do custo de energéticos total em relação às temperaturas do forno. Avaliar conjuntamente o custo e o consumo dos energéticos: gás natural e energia elétrica e gás natural;
- Avaliação da correlação energia térmica de reaquecimento fornecida ao tarugo com a energia elétrica consumida pelo motor das gaiolas de laminação. Responder à pergunta: 1kWh de energia de reaquecimento corresponde à 1kWh de energia elétrica dos motores das gaiolas de laminação?

## 8 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L.A. **Manual de Siderurgia: Transformação**. Editora Arte & Ciência, Vol.2, São Paulo, 1997. 132p.

BECKER, D. I., **Análise e Melhoramento do Rendimento Energético de um Forno de Reaquecimento de Tarugos de Aço com Queimadores de Gás Natural**. Porto Alegre, 2007. p. 5-26.

BERNSTEIN D.S. **Feedback Control: An Invisible Thread in the History of Technology**. IEEE Control System Magazine. Oxford, 2002. p. 53-68.

BEUREN, Jair; TRAVI, Tatiana. **Processos de Aquecimento nos Aços**. Porto Alegre, 2000. 28p.

BRESCIANI, F.E.; ZAVAGLIA, C.A.C.; BUTTON, S.T.; GOMES, E.; NERY, F.A.C. **Conformação Plástica dos Metais**. Editora da Unicamp. Campinas, 1997 (5a. edição). 383p.

BLAIN P. **Laminação e Forjamento dos Aços**. Associação Brasileira de Metais, 1964. p. 87-90.

BOX, G.E.P.; BISGAARD, S. *The scientific context of quality improvement. Quality Progress*, 1987. p. 54-61.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 7<sup>a</sup> ed. New York. John Wiley & Sons, 2007. 524p.

CASTILHOS, Erica. **Contribuição para a Caracterização de Defeitos Superficiais em Barras Laminadas**. Trabalho de Diplomação. Departamento de Metalurgia, UFRGS, 2008. p. 10-26.

CHANDLER, H; FLINT, V; DAVIDSON, G. M.; BONRING, R. L; POWERS C. L. **Heat Treater's Guide Practices Produces for Irons and Steels – 2nd Edition**". American Society of Metals Publishing, 1995. In: VIANA, M. C. **Análise de Defeitos Superficiais com Origem no Processo de Laminação de Aços Especiais para a Cadeia Automotiva e Implementação de Soluções**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2009. p. 13-14.

CHILIKIN, M. **Electric Drive**. Mir Publishers. Moscou, 1970. In: NOVAES, G. O. **Modelagem e controle de velocidade e tensão de um laminador de encruamento**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. São Paulo, 2010. p. 2-3.

CODA, R.C. **Laminação: Produtos Longos de Aços Laminados a Quente**. Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS, 2006. 113p.

DETR, *Energy Consumption Guide*. Guia de orientações técnicas. Energy Enquires Bureau. Oxford. 1999. 12p.

DEVOR, R.E.; CHANG, T.; SUTHERLAND, J.W. *Statistical quality design and control - Contemporary concepts and methods*. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1992. p. 503-744.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. 2.ed. Tradução de Antonio S. de Souza, Luiz Henrique de Almeida e Paulo E. Valadão de Miranda. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981. 653p.

FERNANDES, P. C. **Otimização dos Parâmetros de Lingotamento Contínuo para Minimizar a Ocorrência de Trincas Superficiais no Aço DIN 20MnCr5**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2005. In: SILVA, F. L. **Melhoria da Qualidade Superficial em Barras Laminadas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2010. p. 66.

GALDÁMEZ, E. V. C., **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos Na melhoria da Qualidade de um processo de Fabricação de Produtos Plásticos**. São Paulo: Editora da USP, 2002.p. 9-56.

GORNI, A. A., **Inovações Tecnológicas na Laminação de Chapas Grossas: Equipamentos**. Trabalho apresentado no XXXIII Seminário de Laminação da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Volta Redonda RJ, Setembro de 1996. 20p.

GUIDE 76. *Continuous Steel Reheating Furnaces*: Specification, Design and Equipment. Energy Efficiency Office, Bests Practice Program, 1994. Disponível em: <<http://www.energyefficiencyasia.org>>. Acesso em 10 jan. 2011, 15:10.

HAUCK, G. A. C.; LAIA, L. L., **Curso sobre Fornos de Reaquecimento**. São Paulo: ABM, 2000. 41p.

LAIA, L. L.; GONÇALVES FILHO, N.; ZANELLA, J. V., **Inovações Tecnológicas na Área de Fornos de Reaquecimento de Placas**. São Paulo: COLAM/ABM, 1990. 44p.

LEDEN, B. *A Control System for Fuel Optimization of Reheating Furnaces*. MEFOS, Metal Working Research Plant, 8-951 28 Lulea, Sweden. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1986. p. 16-24.

LIM, K.H.et al. **More Efficient Operating Practices for Improving the Surface Quality of High Quality Steel Wire**. SEAI SI Quarterly. Tensile Testing. The Materials Information Society, ASM International, 2004. p. 42-49.

MONTGOMERY, D.C. **Diseño y análisis de experimentos**. Trad. por Jaime Delgado Saldívar. México, Iberoamérica, 1991. In: GALDÁMEZ, E. V. C., **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos Na melhoria da Qualidade de um processo de Fabricação de Produtos Plásticos**. São Paulo: Editora da USP, 2002.p. 9-56.

MORANDI, A. **A Siderurgia e sua Adaptação ao Novo Paradigma Tecnológico**. Revista Análise Econômica - ano 015 n. 28. Faculdade de Ciências Econômicas/UFRGS, 1997. 32p.

NOVAES, G. O. **Modelagem e controle de velocidade e tensão de um laminador de encruamento** .Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. São Paulo, 2010. p. 1-15.

OLIVEIRA, **Avaliação Experimental e Teórica do Torque no Laminador de Chapas Grossas da Usiminas**. Dissertação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG. Belo Horizonte, 2010. 117p.

PADILHA, A.F.; SICILIANO JR. F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, ABM, 3.ed. São Paulo, 2005. 228p.

ROBERTS, W.L. **Cold Rolling of Steel**. Marcel Dekker. New York, 1978. In: NOVAES, G. O. **Modelagem e controle de velocidade e tensão de um laminador de encruamento**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP. São Paulo, 2010. p. 1-15.

ROCHA, A. S. **Apostila Disciplina de Processos de Conformação Mecânica - Laminação**. Porto Alegre: PPGEM, UFRGS, 2011. 32p.

RODRIGUES, R. A. **Comparativo entre o Fio Máquina produzido com aço SAE 1005 e SAE 1405 Modificados para Produção de Arames Recozidos**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2012. p. 4-26.

SAKURADA, Eduardo Yuji. **As técnicas de Análise do Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no Desenvolvimento e na Avaliação de Produtos**. Florianópolis: Eng. Mecânica/UFSC, (Dissertação de mestrado), 2001. Cap. 5. p. 1-28.

SCHAEFFER, L., **Conformação Mecânica**. 2 Ed.. Porto Alegre, Imprensa Livre, 2004.

SILVA, F. L. **Melhoria da Qualidade Superficial em Barras Laminadas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2010. p. 3-33.

TOLEDO, J. C., AMARAL, D. **FMEA - Análise do Tipo e Efeito de Falha**. GEPEQ – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade DEP - UFSCar, 2001. p. 1-12.

VESTERBERG, P. et al, **Utilização do processo oxi-combustível em fornos de rea aquecimento e recozimento para o aumento da produção e redução do consumo de**



**combustível – tecnologia & resultados industriais.** 43º Seminário de Laminação – Processos, Produtos Laminados e Revestidos, Curitiba, 2006. p. 1-10.

VIANA, M. C. **Análise de Defeitos Superficiais com Origem no Processo de Laminação de Aços Especiais para a Cadeia Automotiva e Implementação de Soluções.** Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais UFRGS. Porto Alegre, 2009.p. 9-25.

VILELA. A.C.F. **Processos Siderúrgicos – SID-500.** Gerdau, Programa de Capacitação Acelerada de Engenheiros, 2007. 42p.

WERKEMA, M. C. C., AGUIAR, S. **Planejamento e análise de experimentos: como identificar e avaliar as principais variáveis influentes em um processo.** Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996. p. 10-36.

WINTER, C., **Análise da Perda de Energia Radiante Através das Portas de um Forno de Reaquecimento de Tarugos a Gás Natural.** TCC Engenharia Mecânica. Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, 2006. p. 1-28.

WUSATOWSKI. Z. **Fundamentals of Rolling.** Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, 1969. 697p.