

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 DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DO AÇO MOLA SAE 9254
DURANTE A LAMINAÇÃO**

Rafael Schumacher Plentz

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2009

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 DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DO AÇO MOLA SAE 9254
DURANTE A LAMINAÇÃO

Rafael Schumacher Plentz
Engenheiro de Materiais

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski

Banca Examinadora:

Dr. Thomas Clarke
Dr. Carlos O. D. Martins
Dr. Fabiano Dornelles Ramos

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, Outubro de 2009.

Dedico esta dissertação a todas as pessoas que fazem parte do meu dia a dia, pois são essenciais para minha formação profissional.

E em especial ao meu Pai, minha Mãe e minha Irmã por serem os responsáveis por todas as conquistas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, pilares de sustentação da minha vida.

A minha namorada pela paciência e compreensão dedicada.

A amiga e colega Eng.^a Kareline Bueno por toda a caminhada e conhecimento desenvolvidos juntos, sem falar em todo o tempo vivenciado para as discussões práticas e técnicas.

Aos colegas e amigos Eng.^o Geraldo André Fagundes e MSc. Eng.^o Rogério Alves de Oliveira, pelo desenvolvimento inicial de uma vida profissional com seus ensinamentos diários.

A Gerdau Aços Especiais Charqueadas, nas pessoas dos Eng.^o Lourival Kersting Amorim, Eng.^o Ildo Janio Souza de Oliveira e Eng.^o Luis Augusto Colembergue Klujszo (Ph.D), pelo apoio, infra-estrutura e confiança para a realização deste trabalho.

A equipe da Laminação pela discussão e análise dos experimentos e pela dedicação dos esforços empregados.

A equipe do Laboratório Metalúrgico, em especial ao colega Jair Leopoldo Janoski pela dedicação, comprometimento e análises realizadas.

Aos colegas da Transformação Mecânica, em especial, ao Processo de Trefila pelas discussões e experimentos realizados.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski, pelo tempo e discussões disponibilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do PPGEM que fazem da UFRGS uma instituição diferenciada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	Aço Mola	2
2.1.1	Características Gerais	2
2.1.2	Tipos de Molas	2
2.1.3	Composição Química dos Aços Mola	3
2.1.4	Aplicações na Indústria Automobilística.....	4
2.1.5	Processamento	6
2.1.6	Importância na Indústria.....	10
2.1.6.1	Cuidados no Refino e Lingotamento	10
2.1.6.2	Cuidados na Conformação Mecânica	10
2.1.7	Características Críticas dos Aços Molas	11
2.1.7.1	Descarbonetação	11
2.1.7.2	Qualidade Superficial	12
2.2	Conformação	12
2.2.1	Generalidades	12
2.2.2	Princípios da Laminação	13
2.2.3	Etapas de Laminação	14
2.2.4	Forças de Conformação	16
2.2.5	Tipos de Laminadores	16
2.2.5.1	Arranjo Aberto.....	17
2.2.5.2	Arranjo Contínuo.....	18
2.2.5.3	Arranjo do Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas.....	20
2.2.6	Laminação de Aço Mola – Cuidados e Características	22
2.2.7	Trefilação.....	23
2.3	Tratamentos Térmicos	24
2.3.1	Aspectos Gerais	24
2.3.2	Diagramas de Transformação	25
2.3.2.1	Diagramas de Transformação Isotérmica	25
2.3.2.2	Diagramas de Resfriamento Contínuo.....	25
2.3.3	Aplicação de Tratamentos Térmicos no Processo da Laminação	25
2.3.3.1	Recozimento Aplicado em Aços Mola.....	25

3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	27
3.1	Considerações Iniciais	27
3.2	Materiais	27
3.3	Processamento do Aço Mola Trefilado	27
3.4	Equipamentos	28
3.4.1	Forno de Reaquecimento	28
3.4.2	Laminador.....	28
3.4.3	<i>Cooling Conveyor</i>	29
3.5	Ensaios.....	29
3.5.1	Determinação das Temperaturas de Conformação.....	29
3.5.2	Amostragem	30
3.5.3	Dureza.....	31
3.5.4	Descarbonetação.....	31
3.5.5	Inspeção Superficial	31
3.5.5.1	Inspeção Visual	31
3.5.5.2	Inspeção por <i>Defectotherm</i>	31
3.5.5.3	Inspeção por <i>Circograph</i>	32
3.6	Experimentos	32
3.6.1	Experimento I	32
3.6.2	Experimento II.....	33
3.6.3	Experimento III.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Considerações Iniciais	35
4.2	Experimento I	37
4.3	Experimento II.....	40
4.4	Experimento III.....	43
5	CONCLUSÕES.....	46
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Alguns exemplos de molas helicoidais [1].	3
Figura 2-2 – Exemplo de mola semi-elíptica (feixe de mola) [3].	3
Figura 2-3 – Suspensão dianteira McPherson, com a característica de possuir um único braço de suspensão.	5
Figura 2-4 – Suspensão dianteira tipo Double Wishbone, com dois braços de suspensão. ..	5
Figura 2-5 – Esquema representativo da conformação durante a Laminação.	14
Figura 2-6 – Esquema representativo das principais etapas de Laminação.	14
Figura 2-7 – Esquema representativo das reduções aplicadas nas etapas de conformação.	15
Figura 2-8 – Gráfico tensão x deformação de diferentes temperaturas para um aço baixo carbono AISI 1020.	16
Figura 2-9 – Representação esquemática de um arranjo aberto [7].	17
Figura 2-10 – Configuração típica dos cilindros de gaiolas do Arranjo Aberto.....	18
Figura 2-11 – Representação esquemática de um arranjo contínuo com a) gaiolas horizontais e verticais e b) apenas gaiolas horizontais [7].	19
Figura 2-12 – Laço para controle da tração existente entre gaiolas.	19
Figura 2-13 – Esquema representativo da configuração do Laminador 2.	20
Figura 2-14 – Gaiola TRIO do laminador 2 de arranjo aberto.	20
Figura 2-15 – Configuração para um arranjo contínuo a) Trem Intermediário b) Trem Acabador.....	21
Figura 2-16 – Caixas de resfriamentos a) em linha na laminação b) parte interna.	21
Figura 2-17 – Formador de Espiras responsável pela formação do fio-máquina.	22
Figura 2-18 – <i>Cooling Conveyor</i> responsável pelo tratamento térmico final do fio-máquina.	22
Figura 2-19 – Efeito da redução de área nas propriedades mecânicas para barras trefiladas de aço baixo carbono [20].	23
Figura 2-20 – Etapas de processo de uma máquina de trefilação combinada [20].	24
Figura 3-1 – Layout esquemático do Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas.	29
Figura 3-2 – Vista do cooling conveyor com as capotas de abafamento abertas.	29
Figura 3-3 – a) Simulador termomecânico Gleeble 3500, b) imagem do aquecimento do corpo-de-prova no simulador.	30
Figura 3-4 – Termografia das espiras do fio-máquina durante o resfriamento no <i>cooling conveyor</i>	30
Figura 3-5 – Representação esquemática da amostragem do fio-máquina.	31
Figura 4-1 – Curvas tensão vs. deformação para o aço SAE 9254, produzidas a diferentes temperaturas. Velocidade de Deformação: 0.05s-1.....	35
Figura 4-2 – Curva tensão máxima vs. temperatura para o aço SAE 9254.....	36

Figura 4-3 – Curva redução de área vs. temperatura, para o aço SAE 9254.....	36
Figura 4-4 – Valores de dureza encontrados nas diferentes temperaturas de reaquecimento.	38
Figura 4-5 – Valores de dureza encontrados nas amostras laminadas a alta temperatura...	39
Figura 4-6 – Percentual de rolos identificados com defeitos.....	39
Figura 4-7 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 1.....	41
Figura 4-8 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 2.....	42
Figura 4-9 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 3.....	42
Figura 4-10 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 4.....	43
Figura 4-11 – Variação da dureza ao longo das espiras do rolo no experimento III.....	44
Figura 4-12 – Variação da descarbonetação média ao longo das espiras do rolo no experimento III.....	45
Figura 4-13 – Variação da descarbonetação máxima ao longo das espiras do rolo no experimento III.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Influência de alguns elementos quando adicionados aos aços [1-3].	4
Tabela 2-2 – Nomenclatura e descrição de diferentes tipos de aços [3].	4
Tabela 2-3 – Nomenclatura e composição química de diferentes tipos de aços [1].	4
Tabela 2-4 – Métodos de fabricação para aços previamente recozido [1].	6
Tabela 2-5 – Métodos de fabricação para aços previamente endurecidos [1].	7
Tabela 2-6 – Propriedades de aços e fios empregados na fabricação de molas conformadas a frio [1].	8
Tabela 2-7 – Propriedades de aços para tiras empregados na fabricação de molas conformadas a frio [1].	9
Tabela 3-1 – Composição química nominal do aço SAE 9254.	27
Tabela 3-2 – Alterações feitas nos parâmetros dos processos.	32
Tabela 3-3 – Condições propostas para temperatura de reaquecimento e velocidade de resfriamento.	33
Tabela 3-4 – Condições propostas para abafamento adicional e resfriamento das extremidades dos rolos.	33
Tabela 4-1 – Resumo dos valores de dureza avaliadas no experimento I.	37
Tabela 4-2 – Resumo dos valores de descarbonetação avaliados no experimento I.	38
Tabela 4-3 – Resumo dos valores de dureza encontrados para as 4 condições laminadas.	40
Tabela 4-4 – Resumo dos valores de dureza e descarbonetação encontrados no experimento III.	44

RESUMO

A otimização de processos e a redução de custos são os dois principais fatores que sustentam a competitividade das indústrias atualmente.

Diante deste cenário, buscou-se otimizar o processo de fabricação de barras trefiladas de aço mola SAE 9254, através da eliminação do recozimento anterior ao processo de trefilação, por intermédio de um resfriamento controlado no *cooling conveyor*, na laminação..

Para isso, a taxa de resfriamento do fio-máquina após a laminação foi variada a fim de garantir a homogeneização da dureza ao longo das espiras, característica essa essencial para o processamento na trefila. Além da redução de custos com o recozimento, se o objetivo fosse alcançado, poder-se-ia otimizar o processo de reaquecimento deste aço na laminação. Como resultado, seria possível melhorar a qualidade superficial do fio-máquina e, por conseqüência, aumentar o rendimento metálico do produto, sem que a descarbonetação máxima e média fossem prejudicadas.

Os experimentos foram desenvolvidos com base no resfriamento do fio-máquina no *cooling conveyor*. Durante o processamento na laminação, foi realizada uma amostragem especial a fim de mapear a variação das propriedades ao longo das espiras.

Os resultados apontaram que é possível a otimização do processo de fabricação do aço mola SAE 9254, principalmente para a condição de resfriamento na laminação quando utilizado um escalonamento na velocidade de transporte do fio-máquina no *cooling conveyor*. Este incremento nas velocidades de deslocamento do material, feita através do escalonamento da velocidade, propicia uma alteração nos “pontos quentes” das espiras, gerando uma uniformidade maior em seu resfriamento, garantindo assim, uma homogeneidade nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Tratamento Térmico; SAE 9254; Laminação; *Cooling Conveyor*.

ABSTRACT

The process optimization and cost reduction are the two main factors that gives sustainability for today industries competitiveness.

For this reason, it was attempted to optimize the manufacturing process of cold draw bars of SAE 9254 spring steel by eliminating pre-annealing of wire drawing, through a controlled cooling on the cooling conveyor, in the rolling mill process.

For this, the cooling rate of wire rod after rolling process was varied to ensure the homogeneity of hardness along the coil, the essential feature for wire drawing process. In addition to reducing costs annealing, if the purpose was reached, the reheating process would be optimized in the rolling mill. As a result, it would be possible to improve the surface quality of wire rod and, consequently, increase the metallic yield of the product, without the decarburization maximum and average were damaged.

The experiments were developed based on wire rod cooling thermograph in the cooling conveyor. During rolling mill processing, special sampling was performed to map the variation of properties along the coils.

The results showed that it is possible to optimize the manufacturing process of the SAE 9254 spring steel, mainly for the cooling condition in the rolling process when scaling speeds in wire rod transportation was used on the cooling conveyor. This speed increase of the material transportation, through the scaling speed, provides a change in "hot spots" of the coils, generating a greater uniformity in their cooling, thus ensuring uniformity in mechanical properties.

Key words: Heat Treatment; SAE 9254; Rolling Process; Cooling Conveyor.

1 INTRODUÇÃO

As parcerias entre a indústria privada e as universidades públicas e privadas, que possuem o conhecimento técnico e conceitual, são cada vez maiores no Brasil. Este projeto faz parte desta proposta, ou seja, uma parceria entre a Gerdau Aços Especiais Charqueadas e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, visando fomentar a produção de conhecimento e a aplicação dos conceitos técnicos no “dia-a-dia” em alguns dos processos desenvolvidos na indústria.

Alguns pontos devem ser contemplados para a escolha e desenvolvimento destes projetos, principalmente aqueles que envolvam a melhoria na qualidade do produto, otimização de processos e diminuição constante dos custos de produção.

No campo relacionado à otimização de processos, a criatividade é o fator determinante para a realização de novas propostas. Além disso, o embasamento científico dá suporte aos mais variados fenômenos decorrentes das modificações realizadas no processo.

Durante a produção do aço mola, algumas etapas do processo são definidas para a garantia da especificação do produto final, a fim de adequar as exigências do cliente e as condições de processamento. Na análise destas etapas do processo e estudo de suas características, algumas melhorias podem ser propostas, a fim de se substituir, diminuir ou otimizar algumas destas etapas, desde é claro que a especificação final seja respeitada ou melhorada.

Uma destas etapas que podem ser melhoradas é a utilização das variáveis de processo durante a conformação do material na laminação para otimizar a etapa de recozimento existente antes do processamento de trefilação. Alguns parâmetros na laminação, como a temperatura de reaquecimento e a velocidade de resfriamento após a conformação, podem ser alterados e os seus efeitos nas propriedades finais do material identificados.

Este trabalho tem como objetivo avaliar algumas alterações no processo de fabricação do aço SAE 9254 durante o processo de laminação, a fim de garantir as propriedades necessárias para a próxima etapa do processo de trefilação e especificações finais do produto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aço Mola

2.1.1 Características Gerais

Os aços continuam sendo um dos materiais mais utilizados na indústria automobilística, apesar do grande avanço dos outros materiais, principalmente dos polímeros. O segredo do sucesso dos aços está relacionado a sua versatilidade, isto é, da capacidade de se alcançar um conjunto específico de propriedades, dentro de um espectro muito amplo de possibilidades. Este espectro amplo de possibilidades é resultado da adição de elementos de liga em diferentes concentrações, bem como de rotas diversas de processamento.

Uma classe de aços que é constantemente estudada e que, por este motivo, apresenta diferentes rotas de processamento são os aços mola.

Este tipo de aço se diferencia pelo seu grande poder de absorver a energia nele aplicada sem sofrer nenhuma deformação permanente, voltando a sua forma original uma vez que a carga aplicada seja aliviada.

Para isto, uma mola apresenta as seguintes características mecânicas [1]:

- Alto limite de elasticidade, para suportar apreciáveis cargas sem apresentar deformação permanente;
- Baixo módulo de elasticidade, para propiciar deformações elásticas;
- Alto limite de fadiga, pois no caso da indústria automobilística, praticamente todas as molas falham por fadiga, originando-se a ruptura em algum ponto de concentração de tensões, devido a imperfeições ou irregularidades;
- Elevada resistência ao choque, principalmente em molas para automóvel, aviões e aplicações similares.

2.1.2 Tipos de Molas

Existem dois tipos principais de molas, as molas helicoidais ou em espiral e as molas semi-elípticas [1-3].

Molas Helicoidais

Este tipo de mola é fabricada a partir de fios ou barras de aços que sofrem o processo de enrolamento a frio ou a quente. Alguns exemplos de molas helicoidais podem ser observados na Figura 2.1.

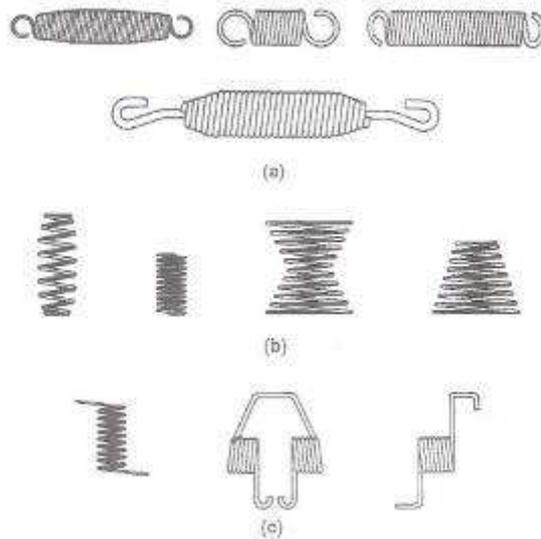


Figura 2-1 – Alguns exemplos de molas helicoidais [1].

Molas Semi-elípticas (feixe de mola)

Este tipo de mola é fabricada a partir de tiras de aço que são unidas em feixes como na configuração demonstrada na Figura 2.2.



Figura 2-2 – Exemplo de mola semi-elíptica (feixe de mola) [3].

2.1.3 Composição Química dos Aços Mola

As molas são produzidas a partir de aços que possuem diferentes quantidades de carbono, variando de 0,50% a 1,20% [1]. Para algumas aplicações especiais, os aços mola devem apresentar resistência à fadiga e limite elástico maior do que os aços carbono quando submetidos a altas temperaturas, portanto, existe a necessidade de se adicionar elementos de liga a sua composição. Com isso, a composição química final do aço empregado na fabricação de uma mola será definida através das propriedades que se deseja atingir, suas aplicações, custo de processamento e técnicas de fabricação a serem utilizadas [2].

A Tabela 2.1 apresenta alguns elementos que são adicionados à composição química dos aços, bem como os efeitos observados [1-3].

Tabela 2-1 – Influência de alguns elementos quando adicionados aos aços [1-3].

Elemento	Propriedade
Silício	Aumenta a resistência à oxidação Aumenta a resistência de aços de baixo teor em liga
Cromo	Aumento da resistência à corrosão e a oxidação Melhora a resistência a altas temperaturas Melhora a resistência ao desgaste (com alto Carbono)
Vanádio	Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita (promove refinamento do grão)
Molibdênio	Eleva a temperatura de crescimento de grão da austenita Produz maior profundidade de endurecimento (temperabilidade)
Níquel	Aumento da resistência ao choque a temperaturas elevadas

Nas Tabelas 2.2 e 2.3, pode-se observar as nomenclaturas, descrições e composições químicas de alguns aços que podem ser utilizados na fabricação de molas.

Tabela 2-2 – Nomenclatura e descrição de diferentes tipos de aços [3].

GRUPO	Exemplo	Tipo de Aço
10XX	SAE 1095	Aço carbono comum
41XX	SAE 4160 (mod)	Aços cromo-molibdênio
51XX	SAE 5160	Aços cromo
61XX	SAE 6150	Aços cromo-vanádio
86XX	SAE 8620	Aços níquel-cromo-molibdênio
92XX	SAE 9254	Aços cromo-silício

Tabela 2-3 – Nomenclatura e composição química de diferentes tipos de aços [1].

Tipos de Aço	Composição química					
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
1080 SAE	0,75 -0,88	0,60 -0,90	0,20 -0,35	-	-	-
1095 SAE	0,90 -1,03	0,30 -0,50	0,15 -0,30	-	-	-
4160 (mod)	0,55 -0,65	0,70 -1,00	-	0,60 -0,90	-	0,25 -0,35
5150 H	0,47 -0,54	0,60 -1,00	0,20 -0,35	0,60 -1,00	-	-
5160 H	0,55 -0,65	0,65 -1,10	0,20 -0,35	0,60 -1,00	-	-
6150 H	0,47 -0,54	0,60 -1,00	0,20 -0,35	0,75 -1,20	0,15 min.	-
8660 H	0,55 -0,65	0,70 -1,05	0,20 -0,35	0,35 -0,75	0,35 -0,55 Ni	0,15 -0,25
9260 H	0,55 -0,65	0,65 -1,10	1,70 -2,20	-	-	-
9254	0,51 -0,59	0,65 -1,10	1,20 -1,60	0,60 -0,80	-	-

2.1.4 Aplicações na Indústria Automobilística

Os aços molas são utilizados na indústria automobilística nos sistemas de suspensão dos diferentes modelos de veículos leves, como carros e utilitários, bem como em veículos pesados, como ônibus e caminhões.

Na indústria automobilística de veículos leves, são utilizadas suspensões dianteiras com molas helicoidais que absorvem a energia com a deformação imediata, o que fornece um maior conforto neste sistema de suspensão.

Para a suspensão dianteira de veículos leves, o sistema do tipo McPherson é comumente empregado (ver Figura 2.3). Este tipo de suspensão foi criado nos anos 50 pelo engenheiro Inglês Ian McPherson. Neste caso, o mecanismo de operação emprega apenas um braço de sustentação com dois pontos de ancoragem na estrutura do veículo, sendo o terceiro ponto de ancoragem representado pela própria fixação superior do amortecedor. Esta criação revolucionou o conceito de linha de montagem, pois permitiu que a suspensão dianteira fosse montada em módulos separados e depois levada diretamente ao veículo com grande economia de tempo [2].



Figura 2-3 – Suspensão dianteira McPherson, com a característica de possuir um único braço de suspensão.

As molas também podem ser utilizadas em sistemas de suspensão que possuem dois braços de suspensão, como o Double Wishbone, que é inclusive mais robusto (ver Figura 2.4).



Figura 2-4 – Suspensão dianteira tipo Double Wishbone, com dois braços de suspensão.

Já em veículos pesados, as molas de grande secção que são utilizadas em sistemas de suspensão tradicionais, são fabricadas com aços de altos teores de carbono, como os aços das classes SAE 1085 e 1095. Porém, o processamento de molas com grandes

diâmetros é difícil e, muitas vezes, inviável. Portanto, utilizam-se molas semi-elípticas (feixes de mola), que são mais práticas de serem fabricadas, podendo ser utilizadas inclusive como elementos estruturais.

2.1.5 Processamento

Existem dois processos principais de fabricação de molas. O mais comum é a fabricação a partir de tiras ou fios de aço-carbono ou aço liga no estado recozido, que são laminados e então recozidos. A próxima etapa do processo de fabricação é a conformação do aço para a forma final das molas, que por sua vez sofre um processo de têmpera em óleo, seguido pelo revenido (ver Tabela 2.4) [1].

Tabela 2-4 – Métodos de fabricação para aços previamente recozido [1].

Material	Grau e especificação	Tratamento Térmico Aplicado	Aplicações
Aço-carbono	C médio (1050) A682	Temperada e revenida	Para fins gerais
	C "regular" (1074) A682	Temperada e revenida	Material mais popular para feixes de mola
	Alto C (1095) A682	Temperada e revenida	Feixes de molas sujeitas a elevadas tensões
Aço-liga	Cr-V (MAS 6455)	Temperada e revenida depois da mola fabricada	Para cargas de choque e temperaturas moderadamente elevadas
	Cr-Si (AISI 9254)	Temperada e revenida depois da mola fabricada	Para cargas de choque e temperaturas moderadamente elevadas

Um outro processo de fabricação de molas é a partir de tiras ou fios de aço já endurecidos. Neste processo, o aço já se encontra no estado temperado e revenido, ou patentado e estirado a frio (encruado), sendo então conformado em molas. A etapa final envolve, usualmente, um tratamento térmico a baixa temperatura para alívio de tensões, como mostra a Tabela 2.5 [1]. As molas produzidas por este processo possuem resistência ao escoamento suficientemente elevada, tornando-as adequadas para suportarem em serviço as cargas usualmente empregadas. Estas, entretanto, não devem ser excessivamente duras, para não romperem ao serem conformadas.

Tabela 2-5 – Métodos de fabricação para aços previamente endurecidos [1].

Material	Grau de especificação	Tratamento Térmico Aplicado	Aplicações
Fio trefilado a frio Aço alto carbono	Fio de música ASTM A228	Trefilada de alta e uniforme resistência à tração	Molas de alta qualidade e perfis de fio
	Trefilado duro, classes I e II ASTM A227	-	Aplicações de tensão média; molas e perfis de baixo custo
	Trefilado duro de alta resistência ASTM A679	-	Molas e perfis de fios de alta qualidade
	Temperado e revenido ASTM A229 classes I e II	Tratada termicamente antes da fabricação	Molas para fins gerais
	Carbono VSQ ASTM A230	Tratada termicamente antes da fabricação	Molas de válvulas
Aço-liga	Cr-V ASTM A231, A232	Tratada termicamente antes da fabricação	Para cargas de choque e temperaturas moderadamente elevadas
	Cr-Si ASTM A401	Tratada termicamente antes da fabricação	Para cargas de choque e temperaturas moderadamente elevadas

Algumas das propriedades alcançadas com estes diferentes processamentos a partir de fios ou tiras podem ser encontradas nas Tabelas 2.6 e 2.7.

Tabela 2-6 – Propriedades de aços e fios empregados na fabricação de molas conformadas a frio [1].

Material	Grau e especificação	Composição nominal %	Propriedades de tração				Propriedades de torção módulo de rigidez G		Dureza HRC (b)	Temperatura permissível °C
			Resistência à tração		Módulo de Elasticidade E		GPa	kgf/mm2		
			MPa	kgf/mm2	GPa	kgf/mm2				
Fio trefilado a frio Aço alto carbono	Fio de música ASTM A 228	C - 0,70 - 1,00 Mn - 0,20 - 0,60	1590 – 2750	161 - 279	210	21000	80	8.050	41 - 60	120
	Trefilado duro ASTM A 227	C - 0,45 - 0,85 Mn - 0,30 - 1,30	Classe I 1010 - 1950 Classe II 1180 – 2230	Classe I 102 - 198 Classe II 199 - 226	210	21000	80	8.050	31 - 52	120
	Trefilado duro de alta resistência ASTM A679	C - 0,65 - 1,00 Mn - 0,20 - 1,30	1640 – 2410	166 - 245	210	21000	80	8.050	41 - 60	120
	Temperado e revenido ASTM A229	C - 0,55 - 0,85 Mn - 0,30 - 1,20	Classe I 1140 - 2020 Classe II 1320 – 2330	Classe I 115 - 205 Classe II 133 - 226	210	21000	80	8.050	42 - 55	120
	Carbono VSQ (c) ASTM A230	C - 0,60 - 0,75 Mn - 0,60 - 0,90	1480 – 1650	150 - 168	210	21000	80	8.050	45 - 49	120
Aço-liga	Cr-V ASTM A231, A232	C - 0,48 - 0,53 Cr - 0,80 - 1,10 V - 0,15 min.	1310 – 2070	133 - 210	210	21000	80	8.050	41 - 55	220
	Cr-Si ASTM 401	C - 0,51 - 0,59 Cr - 0,60 - 0,80 Si - 1,20 - 1,60	1620 – 2070	164 - 210	210	21000	80	8.050	48 - 55	245

(a) a resistência à tração máxima é cerca de 200 MPa (21 kgf/mm2) acima do valor mínimo; (b) a correlação entre dureza e propriedades de tração do fio é aproximada e não deve ser usada para aceitação ou rejeição; (c) qualidade “**valve spring quality**” (qualidade mola de válvula).

Tabela 2-7 – Propriedades de aços para tiras empregados na fabricação de molas conformadas a frio [1].

Material	Grau e especificação	Composição nominal, %	Propriedades de tração				Dureza HRC	Temperatura permissível °C
			Resistência tração, min.		Módulo de elasticidade E			
			MPa	Kgf/mm2	GPa	Kgf/mm2		
Tira laminada a frio Aço-carbono	C médio (1050) A682	C - 0,47 - 0,55 Mn- 0,60 - 0,90	Revenida 1100 - 1930	112 - 196	210	21.000	Recozida 85 máx. Revenida 38 - 50	120
	C "regular" (1074) A682	C - 0,69 - 0,80 Mn- 0,50 - 0,80	Revenida 1100 - 2210	112 - 224	210	21.000	Recozida 85 máx. Revenida 38 - 50	120
	Alto C (1095) A682	C - 0,90 - 1,04 Mn- 0,30 - 0,50	Revenida 1240 - 2340	126 - 238	210	21.000	Recozida 88 máx. Revenida 40 - 52	120
Aço-liga	Cr-V (MAS 6455)	C - 0,48 - 0,53 Cr - 0,80 - 1,10 V - 0,15 min.	1380 - 1720	140 - 175	210	21.000	42 - 48	220
	Cr-Si (AISI 9254)	C - 0,51 - 0,59 Cr - 0,60 - 0,80 Si - 1,20 - 1,60	1720 - 2240	175 - 227	210	21.000	47 - 51	245

2.1.6 Importância na Indústria

Os aços molas que são aplicados na indústria automobilística são submetidos a inúmeros testes, como ensaios de tração e de fadiga. Estes testes servem para homologar os aços produzidos pelas indústrias siderúrgicas assim como para estimar a vida útil das peças projetadas pelos fabricantes.

No intuito de atingir as necessidades especificadas para um aço mola, alguns cuidados devem ser observados, como a diminuição de inclusões não-metálicas, a mínima presença de elementos residuais como fósforo e enxofre, a qualidade interna e superficial e a descarbonetação [4].

As duas etapas do processo de fabricação do aço que tem um impacto direto nas características citadas acima são o refino e lingotamento e a conformação mecânica.

2.1.6.1 Cuidados no Refino e Lingotamento

No refino do aço, alguns pontos críticos devem ser considerados. Os parâmetros de processo que devem ser principalmente controlados estão na metalurgia secundária, no lingotamento contínuo e na qualidade superficial dos tarugos através da realização de inspeções [4].

Os principais pontos a serem controlados são [4,5]:

- A presença de elementos residuais, tais como o Cu, P e S;
- A retenção de escória oxidada no vazamento da panela, a fim de limitar a volta do fósforo durante o refino sob escória redutora;
- A ausência de adições tardias de ligas, a fim de evitar o aparecimento de inclusões;
- A regulação dos níveis do distribuidor e moldes no lingotamento para evitar os defeitos superficiais como formação de primeira pele ou pele dupla;
- O descarte ou desvio de regiões com maior número de impurezas como, por exemplo, o material de início e fim do vazamento.

2.1.6.2 Cuidados na Conformação Mecânica

Os pontos que devem ser avaliados com maior atenção na conformação mecânica do aço na Laminação são os parâmetros de reaquecimento, tipo de processo utilizado para conformação (sem utilização de torção) e controle do resfriamento [4].

Os principais pontos a serem controlados são [5]:

- A manutenção da soleira ou viga dos fornos de reaquecimento para evitar defeitos superficiais;

- O controle das temperaturas de reaquecimento e encharque;
- O teor de oxigênio nos fornos para evitar a descarbonetação;
- A eficácia do removedor de carepa dos tarugos para evitar as incrustações de carepa na superfície do produto;
- A conformação sem torção para limitar o agravamento dos defeitos superficiais;
- A medição do diâmetro para evitar irregularidades dimensionais;
- A inspeção para a detecção de defeitos durante a conformação do material, através de processos como a inspeção por *defectotherm*;
- A condição de manuseio do material para evitar defeitos causados a frio.

2.1.7 Características Críticas dos Aços Molas

2.1.7.1 Descarbonetação

Um dos parâmetros que mais necessitam de controle dentro do processo de laminação é a profundidade de descarbonetação do material. De fato, a qualidade da mola produzida está intimamente ligada à profundidade de descarbonetação obtida no produto laminado [6].

Na prática, a descarbonetação pode ser dividida em descarbonetação uniforme ou descarbonetação local. A descarbonetação uniforme pode ser definida como a camada abaixo da superfície que sofre a perda de carbono, que se estende uniformemente por todo o perímetro da amostra. Normalmente, a especificação para esta camada uniforme de descarbonetação varia entre 1 a 3% em relação ao diâmetro. A descarbonetação local é definida como o ponto onde existe a presença de ferrita ou uma fase transitória (ferrita-perlita) [6].

A descarbonetação que ocorre na superfície do material diminui a resistência mecânica e a dureza devido à perda de carbono. Portanto, quando aplicados esforços cíclicos nas molas, é a superfície que irá sofrer uma deformação plástica propiciando o aparecimento de defeitos.

Em molas produzidas com aços de altos teores de silício, como o SAE 9254, a descarbonetação é muito mais acentuada. Por este motivo, para se garantir a qualidade e especificações finais do produto, as diversas etapas de fabricação devem ser rigorosamente controladas, desde o reaquecimento, passando pela conformação mecânica e tratamento térmico.

2.1.7.2 Qualidade Superficial

Outro ponto importante e necessário para a produção de molas com excelente resistência mecânica e alto desempenho quando solicitadas em esforços elevados é a qualidade superficial [4-5].

A qualidade superficial é garantida, como já descrito em seções anteriores, através de um controle rigoroso de algumas etapas do processo produtivo. De fato, é crucial que se garanta uma eficácia do removedor de carepa, “descarepador”, após o reaquecimento, que a configuração do laminador não possua torções na barra a ser conformada, que a temperatura de conformação seja bem controlada e que o material seja adequadamente manuseado a quente e a frio [5].

A conformação em temperaturas mais elevadas diminui a resistência mecânica do material, facilitando a conformação. Isto implica em uma diminuição na formação de defeitos durante este processo.

Contudo, uma temperatura mais elevada também facilita a descarbonetação. Assim, a conformação mecânica a quente precisa considerar cuidadosamente a relação de compromisso que existe entre a descarbonetação e a qualidade superficial, a fim de que parâmetros otimizados de processo sejam empregados.

2.2 Conformação

2.2.1 Generalidades

O processo de fabricação do aço é dividido em três etapas principais: A redução que tem como objetivo a transformação do minério de ferro em ferro gusa. O refino que transforma o ferro gusa ou uma mistura de ferro gusa e sucata de aço em aço líquido, de acordo com as especificações do produto. Finalmente, a conformação mecânica, através de um processo de laminação ou forjamento, que é responsável por garantir a forma e as propriedades mecânico-metalúrgicas do produto final de aço.

Uma quarta etapa, essencial para a fabricação de certas classes de aço, é a “transformação mecânica”. Esta etapa adicional se faz necessária quando as propriedades mecânico-metalúrgicas não são alcançadas pela laminação, sendo que pode envolver diferentes tipos de processamentos, como tratamentos térmicos, trefilação, descascamento, usinagem e retificação.

Portanto, quase todo o aço produzido possui todas as suas propriedades dimensionais e metalúrgicas atreladas aos processos ocorridos na laminação [7]. As propriedades dimensionais são garantidas através da conformação realizada nos laminadores. Estas podem, muitas vezes, ter especificações bem mais rigorosas do que

aquelas exigidas pelas normas técnicas. Já as propriedades mecânico-metalúrgicas são garantidas através do controle dos parâmetros de processo empregados nos laminadores, como temperaturas de reaquecimento, temperaturas de laminação e controle do resfriamento. O controle eficaz destes parâmetros de processo pode propiciar a obtenção de propriedades mecânicos-metalúrgicas mais rigorosas. A este processo de elevado controle dá-se o nome de laminação controlada ou processamento termomecânico [7].

Quando as especificações finais do produto não podem ser obtidas apenas na laminação, faz-se necessário a realização de outros processos posteriores, como tratamento térmico e acabamento superficial. No tratamento térmico, os parâmetros de processo são definidos em função da qualidade do aço e das propriedades desejadas. Porém, alguns cuidados devem ser tomados quanto às definições dos parâmetros empregados, principalmente no que diz respeito à descarbonetação já existente no material laminado.

Portanto, para uma eficiente otimização do processo produtivo, é crucial que as diversas etapas estejam integradas e não tratadas independentemente.

2.2.2 Princípios da Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica a quente executado por compressão direta, que visa produzir alterações permanentes de forma e de algumas propriedades, através da imposição de deformações plástica no material [8-11].

A conformação mecânica é realizada sobre os tarugos brutos de solidificação que possuem uma estrutura irregular bruta de fusão, com vazios e segregação, de grande fragilidade. O trabalho mecânico é realizado a quente, normalmente acima da temperatura de recristalização do material (780°C), com o objetivo de diminuir a resistência mecânica deste e promover, simultaneamente, a recristalização da sua estrutura. Como resultado, obtém-se as formas (geometrias) desejadas, bem como o refinamento da microestrutura e eliminação ou atenuação de defeitos pré-existentes [8].

O material a ser conformado é introduzido entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, sofrendo deformação durante sua passagem. Uma representação esquemática simples pode ser visualizada na Figura 2.5.

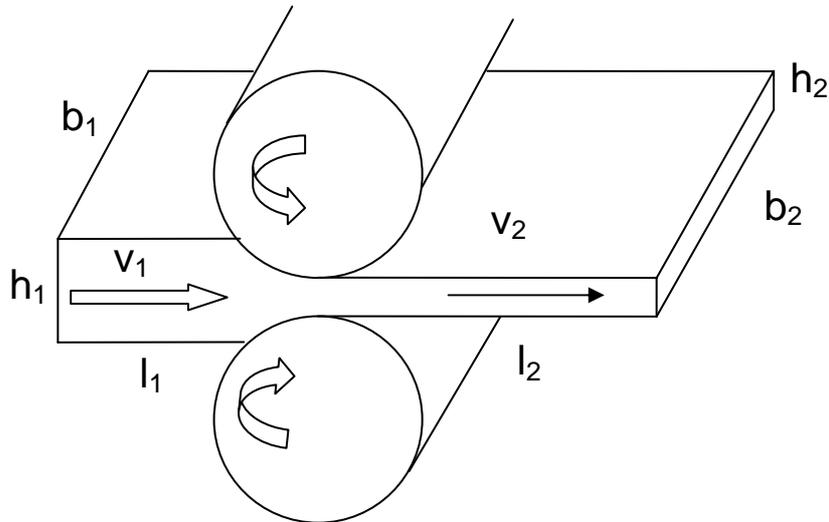


Figura 2-5 – Esquema representativo da conformação durante a Laminação.

A conformação consiste na redução de altura ($h_2 < h_1$) com conseqüências no alargamento ($b_2 > b_1$), no alongamento ($l_2 > l_1$), e na velocidade ($v_2 > v_1$) do material, sempre respeitando a lei da conservação do volume [8, 12].

Com isso, uma conformação eficiente em um processo de laminação de produtos longos consiste na maior redução de área possível, através de uma eficiente redução de altura com o menor alargamento e o máximo alongamento [8, 11].

2.2.3 Etapas de Laminação

As principais etapas que ocorrem durante o processo de laminação estão apresentadas na Figura 2.6 [7, 11].

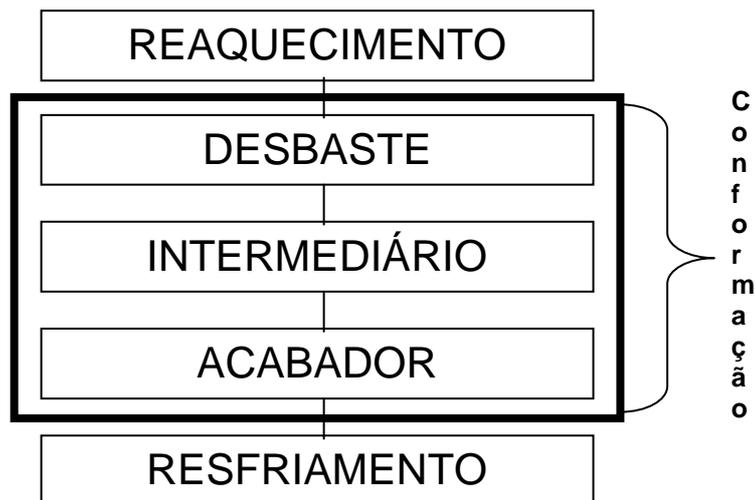


Figura 2-6 – Esquema representativo das principais etapas de Laminação.

A etapa de reaquecimento tem como objetivo aquecer o tarugo a uma temperatura que varia entre 900°C e 1200°C. Para isto, os tarugos passam por três diferentes zonas de aquecimento dentro dos fornos, com temperaturas e tempos de permanência determinados.

As três zonas do sistema de reaquecimento são: Zona de Pré-Aquecimento (temperatura média de 900°C); Zona de Aquecimento (temperatura média de 1100°C) e Zona de Encharque (temperatura média de 1200°C).

A etapa de conformação é definida por três diferentes denominações: Desbaste, Intermediário e Acabador. Estas três etapas se diferenciam pelas reduções aplicadas durante a conformação.

No Desbaste, onde se deseja desmanchar a estrutura bruta de fusão, são aplicadas reduções mais baixas. A estrutura bruta de fusão possui um arranjo irregular, com muitos vazios e intensa segregação. Esta conformação inicial gera uma grande alteração na estrutura sub-superficial do material [8, 10].

Já na segunda etapa de conformação, o Intermediário, as reduções são bastante elevadas, podendo chegar a 30% de redução em área. Estes elevados níveis de redução são aplicados com o objetivo de conformar o núcleo do material, eliminando assim os vazios existentes e atenuando a segregação. Isto ocasionará uma homogeneização mais completa da estrutura do material, já que todo ele será conformado simultaneamente [8, 10].

Durante a última etapa de conformação, o Acabador, reduções menores são novamente aplicadas na conformação do material, cerca de 5 a 9% de redução em área. O objetivo principal é dar a forma ao produto, pois sua estrutura final de conformação já foi alcançada, garantindo inclusive precisão dimensional [8].

Estas diferentes etapas de conformação e suas reduções estão esquematicamente representadas na Figura 2.7.

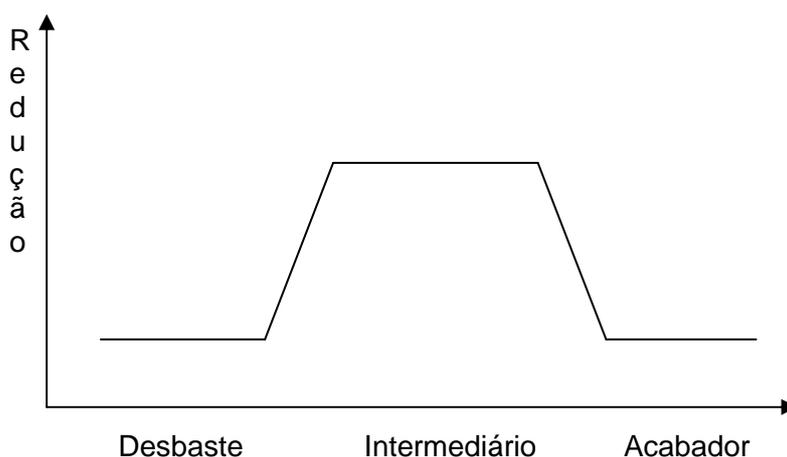


Figura 2-7 – Esquema representativo das reduções aplicadas nas etapas de conformação.

No Resfriamento, etapa final do processo de laminação, o material sofre as últimas modificações possíveis em sua microestrutura e propriedades. Nesta etapa, o objetivo é controlar as temperaturas de entrada e saída, bem como a taxa de resfriamento. Pode-se

aplicar diferentes tipos de resfriamento, como simplesmente ao ar, ar forçado ou até mesmo, sistemas de abafamentos. A definição do tipo de resfriamento irá permitir o controle da taxa de resfriamento, podendo ser alta, como é o caso para o ar forçado, ou taxas bastante pequenas, como no caso do abafamento. Cada um destes tipos de resfriamento será previamente definido conforme o material que será produzido e das propriedades e especificações finais que se desejam alcançar [13-15].

2.2.4 Forças de Conformação

Os aços em geral possuem um comportamento dúctil, ou seja, quando submetidos a esforços mecânicos, estes apresentam primeiramente uma deformação elástica e, após uma determinada tensão aplicada, passam a se deformar plasticamente. Este comportamento é função da composição química, que pode alterar significativamente a relação tensão-deformação e assim o comportamento elasto-plástico dos aços.

Outro fator que pode alterar as relações entre tensão e deformação é a temperatura. A Figura 2.8 demonstra, para um aço baixo carbono, que quanto maior a temperatura, menor será a tensão necessária para se produzir uma mesma quantidade de deformação, ou para uma mesma tensão aplicada, maior será a deformação resultante [16].

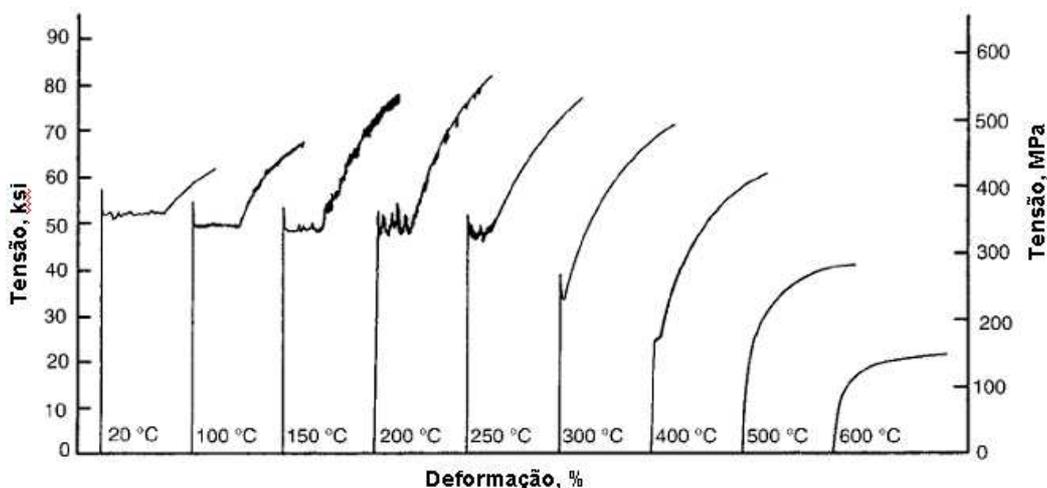


Figura 2-8 – Gráfico tensão x deformação de diferentes temperaturas para um aço baixo carbono AISI 1020.

2.2.5 Tipos de Laminadores

Os laminadores são definidos pelos arranjos que suas gaiolas são dispostas ao longo do processo. Esta definição depende dos produtos que cada laminador deverá produzir. Os dois principais arranjos que os laminadores possuem são: o Arranjo Aberto e o Arranjo Contínuo. Muitas vezes, os laminadores terão a composição destes dois tipos de arranjos [7, 11].

2.2.5.1 Arranjo Aberto

Um laminador de arranjo aberto possui as gaiolas dispostas aleatoriamente, sem uma especificação bem definida, dependendo do comprimento do material que será produzido e do espaço físico disponível [7, 11]. Os cilindros das gaiolas sempre se encontram na posição horizontal, sendo que na maioria das vezes possuem vários passes em uma mesma gaiola.

Um esquema representativo de um laminador de arranjo aberto pode ser visto na Figura 2.9, em que se apresenta um único motor de acionamento para quatro gaiolas alinhadas paralelamente. Também se pode evidenciar nesta figura esquemática que o material sofre três diferentes conformações na primeira gaiola, enquanto que na segunda, terceira e quarta gaiola, o material apenas é conformado uma única vez.

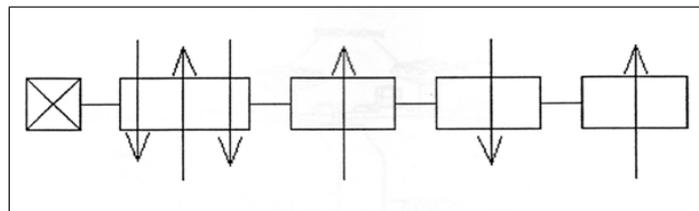


Figura 2-9 – Representação esquemática de um arranjo aberto [7].

As gaiolas de um laminador de arranjo aberto possuem diversos tipos de configurações, sendo as mais comuns as de dois cilindros. Estas podem ser chamadas de gaiolas DUO (quando os cilindros possuírem apenas um sentido de rotação) ou gaiolas DUO-Reversível (quando os cilindros possuírem dois sentidos de rotação). Também existem as gaiolas de três cilindros, chamadas de gaiolas TRIO (cilindros com sentidos de rotação opostos entre si). Estes diferentes tipos de configuração de cilindros das gaiolas para um arranjo aberto estão representados na Figura 2.10.

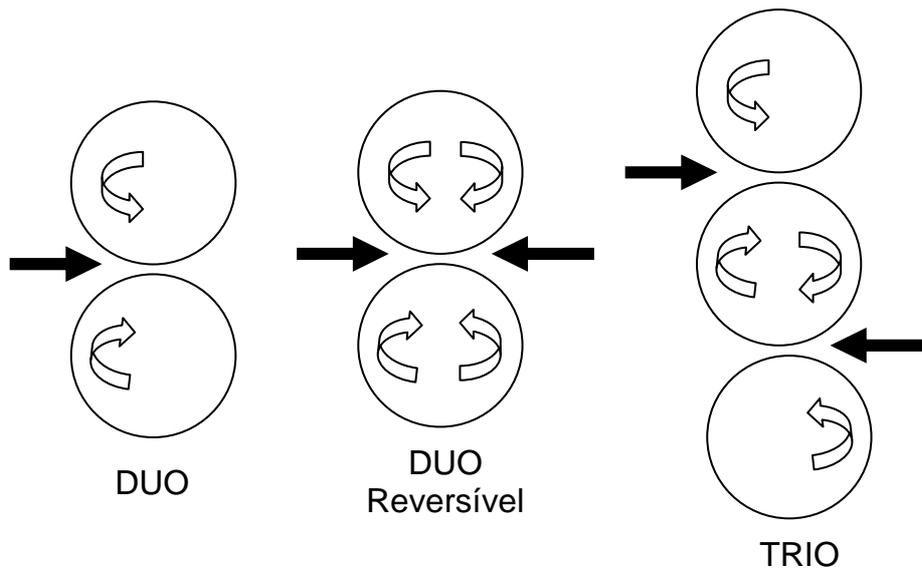


Figura 2-10 – Configuração típica dos cilindros de gaiolas do Arranjo Aberto.

Estes tipos de gaiolas são comumente utilizadas na primeira etapa do processo de conformação da laminação, isto é, o desbaste. Normalmente, nesta etapa, o produto da laminação possui dimensões maiores e comprimentos menores o que proporciona esta possibilidade de arranjo. Este arranjo é mais simples e de menor custo, pois permite múltiplos passes (níveis variados de conformação) em uma mesma gaiola.

2.2.5.2 Arranjo Contínuo

Um laminador de arranjo contínuo possui as gaiolas dispostas sequencialmente, ou seja, uma logo após a outra [7, 11]. Uma representação esquemática da disposição sequencial das gaiolas para um laminador de arranjo contínuo pode ser vista na Figura 2.11, que neste arranjo proporciona conformações sucessivas ao material. Neste arranjo, pode-se evidenciar que cada gaiola possui um motor de acionamento e pode possuir uma configuração de gaiolas verticais e horizontais como na figura “a” ou apenas horizontais como na figura “b”.

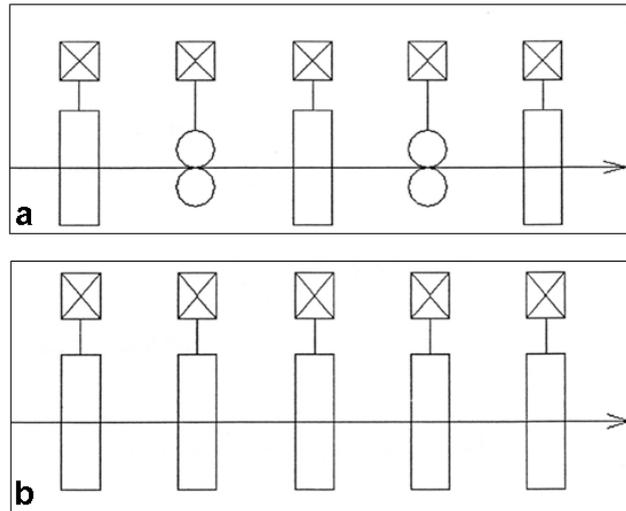


Figura 2-11 – Representação esquemática de um arranjo contínuo com a) gaiolas horizontais e verticais e b) apenas gaiolas horizontais [7].

Este arranjo de laminador é comumente utilizado na produção de produtos com dimensões menores, como fio-máquina e vergalhões, devido a sua alta produtividade e à necessidade de um número de passes e gaiolas bastante elevado para a conformação do material. Um ponto importante em laminadores com este tipo de arranjo são os dispositivos existentes entre as gaiolas para o controle de tração do material. Estes dispositivos formam um “laço” na barra capaz de controlar a vazão de material entre as gaiolas como visualizada na Figura 2.12.



Figura 2-12 – Laço para controle da tração existente entre gaiolas.

Os laminadores mais modernos possuem apenas este tipo de arranjo, já que a produtividade e qualidade do material são muito superiores aos laminadores que possuem um arranjo aberto. Outra vantagem do laminador de arranjo contínuo é o melhor controle

de processo durante a conformação, porque as perdas de temperatura são muito menores do que em um laminador de arranjo aberto.

2.2.5.3 Arranjo do Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas

O Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas possui uma configuração combinada entre um arranjo aberto e um arranjo contínuo. Esta combinação de configuração pode ser vista na representação esquemática da Figura 2.13.

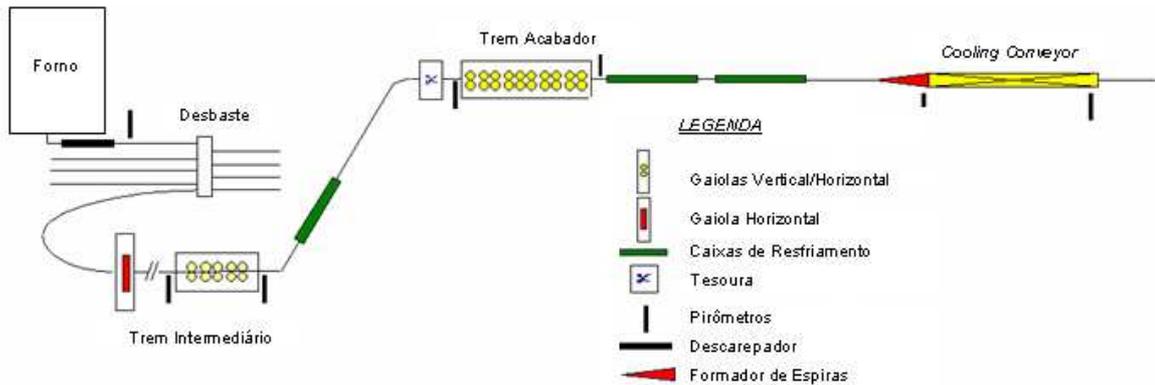


Figura 2-13 – Esquema representativo da configuração do Laminador 2.

O desbaste é realizado por uma gaiola TRIO que possui um arranjo aberto, como mostra a Figura 2.14.



Figura 2-14 – Gaiola TRIO do laminador 2 de arranjo aberto.

A conformação intermediária e final possui a disposição de um arranjo contínuo. O trem intermediário possui gaiolas universais, que são gaiolas horizontais e verticais intercaladas, enquanto que o trem acabador possui a configuração em “V” das gaiolas. Esta configuração de arranjo contínuo para o trem intermediário e acabador pode ser observada na Figura 2.15.



Figura 2-15 – Configuração para um arranjo contínuo a) Trem Intermediário b) Trem Acabador.

O Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas também conta com equipamentos capazes de realizar tratamentos térmicos durante os processos de conformação, como as caixas de resfriamentos, dispostas ao longo da linha de laminação (ver Figura 2.16). Estas caixas controlam a temperatura do material ao longo da conformação, como explicado anteriormente.



Figura 2-16 – Caixas de resfriamentos a) em linha na laminação b) parte interna.

Após os últimos passes de conformação da laminação, existe a zona de equalização, onde o material alcança uma homogeneização de temperatura. O bobinamento é a próxima etapa do processo, na qual o material passará a ter o formato do fio-máquina laminado. Isto ocorre no formador de espiras, como mostra a Figura 2.17.

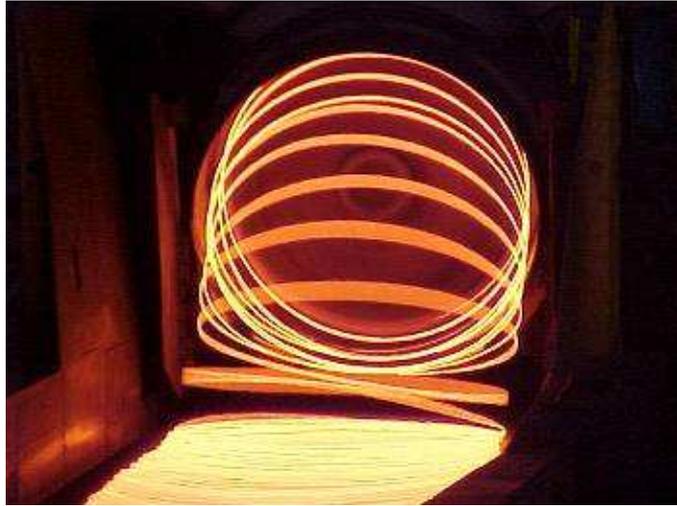


Figura 2-17 – Formador de Espiras responsável pela formação do fio-máquina.

A última etapa do processo de laminação é o resfriamento do material, que acontece no *cooling conveyor* (ver Figura 2.18). Este equipamento é capaz de realizar o tratamento térmico de normalização. Além deste tratamento, também se pode impor um resfriamento forçado ao material, através da utilização de ventiladores, posicionados na parte inferior da esteira transportadora do fio-máquina. Por outro lado, quando se deseja um resfriamento lento, pode-se dispor de uma sistema de “abafamento”, composto por capotas revestidas por material isolante.



Figura 2-18 – *Cooling Conveyor* responsável pelo tratamento térmico final do fio-máquina.

2.2.6 Laminação de Aço Mola – Cuidados e Características

A laminação de Aços Mola requer muitos cuidados. O rigoroso controle dos parâmetros de reaquecimento, como a temperatura, a relação ar-gás e a pressão interna do forno, bem como as temperaturas de conformação e o próprio resfriamento, determinarão o nível final de descarbonetação do material [6]. O controle da descarbonetação também se faz necessário na etapa posterior à conformação, isto é, no tratamento térmico.

O controle da temperatura de conformação e de impurezas presentes no aço terão influência na qualidade superficial. As macro e microinclusões, bem como a segregação e “pontos frios” representam áreas de maior resistência mecânica e, conseqüentemente, de comportamento plástico distinto. Como resultado, o material apresenta uma “conformabilidade” que varia ao longo de sua área, o que aumenta o risco de surgimento de defeitos superficiais [4, 5, 9].

Assim, é crucial que o material passe por inspeções regulares, a fim de se garantir um produto isento de qualquer defeito superficial, que possa eventualmente diminuir a vida em serviço do componente (mola). Para estas inspeções, são utilizados equipamentos de detecção a quente, logo após os últimos passes de conformação. Da mesma forma, realiza-se, por amostragem, inspeção visual e por partículas magnéticas [5-6].

2.2.7 Trefilação

O processo de trefilação tem como característica principal o aumento de resistência mecânica, que ocorre através da deformação plástica a frio (encruamento) do material. A Figura 2.19 mostra o efeito da deformação a frio do material nas suas propriedades mecânicas. Claramente, com a redução de área da seção transversal, ocorre um aumento da resistência à tração e ao escoamento do material, com uma respectiva redução de ductilidade [17-19].

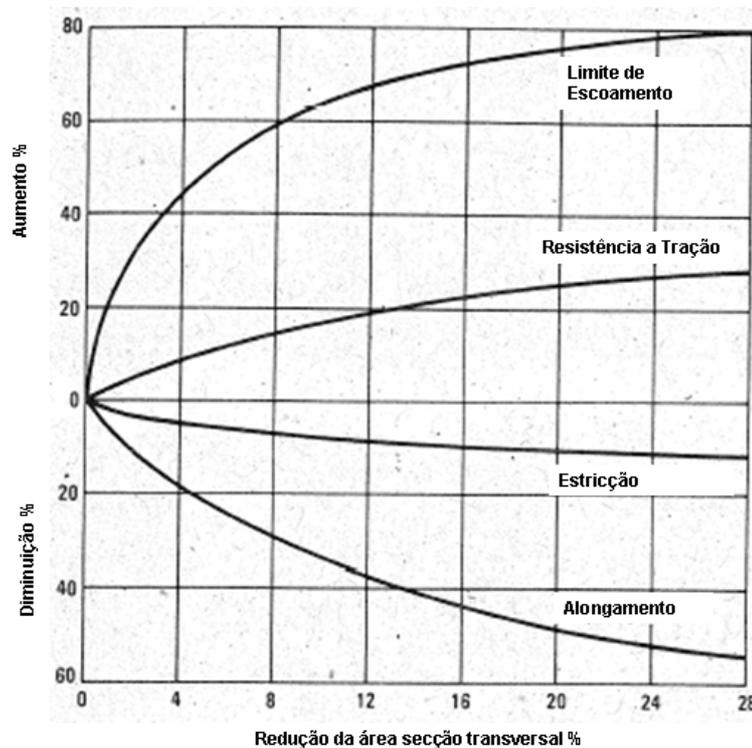


Figura 2-19 – Efeito da redução de área nas propriedades mecânicas para barras trefiladas de aço baixo carbono [20].

Para as deformações usualmente aplicadas, o limite de escoamento aumenta em torno de 40% e a resistência à tração em pelo menos 10%. Porém, quando uma resistência maior do que aquela já adquirida apenas com a deformação é necessária, o material a ser trefilado deve ser previamente tratado [17].

Atualmente, a trefilação conta com máquinas modernas, que seguem um fluxo de produção em linha, realizando em seqüência uma série de operações diferentes, como desbobinamento, pré-endireitamento, jateamento, trefilação, corte e endireitamento/polimento [20-21]. A Figura 2.20 mostra de forma esquemática um exemplo típico de uma máquina de trefilação combinada.

Pode-se ainda acrescentar uma inspeção final automática logo após o processo de polimento e endireitamento, com o intuito de garantir a qualidade superficial exigida para as barras trefiladas.

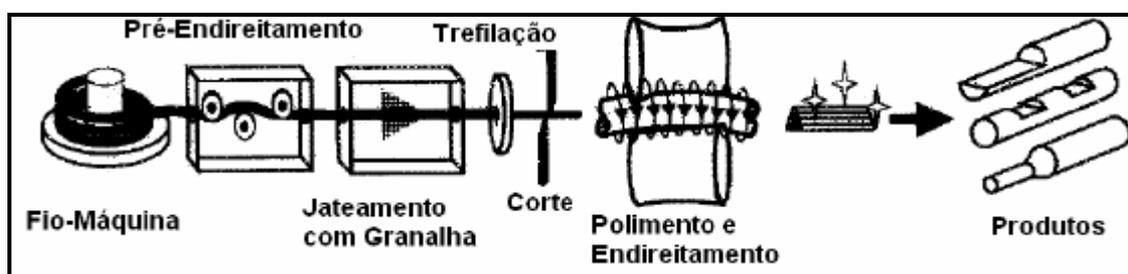


Figura 2-20 – Etapas de processo de uma máquina de trefilação combinada [20].

2.3 Tratamentos Térmicos

2.3.1 Aspectos Gerais

As propriedades dos aços são características da sua composição química, como detalhada anteriormente, e também da sua microestrutura. A sua microestrutura pode ser definida pelas conformações e parâmetros de processos aplicados na laminação, também detalhado anteriormente, ou através de tratamentos térmicos.

O tratamento térmico consiste em um ciclo de aquecimento e resfriamento do material sob condições bem controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento objetivando-se alcançar certas propriedades mecânicas através de uma microestrutura pré-determinada [22-24].

Existem vários tipos de tratamentos térmicos, dentre eles pode-se citar o recozimento, a normalização, a têmpera e o revenido. Estes tratamentos térmicos são baseados em informações obtidas nos diagramas de transformação isotérmica e resfriamento contínuo.

2.3.2 Diagramas de Transformação

2.3.2.1 Diagramas de Transformação Isotérmica

Os diagramas de transformação isotérmica descrevem as transformações que ocorrem ao longo do tempo a temperaturas constantes. Estes diagramas definem que estruturas serão produzidas quando o material for submetido a certas condições de temperatura e tempo, e assim como as propriedades que podem ser esperadas para este material processado nestas condições. Por este motivo, estes diagramas são bastante utilizados no processo de otimização dos parâmetros de controle.

2.3.2.2 Diagramas de Resfriamento Contínuo

Para certas aplicações, como é o caso do resfriamento a partir da temperatura de laminação, é importante se dispor de um outro tipo de diagrama de transformação. De fato, nestes casos, deseja-se prever que produtos microestruturais serão formados, para uma certa taxa de resfriamento, ao longo de uma queda contínua da temperatura. Para tanto, precisa-se aplicar os diagramas de resfriamento contínuo [16].

2.3.3 Aplicação de Tratamentos Térmicos no Processo da Laminação

Modernamente, a indústria busca com mais vigor integrar as diversas etapas de um processo produtivo. Um exemplo desta integração é a utilização, na laminação, das caixas de resfriamento durante a conformação do aço e do *cooling conveyor* no tratamento térmico do fio-máquina.

As caixas de resfriamento são utilizadas para se conseguir temperaturas específicas de conformação (denominada laminação termocontrolada) e homogeneizar a diferença de temperatura entre início e fim da barra inerente ao processo de laminação.

Diferentes taxas de resfriamento são aplicadas no *cooling conveyor*, simulando-se assim uma operação de tratamento térmico ao final do processo de laminação. Com isso, aproveita-se a temperatura e a energia provenientes da conformação. Para isto, são utilizados três tipos diferentes de resfriamento, isto é, ao ar (equivalente à normalização), com ventilação forçada (equivalente à têmpera) e abafamento com capotas revestidas com material refratário (equivalente ao recozimento) [22, 25, 26].

2.3.3.1 Recozimento Aplicado em Aços Mola

No caso específico dos aços mola, o recozimento tem como objetivo diminuir a dureza do fio-máquina. Para o sucesso desta operação, três parâmetros precisam ser rigorosamente controladas, isto é, a temperatura final de aquecimento, o tempo de permanência nesta temperatura e o resfriamento a partir desta [22, 27, 28].

Um tratamento térmico muito semelhante ao recozimento pode ser aplicado no *cooling conveyor*, ao se aproveitar as temperaturas elevadas da etapa final do processo final de conformação. Na definição deste processo, trabalha-se com o controle do resfriamento do fio-máquina através da determinação da velocidade de passagem e quantidade de capotas de abafamento utilizadas para propiciar um resfriamento lento.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Considerações Iniciais

Este trabalho teve como motivação a proposta de alteração do processamento do aço mola SAE 9254 dentro da Gerdau Aços Especiais Charqueadas. O foco deste trabalho é a otimização do processamento deste aço, através de alterações no processo de laminação. A otimização é alcançada, de fato, com a eliminação do recozimento prévio à trefilação. O tratamento térmico de recozimento atualmente empregado se faz necessário porque o material proveniente da laminação não possui as propriedades necessárias para o seu processamento adequado na trefila.

A eliminação do recozimento trará uma série de benefícios para a empresa, tais como, eliminação dos custos com o tratamento térmico de recozimento, diminuição no tempo de fabricação do material e disponibilidade de forno para tratamento de outros materiais. O processo de otimização contou com a realização de alguns experimentos, onde foram avaliadas as influências da velocidade de resfriamento e temperatura de reaquecimento nas propriedades mecânicas e qualidade superficial do material.

3.2 Materiais

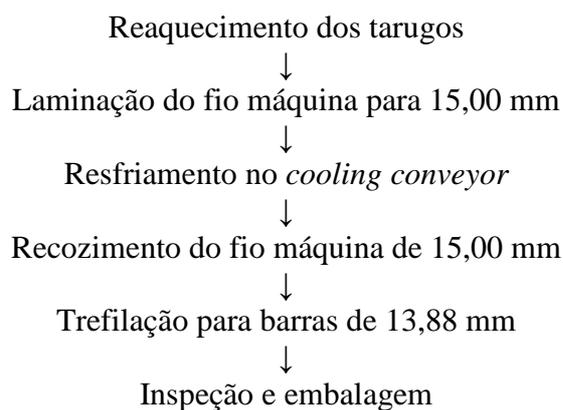
O material do estudo em questão é o SAE 9254 na bitola de 15,00 mm, laminado em fio-máquina e trefilado posteriormente para 13,88 mm. A Tabela 3.1 apresenta a composição química nominal deste aço.

Tabela 3-1 – Composição química nominal do aço SAE 9254.

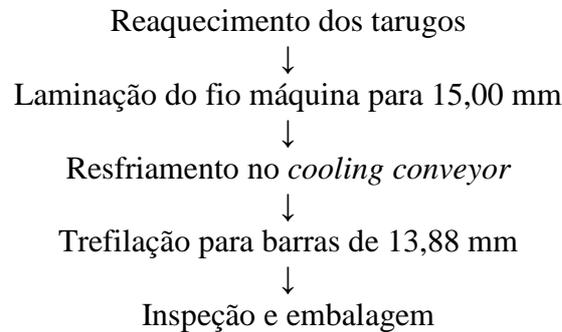
C	Mn	Si	Cr	V	Mo
0,51 -0,59	0,65 -1,10	1,20 -1,60	0,60 -0,80	-	-

3.3 Processamento do Aço Mola Trefilado

O processamento atual das barras trefiladas do aço mola SAE 9254 é composto por seis etapas principais, como mostra o fluxograma abaixo.



A proposta deste trabalho é a otimização da etapa de resfriamento após a laminação, com o objetivo de se eliminar o tratamento térmico de recozimento, conforme mostra o novo fluxo do processo abaixo.



3.4 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados na otimização do processamento do aço mola SAE 9254 na laminação foram o Forno de Reaquecimento, o Laminador e o *cooling conveyor*.

3.4.1 Forno de Reaquecimento

O Forno de Reaquecimento do Laminador 2 é do tipo *Walking Hearth*, ou soleira marchante, com aquecedores laterais nas zonas de aquecimento e encharque. Este forno propicia um aquecimento homogêneo da face superior do tarugo em direção a face inferior onde este está apoiado na soleira.

A temperatura é controlada nas três zonas do forno, isto é, zona de pré-aquecimento, zona de aquecimento e zona de encharque. O tempo de permanência para um correto aquecimento é definido como tempo total de permanência do tarugo no forno.

3.4.2 Laminador

O Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas possui uma gaiola de desbaste com oito passes, um trem intermediário de catorze gaiolas e um bloco acabador de dez gaiolas.

O Laminador 2 ainda apresenta dois “descarepadores”, quatro tesouras de despontes, cinco caixas de resfriamento e um formador de espiras, como pode ser visto na representação esquemática da Figura 3.1.

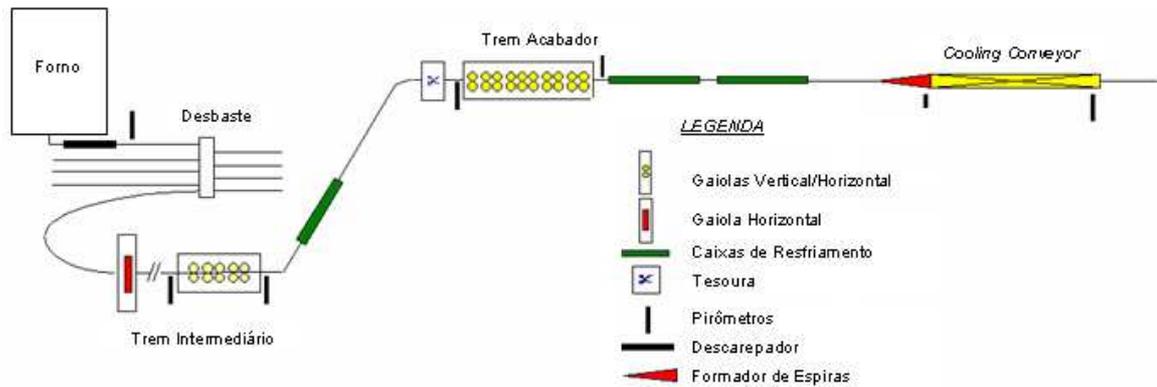


Figura 3-1 – Layout esquemático do Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas.

3.4.3 *Cooling Conveyor*

O *cooling conveyor*, apresentado na Figura 3.2, é um equipamento integrante do Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas, composto por 14 conjuntos de capotas térmicas e dez ventiladores dispostos na parte inferior. A movimentação dos rolos de fio-máquina é feita através de rolos transportadores acionados por um sistema de correntes e motores.



Figura 3-2 – Vista do cooling conveyor com as capotas de abafamento abertas.

3.5 Ensaios

3.5.1 Determinação das Temperaturas de Conformação

A determinação das melhores temperaturas de conformação para o aço mola SAE 9254 foi realizada no simulador Gleeble 3500. O simulador Gleeble é basicamente constituído de um sistema de aquecimento resistivo, um sistema servo-hidráulico e um sistema de aquisição de dados por computador, capazes de analisarem variáveis como tensão aplicada, redução de área e temperatura.

A Figura 3.3 apresenta uma visão geral do simulador, bem como uma imagem detalhada do aquecimento do corpo-de-prova.

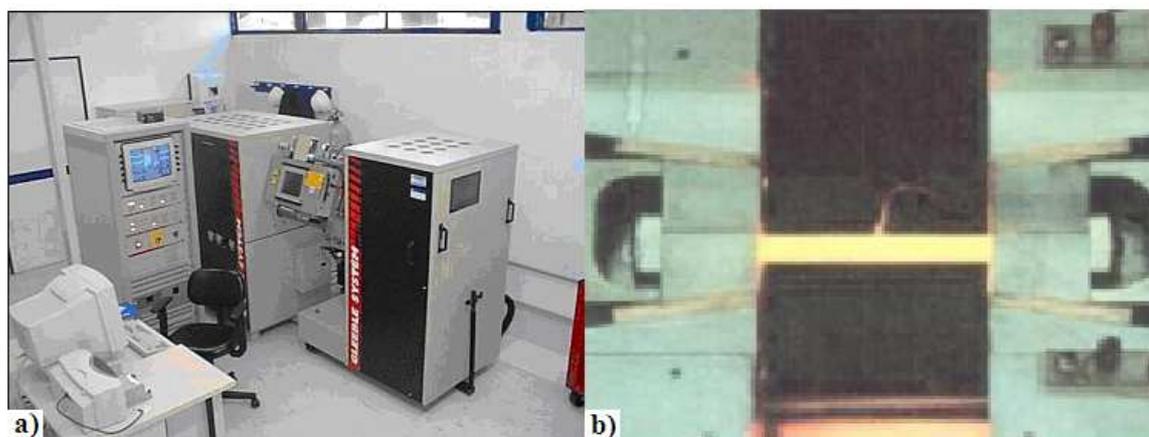


Figura 3-3 – a) Simulador termomecânico Gleeble 3500, b) imagem do aquecimento do corpo-de-prova no simulador.

3.5.2 Amostragem

Uma amostragem correta do material em análise se faz necessária a fim de mapear todas as características e, principalmente, as variações que são inerentes ao processo.

A análise termográfica do resfriamento do fio-máquina no *cooling conveyor* indica a necessidade de uma amostragem maior para que estas variações do processo possam ser detectadas. A termografia do resfriamento no *cooling conveyor* é demonstrada na Figura 3.4.

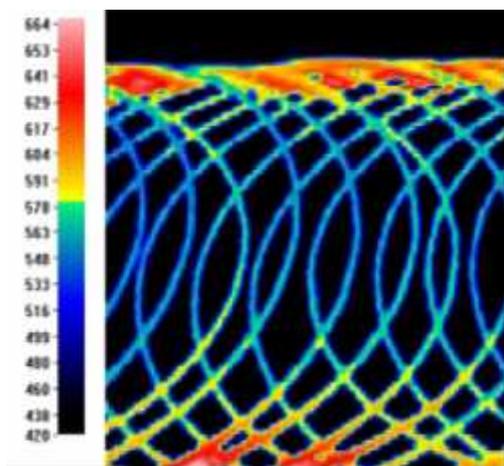


Figura 3-4 – Termografia das espiras do fio-máquina durante o resfriamento no *cooling conveyor*.

A amostragem adotada para a análise das características do fio-máquina é demonstrada na Figura 3.5, onde são retiradas quatro amostras de uma mesma espira a fim de garantir o mapeamento das propriedades devido à variação do resfriamento da espira.

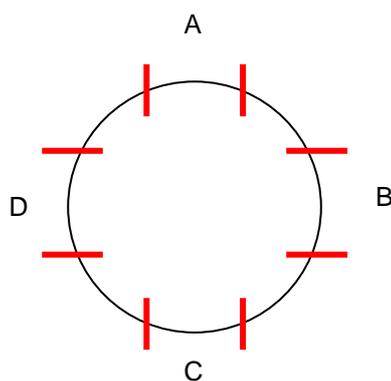


Figura 3-5 – Representação esquemática da amostragem do fio-máquina.

Três experimentos diferentes foram testados e cada um deles apresentou uma amostragem diferente devido aos parâmetros alterados. O detalhamento maior da amostragem adotada por experimento será melhor descrita a seguir.

3.5.3 Dureza

Foram tomadas medidas de dureza Brinell em todas as amostras no Durômetro INSTRON Series 600, com carga de 187,5 Kg e indentador de 2,5 mm de diâmetro.

3.5.4 Descarbonetação

As amostras foram preparadas com lixamento e polimento em pasta de diamante com granulometria de 1 μm , sendo em seguida atacadas com reagente Nital 2% para as análises de descarbonetação.

As amostras foram analisadas em Microscópio Óptico Olympus BX 60, onde se mede a profundidade da camada externa descarbonetada.

3.5.5 Inspeção Superficial

Foram realizadas inspeções para verificar a qualidade superficial do produto laminado através de três procedimentos: Inspeção Visual, Inspeção por *Defectotherm* e Inspeção por *Circograph*.

3.5.5.1 Inspeção Visual

Todas as amostras foram inspecionadas visualmente através de uma lupa com aumento de 10 x. As amostras também foram inspecionadas por partículas magnéticas.

3.5.5.2 Inspeção por *Defectotherm*

O Laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Charqueadas possui inspeção on-line. O equipamento que faz esta inspeção está posicionado logo após o bloco acabador.

A inspeção pelo *defectotherm* é realizada através da análise de correntes parasitas induzidas no fio-máquina durante sua passagem pelo equipamento. Perturbações destas

correntes são percebidas pelo equipamento, indicando a presença de imperfeições no material, sendo registradas graficamente.

3.5.5.3 Inspeção por *Circograph*

A trefila possui inspeção on-line, que é realizada pelo *circograph*. Esta inspeção é realizada através da análise de correntes parasitas induzidas na barra trefilada durante sua passagem pelo equipamento. A perturbação da corrente aplicada percebida pelo equipamento indica a presença de imperfeições na barra, sendo então indicadas graficamente.

3.6 Experimentos

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi o Planejamento e Análise de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*). A escolha desta metodologia se baseou na confiabilidade alcançada, redução nos tempos e custos de trabalho experimental.

Os parâmetros dos processos de reaquecimento, laminação e resfriamentos possuem uma interligação. Sendo assim, quando se altera algum parâmetro destes processos, os outros sofrem influência. Por este motivo, foram necessários vários ajustes nestes diferentes processos, conforme mostra a Tabela 3.2.

Tabela 3-2 – Alterações feitas nos parâmetros dos processos.

Processo	Parâmetro	Alteração
Reaquecimento	Temperatura do Forno	Alta e Baixa
Resfriamento	Velocidade	Alta e Baixa
Laminação	Resfriamento das extremidades	Resfriamento entre barras
Resfriamento	Abafamento	Capotas adicionais
Resfriamento	Velocidade	Escalonamento da velocidade

3.6.1 Experimento I

No planejamento do experimento I foram alterados os parâmetros de velocidade de resfriamento no *cooling conveyor* e temperatura de reaquecimento do forno.

Foram testadas duas velocidades de resfriamento, uma velocidade alta (tempo menor de resfriamento) e outra velocidade baixa (tempo maior de resfriamento) que se assemelha ao recozimento.

Com a eliminação do recozimento prévio a trefilação, que acaba por intensificar a descarbonetação, surgiu a possibilidade de elevação da temperatura de reaquecimento. Portanto, foram definidas duas temperaturas de reaquecimento. A já utilizada atualmente e denominada de baixa e uma segunda temperatura mais elevada, a fim de melhorar a “conformabilidade” do material.

Estas quatro condições testadas neste experimento I estão detalhadas na Tabela 3.3.

Tabela 3-3 – Condições propostas para temperatura de reaquecimento e velocidade de resfriamento.

Condição	Temperatura de reaquecimento	Velocidade de resfriamento
1	Baixa	Baixa
2	Baixa	Alta
3	Alta	Baixa
4	Alta	Alta

Neste experimento I, cada condição representou uma ordem de produção com dois rolos testados com os parâmetros acima descritos.

Estas alterações nos parâmetros de processos na laminação e o estudo prévio da termografia do resfriamento do fio-máquina no *cooling conveyor* levaram a necessidade de uma amostragem por quadrante definida anteriormente. Para este experimento foram retiradas amostras de uma espira de cada extremidade e de uma espira central, totalizando 12 amostras por rolo.

3.6.2 Experimento II

O experimento II teve como objetivo diminuir a variação da dureza ao longo dos rolos. Em seu planejamento, foram testadas capotas adicionais no início do *cooling conveyor* e o resfriamento das extremidades dos rolos nas caixas de resfriamento. A temperatura de reaquecimento foi mantida maior devido aos bons resultados de descarbonetação e qualidade superficial apresentados no experimento I.

Foram testadas quatro diferentes condições como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3-4 – Condições propostas para abafamento adicional e resfriamento das extremidades dos rolos.

Condição	Capotas adicionais	Resfriamento das extremidades
1	Não	Desligado
2	Não	Ligado
3	Sim	Ligado
4	Sim	Desligado

Neste experimento II, cada condição representou uma ordem de produção com um rolo testado com os parâmetros acima descritos.

Para garantir um mapeamento maior e conseguir visualizar as variações nas propriedades mecânicas das extremidades dos rolos, foi realizada uma amostragem maior neste experimento. Cada rolo foi amostrado em seis espiras da extremidade inicial do rolo e sete espiras da extremidade final do rolo, totalizando 52 amostras por rolo.

3.6.3 Experimento III

No planejamento do experimento III, foram escalonadas as velocidades de resfriamento do *cooling conveyor* para que os chamados “pontos quentes” das espiras se alternassem ao longo do transporte, diminuindo assim a heterogeneidade de resfriamento entre as espiras. A temperatura de reaquecimento também foi mantida maior para este experimento.

Este escalonamento de velocidade foi definido por incrementos percentuais constantes na velocidade de transporte dos rolos por toda a extensão do *cooling conveyor* começando com os menores valores possíveis do equipamento.

Neste experimento III foram testadas duas ordens de produção com cinco rolos cada, sendo apenas dois rolos amostrados por ordem.

A amostragem definida para este experimento ficou restrita as extremidades dos rolos, pois nos experimentos anteriores não houve variação significativas nos resultados das espiras das extremidades em comparação as espiras centrais dos rolos. A fim de garantir uma amostragem suficiente para a análise deste experimento III, foram retiradas amostras de duas espiras de cada extremidade, totalizando 16 amostras por rolo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Considerações Iniciais

Primeiramente, analisaram-se as temperaturas de conformação para o aço mola no simulador Gleeble 3500, verificando-se que à medida que a temperatura foi elevada, as forças necessárias para a deformação foram diminuindo conforme já detalhado na revisão bibliográfica, Seção 2.2.4.

Os testes foram realizados na faixa de temperatura entre 850°C e 1300°C, onde as temperaturas ideais de conformação encontradas foram superiores a 1000°C, como demonstrado na Figura 4.1.

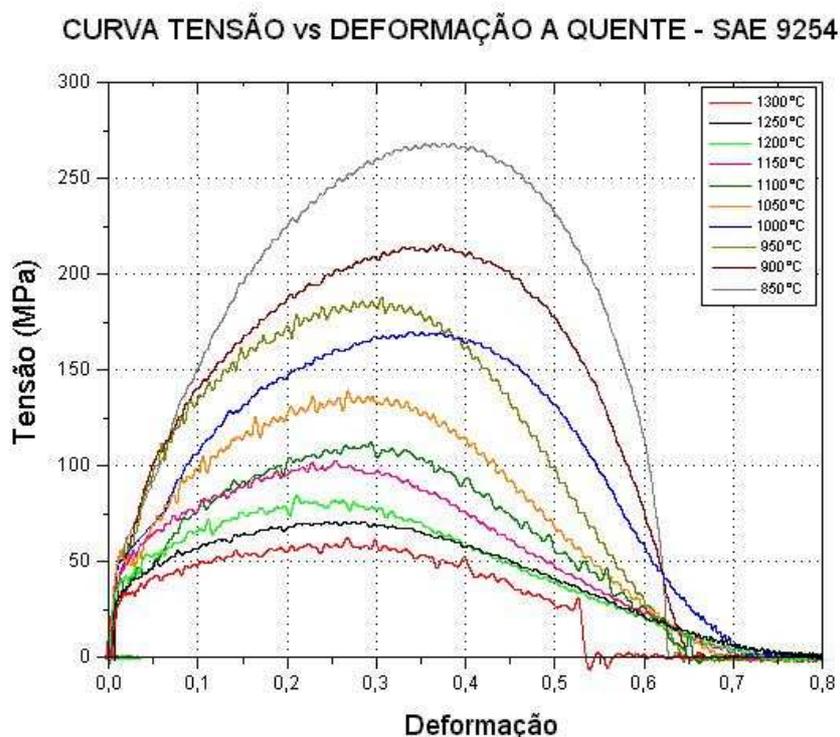


Figura 4-1 – Curvas tensão vs. deformação para o aço SAE 9254, produzidas a diferentes temperaturas. Velocidade de Deformação: 0.05s⁻¹.

Quando se analisa a tensão máxima e a temperatura do ensaio, também se verifica que as temperaturas superiores a 1000°C são as mais indicadas, sendo que na faixa de 1100°C a 1200°C, a tensão máxima aplicada é menor do que 125MPa, ficando próximas de 50 MPa, como pode ser visto na Figura 4.2.

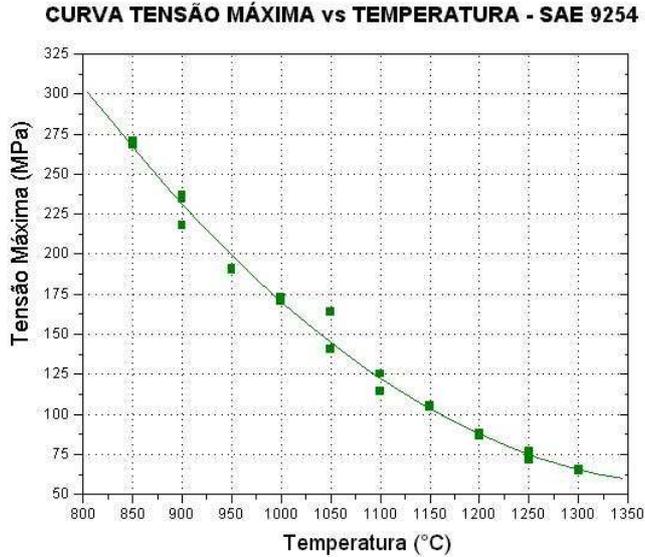


Figura 4-2 – Curva tensão máxima vs. temperatura para o aço SAE 9254.

Na análise da redução de área versus a temperatura, verifica-se que as temperaturas mais indicadas para a conformação do aço mola são 1100 a 1150°C, porque apresenta, percentualmente, a maior redução de área (próximo a 95% de redução em área), como indicado na Figura 4.3.

Estes ensaios indicam que quanto maiores as temperaturas utilizadas de conformação menores são os esforços necessários e maiores as reduções em áreas. Portanto, deve-se sempre objetivar estas temperaturas elevadas, sendo que as melhores estão na faixa entre 1050 a 1200°C.

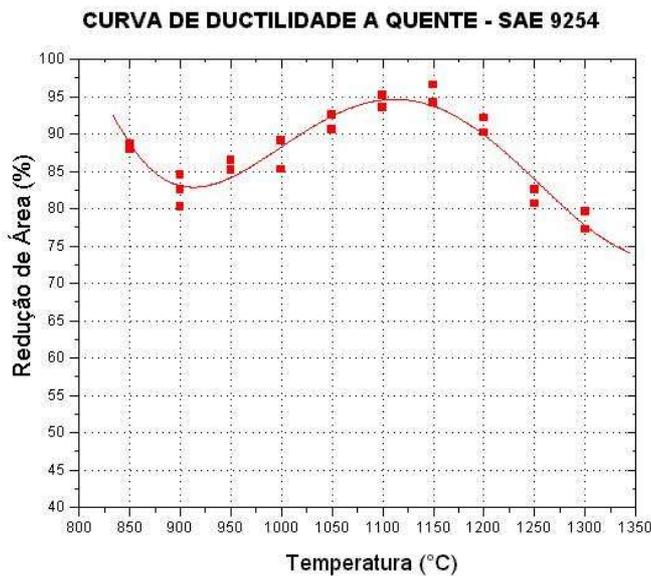


Figura 4-3 – Curva redução de área vs. temperatura, para o aço SAE 9254.

Os dados produzidos na Gleeble foram avaliados para que se pudesse otimizar a laminação do aço mola, definindo-se assim os parâmetros temperatura de reaquecimento e de laminação, bem como a taxa de resfriamento no *cooling conveyor*. O emprego dos parâmetros otimizados garante os melhores resultados quanto à homogeneidade das propriedades mecânicas do fio-máquina laminado, um nível adequado de descarbonetação e elevada qualidade superficial.

4.2 Experimento I

Os resultados avaliados no experimento I foram a dureza, a descarbonetação máxima, a descarbonetação média e a qualidade superficial, através de inspeção no *defectotherm* e *circograph*. Também foi analisado o impacto na produtividade do processo posterior, isto é, na trefilação, já que o material não foi previamente recozido, como ocorre em um fluxo normal de processamento do aço mola.

A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos valores de dureza avaliados neste experimento. Pode-se observar que a dureza não sofreu alterações quando foi variado a velocidade de resfriamento, comparação entre condição 1 e 2 ou comparação entre condição 3 e 4. Contudo, a dureza apresentou uma maior dispersão nos seus valores quando alterada a temperatura de reaquecimento, condições 1 e 2 comparadas com condições 3 e 4, como indicados pelos desvios padrão. Esta maior dispersão nos valores encontrados indica uma maior heterogeneidade entre as espiras para este experimento.

Tabela 4-1 – Resumo dos valores de dureza avaliadas no experimento I.

		Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Dureza (HB)	Média	266	275	271	276
	Desvio padrão	8,24	8,37	11,51	10,99

A Figura 4.4 apresenta o comportamento da dureza para duas ordens de produção com dois rolos laminados comparando as condições 1 e 2 (temperatura baixa de reaquecimento) com as condições 3 e 4 (temperatura alta de reaquecimento). Cada ponto indica a medida de dureza encontrada para uma amostra, onde os valores de 1 a 12 são referentes ao rolo 1 e os valores de 13 a 24 são referentes ao rolo 2 de cada condição de reaquecimento.

Experimento I

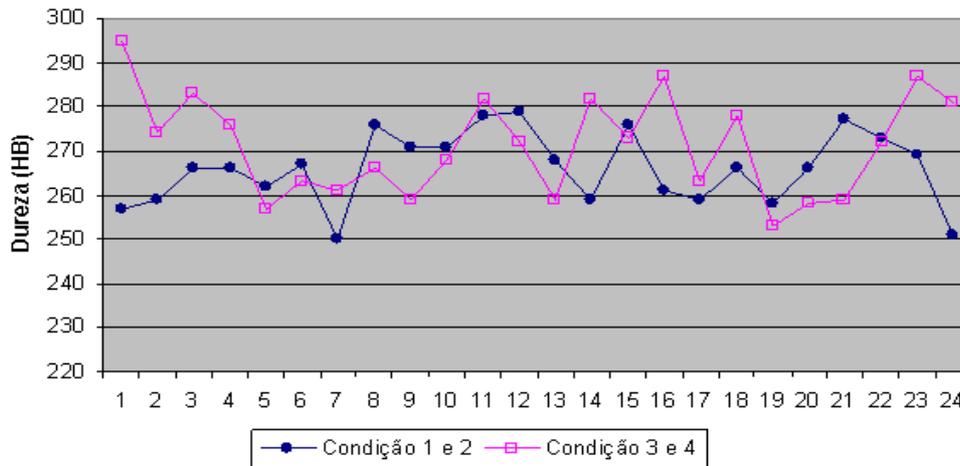


Figura 4-4 – Valores de dureza encontrados nas diferentes temperaturas de reaquecimento.

A Tabela 4.2 apresenta o resumo dos valores de descarbonetação máxima e média avaliados neste experimento. Pode-se observar que a descarbonetação máxima apresentou variação em todas as condições testadas, mas sem alterações significativas quando comparadas às velocidades de resfriamento ou às temperaturas de reaquecimento. Entretanto, a descarbonetação média apresentou um pequeno aumento quando utilizadas temperaturas de reaquecimento mais elevadas (comparação entre as condições 1 e 2 com condições 3 e 4). Já para as velocidades de resfriamento testadas no *cooling conveyor*, a descarbonetação média não apresentou variações significativas.

Tabela 4-2 – Resumo dos valores de descarbonetação avaliados no experimento I.

		Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Descarbonetação Máxima (mm)	Média	0,12	0,14	0,13	0,13
	Desvio padrão	0,013	0,017	0,019	0,012
Descarbonetação Média (mm)	Média	0,07	0,08	0,09	0,09
	Desvio padrão	0,012	0,012	0,012	0,012

A Figura 4.5 apresenta o comportamento da descarbonetação máxima e média para duas ordens de produção com dois rolos laminados comparando as condições 1 e 2 (temperatura baixa de reaquecimento) com as condições 3 e 4 (temperatura alta de reaquecimento). Cada ponto indica a medida de descarbonetação máxima e média encontrada para uma amostra, onde os valores de 1 a 12 são referentes ao rolo 1 e os valores de 13 a 24 são referentes ao rolo 2 de cada condição de reaquecimento. Para temperaturas baixas de reaquecimento, o material apresentou uma descarbonetação média de 0,076 mm de profundidade. Enquanto que para temperaturas altas de reaquecimento, o material apresentou uma descarbonetação média de 0,090 mm de profundidade.

Experimento I

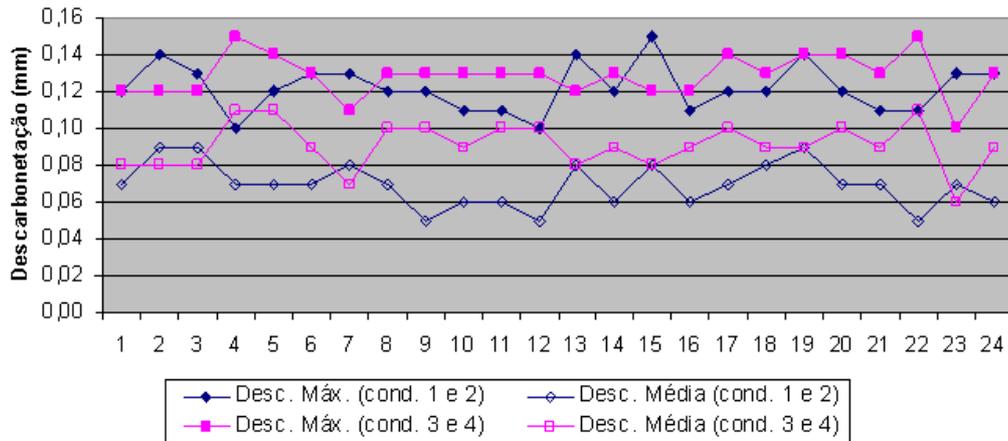


Figura 4-5 – Valores de dureza encontrados nas amostras laminadas a alta temperatura.

A qualidade superficial do material laminado foi avaliada através da inspeção a quente realizada pelo *defectotherm*, após o bloco acabador. O material laminado a baixa temperatura apresentou indicação de defeito em 75% dos rolos de fio-máquina, enquanto que para o material laminado a alta temperatura, a indicação de defeitos caiu para apenas 25% dos rolos, como demonstrado na Figura 4.6.

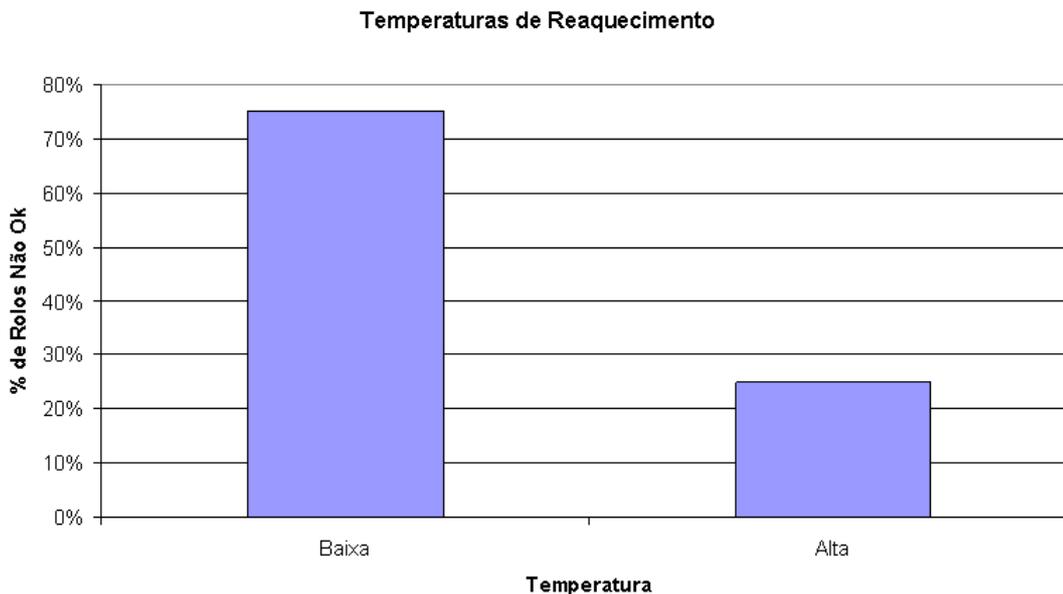


Figura 4-6 – Percentual de rolos identificados com defeitos.

Avaliando somente os dados de laminação, não se pode concluir que o material laminado atingiu as propriedades mecânicas necessárias, e por isto, estes rolos foram empregados na trefilação sem o recozimento prévio. O acompanhamento do processamento forneceu importantes informações para a definição dos próximos parâmetros a serem testados na laminação.

Os parâmetros de trefilação sofreram inúmeros ajustes, principalmente no pré-estiramento, carros de tração e plano da fieira em função do empenamento apresentado no produto final. O tempo de processamento para trefilar este material foi 6x superior ao material que é previamente recozido.

Estas dificuldades no processamento da trefila foram resultados da heterogeneidade do produto laminado, consequência do resfriamento contínuo no *cooling conveyor*.

O produto trefilado apresentou a mesma qualidade superficial que o produto laminado na inspeção realizada no *circograph*. Ou seja, o material testado na trefilação que foi laminado a baixa temperatura apresentou 75% de defeitos. Enquanto que o material que foi laminado em temperatura elevada, não apresentou nenhuma reprovação, sendo 100% aprovado e liberado para o uso.

4.3 Experimento II

Devido à necessidade de melhorar a homogeneidade dos rolos de fio-máquina, decidiu-se testar o resfriamento das extremidades dos rolos, com a utilização das caixas de resfriamento do laminador. Com o mesmo objetivo, foram incorporadas capotas adicionais de abafamento no *cooling conveyor*, para diminuir ainda mais a taxa de resfriamento.

Com o bom resultado apresentado na qualidade superficial do material laminado e a pouca variação na descarbonetação máxima e média, decidiu-se manter a temperatura de reaquecimento mais alta para este segundo experimento.

Todas as ordens testadas neste experimento apresentaram os valores de dureza e desvio padrão entre si bastante semelhantes. Porém, quando comparadas ao experimento I, apresentaram valores superiores, como pode ser evidenciado na Tabela 4.3.

Este resultado foi atribuído ao aumento da amostragem dos rolos de fio-máquina e a retirada das amostras apenas das extremidades dos rolos. A amostragem foi realizada apenas nas espiras das extremidades dos rolos, porque estas foram as que apresentaram as maiores dificuldades no processamento da trefila. Além disso, estas impõem grandes obstáculos para a estabilização do processo de laminação, quanto à utilização das caixas de resfriamento e resfriamento aplicada no *cooling conveyor*.

Tabela 4-3 – Resumo dos valores de dureza encontrados para as 4 condições laminadas.

		Condição 1	Condição 2	Condição 3	Condição 4
Dureza (HB)	Média	286	278	283	284
	Desvio padrão	9,22	10,41	9,27	9,61

Entretanto, a análise individual de cada condição, demonstrada nas figuras seguintes, indica uma grande heterogeneidade entre as amostras avaliadas. Isto também pode ser evidenciado pelos valores do desvio padrão de cada condição na Tabela 4.3.

A Figura 4.7 demonstra a grande variação dos valores de dureza encontrados no rolo para a condição 1. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 28 indicam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 29 a 52 indicam a extremidade final do rolo.



Figura 4-7 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 1.

A Figura 4.8 demonstra a grande variação dos valores de dureza encontrados no rolo para a condição 2. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 28 indicam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 29 a 52 indicam a extremidade final do rolo.



Figura 4-8 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 2.

A Figura 4.9 demonstra a grande variação dos valores de dureza encontrados no rolo para a condição 3. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 28 indicam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 29 a 52 indicam a extremidade final do rolo.



Figura 4-9 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 3.

A Figura 4.10 demonstra a grande variação dos valores de dureza encontrados no rolo para a condição 4. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 28 indicam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 29 a 52 indicam a extremidade final do rolo.



Figura 4-10 – Variação da dureza ao longo de espiras do rolo para condição 4.

Este material foi testado na trefilação, porém estas alterações não foram suficientes para que o processamento da trefila mantivesse a mesma qualidade e produtividade do material que é previamente recozido. Portanto, foi planejado um terceiro experimento.

4.4 Experimento III

A falta de sucesso dos experimentos anteriores, no sentido de garantir a homogeneização das propriedades mecânicas nos rolos, levou à necessidade de um terceiro experimento. Com base no resfriamento contínuo aplicado no *cooling conveyor*, exposto na secção 2.3.2.2, e principalmente aos “pontos quentes” demonstrados na termografia do fio-máquina na secção 3.5.2, decidiu-se alterar a forma de resfriamento no *cooling conveyor*.

A fim de homogeneizar o resfriamento em toda a extensão das espiras, decidiu-se fazer um escalonamento das velocidades de transporte aplicadas na movimentação do fio-máquina no *cooling conveyor*, ao invés de deixar estas velocidades constantes em toda sua extensão. Este escalonamento faz com que “os pontos quentes”, demonstrados na secção 3.5.2, pudessem ser alternados e, conseqüentemente minimizados, para diminuir a heterogeneidade apresentada nos experimentos anteriores. O escalonamento foi definido por incrementos percentuais constantes na velocidade de transporte dos rolos por toda a extensão do *cooling conveyor*, começando com os menores valores possíveis do equipamento.

Os valores de decarbonetação média e máxima não foram diferentes dos já apresentados nos experimentos anteriores, como demonstrado na Tabela 4.4. Entretanto, a dureza apresentou uma variação menor, como evidenciado pelos valores do desvio padrão

que ficaram em torno de 6,20 pontos. Esta menor variação apresentada pelos valores encontrados nas amostras deste experimento deixa claro que uma homogeneidade maior foi alcançada se comparada com valores dos rolos anteriormente testados. Todos os quatro rolos amostrados neste experimento apresentaram o mesmo comportamento, o que pode ser visto nas figuras seguintes.

Tabela 4-4 – Resumo dos valores de dureza e descarbonetação encontrados no experimento III.

		Rolo 1	Rolo 2	Rolo 3	Rolo 4
Dureza (HB)	Média	288	287	286	288
	Desvio padrão	6,88	5,85	6,34	5,74
Descarbonetação Média (mm)	Média	0,10	0,10	0,10	0,10
	Desvio padrão	0,011	0,010	0,010	0,011
Descarbonetação Máxima (mm)	Média	0,13	0,13	0,13	0,13
	Desvio padrão	0,013	0,013	0,013	0,013

A Figura 4.11 demonstra graficamente a menor variação dos valores de dureza encontrados no rolo neste terceiro experimento. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 8 representam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 9 a 16 representam a extremidade final do rolo.

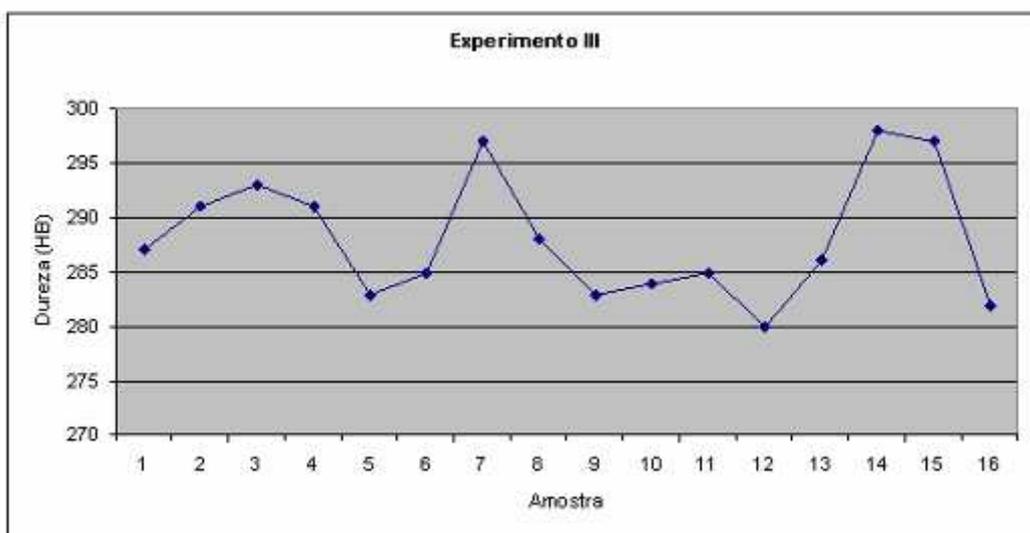


Figura 4-11 – Variação da dureza ao longo das espiras do rolo no experimento III.

A Figura 4.12 demonstra graficamente a menor variação dos valores de descarbonetação média encontrados no rolo neste terceiro experimento. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 8 representam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 9 a 16 representam a extremidade final do rolo.

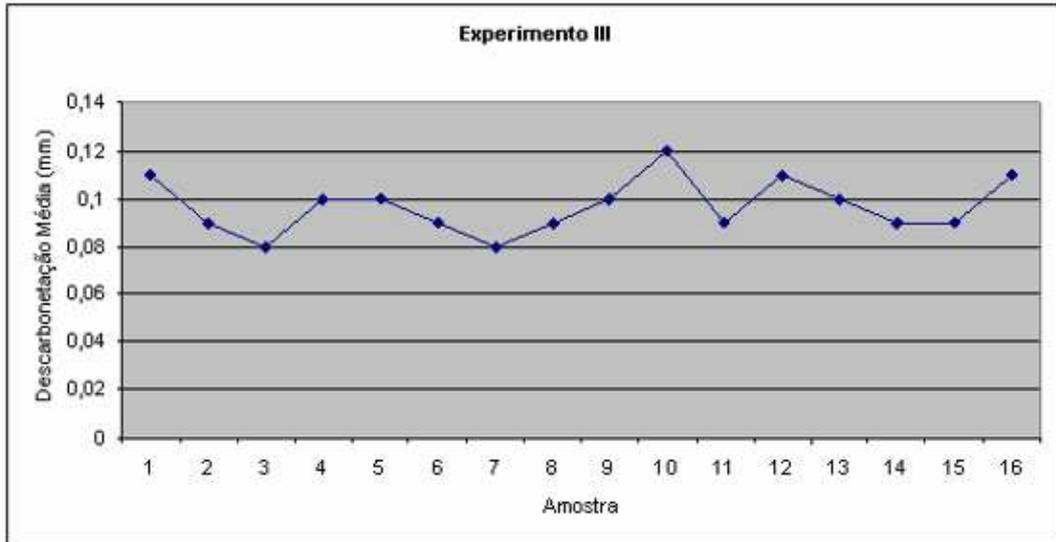


Figura 4-12 – Variação da descarbonetação média ao longo das espiras do rolo no experimento III.

A Figura 4.13 demonstra graficamente a menor variação dos valores de descarbonetação máxima encontrados no rolo neste terceiro experimento. Cada ponto do gráfico indica o valor encontrado para cada amostra, onde os valores de 1 a 8 representam a extremidade inicial do rolo, enquanto que os valores de 9 a 16 representam a extremidade final do rolo.

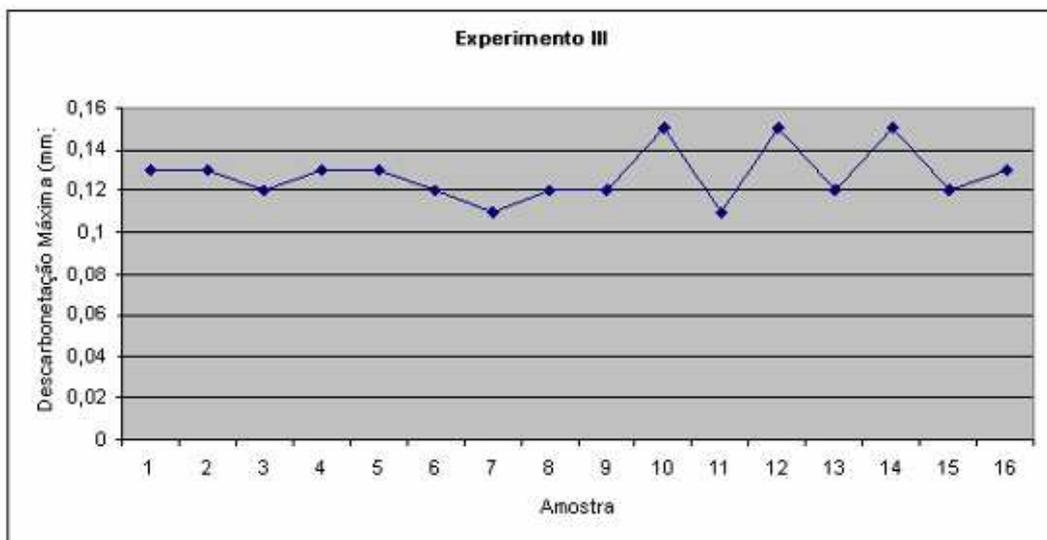


Figura 4-13 – Variação da descarbonetação máxima ao longo das espiras do rolo no experimento III.

Estes rolos foram novamente testados no processamento da trefila e apresentaram resultados bastante satisfatórios e muitos semelhantes ao material previamente recozido. Apenas alguns ajustes no pré-endireamento se fizeram necessários, o que não interferiu em nada na produtividade e desempenho da trefilação, sendo possível processar no mesmo tempo do material previamente recozido.

5 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foi discutida a influência de alguns parâmetros do processo de laminação como velocidades de resfriamento do fio-máquina no *cooling conveyor*, temperaturas de reaquecimento e resfriamento das extremidades dos rolos. Também foi comprovada a necessidade da utilização de uma metodologia racional e científica na busca por melhorias tecnológicas no ambiente de produção.

A partir dos resultados dos experimentos realizados no processo de laminação e com base na revisão bibliográfica apresentada, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

1 – Foi possível eliminar o processo de recozimento prévio à trefilação, através da otimização do resfriamento no *cooling conveyor*;

2 – O resfriamento escalonado no *cooling conveyor* garantiu a homogeneidade necessária ao processamento da trefila;

3 – As temperaturas de reaquecimento testadas não apresentaram influência significativa na dureza;

4 – As temperaturas de reaquecimento maiores apresentaram uma pequena elevação na descarbonetação média;

5 – O material que foi reaquecido a alta temperatura apresentou uma qualidade superficial muito superior ao material que foi reaquecido a baixa temperatura;

6 – A alteração das velocidades de resfriamento, sem o uso do escalonamento, não apresentou variação significativa na dureza;

7 – O resfriamento das extremidades dos rolos não melhorou a homogeneidade da dureza do material;

8 – A utilização das capotas adicionais não produziu diferença nos valores de dureza do material.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Várias perspectivas se abrem a partir deste trabalho, sendo que se propõem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Intensificar o uso do resfriamento no *cooling conveyor* para a obtenção de tratamentos térmicos no material laminado;
- Ampliar melhorias obtidas com o trabalho para outros tipos de aço;
- Determinar a influência das velocidades de resfriamento nas propriedades do material laminado;
- Verificar a influência das temperaturas de reaquecimento na conformação do material laminado quanto à presença de defeitos superficiais;
- Avaliar as diferenças microestruturais entre o resfriamento de velocidade constante e o resfriamento de velocidade escalonada no *cooling conveyor*;
- Avaliar as possíveis alterações no estado de tensões residuais do material quando aplicado o resfriamento escalonado em relação ao resfriamento constante;
- Avaliar o impacto no estado de tensões residuais no produto final trefilado quando resfriado com velocidades escalonadas no *cooling conveyor*.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 7^a. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2005.
- 2 <http://www.tkbilstein.com.br/index.php?area=tecnologia&subarea=oaco>, acessado em 20/04/2009 às 20hs.
- 3 <http://www.hoesch.com.br/index.php/produtos/br>, acessado em 20/04/2009 às 20hs.
- 4 OKA, E.; NISAWA, K.; BANNO, T.; EBIHARA, T.; KUROSU, N. **Development of Wire Rods for High-Quality Automotive Suspension Springs**, Nippon Steel Technical Report, N° 30 July 1986.
- 5 CHONÉ, J. **Molas de Aço para Suspensão Automotiva**, Relatório Interno Gerdau AEP.
- 6 GOLIS, B.; PILARCZYK, J. W.; BUDZIK, R.; WASZKIELEWICZ, W. **Quality of Spring Wires – Effect of Decarburization of a Wire Rod and Application of Pressure Dies**, em Wire Journal International.
- 7 POLUKHIN, P.; FEDOSOV, N.; KOROLYOV, A.; MATVEYEV, Y. **Rolling Mill Practice**. Peace Publishers, Moscow, Russia.
- 8 CODA, R. C. **Laminação – Produtos Longos de Aço Laminados a Quente**, Manual de Treinamento, Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS, 2004.
- 9 **Laminação e Calibração de Produtos Laminados Não Planos de Aço**, Manual de Treinamento Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2007
- 10 **Laminação**, Relatório Interno Gerdau, número 504, 2007.
- 11 THE UNITED STEEL COMPANIES LIMITED, **Elements of Rolling Practice**, Sheffield, England, 1963.
- 12 SCHAEFFER, L. **Forjamento – Introdução ao Processo**, Porto Alegre, Brasil, 2006.
- 13 **Thermoloop – Modelo de Simulación del Enfriamiento Controlado**, Relatório Interno SIDENOR, Departamento de I + D, Espanha.
- 14 ALZETTA, F.; TOSCHI, F.; GORI, L. **Latest Developments and Results in Rolling and On-line Heat-Treatment of Speciality Steels**, Arquivo Interno Gerdau AEP.
- 15 ABAD, R.; LÓPEZ, B.; RODRIGUEZ-IBABE, J.M. **Development of Direct Annealing Treatments After Hot Working in Alloyed Steels**, MS&T 2003, 45th MWSP Conference Proceedings, Vol. XLI, 2003, p. 471.
- 16 KRAUSS, G **Steels Processing, Structure, and Performance**, ASM International, Ohio, USA, 2005.
- 17 BOYER, H. E, **Cold Finished Steel Bars**, in **AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Committee on Carbon and Alloy Steel**, Metals Handbook, 9^o ed., p.215-251, 2002.

18 NEWBURY, B., NOTIS, M. The History and Evolution of Wiredrawing Techniques. JOM, p.33-37, 2004.

19 MACKENZIE. B. Drawn Sections Approach Net Shape. American Machinist, p.109-110, 1980.

20 SANTOS, C. C. Influência de parâmetros de processo no empenamento de barras trefiladas do aço SAE 9254, **Trabalho de dissertação de mestrado, UFRGS, 2008.**

21 NAKAGIRI, A., YAMANO, T., KONADA, M., ASAKAWA, M., SASAKI, W. Behavior of Residual Stress and Drawing Stress in Conical-Type Die and Circle-Type Die Drawing by FEM Simulation and Experiment. Wire Journal International, p.72-80, 2001.

22 TOTTEN, G. E. Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies Taylor & Francis Group, Florida, USA, 2007.

23 PORTER, D.A.; EASTERLING, K.E.; Phase Transformation in Metals and Alloys. Chapman & Hal, 1981

24 Tratamentos Térmicos, Relatório Interno Gerdau, número 503, 2007.

25 CALLISTER, W. D. Jr. Materials science and engineering: A Introduction, 5^o edição, 2002

26 DIETER, G. E.; Mechanical Metallurgy; Mac Graw-Hill Book Company; London, 1998.

27 GUERINO, K. B., Otimização dos Parâmetros no Cooling Conveyor – Laminação – para Obtenção de Pré-estrutura Favorável a Esferoidização no SAE 52100, Trabalho final de graduação, UFRGS, 2006.

28 MAHL, R. L., Redução da Resistência Mecânica no Aço SAE 10B30 MOD Através do Resfriamento Controlado na Laminação, Trabalho final de graduação, UFRGS, 2004.