

ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL E DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DO  
AÇO SAE 10B22 – FIO MÁQUINA VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE  
FABRICAÇÃO.**

Graduanda: Ana Lígia Souza da Costa

00138470

Professora orientadora: Liane Roldo

Porto Alegre, dezembro de 2010

## **AGRADECIMENTOS**

A Gerdau Charqueadas pela oportunidade de realização deste trabalho.

A toda minha família pelo apoio e incentivo.

Aos colegas Jair Leopoldo Janoski pelo auxílio nas análises e Eng.<sup>a</sup> Renata Santer Becker pelo apoio e discussões.

A Prof. Dra Liane Roldo pelo tempo e discussões disponibilizados para a orientação do presente trabalho.

A UFRGS pela oportunidade de cursar um curso de qualidade.

## RESUMO

A otimização de processos e a redução de custos são os dois principais fatores que sustentam a competitividade das indústrias atualmente. Por esse motivo buscou-se otimizar o processo de fabricação do aço SAE 10B22, produzido na forma de fio máquina, através da eliminação ou redução no tempo de recozimento após laminação. Para que esse objetivo fosse alcançado foi variada a taxa de resfriamento do fio máquina no transportador de espiras, no final do processo de laminação. Foram testados diferentes parâmetros como a velocidade de transporte, com e sem incremento e a temperatura de entrada do material no transportador. Para garantir a o atendimento das especificações do material foi realizado o recozimento com menor temperatura e com diferente meio de resfriamento. Os efeitos dos parâmetros alterados foram avaliados quanto a microestrutura, tamanho de grão, decarbonetação, dureza e resistência mecânica. Os resultados obtidos apontaram que é possível a otimização do processo de fabricação do aço SAE 10B22 com a diminuição da taxa de resfriamento do material no transportador de espiras, sendo possível reduzir o tempo do processo de recozimento posterior.

Palavras-chave: SAE 10B22; Taxa de Resfriamento; Transportador de Espiras; Recozimento.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama CCT do aço SAE 10B22 obtido por simulação termomecânica (Gleeble) na Gerdau Charqueadas.....	10
Figura 2 - Esquema representativo de um material sendo conformado por cilindros de laminação [5].....	11
Figura 3 - Representação esquemática da configuração do laminador da Gerdau Charqueadas. ....	12
Figura 4 - Desenho esquemático do final de um laminador de longos, onde se observa o transportador de espiras [6]. ....	13
Figura 5 - a) Formador de espiras e b) Transportador de espiras da Gerdau Charqueadas.	14
Figura 6 - Alteração da estrutura de grãos de um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica a) antes da deformação b) após deformação [4]. ....	14
Figura 7 - Representação esquemática da transformação por recristalização dinâmica nos grãos do material deformado a quente.....	15
Figura 8 - Imagem da liga Al-Fe-Mn com a ocorrência de a) recristalização convencional e b) recristalização dinâmica [7]. ....	16
Figura 9 - Relações entre dureza e o limite de resistência à tração para o aço, o latão e o ferro fundido [4]. ....	18
Figura 10 - Posição do rolo de fio máquina na qual as amostras foram retiradas. ....	21
Figura 11 - Detalhes dos locais de captura das imagens da microestrutura do experimento E1, sendo a) Aumento: 50X e b) Aumento: 500X. ....	23
Figura 12 - Detalhe do local de captura e imagem da microestrutura do experimento E2 com aumento de 50X. ....	24
Figura 13 - Detalhes dos locais de captura das imagens da microestrutura do experimento E1b, sendo a) Aumento: 50x e b) Aumento: 500x. ....	25
Figura 14 - Imagens para determinação do tamanho médio de grão austenítico pelo método planimétrico a) para o experimento E1 b) para o experimento E2 c) para o experimento E1b. ....	26

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química nominal do aço SAE 10B22. ....	19
Tabela 2 - Composição química sugerida pela literatura do aço SAE 10B22 [1]. ....	19
Tabela 3 - Especificações exigidas pelo cliente e histórico do material. ....	19
Tabela 4 - Parâmetros alterados no transportador de espiras. ....	20
Tabela 5 - Resumo dos resultados de descarbonetação para os experimentos E1, E2 e E1b. .....	27
Tabela 6 - Resumo dos resultados de dureza Brinell para os experimentos E1, E2 e E1b. .	27
Tabela 7 - Resumo dos resultados dos ensaios de tração para os experimentos E1, E2 e E1b. ....	28

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Proposta de Investigação .....	7
1.2 Objetivo Geral.....	7
1.2.1 Objetivos Específicos.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 Aços ao Boro .....	8
2.1.1 Curva de Resfriamento Contínuo - CCT (TRC).....	9
2.2 Princípios da Laminação .....	11
2.2.1 Fio Máquina.....	12
2.2.2 Laminação do Fio Máquina na Gerdau Charqueadas.....	12
2.3 Deformação a Quente.....	14
2.3.1 Recristalização Convencional .....	15
2.3.2 Recristalização Dinâmica .....	15
2.4 Métodos de Caracterização .....	16
2.4.1 Caracterização da Microestrutura.....	16
2.4.2 Dureza e Ensaio Mecânico .....	17
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 Material.....	19
3.1.1 Alteração dos Parâmetros na Fabricação do Aço SAE 10B22.....	20
3.1.2 Retirada das Amostras .....	21
3.2 Ensaio e Análises .....	21
3.2.1 Microestrutura .....	21
3.2.2 Tamanho de Grão .....	22
3.2.3 Profundidade da Camada Descarbonetada.....	22

3.2.4 Dureza.....	22
3.2.5 Ensaio de Tração .....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	23
4.1 Microestrutura.....	23
4.2 Tamanho de Grão.....	26
4.3 Profundidade da Camada Descarbonetada .....	27
4.4 Dureza .....	27
4.5 Ensaio de Tração.....	28
5 CONCLUSÃO .....	30
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	31
7. REFERÊNCIAS.....	32

## **1 INTRODUÇÃO**

Durante a produção do aço são definidos parâmetros de processo para garantir a especificação do produto final, adequando as exigências do cliente e as condições de processamento. Alguns desses parâmetros do processo podem ser analisados e ter suas características estudadas a fim de eliminar, substituir ou otimizar etapas de fabricação, resultando em maior produtividade, menor custo e melhor utilização dos equipamentos, desde é claro que a especificação final seja respeitada ou melhorada.

O material utilizado neste trabalho é um aço ao boro, SAE 10B22, produzido na Gerdau Charqueadas na forma de fio máquina. Após o processo padrão de laminação o material é submetido ao tratamento térmico de recozimento para que sejam atingidas as especificações do cliente. Após o recebimento do material pelo cliente, este é conformado por trefilação sendo, então, muito importante propriedades adequadas de dureza e resistência mecânica.

Uma destas etapas que pode ser otimizada é a etapa de resfriamento após a conformação do material na laminação, visando eliminar ou reduzir o tempo do tratamento térmico para recozimento. Após o bobinamento do material este é transportado por um transportador de espiras, local no qual vários parâmetros como velocidade de transporte das espiras, temperatura de entrada no transportador e a possibilidade de abafamento das espiras podem ser alterados e seus efeitos nas propriedades finais do material identificados.

### **1.1 Proposta de Investigação**

É economicamente viável alterar parâmetros no processo de fabricação na produção do aço SAE 10B22?

### **1.2 Objetivo Geral**

Alterar parâmetros de laminação de modo a otimizar o processo de fabricação do aço em questão.

#### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Analisar as propriedades mecânicas e microestrutura do aço SAE 10B22 no transportador de espiras do laminador testando diferentes parâmetros de resfriamento como a velocidade de transporte das espiras, a temperatura de entrada e a possibilidade de



abafamento das espiras no transportador, a fim de reduzir o tempo ou eliminar o processamento térmico de recozimento pleno.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços ao Boro

Aços ao boro são largamente utilizados na fabricação de parafusos de alta resistência. A presença de pequenos teores de boro em aços com 0,20 a 0,40% de carbono permite obter uma temperabilidade média ideal para obtenção dos valores necessários de dureza e resistência após têmpera, principalmente em parafusos de pequenas seções [1].

O boro é adicionado aos aços em pequenas quantidades (ppm) para aumentar a sua temperabilidade, evitando a nucleação da ferrita através da sua segregação nos contornos de grão da austenita. Embora exista uma certa discussão quanto ao teor ideal de boro sobre a efetividade na temperabilidade, pode-se dizer que este valor está entre 10 e 30 ppm, sendo o teor ótimo entre 15 e 20 ppm [1].

O principal efeito do boro na temperabilidade é o de erguer uma barreira de energia para nucleação da ferrita no contorno de grão da austenita. O boro segrega-se para o contorno de grão da austenita, formando facilmente uma relação de coerência com os grãos, onde reduz a energia de contorno que irá, por sua vez, suprimir a nucleação de ferrita nesses sítios. Essa nucleação é inibida ou pela presença de átomos de boro livre no contorno de grão da austenita ou por precipitados de borocarbonetos  $Fe_{23}(BC)_6$ , o qual é dissolvido para temperaturas de austenitização acima de 1000°C. O boro é claramente rejeitado a partir do crescimento da fase ferrítica, indicando que a solubilidade do boro na ferrita é menor do que na austenita. No caso de se formarem borocarbonetos grandes, devido a presença de boro em excesso, desaparece a coerência com a matriz anulando o efeito de temperabilidade pelo mecanismo exposto [2].

A presença de precipitados de boro na forma de óxido ( $Fe_3BO_6$ ), nitreto (BN) ou borocarbonetos ( $Fe_3(BC)$  ou  $M_{23}(BC)_6$ , sendo  $M = Fe, Cr, Ti, Mn, etc$ ) é inconveniente porque, além de removerem o boro elementar do contorno de grão, os próprios precipitados atuam como sítios de nucleação da ferrita [1].

Durante a fabricação de aços ao boro uma adequada desoxidação através da adição de Si e Al é requerida, enquanto que Nb ou Ti devem ser adicionados para evitar a formação de nitretos de boro. Uma vez que o teor de boro é muito baixo comparado com aqueles de Si, Al e Ti, pode-se assumir que não haverá a formação de óxidos de boro [1]

Resultados de ensaios mecânicos para um aço 1020 com teores de boro, na condição de laminado à quente, demonstraram que as propriedades mecânicas praticamente não se alteraram, com exceção do limite de escoamento, que diminuiu cerca de 4% em relação ao aço sem boro. Sugeriu-se que esse fenômeno deve-se à combinação do boro com intersticiais presentes no aço, principalmente o nitrogênio, favorecendo assim a liberação de discordâncias. A diminuição do limite de escoamento, juntamente com a não alteração significativa das outras propriedades, sugere usos específicos para esses aços devido a sua maior fase plástica, como por exemplo, para peças que necessitam de conformação a frio [1].

### **2.1.1 Curva de Resfriamento Contínuo - CCT (TRC)**

Os diagramas TTT e TRC definem a cinética das transformações de fases e fornecem base para determinar o tratamento térmico mais adequado para se obter a microestrutura e propriedades desejadas, sendo então usados para investigar ciclos de tratamentos térmicos contínuos [3].

As propriedades tanto mecânicas quanto de outra natureza dependem das suas microestruturas, as quais com frequência são produzidas como resultado de transformações de fases. Com as transformações de fases, normalmente se forma pelo menos uma nova fase, a qual possui características físicas/químicas diferentes e/ou uma estrutura diferente daquela da fase que a originou. Além disso, a maioria das transformações de fases não ocorre instantaneamente. Ao contrário, elas começam pela formação de numerosas pequenas partículas da nova fase, as quais aumentam em tamanho até que a transformação tenha sido concluída [4].

Os principais fatores que influenciam a posição dessas curvas são: a composição química (em geral, aumentado-se o teor dos elementos de liga, atrasa-se o início das transformações) e o tamanho de grão (aumentando-se o tamanho do grão atrasa-se o começo e o fim da transformação) [1].

A Figura 1 apresenta a curva CCT para o aço SAE 10B22 obtido por simulação termomecânica (Gleeble) na Gerdau Charqueadas.

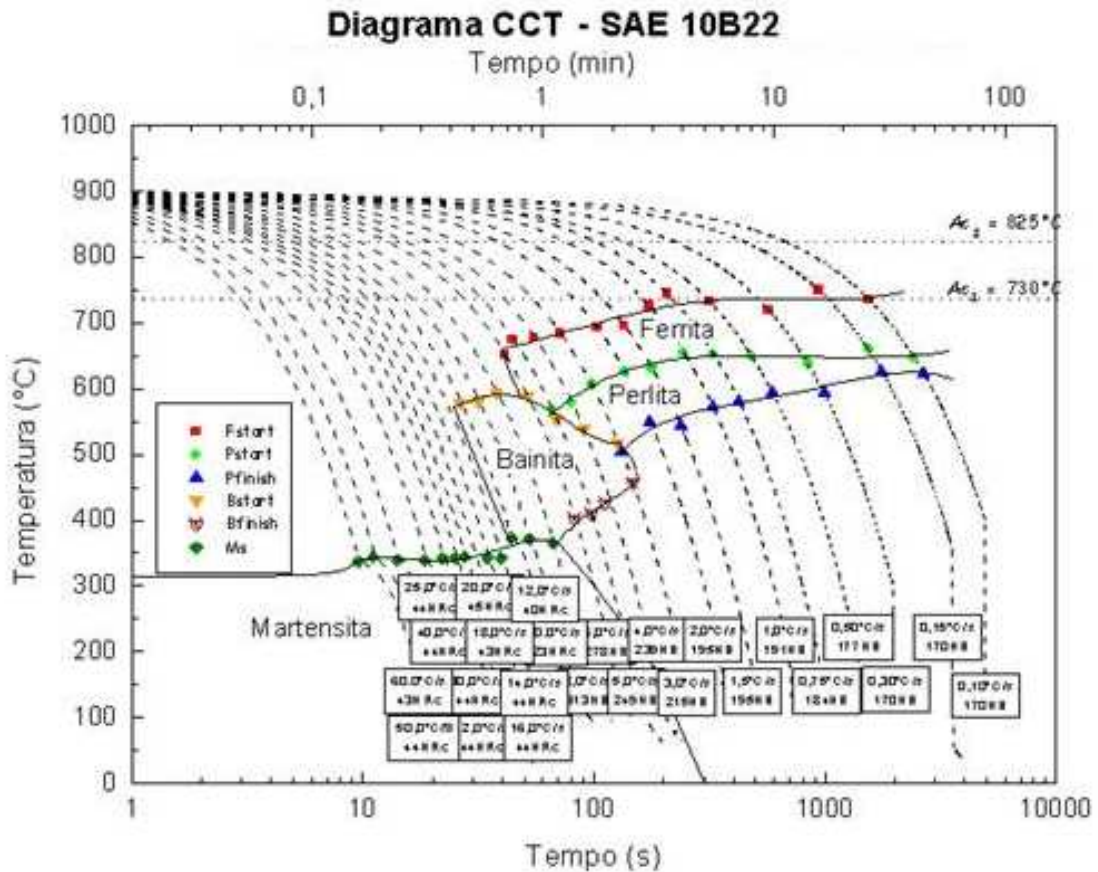


Figura 1 - Diagrama CCT do aço SAE 10B22 obtido por simulação termomecânica (Gleeble) na Gerdau Charqueadas.

A curva CCT apresentada na Figura 1 mostra as temperaturas de transformações de fases conforme a taxa de resfriamento. Segundo a curva, pode-se facilmente formar martensita com taxas de resfriamento de 15 a 40°C/s, demonstrando a boa temperabilidade do aço ao boro. A curva também mostra que para taxas de resfriamento menores que 2°C/s pode-se obter microestrutura composta apenas por perlita e ferrita, sendo o início dessa transformação a cerca de 730°C.

## 2.2 Princípios da Laminação

Quase todo o aço produzido possui suas propriedades dimensionais e metalúrgicas atreladas aos processos ocorridos na laminação. As propriedades dimensionais são garantidas através da conformação realizada nos laminadores, já as propriedades mecânico-metalúrgicas são garantidas através do controle de parâmetros de processo empregados nos laminadores, como temperaturas de reaquecimento, temperaturas de laminação e controle do resfriamento [5].

Na laminação, o material a ser conformado é introduzido entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, sofrendo deformação durante sua passagem. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática simples.

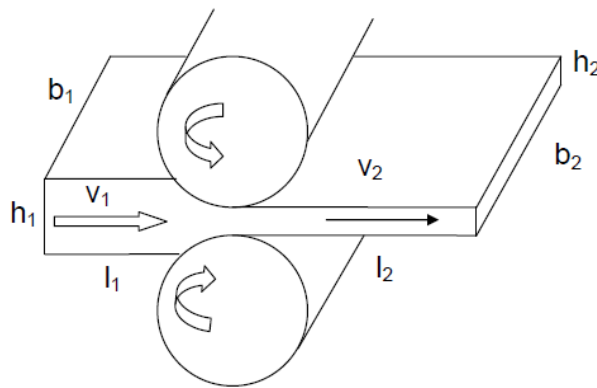


Figura 2 - Esquema representativo de um material sendo conformado por cilindros de laminação [5].

A conformação consiste na redução da altura  $h_1$ , com conseqüente alargamento ( $b_2 > b_1$ ) e alongamento ( $l_2 > l_1$ ), e aumento da velocidade do material, respeitando a lei da conservação das massas.

A laminação é um processo de conformação mecânica que pode ser a quente ou a frio. A laminação a quente, com temperatura em torno de  $1200^{\circ}\text{C}$ , é executada, para grandes deformações, por compressão direta, resultando em alterações permanentes de forma e de algumas propriedades devido a deformações plásticas. A laminação a frio é empregada quando se quer obter pequenas deformações, geralmente para operações de acabamentos, pois confere superfícies regulares.

A última etapa do processo de laminação é o resfriamento. No resfriamento o material sofre as últimas modificações possíveis em sua microestrutura e propriedades. O objetivo é controlar as temperaturas de entrada e saída, bem como a taxa de resfriamento.

Pode-se aplicar diferentes tipos de resfriamento, como simples ao ar, ar forçado ou abafamento do material. A definição do tipo de resfriamento irá permitir o controle da taxa de resfriamento, podendo ser alta, como é o caso do 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 as propriedades e especificações finais que se desejam alcançar [5]. Dentre os produtos obtidos pelo processo de laminação pode-se destacar a produção de barras, perfis, chapas, tubos e fio máquina, sendo o fio máquina o objeto de estudo deste trabalho.

### 2.2.1 Fio Máquina

O Fio máquina é o resultado de um processo de conformação mecânica de laminação pelo qual se transforma tarugos em produto na forma de fio. É um processo realizado a altas temperaturas, onde tarugos de aço previamente aquecidos são conformados pela passagem por cilindros laminadores. O fio máquina é o material de partida de uma série de produtos utilizados no dia-a-dia tais como barras para construção mecânica, arames, pregos e parafusos [6].

### 2.2.2 Laminação do Fio Máquina na Gerdau Charqueadas

Na Gerdau Charqueadas a laminação do Fio Máquina é realizado em um laminador que possui uma configuração combinada entre um arranjo aberto e um arranjo contínuo. A Figura 3 mostra uma representação esquemática da configuração do laminador.



Figura 3 - Representação esquemática da configuração do laminador da Gerdau Charqueadas.

O desbaste é realizado por uma gaiola TRIO que possui um arranjo aberto. A conformação intermediária e final possui a disposição de um arranjo contínuo. O trem intermediário possui gaiolas horizontais e verticais itercaladas, enquanto que o trem acabador possui a configuração em “V” das gaiolas.

Na Figura 4 é apresentado um desenho esquemático do final do laminador.

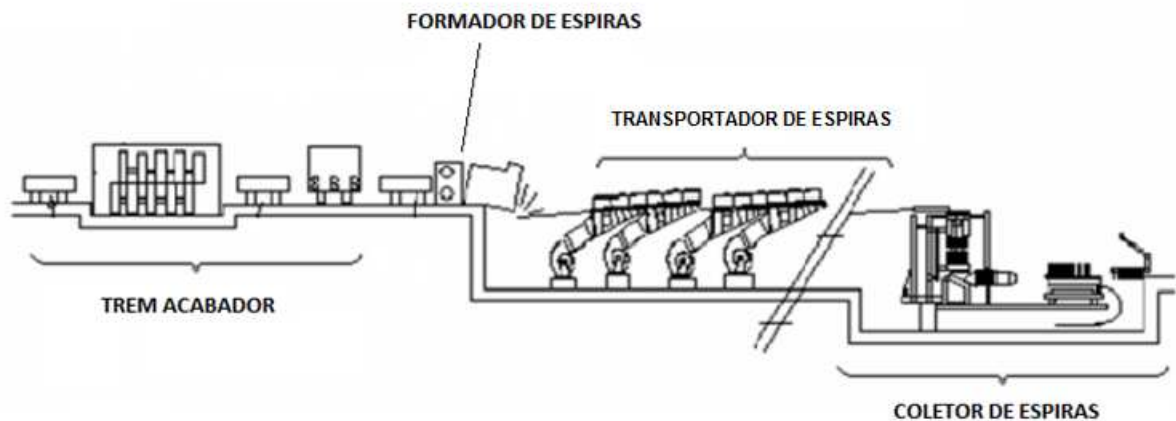


Figura 4 - Desenho esquemático do final de um laminador de longos, onde se observa o transportador de espiras [6].

Após os últimos passes de conformação da laminação, existe a zona de equalização, composta por caixas de resfriamento, onde o material alcança uma homogeneização da temperatura. Na seqüência o material passa pelo formador de espiras, etapa na qual o material passará a ter o formato do fio-máquina laminado. A última etapa do processo de laminação é o resfriamento do material, que acontece no transportador de espiras. O transportador possui comprimento de 49 metros, divididos em 11 segmentos. O sistema de controle do resfriamento é equipado com capotas refratárias e ventiladores, podendo ser ajustados de acordo com a qualidade produzida [5,6].

Na Figura 5(a) se observa as bobinas saindo do formador de espiras e a Figura 5(b) mostra o material no transportador de espiras.

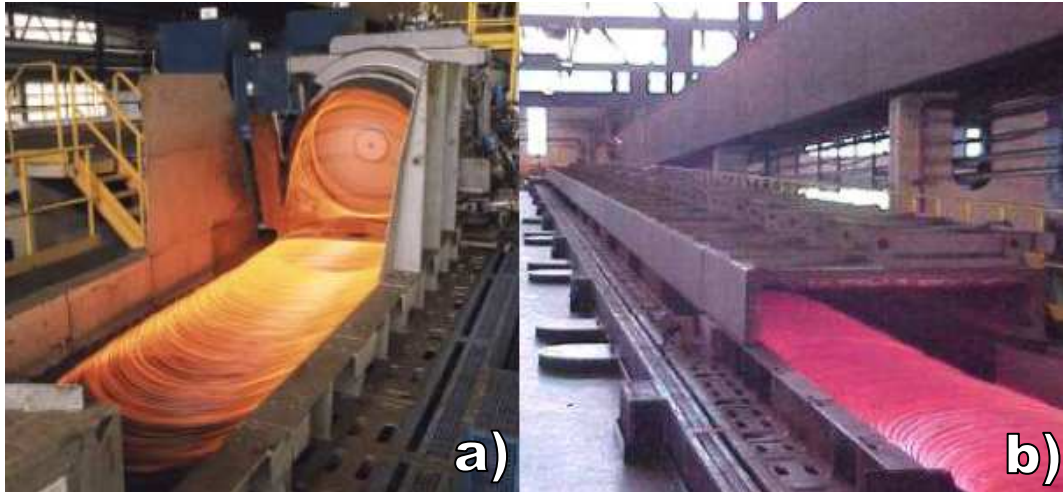


Figura 5 - a) Formador de espiras e b) Transportador de espiras da Gerdau Charqueadas.

### 2.3 Deformação a Quente

A deformação plástica dos materiais é produzida pelo movimento de discordâncias, fenômeno conhecido como escorregamento. Para os metais, devido às orientações cristalográficas aleatórias do grande número de grãos, a direção do escorregamento varia de um grão para o outro, ocorrendo ao longo do sistema que possui a orientação mais favorável [4].

Durante a deformação, a integridade mecânica e a coesão são mantidas ao longo dos contornos dos grãos, isto é, os contornos dos grãos geralmente não se rompem ou se abrem. Como consequência, cada grão individual está restrito, em determinado grau, à forma que ele pode assumir devido aos seus grãos vizinhos. A maneira segundo a qual os grãos se distorcem como resultado de uma deformação plástica generalizada está indicada na Figura 6 [4].

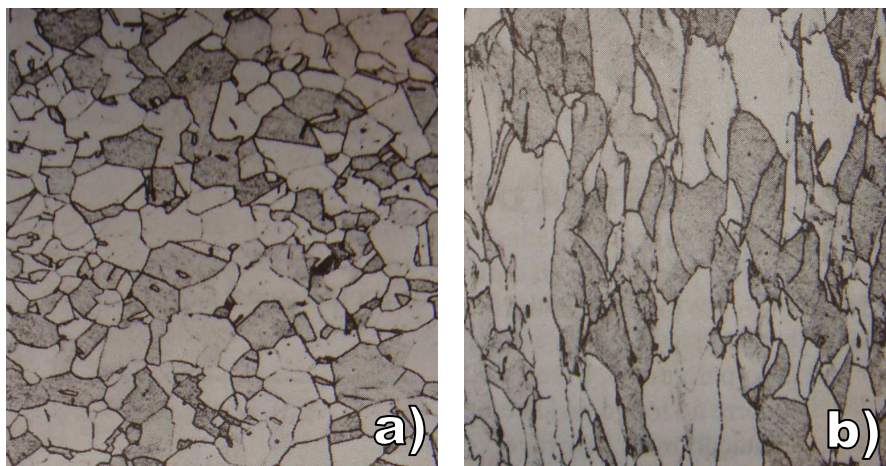


Figura 6 - Alteração da estrutura de grãos de um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica a) antes da deformação b) após deformação [4].

Antes da deformação, os grãos são equiaxiais, enquanto que para o material deformado os grãos se tornam alongados ao longo da direção na qual houve a deformação. Para estes casos ocorre a recristalização convencional e, mais comumente, a recristalização dinâmica.

### 2.3.1 Recristalização Convencional

A recristalização convencional ocorre durante o processo de recozimento pleno, com resfriamento controlado, geralmente dentro do forno. É o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que são equiaxiais, com baixas densidades de discordâncias e característicos das condições que existem antes do processo de deformação. A força motriz para produzir essa nova estrutura grão é a diferença entre as energias interna do material submetido a deformação e do material sem deformação. Os novos grãos se formam como núcleos muito pequenos e crescem até que consumam por completo o seu material de origem.

Além disso, durante a recristalização, as propriedades mecânicas que foram alteradas como resultado da deformação são restauradas aos seus valores pré-existent, fazendo com que o material se torne mais mole e menos resistente, porém mais dúctil [4].

### 2.3.2 Recristalização Dinâmica

Para processos em que há deformação acima da temperatura de recristalização, devido ao grau de deformação, pode-se observar a recristalização dinâmica, onde há os processos de recuperação e recristalização ocorrendo logo após, ou até mesmo durante a deformação. A força motriz para estes processos é a diminuição da energia livre do sistema, sendo necessária uma deformação mínima para que eles ocorram. A Figura 7 apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno de recristalização dinâmica logo após a deformação [7].

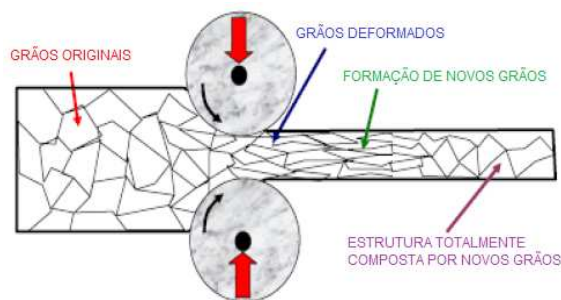


Figura 7 - Representação esquemática da transformação por recristalização dinâmica nos grãos do material deformado a quente.



A recristalização dinâmica leva à formação de novos grãos livres de deformação, diminuindo a tensão necessária para deformação e permitindo que o material continue a ser deformado sem fraturar, influenciando também no tamanho de grão final e na textura observada no material [7].

A quantidade de deformação sofrida pelo material e o tamanho de grão são fatores determinantes para o fenômeno de recristalização dinâmica. A Figura 8 apresenta duas imagens mostrando o efeito desses parâmetros na ocorrência do fenômeno.

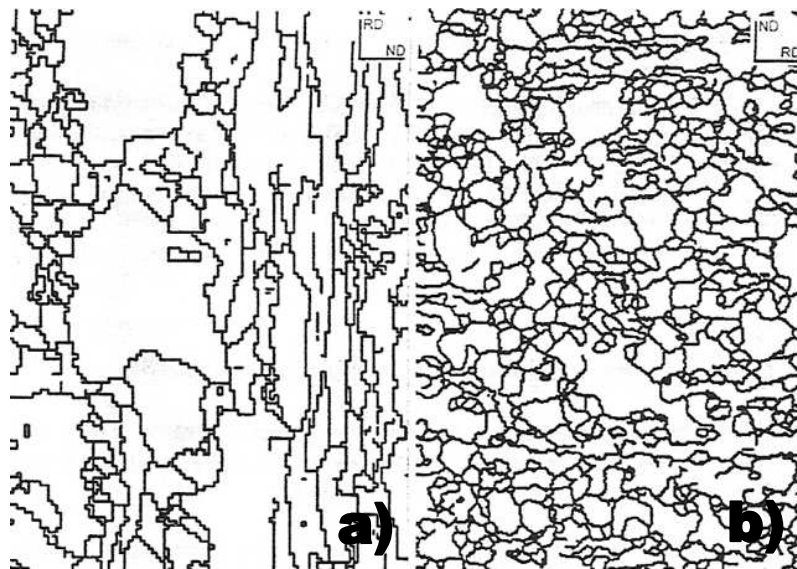


Figura 8 - Imagem da liga Al-Fe-Mn com a ocorrência de a) recristalização convencional e b) recristalização dinâmica [7].

Para que a recristalização dinâmica ocorra o material deve ter um pequeno tamanho de grão e ter sofrido uma deformação razoável. Para a Figura 8(a) não houve deformação suficiente para que ocorresse a recristalização dinâmica, sendo necessário realizar um processo de recristalização convencional. O fenômeno também é favorecido pelas baixas taxas de resfriamento após deformação [7].

## 2.4 Métodos de Caracterização

### 2.4.1 Caracterização da Microestrutura

A análise microestrutural do aço é de extrema importância, uma vez que a estrutura é dependente do processo de fabricação e determina as propriedades do material. Essa análise é realizada a partir de técnicas metalográficas, permitindo esclarecimentos sobre o

processo de fabricação a que foi submetido o material e prever seu comportamento sob o ponto de vista de algumas de suas propriedades.

Com a caracterização da microestrutura pode-se obter informações das fases presentes no material, tamanho de grão, profundidade da camada descarbonetada, entre outras.

O tamanho de grão é determinante nas propriedades mecânicas do material. Um grão refinado garante uma dureza elevada e maior resistência à tração, enquanto uma granulometria grosseira gera baixa resistência mecânica. Essas mudanças de propriedades mecânicas ocorrem porque grãos grandes possuem maior área total de contornos de grão para dificultar o movimento das discordâncias [5]. Um método comumente usado para determinação do tamanho médio de grão é o Método Planimétrico ASTM E112. Nesse processo é efetuada a contagem do número de grãos existentes em uma área de uma micrografia ou de uma projeção com uma determinada ampliação.

Para os aços a espessura da camada descarbonetada é importante, sendo 0,14mm a máxima espessura aceita para o aço 10B22. Como a descarbonetação é a perda de carbono da superfície de um aço devido ao aquecimento em atmosfera oxidante, a descarbonetação excessiva pode resultar em produtos defeituosos por ocasionar a perda de resistência e ductilidade, desenvolvendo fissuras que tornam o material vulnerável à ruptura. Para medir a profundidade da camada descarbonetada as amostras são atacadas e analisadas ao microscópio com um aumento de 100X e o auxílio de uma escala milimétrica.

#### **2.4.2 Dureza e Ensaio Mecânicos**

Dureza consiste em uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, quanto mais macio for o material, maior e mais profunda será a penetração. Nos ensaios de dureza Brinell um penetrador esférico e duro é forçado contra a superfície do material a ser testado. O número índice de dureza Brinell, HB, é uma função tanto da magnitude da carga aplicada como do diâmetro da impressão resultante.

Em um ensaio de tração, um corpo de prova é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura. O corpo de prova deve ter formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, a qual gera a curva tensão x deformação e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material. A partir do ensaio de tração pode-se

obter dados como a resistência à tração, tensão de escoamento, redução de área e alongamento.

A tensão de escoamento para um metal representa a medida de sua resistência à deformação plástica, ou seja, quando o comportamento do material passa do regime elástico para o plástico. Resistência à tração é a tensão máxima que pode ser suportada pelo material sob tração e a redução de área e o alongamento expressam quantitativamente a ductilidade do material [5].

Outras propriedades mecânicas podem ser estimadas a partir dos dados obtidos para os ensaios de dureza, tais como o limite de resistência à tração, conforme apresentado na Figura 9 [4].

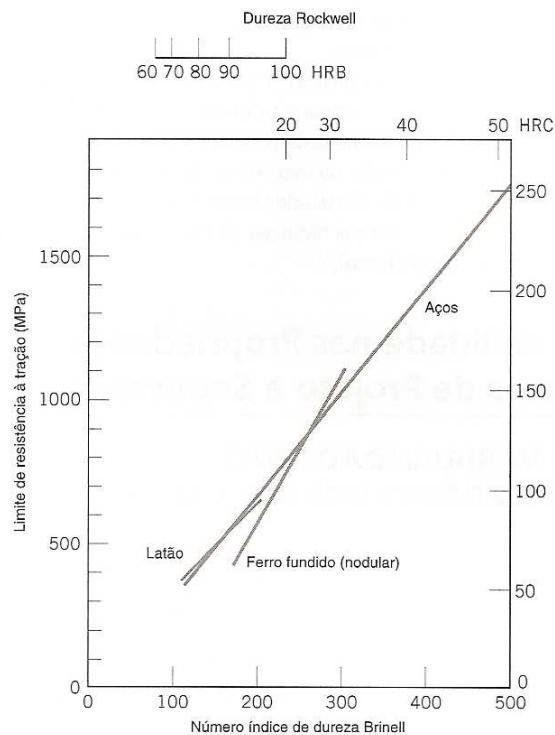


Figura 9 - Relações entre dureza e o limite de resistência à tração para o aço, o latão e o ferro fundido [4].

A Figura 9 mostra, a partir de valores obtidos de dureza, correlação com valores de limite de resistência, podendo-se estimar estes valores sem a realização de um ensaio de tração.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Material

O estudo foi realizado no fio máquina - aço SAE 10B22 na bitola 7,94 mm produzido na Gerdau Charqueadas. A Tabela 1 apresenta a composição química nominal para o aço SAE 10B22 e a Tabela 2 apresenta uma composição química sugerida pela literatura para este aço.

Tabela 1 - Composição química nominal do aço SAE 10B22.

	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>B</i>
<b>10B22</b>	0,18 - 0,23	0,70 - 1,00	máx 0,030	máx 0,050	0,0005 - 0,003

Tabela 2 - Composição química sugerida pela literatura do aço SAE 10B22 [1].

	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>B</i>	<i>N</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
<b>10B22</b>	0,21	1,12	0,23	0,03	0,013	0,12	0,003	0,0047	0,043	0,16	0,02

Originalmente o material é laminado e depois encaminhando para o recozimento a fim de atingir as especificações exigidas pelo cliente. A Tabela 3 apresenta as medidas de Dureza, Resistência a Tração (RT), Descarbonetação e Tamanho de Grão (TG) exigidas pelo cliente, além de resultados históricos de Limite de escoamento (LE), Redução de Área (RA) e Alongamento (A) desse material após recozimento.

Tabela 3 - Especificações exigidas pelo cliente e histórico do material.

	<i>Dureza</i> <i>(HB)</i>	<i>RT</i> <i>(MPa)</i>	<i>LE</i> <i>(MPa)</i>	<i>RA</i> <i>(%)</i>	<i>A</i> <i>(%)</i>	<i>Descarb</i> <i>(mm)</i>	<i>TG</i>
<b>Especificação</b>	máx 156	máx 530	-	-	-	0,14	5 a 8
<b>Histórico (média)</b>	141	496	302	64	33	0,04	8

### 3.1.1 Alteração dos Parâmetros na Fabricação do Aço SAE 10B22

O aço SAE 10B22 foi laminado conforme padrões da Gerdau Charqueadas, sendo alterados apenas alguns parâmetros no transportador de espiras, onde inicia o resfriamento do material, conforme apresentado na Tabela 4. Foram realizados dois experimentos, os quais foram chamados de E1 e E2.

Tabela 4 - Parâmetros alterados no transportador de espiras.

<b>Amostras</b>	<b>LAMINAÇÃO</b>				
	<b>T de entrada</b>	<b>Nº de coolers</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Incremento da Velocidade</b>	<b>Taxa de Resfriamento</b>
<b>Padrão</b>	840 a 860°C	6	4m/min	-	60°C/min
<b>E1</b>	780°C	4	3 m/min	5%	30°C/min
<b>E2</b>	780°C	4	3 m/min	-	27,8°C/min
<b>E1b</b>	780°C	4	3 m/min	5%	30°C/min
<b>Amostras</b>	<b>TRATAMENTO TÉRMICO</b>				
	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo de encharque</b>	<b>Meio de resfriamento</b>		
<b>Padrão</b>	720 a 730°C	3h	Forno		
<b>E1b</b>	710°C	3h	Ar		

Com base na curva de resfriamento contínuo apresentada na Figura 1, a temperatura de entrada do material no transportador foi reduzida, para todos os experimentos, garantindo que a transformação da austenita ocorra inteiramente dentro do equipamento. Foi reduzida a quantidade de coolers e a velocidade de transporte das espiras, diminuindo a taxa de resfriamento.

O experimento E1 foi realizado com incremento de 5% da velocidade em 8 dos 11 segmentos do transportador de espiras, enquanto que no experimento E2 não houve incremento de velocidade. Os incrementos de velocidade são responsáveis por um maior espaçamento entre as espiras do rolo, causando um pequeno aumento na taxa de resfriamento.

Após as análises dos resultados obtidos para os experimentos E1 e E2 estudou-se a necessidade da etapa posterior de recozimento. A fim de otimizar o processo de tratamento térmico, o experimento E1 foi encaminhado para o recozimento, passando então a se

chamar E1b. O ciclo do tratamento térmico, também apresentado na Tabela 4, foi alterado com o objetivo de diminuir o tempo de tratamento e melhorar a produtividade do forno.

### 3.1.2 Retirada das Amostras

Para garantir a homogeneidade dos resultados foram retiradas 4 amostras de 3 espiras diferentes do meio do rolo, conforme a Figura 10, totalizando 12 amostras por experimento. As amostras foram então encaminhadas e preparadas para os ensaios de tração, dureza, tamanho de grão, descarbonetação e microestrutura.

Para os experimentos E1 e E2 as amostras foram retiradas após o transportador de espiras e para o experimento E1b as amostras foram retiradas após o tratamento térmico de recozimento.

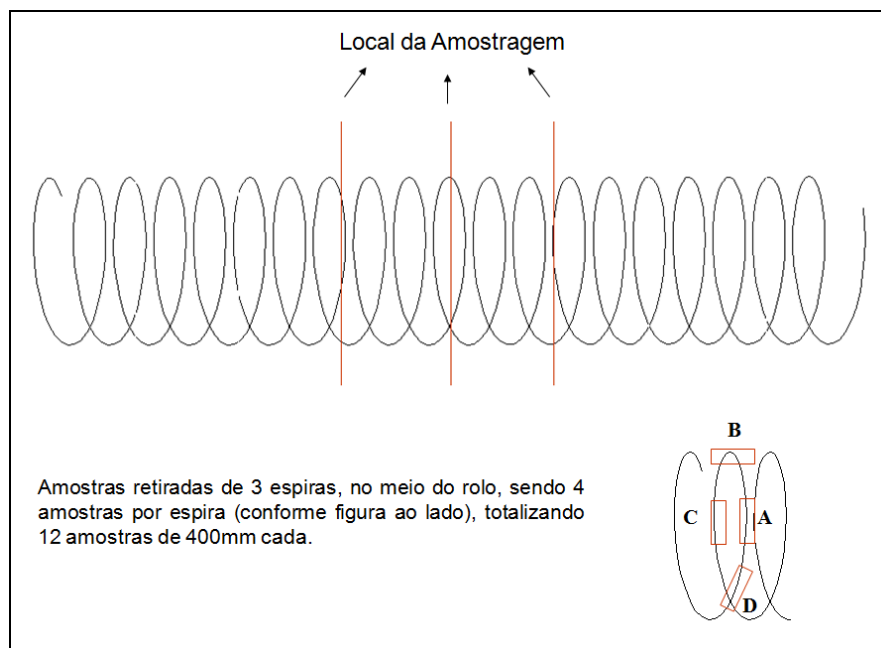


Figura 10 - Posição do rolo de fio máquina na qual as amostras foram retiradas.

## 3.2 Ensaios e Análises

### 3.2.1 Microestrututa

As amostras foram embutidas e preparas com lixamento e polimento em pasta de diamante com granulometria de  $1\mu\text{m}$ , sendo em seguida atacadas com Nital 2% para

análise da microestrutura. As amostras foram analisadas em Microscópio Óptico Olympus BX60.

### **3.2.2 Tamanho de Grão**

Para determinação do tamanho de grão austenítico as amostras foram tratadas termicamente em um forno a 925°C. As amostras foram lixadas, polidas e atacadas com ácido crômico. Foi utilizado o método planimétrico e classificado segundo a norma ASTM E112.

### **3.2.3 Profundidade da Camada Descarboxetada**

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

As amostras foram analisadas em Microscópio Óptico Olympus BX60, onde se mede a profundidade da camada externa descarboxetada.

### **3.2.4 Dureza**

Foi realizada medida de dureza Brinell a meio raio em todas as amostras com o Durômetro Wolpert DIA Testor 2N, com carga de 187,5Kg e indentador esférico de 2,5mm de diâmetro.

### **3.2.5 Ensaio de Tração**

Os ensaios de resistência mecânica foram feitos na máquina Instron 4493. Foram analisadas média de resistência a tração, limite de escoamento, redução de área e alongamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Microestrutura

A Figura 11 apresenta as imagens da microestrutura obtida para o experimento E1.

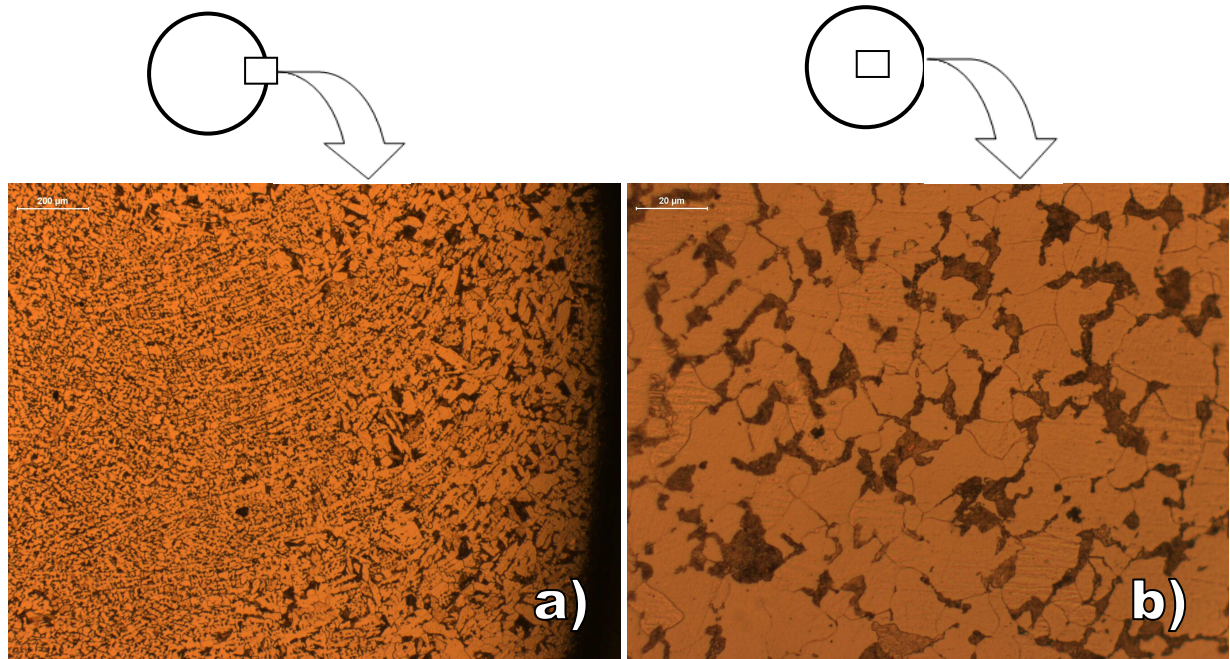


Figura 11 - Detalhes dos locais de captura das imagens da microestrutura do experimento E1, sendo a) Aumento: 50X e b) Aumento: 500X.

As imagens obtidas para o experimento E1 apresentam uma microestrutura composta por perlita e ferrita. Observando a Figura 11(a) pode-se perceber que em direção ao centro a microestrutura se apresenta mais homogênea, enquanto que próximo à superfície apresentou ferrita acicular, provavelmente por sofrer uma taxa de resfriamento um pouco mais elevada nessa região do material. Devido ao grande grau de redução sofrido pelo material e com a comparação da Figura 11(a) com a Figura 8, pode-se sugerir a ocorrência de recristalização dinâmica no centro do material, devido a menor taxa de resfriamento.



Com o aumento de 500x da imagem apresentada na Figura 11(b), pode-se observar que as colônias de perlita se apresentam compactas, na forma de lamelas.

A Figura 12 apresenta imagem da microestrutura obtida para o experimento E2.

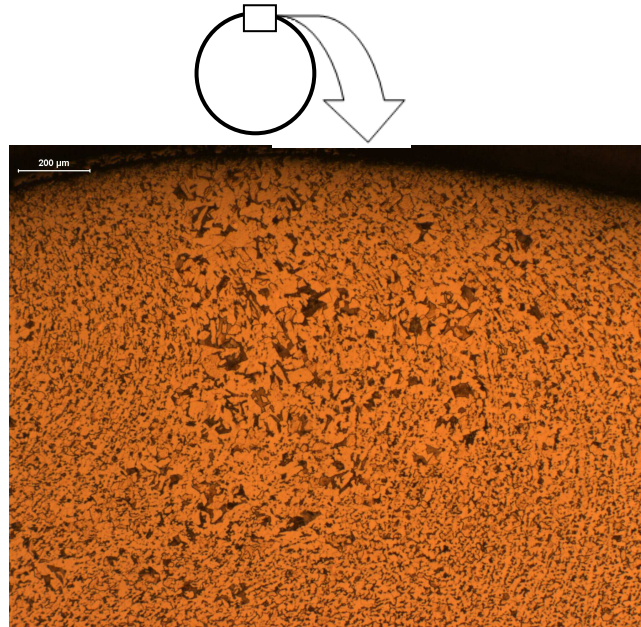


Figura 12 - Detalhe do local de captura e imagem da microestrutura do experimento E2 com aumento de 50X.

A imagem apresentada para o experimento E2 (Figura 12) também apresentou ferrita e perlita. Assim como no experimento E1, E2 também apresentou ferrita acicular em regiões próximas à superfície, porém em menor quantidade, provavelmente devido a menor taxa de resfriamento que o material foi submetido. Para este experimento também pode-se sugerir a ocorrência de recristalização dinâmica.

A Figura 13 apresenta imagem da microestrutura obtida para o experimento E1b.

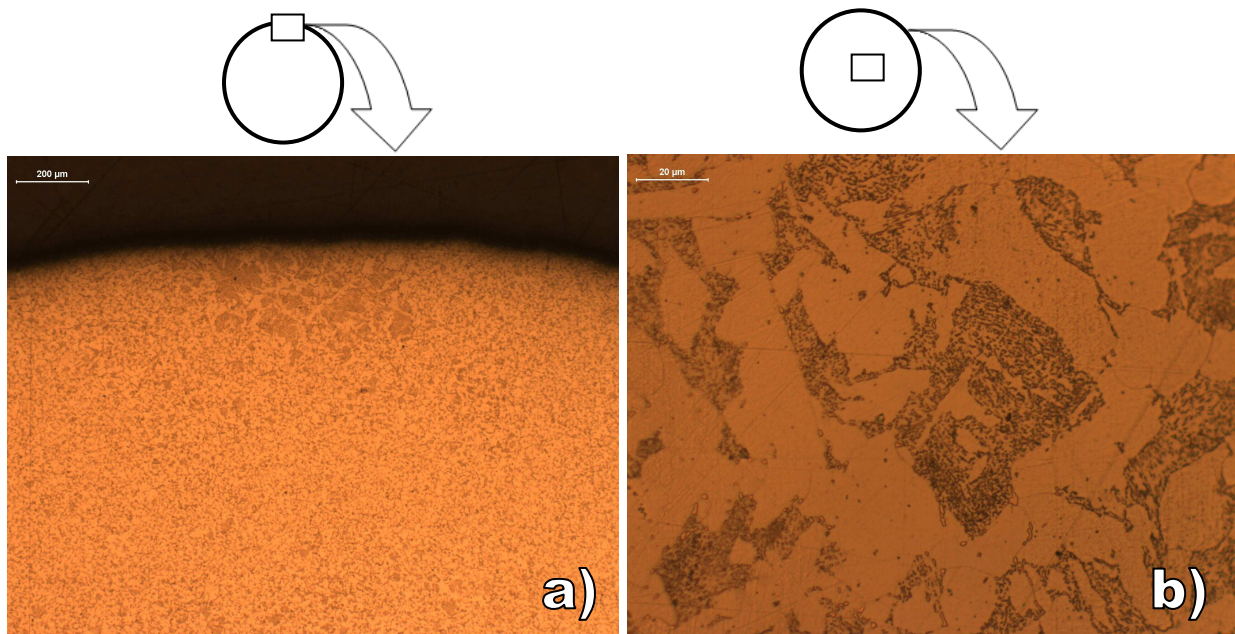


Figura 13 - Detalhes dos locais de captura das imagens da microestrutura do experimento E1b, sendo a) Aumento: 50x e b) Aumento: 500x.

Analisando a Figura 13(a) pode-se perceber uma considerável redução na quantidade de ferrita acicular no material que foi submetido à etapa de recozimento. A microestrutura do material se apresenta bem mais homogênea. A partir do detalhe da microestrutura apresentada na Figura 13(b), pode-se observar que a perlita não se apresenta na forma de lamelas como na Figura 11(b), e sim na forma globulizada. A globularização ocorrida na perlita resulta em considerável redução nas propriedades mecânicas, como pode ser observado na Tabela 6.

## 4.2 Tamanho de Grão

A Figura 14 apresenta os grãos austeníticos para o experimento E1, E2 e E1b.

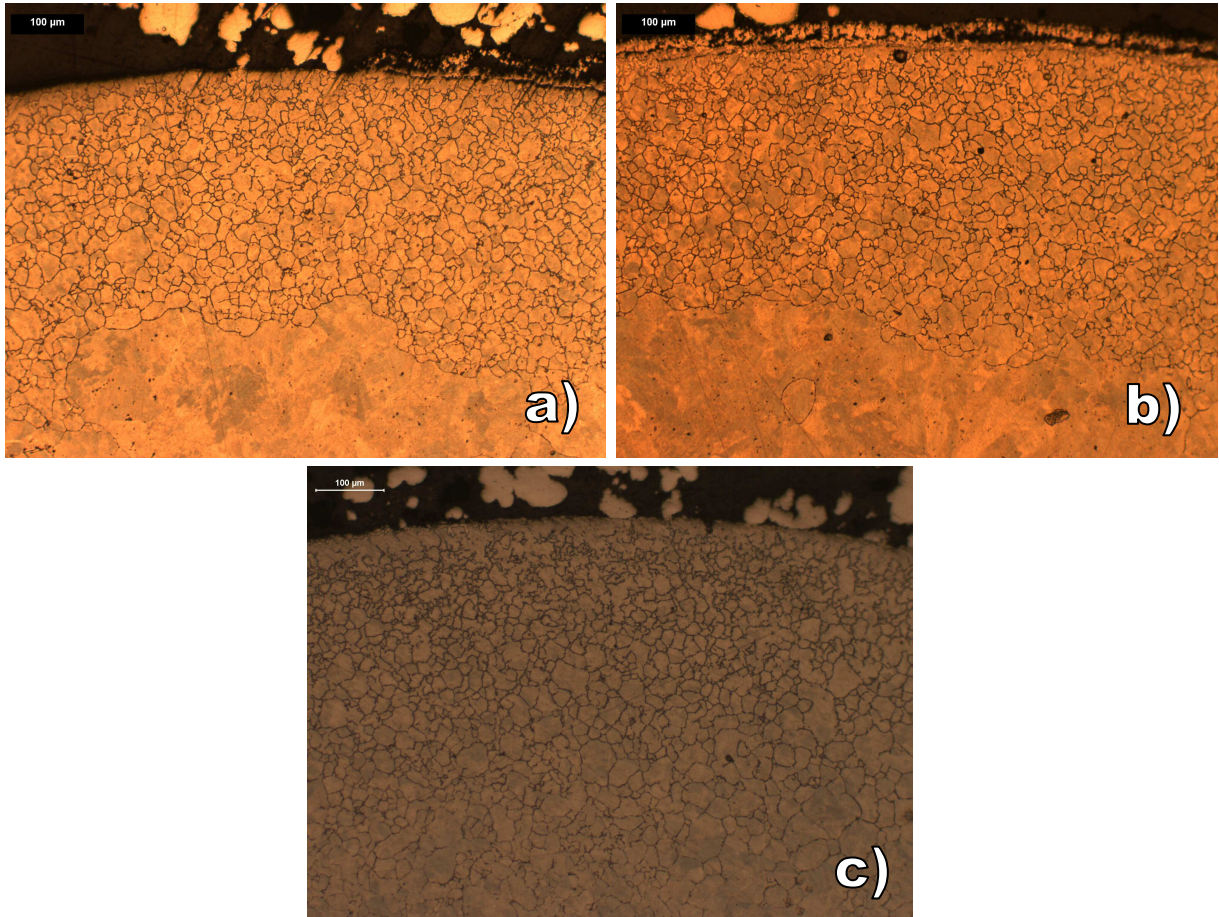


Figura 14 - Imagens para determinação do tamanho médio de grão austenítico pelo método planimétrico a) para o experimento E1 b) para o experimento E2 c) para o experimento E1b.

O índice ASTM para o tamanho médio de grão austenítico para os três experimentos calculado pelo método planimétrico foi igual a 8. Comparando os experimentos E1 e E2 verifica-se que o incremento de 5% na velocidade de transporte do material não tem influência no tamanho de grão do material. Como o resultado foi o mesmo obtido para o experimento E1b, verifica-se que não houve aumento do tamanho médio dos grãos no processo de recozimento, ocorrendo apenas o alívio de tensões devido à restauração da microestrutura minimizando os efeitos do encruamento do material.

### 4.3 Profundidade da Camada Descarboxetada

Os resultados de descarboxetação para o experimento E1, E2 e E1b são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos resultados de descarboxetação para os experimentos E1, E2 e E1b.

	<b>Profundidade da Camada Descarboxetada (mm)</b>		
<b>Experimento</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E1b</b>
<b>Média</b>	0,06	0,08	0,00
<b>Desvio padrão</b>	0,012	0,020	0,010

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que os parâmetros alterados e a ausência da etapa de recozimento não alteraram significativamente a descarboxetação do material, se mantendo dentro do valor especificado para todos os experimentos.

### 4.4 Dureza

Os resultados de dureza Brinell para os experimentos E1, E2 e E1b são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo dos resultados de dureza Brinell para os experimentos E1, E2 e E1b.

	<b>Dureza (HB)</b>		
<b>Experimento</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E1b</b>
<b>Média</b>	144	141	131
<b>Desvio padrão</b>	5,16	2,94	2,73

Pode-se observar que para o experimento E1 a dureza ficou 3 pontos acima dos resultados históricos apresentados na Tabela 3, porém ainda dentro da especificação, evidenciando a possibilidade em obter dureza equivalente após laminação e recozimento padrão. O desvio padrão maior que os resultados dos demais experimentos evidencia maior heterogeneidade do material.

Para o experimento E2 a dureza não apresentou alteração quando comparada ao material original. Comparando os experimentos E1 e E2 verifica-se que o incremento de 5%

na velocidade de transporte do material não tem influência na dureza do material, apenas diminui a heterogeneidade, indicada pela diminuição do desvio padrão. A menor heterogeneidade se deve ao fato de que a exposição do material à atmosfera de dentro do transportador é menor, uma vez que a ausência do incremento da velocidade mantém as espiras mais próximas umas das outras.

Os valores obtidos para o experimento E1b ficaram 10 pontos abaixo do valor histórico (Tabela 3), mesmo com a redução do tempo de tratamento térmico e a alteração do meio de resfriamento. Esta variação demonstra que para os parâmetros padrões de resfriamento na laminação o material padrão provavelmente chegava ao fim do transportados de espiras com uma dureza bem mais elevada. Com o desvio padrão calculado para esse experimento pode-se verificar maior homogeneidade do material tratado termicamente, mesmo partindo de um material mais heterogêneo, eliminando o efeito negativo do incremento de velocidade.

#### 4.5 Ensaio de Tração

Os resultados para os ensaios de tração dos experimentos E1, E2 e E1b são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resumo dos resultados dos ensaios de tração para os experimentos E1, E2 e E1b.

	<b>Experimento</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>LE (MPa)</b>	<b>RA (%)</b>	<b>A (%)</b>
<b>Média</b>	<b>E1</b>	551	307	64	26
<b>Des. padrão</b>		16,97	15,07	2,19	10,67
<b>Média</b>	<b>E2</b>	543	293	65	23
<b>Desv. padrão</b>		16,16	16,65	3,65	9,52
<b>Média</b>	<b>E1b</b>	455	294	73	22
<b>Desv. padrão</b>		4,99	38,95	1,05	1,83

Tanto para o experimento E1 quanto para E2 os resultados de resistência a tração ficaram acima dos resultados históricos apresentados na Tabela 3, ficando fora da especificação exigida pelo cliente.

Ao comparar os resultados dos experimentos E1 e E2, percebe-se que o experimento sem rampa (E2) teve melhor desempenho, já que o que se deseja é um material com baixas propriedades mecânicas, ideal para deformação a frio. A diferença nos

resultados obtidos para esses dois experimentos se deve à menor taxa de resfriamento obtida pelo E2 devido à ausência de incremento de velocidade do material no transportador de espiras, fazendo com que o material permaneça mais tempo dentro do mesmo, favorecendo a provável ocorrência da recristalização dinâmica e em menor quantidade de ferrita acicular apresentada na microestrutura, resultando em um material mais dúctil.

Com a etapa de recozimento, o experimento E1b apresentou grande diminuição no resultado obtido para resistência a tração. Os demais testes também sofreram alteração, porém não em tal dimensão. A forte redução da resistência a tração se explica pela globularização ocorrida na perlita e pelo alívio de tensões ocorrido durante o tratamento térmico, restaurando a microestrutura e eliminando o encruamento.

Pode-se perceber que para o experimento E1b os valores dos desvios padrões diminuíram consideravelmente quando comparado aos experimentos E1 e E2, indicando que a etapa de tratamento térmico confere maior homogeneidade ao material.

Para os experimentos E1 e E2 não foi possível atingir todas as especificações exigidas pelo cliente. A perlita compacta apresentada nesses experimentos resultou em alta resistência à tração, sendo indispensável a etapa de tratamento térmico.

A partir das alterações nos parâmetros de resfriamento da laminação foi possível reduzir o ciclo de recozimento, aumentando a produtividade do tratamento térmico. Como o forno utilizado para o recozimento opera com cargas de 20 toneladas, têm-se uma redução de 4 horas no tempo de recozimento para o novo ciclo testado, reduzindo o custo de produção do aço SAE 10B22.

## 5 CONCLUSÃO

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

- Não foi possível eliminar o processo de recozimento com a otimização dos parâmetros de resfriamento no transportador de espiras;
- Foi possível reduzir em 4 horas o tempo do ciclo de tratamento térmico de recozimento aumentando a produtividade do processo;
- Os incrementos de velocidade testados não tiveram forte influência nos resultados de resistência mecânica e na microestrutura;
- O tamanho de grão e não sofreu alteração devido aos parâmetros alterados e nem com o tratamento térmico;
- A profundidade da camada descarbonetada não sofreu alteração significativa para os experimentos sem tratamento térmico, enquanto que após recozimento o material não apresentou camada descarbonetada;
- O processo de tratamento térmico teve pouca influência na dureza, sendo na faixa de 140HB para os experimentos sem tratamento térmico e 130HB após recozimento;
- O processo de tratamento térmico teve forte influência nos resultados de tração, sendo a resistência a tração na faixa de 545MPa para os experimentos sem tratamento térmico e 455 MPa após o recozimento.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos na realização deste trabalho é possível fazer as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Intensificar o uso do resfriamento no transportador de espiras para a obtenção de tratamento térmico no material laminado;
- Ampliar melhorias obtidas com o trabalho para outros tipos de aço;



## 7. REFERÊNCIAS

- 1 CASARIN, S. J. Caracterização da temperabilidade de aço C-Mn microligado ao boro, através de dilatometria e curvas de transformações de fases por resfriamento contínuo. EESC, USP, 1996.
- 2 AKELSEN, O. M., GRONG, O., KVAALE, P. E. A comparative study of the heat affected zone (HAZ) properties of boron containing low carbon steel. Metallurgical Transaction A, v.17A, n.9, p. 1529-1536, 1986.
- 3 KRAUSS, GEORGE. Steels – Processing, structure and performance, ASM International. Ohio, USA, 1ª edição, 2005.
- 4 CALLISTER, WILLIAM D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, LTC. Rio de Janeiro, 2º edição, 2006.
- 5 PLENTZ, R. S. Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante a laminação. Dissertação de mestrado. PPGEM, UFRGS, 2009.
- 6 Laminação, Relatório Interno Gerdau, número 503, 2007.
- 7 HUMPHREYS, F.J, HATHERLY. Recrystallization and related annealing phenomena. Elsevier, 2004.