



ENG 02298 TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO NA LAMINAÇÃO TERMOMECÂNICA DE UM  
AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO EM FIO MÁQUINA PARA A FABRICAÇÃO DE  
PARAFUSOS DA CLASSE 8.8**

Mário Ballve Prates

Matrícula: 135872

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre, Novembro 2011

## AGRADECIMENTOS

A Gerdau Charqueadas pela oportunidade de realização deste trabalho.

A colega Eng. Kareline Bueno pelo apoio e discussões vitais para a realização deste trabalho.

Aos colegas Eng. Felipe Minella e Eng. Rafael Schumacher Plentz pelos ensinamentos diários, tanto na formação técnica quanto de caráter.

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly pelas orientações e contribuições neste trabalho;

Ao colega Jader Daniel de Brito pelo auxílio nas análises e discussões.

Aos meus pais pela dedicação e incentivo.

A minha namorada Daniela pela motivação e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Saulo Roca Bragança por todos os anos de orientação e amizade.

A UFRGS por ser uma instituição pública de qualidade.

## RESUMO

A competitividade das indústrias na atualidade é sustentada e incentivada pela redução dos custos, sustentabilidade e otimização dos processos. Neste trabalho, buscou-se avaliar a influência do resfriamento no processo de laminação termomecânica de um aço microligado ao nióbio SAE 1312 MOD com aplicação em parafusos da indústria automotiva com o objetivo de eliminar os tratamentos térmicos posteriores da rota tradicional de produção dos aços com esta aplicação. A eliminação dos tratamentos térmicos ocorre por intermédio do resfriamento controlado no transportador de espiras após a laminação controlada. Assim, é possível reduzir custos de fabricação e energia, e desenvolver um aço de alta resistência que atenda as propriedades solicitadas para aplicação em parafusos da indústria automotiva da classe 8.8. Utilizando este conceito, foram elaboradas e testadas três condições de resfriamento deste aço em formato de fio máquina redondo com base no resfriamento no transportador de espiras. Os efeitos das mudanças nos parâmetros foram avaliados e caracterizados quanto à microestrutura e propriedades mecânicas. Os resultados obtidos apontaram que é possível a obtenção de um aço microligado ao nióbio com os requisitos prévios para aplicação em parafusos da classe 8.8 e as melhores combinações de resultados ocorreram utilizando a maior taxa de resfriamento.

Palavras chave: Microligado, Nióbio, Transportador de espiras, Taxas de resfriamento.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito das adições de soluto no aumento do limite de escoamento pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida (8).....	11
Figura 2 - Efeito da temperatura de transformação na resistência de estruturas ferrítico-perlíticas e bainíticas (8).....	13
Figura 3 - a) Precipitação interfásica em aço microligado ao nióbio e b) representação esquemática da precipitação interfásica (15).....	16
Figura 4 - Efeito do nióbio na microestrutura dos aços de alta resistência e baixa liga durante várias etapas de processamento (13). ....	17
Figura 5 - Dependência da temperatura de não recristalização ( $T_{nr}$ ), como função do teor de elementos em solução sólida na austenita (16).....	18
Figura 6 - Diagrama de solubilidade do carbeto de nióbio (NbC) em função do teor de carbono (12).....	19
Figura 7 - Fases de estampagem de um parafuso em uma prensa de matriz sólida. ....	20
Figura 8 - Representação esquemática de um passe simples de laminação. ....	22
Figura 9 - Alteração da estrutura de grãos em um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica a) antes da deformação e b) após deformação (9). ....	23
Figura 10 - Representação esquemática da transformação por recristalização dinâmica nos grãos de um material deformado por laminação a quente (8). ....	24
Figura 11 - Representação esquemática da laminação de fio máquina redondo na Gerdau Aços Especiais Piratini (19).....	26
Figura 12 - Comparação entre os processos de fabricação de parafusos de alta resistência. ....	27
Figura 13 - Representação esquemática do laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Piratini (20). ....	28
Figura 14 - Gaiola trio do laminador 2 da Gerdau AEP de arranjo aberto (20). ....	29
Figura 15 - Trem intermediário de laminação contínuo da Gerdau AEP (20). ....	30
Figura 16 - a) Formador de espiras e b) Transportador de espiras da Gerdau AEP (20). ....	31
Figura 17 - Diagrama CCT do aço SAE 1312 MOD obtido por simulação termomecânica (Gleeble) na Gerdau Aços Especiais Piratini. ....	32
Figura 18 - a) Representação esquemática da amostragem do fio máquina b) Perfil térmico do fio máquina durante o resfriamento no Cooling Conveyor. ....	34
Figura 19 - a) Ductilidade a quente (redução de área) sob deformação no intervalo de temperaturas de laminação do aço SAE 1312 MOD. (b) e (c) Amostras utilizadas no ensaio e perfil de fratura dos materiais nas temperaturas de 750, 850, 950 e 1200°C. ....	37
Figura 20 - a) Inspeção visual com lupa (aumento 10x). b) Inspeção visual com auxílio de partículas magnéticas.....	38
Figura 21 - Microestrutura do experimento 1.....	40
Figura 22 - Microestrutura do experimento 2.....	40
Figura 23 - Microestrutura do experimento 3.....	40
Figura 24 - Propriedades mecânicas do fio máquina SAE1312mod nas diferentes condições testadas: (a) Limite de Resistência e (b) Limite de Escoamento.....	41
Figura 25 – Propriedades mecânicas do fio máquina SAE1312mod nas diferentes condições testadas: (a) Alongamento e (b) Redução de área. ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das propriedades mecânicas exigidas nos parafusos segundo as classes de resistência da ISO 898-1 (18). .....	21
Tabela 2 - Composição química do aço SAE 1312 MOD.....	27
Tabela 3 - Condições de resfriamento para os experimentos 1, 2 e 3. ....	33
Tabela 4 - Tamanho de grão austenítico (ASTM E112) para os três experimentos.....	38
Tabela 5 - Resumo dos resultados de dureza Brinell (HB) para os três experimentos.....	39
Tabela 6 - Resumo dos valores de descarbonetação média para os três experimentos.....	39

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 Aços microligados de alta resistência mecânica.....	10
3.2 Mecanismos de aumento de resistência dos aços.....	10
3.2.1 Endurecimento por solução sólida.....	10
3.2.2 Endurecimento por refino de grão.....	11
3.2.3 Endurecimento por precipitação.....	12
3.2.4 Endurecimento por transformação de fase.....	12
3.2.5 Endurecimento por encruamento.....	13
3.3 Metalurgia física dos aços microligados.....	14
3.3.1 Precipitação na austenita.....	15
3.3.2 Precipitação interfásica.....	15
3.3.3 Precipitação na ferrita.....	16
3.4 Influência do Nióbio.....	16
3.4 Fabricação de parafusos.....	19
3.4.1 Processo de fabricação de parafusos.....	19
3.4.2 Preparação da matéria prima.....	20
3.4.3 Propriedades dos parafusos da classe 8.8 – Norma ISO 898-1.....	20
3.5 Princípios de Laminação.....	21
3.5.1 Deformação a Quente.....	22
3.5.2 Recristalização convencional e dinâmica.....	23
3.5.3 Reaquecimento controlado.....	24
3.5.4 Laminação controlada.....	24
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
4.1 Considerações iniciais.....	26
4.2 Material.....	27
4.3 Laminação de Fio Máquina na Gerdau Aços Especiais Piratini.....	28
4.3.1 Forno de reaquecimento.....	28
4.3.2 Desbaste.....	29
4.3.3 Trem Intermediário.....	30
4.3.4 Trem acabador.....	30
4.3.5 Cooling Conveyor (Transportador de espiras).....	31
4.4 Diagrama de Resfriamento Contínuo – CCT.....	32
4.5 Experimentos.....	33
4.6 Retirada de amostras.....	34
4.7 Métodos de caracterização e análises.....	34
4.7.1 Ductilidade a quente.....	34
4.7.2 Inspeção por correntes parasitas.....	35
4.7.3 Inspeção visual e partículas magnéticas.....	35
4.7.4 Tamanho de grão.....	35
4.7.5 Dureza.....	35
4.7.6 Profundidade de descarbonetação.....	35
4.7.7 Microestrutura.....	36
4.7.8 Ensaio de tração.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
5.1 Ductilidade a quente.....	37
5.2 Inspeção por correntes parasitas.....	37

5.3 Inspeção visual e por partículas magnéticas.....	38
5.4 Tamanho de grão .....	38
5.5 Dureza.....	39
5.6 Profundidade de descarbonetação .....	39
5.7 Microestrutura .....	40
5.8 Ensaio de tração.....	41
5.8.1 Limite de resistência e escoamento .....	41
5.8.2 Alongamento e redução de área.....	42
6. CONCLUSÕES .....	43
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	44
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

# 1. INTRODUÇÃO

A obtenção de melhores propriedades mecânicas dos aços, com a otimização de processos e redução de custos de fabricação é um objetivo permanente das grandes empresas do ramo siderúrgico atualmente. A utilização de aços com microligantes para atingir este propósito vem crescendo muito nos últimos anos, visto que com estes constituintes é possível obter um produto de elevada qualidade com menores custos de produção quando comparado ao processo de fabricação dos aços convencionais.

Neste trabalho buscou-se obter um aço microligado ao Nióbio com propriedades prévias para aplicação em parafusos forjados a frio para a indústria automobilística que atendem a classe 8.8, eliminando-se os tratamentos térmicos convencionais. Para atingir este objetivo foi utilizado um aço ao nióbio, SAE 1312MOD, produzido na Gerdau Aços Especiais Piratini na forma de fio máquina redondo.

Os processos convencionais de fabricação de parafusos de alta resistência utilizam aços com médio teor de carbono e elementos que aumentam a temperabilidade. Estes materiais são submetidos aos tratamentos térmicos de esferoidização, efetuado na matéria prima para facilitar as etapas de deformação a frio, têmpera e revenimento, efetuados no parafuso pronto com o objetivo de adequar as propriedades mecânicas a aplicação final.

A otimização dos parâmetros de laminação termomecânica (laminação e resfriamento controlados) em conjunto com a utilização de elementos microligantes em aços de baixo carbono, que combinam diferentes mecanismos de endurecimento, proporciona uma matéria prima com propriedades prévias que atendem simultaneamente as exigências das etapas de deformação a frio e as propriedades mecânicas finais dos parafusos.



## **2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do resfriamento de um aço microligado ao nióbio no transportador de espiras após laminação controlada com o objetivo de se desenvolver uma matéria prima em formato de fio máquina redondo com as propriedades prévias para aplicação em parafusos automotivos da classe 8.8, eliminando os tratamentos térmicos de esferoidização e têmpera do processo convencional dos aços com esta aplicação.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Aços microligados de alta resistência mecânica**

Aços microligados são conhecidos como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) e constituem uma das classes mais importantes dos materiais de engenharia, assumindo um papel de destaque nas indústrias automobilística, civil, naval e petrolífera. Este grupo específico de aços é constituído por composições químicas especialmente desenvolvidas para alcançar elevados valores de propriedades mecânicas. Constitui-se na prática de se adicionar pequenas quantidades de elementos formadores de carbonetos, nitretos e carbonitretos, como o nióbio (Nb), o vanádio (V) e o titânio (Ti) em aços de baixo e médio teor de carbono (1) (2).

O titânio forma carbonitretos estáveis a altas temperaturas, contribuindo para o controle de crescimento de grão austenítico anterior ao processamento termomecânico, sendo mais indicado para o controle do tamanho de grão durante o reaquecimento. O nióbio possui uma solubilidade intermediária e forte influência sobre a cinética de recristalização, auxiliando no controle do tamanho de grão austenítico durante o processamento, retardando a recristalização. Os aços microligados ao vanádio, cujos carbonitretos apresentam maior solubilidade, podem manter uma grande quantidade de vanádio em solução na austenita e na decomposição da austenita, podendo ser usado para o endurecimento por precipitação, em temperaturas baixas (3) (4) (5) (6).

O desenvolvimento dos aços ARBL ocorreu a partir da década de 60, com a utilização de aços baixo carbono com elevados limites de escoamento, e na década de 70 com os aços de médio carbono que apresentavam valores de resistência mecânica similares aos aços temperados e revenidos.

#### **3.2 Mecanismos de aumento de resistência dos aços**

O aumento das propriedades mecânicas dos aços pode ser obtido através da utilização de cinco mecanismos diferentes: solução sólida, refino de grão, precipitação de segunda fase e o endurecimento por encruamento (7).

##### **3.2.1 Endurecimento por solução sólida**

O endurecimento por solução sólida é atingido através da inserção de átomos de soluto em solução na rede de um solvente, através da substituição de um átomo de solvente por um átomo de soluto com tamanho equivalente (solução sólida substitucional) ou quando pequenos átomos de soluto ocupam posições intersticiais (solução sólida intersticial). A diferença de tamanho atômico entre o elemento e o ferro e a concentração de soluto tem efeito

direto no limite de resistência e de escoamento do material. Para se obter endurecimento por solução sólida geralmente são utilizados os elementos silício (Si), manganês (Mn) e fósforo (P), devido ao grande aumento dos limites de escoamento em aços de baixo carbono proporcionado por estes elementos (8).

A presença destes átomos de soluto ocasiona a deformação da matriz cristalina do material, dificultando a movimentação das discordâncias no interior do cristal, exigindo maior tensão para o movimento como esta representado na figura 1 (8).

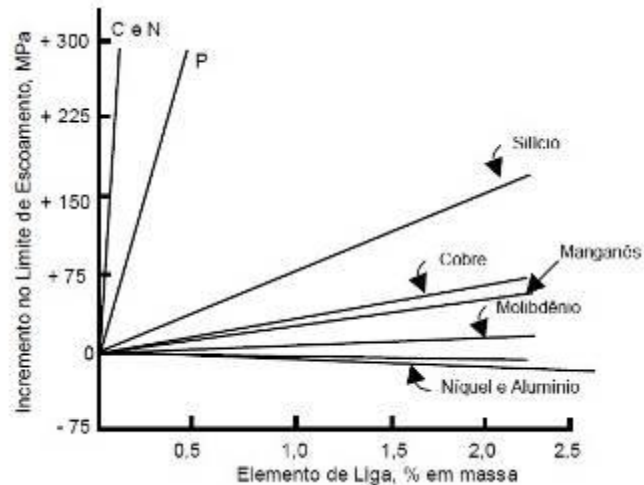


Figura 1 - Efeito das adições de soluto no aumento do limite de escoamento pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida (8).

### 3.2.2 Endurecimento por refino de grão

As propriedades mecânicas de um metal policristalino são diretamente influenciadas pelo tamanho de grão ou diâmetro médio de grão. O refinamento de grão é regido pela conhecida equação de Hall-Petch, que determina uma relação empírica entre o limite de escoamento de vários metais e ligas com o tamanho de grão. Um material com grãos finos é mais resistente que um material com grãos grosseiros, pois os contornos de grão atuam como barreiras ao movimento das discordâncias (9).

O aumento da resistência mecânica verificado nos aços microligados laminados a quente é associado ao refino dos grãos ferríticos e pela granulometria mais fina do material, obtida através do retardo na recristalização da austenita pela ação das partículas dos precipitados. O refino de grão é o único mecanismo de endurecimento capaz de aumentar a resistência mecânica do material e a sua tenacidade (10).

### **3.2.3 Endurecimento por precipitação**

O endurecimento por precipitação é obtido através da restrição imposta pelos precipitados ao movimento das discordâncias do material durante a deformação plástica, modificando as propriedades mecânicas do material. O limite de escoamento do material é aumentado consideravelmente, elevando a razão elástica (LE/LR). A influência nas propriedades mecânicas vai depender de fatores como: tamanho, quantidade, forma, espaçamento, distribuição e coerência dos precipitados (7).

Este mecanismo de endurecimento é obtido durante o resfriamento do material após laminação e/ou durante reaquecimentos posteriores em baixas temperaturas. No caso de resfriamento após a laminação, as partículas endurecedoras são aquelas de pequenas dimensões que são formadas em baixas temperaturas, na interface austenita/ferrita durante a transformação e na ferrita durante o resfriamento. Quanto maiores as taxas de resfriamento, menores e em maiores quantidades serão formados os precipitados, aumentando a dureza do material. O endurecimento por precipitação geralmente tem efeito benéfico na ductilidade, avaliada pelo ensaio de tração, devido ao mecanismo de restrição do movimento das discordâncias, semelhante ao mecanismo de endurecimento por refino de grão (11).

### **3.2.4 Endurecimento por transformação de fase**

O endurecimento por transformação de fase está associado com a transformação da austenita, no resfriamento mais estável termodinamicamente a altas temperaturas, para outras fases mais estáveis a baixas temperaturas. As propriedades resultantes das transformações de fase nos aços dependem diretamente das temperaturas nas quais elas ocorrem, ou seja, da microestrutura resultante. Em geral, quanto mais baixa a temperatura de transformação, maior será o efeito endurecedor. Isto está associado a vários fatores endurecedores como:

- Quanto mais baixa for a temperatura de transformação, mais finos serão os grãos da fase produto;
- Quanto mais baixa for a temperatura de transformação, maior será a densidade de discordâncias;
- Quanto mais baixa for a temperatura de transformação, maior será a tendência de retenção dos solutos em solução supersaturada, levando a um aumento da resistência mecânica por solução sólida;
- Quanto mais baixa for a temperatura de transformação, mais fina é a dispersão de precipitados.

A figura 2 (8) apresenta o efeito da temperatura de transformação na resistência mecânica.

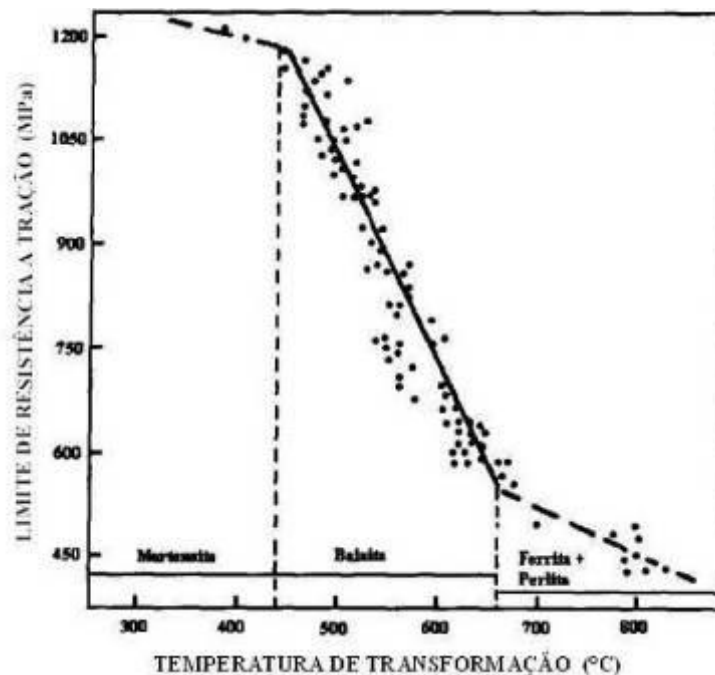


Figura 2 - Efeito da temperatura de transformação na resistência de estruturas ferrítico-perlíticas e bainíticas (8).

Os efeitos mencionados refletem os mecanismos de endurecimento por refino de grão, solução sólida e precipitação que, estão relacionados a fatores termodinâmicos e cinéticos das transformações de fase. A temperatura de transformação é, portanto, a variável mais importante (8).

Para se obter produtos de transformação em baixas temperaturas deve-se atuar na velocidade de resfriamento e/ou na composição química. Elementos como boro (B) e molibdênio (Mo) possibilitam a obtenção de estruturas bainíticas de alta resistência, com taxas de resfriamento não tão elevadas. Com relação a ductilidade, avaliada pela estrição no ensaio de tração, o efeito das transformações de fase dependerá da interação entre os vários fatores endurecedores.

Caso predomine o efeito de refino de tamanho de grão, espera-se um aumento da ductilidade. Em aços bainíticos observa-se o aumento da estrição e da resistência quando se utiliza resfriamento acelerado. Em aços predominantemente martensíticos, a tendência é a queda da ductilidade com o aumento da resistência (8).

### 3.2.5 Endurecimento por encruamento

Este mecanismo de endurecimento é largamente utilizado em operações de trefilação e forjamento a frio que aumentam consideravelmente a densidade e a interação entre as

discordâncias. Em geral, a resistência do material aumenta, porém este mecanismo acarreta perda de ductilidade com o aumento da deformação (8).

### **3.3 Metalurgia física dos aços microligados**

A obtenção das propriedades mecânicas desejadas em aços microligados depende da estratégia utilizada para se projetar uma liga adequada em conjunto com condições controladas de processamento termomecânico e/ou resfriamento. São considerados aços microligados aqueles contendo pequenos teores de elementos formadores de carbonetos, nitretos e carbonitretos (Nb, Ti, V e B) que são capazes, por si só ou através de efeitos sinérgicos, de alterarem drasticamente as propriedades mecânicas resultantes. O projeto de liga de um aço microligado deve levar em conta a faixa de composição química e as condições de processamento termomecânico disponíveis. Assim, é possível estipular teores adequados dos elementos de forma a se obter as propriedades desejadas com os recursos disponíveis (12).

Aços microligados são tipicamente aços de baixo a médio teor de carbono contendo pequenas adições de nióbio, vanádio, titânio e alumínio, em adições individuais ou em combinação. A metalurgia física destes aços microligados é basicamente baseada em:

- Aumento do limite de resistência e tenacidade através do refino de grão;
- Teor relativamente baixo de carbono (0,03 a 0,15%) para incremento em tenacidade e soldabilidade;
- Endurecimento por solução sólida, apesar de esta técnica ser bastante limitada visto que os elementos mais efetivos têm efeito deletério na tenacidade;
- Endurecimento pela diminuição da temperatura de transformação formando ferrita acicular, bainita ou mesmo martensita, e
- Endurecimento por precipitação feito por uma normalização ou durante o resfriamento pós laminação (precipitação interfásica) ou durante um tratamento térmico de envelhecimento (precipitação na ferrita) (13).

A temperatura de reaquecimento e a composição química do aço microligado são fundamentais para se avaliar a dissolução dos microligantes e o seu comportamento frente à precipitação e o ancoramento de grão. Quando carbeto e nitreto de microligantes a altas temperaturas são dissolvidos na austenita, existem algumas opções para subsequente reprecipitação a menores temperaturas. A precipitação é possível devido à diferença da solubilidade dos microligantes na austenita e na ferrita. Temperaturas menores permitem a

dissolução parcial dos microligantes que funcionarão como sítios para a precipitação durante o resfriamento e na formação de partículas de segunda fase para ancorar os grãos.

A dissolução dos microligantes na austenita possibilita:

- Precipitação na austenita durante o resfriamento após deformação no campo austenítico;
- Precipitação durante a transformação austenita-ferrita, devido a solubilidade descontínua nos contornos de grão, e
- Precipitação na ferrita pelo resfriamento rápido pela zona austenítica e temperaturas de transformação.

A utilização de altas temperaturas de formação e menores taxas de resfriamento conduzem a um maior crescimento dos carbonitretos, tornando as partículas menos efetivas no endurecimento por precipitação (14).

### **3.3.1 Precipitação na austenita**

A precipitação na austenita é muito lenta utilizando-se temperaturas e tempos normais de trabalho a quente, porém utilizando deformação à quente, discordâncias e contornos de grão atuam como sítios de precipitação de carbonetos e nitretos, facilitando o endurecimento por precipitação. Esta precipitação na austenita de carbonetos e nitretos impede a recristalização da austenita, possibilitando o aumento na taxa de nucleação da ferrita durante a transformação, refinando os grãos (14).

### **3.3.2 Precipitação interfásica**

Quando a precipitação ocorre durante a decomposição da austenita, os carbonetos e nitretos são observados em disposição alinhada de fileiras ou colunas (em determinadas direções na microscopia eletrônica de transmissão), devido à nucleação na interface austenita-ferrita durante o resfriamento.

A interface ferrítica formada (ferrita eutetóide ou da perlita), durante a transformação, atua como sítio de nucleação dos microligantes. O espaçamento entre as linhas de precipitados e partículas, assim como o tamanho das partículas é reduzido utilizando temperaturas de transformação menores. A precipitação interfásica em aços microligados é observada, geralmente, em taxas de resfriamento menores, onde a formação da bainita é minimizada (14).

A figura 3 (15) ilustra a distribuição de partículas em uma precipitação interfásica típica.

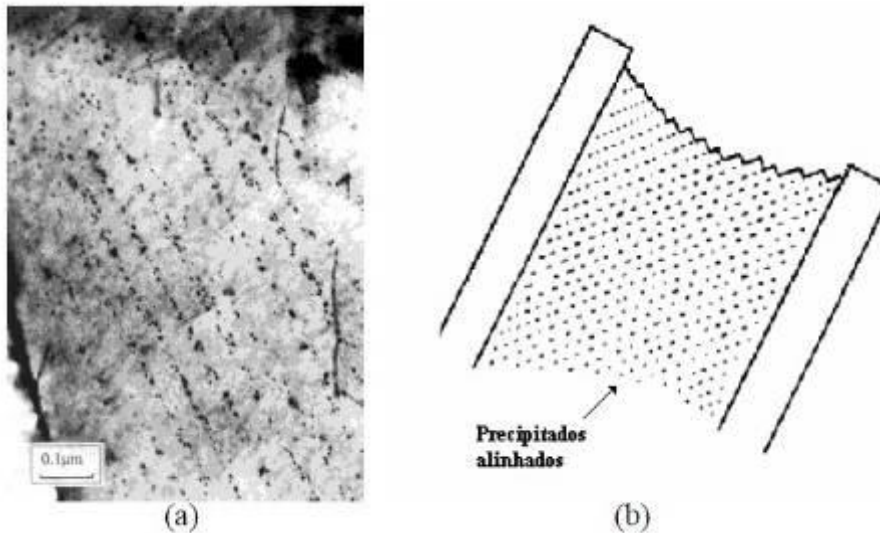


Figura 3 - a) Precipitação interfásica em aço microligado ao nióbio e b) representação esquemática da precipitação interfásica (15).

### 3.3.3 Precipitação na ferrita

A utilização de elementos microligantes ou taxas de resfriamentos maiores podem reduzir a temperatura de transformação. Com a diminuição na temperatura de transformação, a difusão dos elementos microligantes pode ser insuficiente para ocorrer precipitação dos carbeto e nitreto, que seguem em solução sólida supersaturada na ferrita que, através de um reaquecimento dentro da zona ferrítica ou resfriamento lento a partir de trabalho mecânico, podem dar origem a uma reação de precipitação sobre as discordâncias ou na matriz, aumentando a resistência do aço (14).

### 3.4 Influência do Nióbio

A adição de elementos microligantes aos aços tem papel fundamental na obtenção de melhores combinações de propriedades mecânicas. Cada elemento microligante exerce influência de forma característica sobre os complexos mecanismos microestruturais e nas relações microestrutura/propriedades. O projeto correto de um aço microligado depende não apenas da aplicação final do aço, mas também da integração entre o microligante e os outros componentes do aço, e principalmente dos parâmetros de processo associado, tendo influência



direta nas propriedades do produto final. Em geral, o retardo no crescimento de grão durante o reaquecimento ou durante a laminação e da recrystalização da austenita são obtidos através do uso destes microligantes (14).

O nióbio é um dos principais elementos microligantes adicionado aos aços. A utilização de aços microligados ao nióbio vem crescendo nas últimas décadas, visto que a produção de aços microligados consome aproximadamente 80% da produção mundial de nióbio e compreende mais de 10% da produção mundial de aço (em torno de 80 milhões de toneladas por ano) (13).

Ainda que adicionado em pequenos teores (0,020 a 0,04%), o nióbio é muito efetivo no retardo da recrystalização da austenita, devido a formação de precipitados acima da temperatura de recrystalização durante os processamentos termomecânicos, propiciando a obtenção de uma microestrutura mais refinada. As interações entre o processamento e os precipitados de nióbio, relativas ao refino de grão, controle de transformações e endurecimento por precipitação são apresentadas na figura 4 (13).

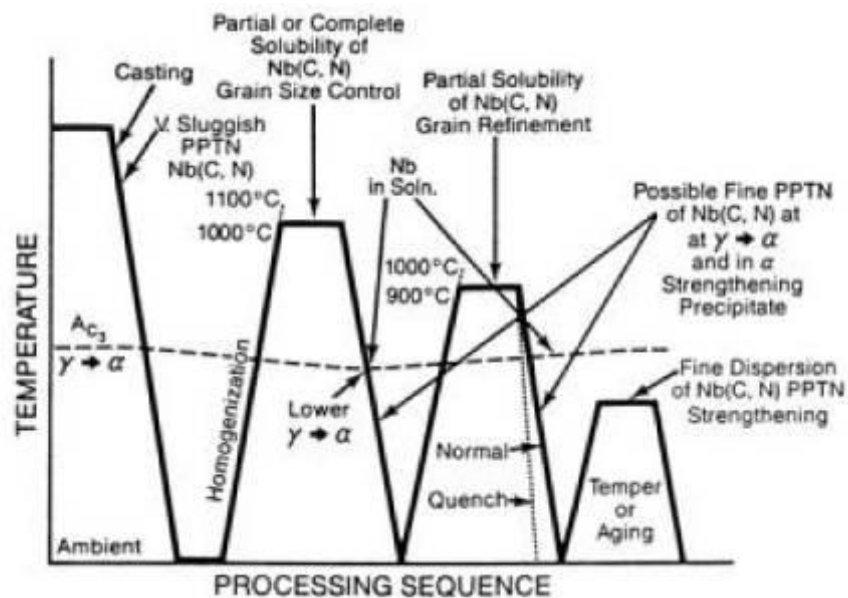
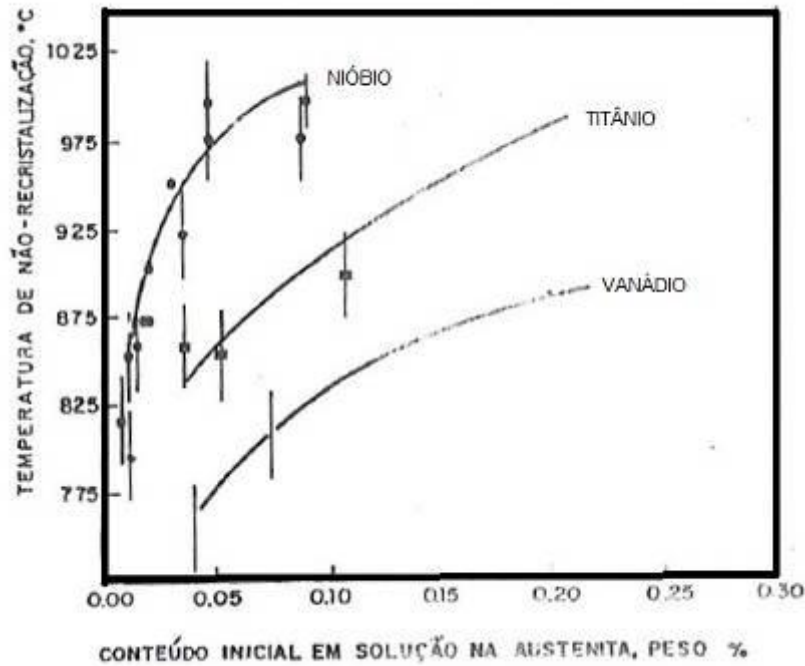


Figura 4 - Efeito do nióbio na microestrutura dos aços de alta resistência e baixa liga durante várias etapas de processamento (13).

A cinética de recrystalização é bastante afetada pela quantidade de nióbio dissolvido, porém o grande retardo na recrystalização é obtido pela precipitação parcial do nióbio como carbonitretos nas microestruturas deformadas. A deformação livre induz a precipitação, inibindo o crescimento de grão e retardando a recrystalização da austenita, resultando numa efetiva elevação da temperatura final de recrystalização. A figura 5 (16) ilustra a comparação no retardamento da recrystalização da austenita para três microligantes nióbio, titânio e

vanádio. O retardamento na recristalização da austenita é avaliado pelo valor da temperatura de não-recristalização ( $T_{nr}$ ). Abaixo da  $T_{nr}$  a austenita já não recristaliza durante a laminação. Assim, o maior efeito do nióbio consiste em elevar a  $T_{nr}$ . Uma vez que partículas precipitadas muito finas de carbonitretos de nióbio retardam a recristalização, resultando em um aumento da  $T_{nr}$ , é importante que os precipitados estejam dissolvidos na temperatura de reaquecimento (16).



**Figura 5 - Dependência da temperatura de não recristalização ( $T_{nr}$ ), como função do teor de elementos em solução sólida na austenita (16).**

A concentração de nióbio dissolvido e o decréscimo da temperatura de reaquecimento aumentam o retardo na recristalização da austenita. Isto permite a otimização dos processamentos termomecânicos para refino de grão durante a laminação controlada, obtendo-se uma austenita altamente deformada que gera vários sítios para a nucleação de grãos ferríticos, originando uma estrutura de granulometria mais fina (16).

O tamanho de grão austenítico pequeno normalmente resulta em um tamanho de grão pequeno no produto final, para isso ocorrer é necessário que partículas que permanecem não dissolvidas na austenita ocasionem a inibição do crescimento de grão.

Para se obter as propriedades desejadas no produto final é fundamental o conhecimento da solubilidade dos microligantes nas diversas temperaturas, que serão responsáveis pela quantidade de microligante dissolvido em solução sólida que estarão disponíveis para precipitar durante o trabalho a quente (12). A figura 6 apresenta o diagrama de solubilidade do carbeto de nióbio.

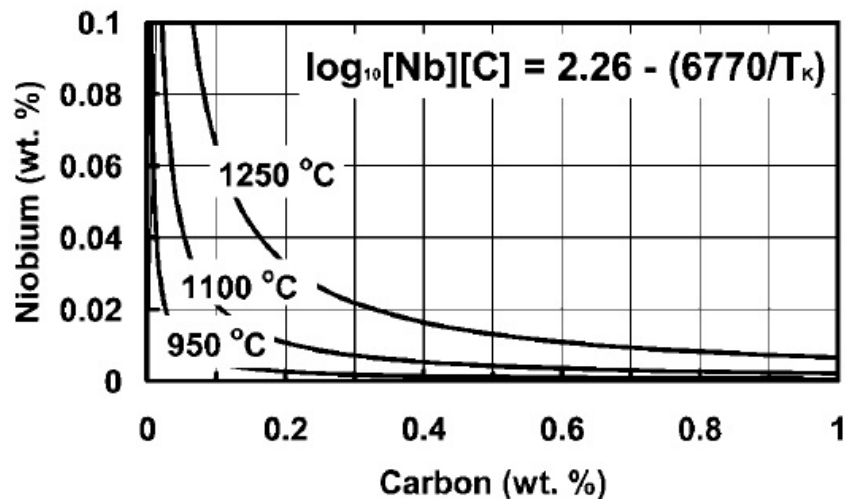


Figura 6 - Diagrama de solubilidade do carbeto de nióbio (NbC) em função do teor de carbono (12).

### 3.4 Fabricação de parafusos

Para a produção em massa de parafusos de tamanho médio e pequeno, os processos de forjamento, principalmente a frio, apresentam várias vantagens em relação ao processo de usinagem como o maior aproveitamento da matéria prima, maior produtividade e aumento da resistência devido ao encruamento (17).

#### 3.4.1 Processo de fabricação de parafusos

A fabricação de parafusos para forjamento a frio pode ser dividida nas seguintes etapas:

- Estampagem da cabeça (cold heading);
- Apontamento;
- Corte do sextavado;
- Laminação da rosca.

Devido a existência de inúmeros tipos de parafusos com as mais diversas aplicações, as etapas básicas citadas podem sofrer variações, porém a etapa principal do processo é a estampagem da cabeça (cold heading). Esta etapa do forjamento a frio consiste na ação de um punção contra uma matriz que deforma uma parte da matéria prima até a forma desejada (17).

Para a produção dos parafusos geralmente são utilizadas prensas de matrizes sólidas que incorporam todas as etapas de fabricação/estampagem dos parafusos. A matéria prima (arame ou fio máquina) é alimentada na máquina na forma de rolos/bobinas. A primeira etapa

consiste no corte do arame no comprimento adequado, sendo então transferido para a prensa de estampagem. A quarta etapa consiste no corte do sextavado da cabeça e a quinta etapa é o apontamento/chanfro feito por usinagem, preparando o material para a última etapa que é a laminação a frio da rosca (17). A figura 7 apresenta as fases de estampagem dos parafusos utilizando uma prensa de matriz sólida.



**Figura 7 - Fases de estampagem de um parafuso em uma prensa de matriz sólida.**

### **3.4.2 Preparação da matéria prima**

A qualidade geral dos aços para forjamento a frio é determinada pela capacidade de fluir na cavidade da ferramenta e adquirir a forma desejada, habilidade de sofrer uma deformação severa sem trincar e pela habilidade de tomar a forma desejada com uma baixa resistência contra as forças de estampagem, gerando menor desgaste das ferramentas. Para forjamento a frio normalmente são utilizados os aços com baixo carbono e baixa liga fabricados em forma de rolos de fio máquina, aumentando a produtividade das prensas (17).

### **3.4.3 Propriedades dos parafusos da classe 8.8 – Norma ISO 898-1**

Os parafusos prontos devem atender a uma série de requisitos prescritos em normas de controle. A norma ISO 898-1 é a mais utilizada pelas indústrias brasileiras de parafusos e especifica as propriedades mecânicas dos parafusos sextavados. A principal classificação é pela classe de resistência, a qual é indicada por dois números separados por um ponto. O primeiro dígito refere-se à força de tensão mínima em 100 N/mm<sup>2</sup> e o segundo dígito indica 10 vezes a taxa entre o limite de escoamento mínimo e o limite de resistência nominal. Para a classe de parafusos 8.8, a norma especifica um parafuso com resistência mínima de 800N/mm<sup>2</sup> e um limite de escoamento de no mínimo 80% do limite de resistência nominal

( $0.8 \times 800 = 640 \text{ N/mm}^2$ ). A tabela 1 fornece um resumo das propriedades mecânicas exigidas nos parafusos segundo as classes de resistência da ISO 898-1 (18).

**Tabela 1 - Resumo das propriedades mecânicas exigidas nos parafusos segundo as classes de resistência da ISO 898-1 (18).**

ISO 898-1	LR (N/mm <sup>2</sup> ) mín.	LE (N/mm <sup>2</sup> ) mín.	Along % mín.	Dureza (HRc)	Tensão carga (N/mm <sup>2</sup> )
D ≤ 16mm	800	640	12	22 - 32	580

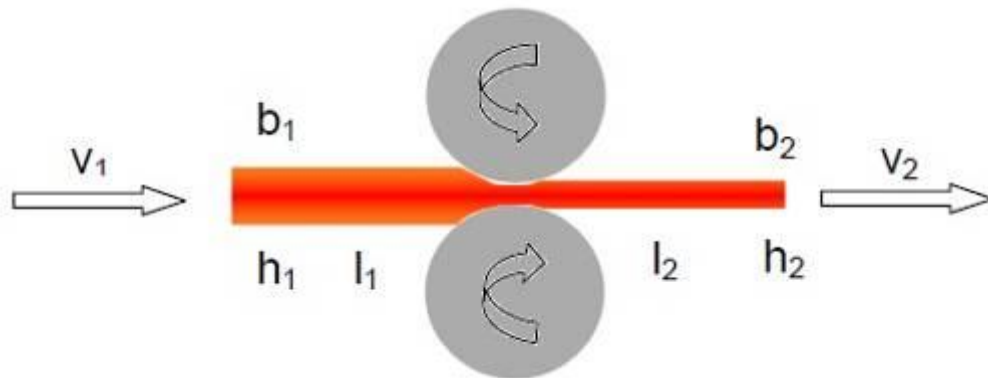
### **3.5 Princípios de Laminação**

O processo de laminação consiste na deformação plástica a frio ou a quente de um sólido, com objetivo de obter um produto final com as formas desejadas (dimensão e formato da seção transversal), mas que são difíceis ou dispendiosas de serem obtidas através de outros processos que não a laminação e alterar as propriedades mecânicas, desejável para variadas aplicações de aços, sendo uma das mais relevantes o encruamento do material (19).

A laminação a frio é empregada quando deseja obter pequenas deformações, geralmente para operações de acabamentos, pois confere superfícies regulares. Na laminação a quente o trabalho mecânico é realizado a quente, normalmente acima da temperatura de recristalização do material, com o objetivo de diminuir a resistência mecânica deste e promover, simultaneamente, a recristalização da sua estrutura (19).

A conformação do material é realizada sobre os tarugos brutos de solidificação que possuem uma estrutura irregular bruta de fusão, com vazios e segregação, de grande fragilidade. A deformação ocorre ao realizarem-se passes de laminação, que consistem em forçar o material a passar entre dois cilindros em movimento, com velocidades próximas e girando em sentidos opostos. Os cilindros devem ser espaçados entre si de forma que ocorra uma redução na seção do material e aumento de comprimento (no caso de laminação de produtos longos) (19).

Uma representação esquemática simples de um passe de laminação pode ser visualizada na figura 8.



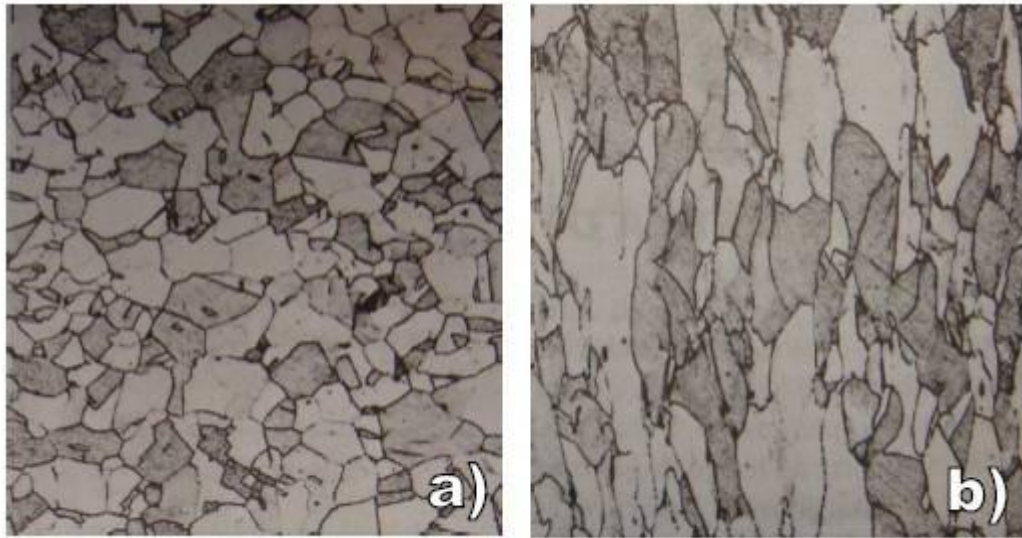
**Figura 8 - Representação esquemática de um passe simples de laminação.**

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. 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 (20).

### **3.5.1 Deformação a Quente**

O escorregamento é o fenômeno responsável pela deformação plástica dos materiais através do movimento de discordâncias. Devido à aleatoriedade das orientações cristalográficas do grande número de grãos nos metais, a direção de escorregamento varia de um grão para o outro, ocorrendo no sentido de orientação mais favorável.

A integridade mecânica e a coesão dos contornos de grão são mantidas durante a deformação, ou seja, estes não se abrem ou se rompem. A figura 9 (9) ilustra o resultado de uma deformação plástica em um metal policristalino antes e após a deformação (9).



**Figura 9 - Alteração da estrutura de grãos em um metal policristalino como resultado de uma deformação plástica a) antes da deformação e b) após deformação (9).**

### **3.5.2 Recristalização convencional e dinâmica**

A recristalização convencional 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 (9).

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 (8).

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. A Figura 10 (8) apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno de recristalização convencional e dinâmica durante o processo de laminação (8).

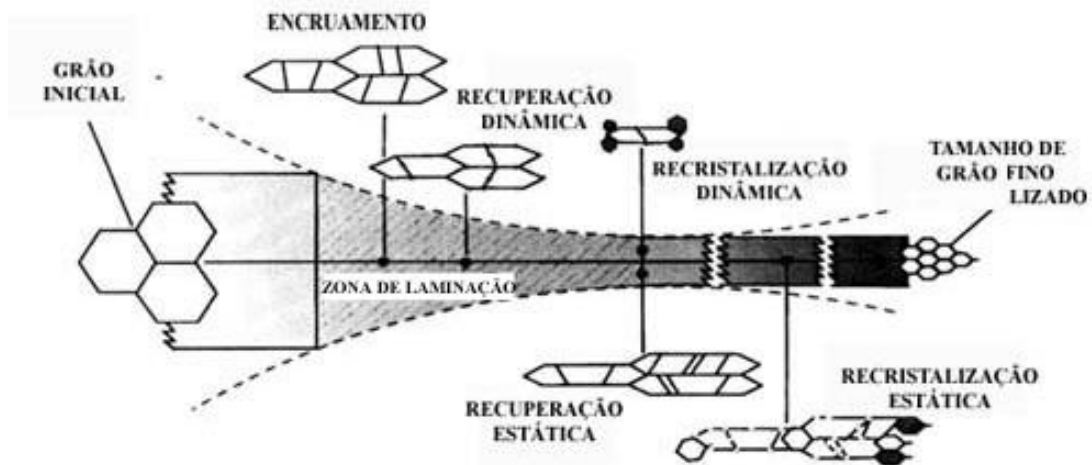


Figura 10 - Representação esquemática da transformação por recristalização dinâmica nos grãos de um material deformado por laminação a quente (8).

### 3.5.3 Reaquecimento controlado

A temperatura e o tempo de reaquecimento no processo de laminação de aços microligados têm como objetivo dissolver os precipitados sem promover o crescimento exagerado dos grãos austeníticos. Em aços sem microligantes o crescimento do grão austenítico ocorre de forma contínua, enquanto nos aços microligados ocorre crescimento até a temperatura de dissolução. O titânio é o elemento mais eficaz no controle do tamanho de grão durante o reaquecimento, pois não permite o crescimento dos grãos nas temperaturas normais de reaquecimento (17).

O tempo na temperatura de aquecimento tem efeito semelhante ao da temperatura de reaquecimento, ou seja, quanto maior o tempo maior o tamanho de grão resultante. Tempos muito curtos de reaquecimento podem não garantir a completa dissolução do microligante na austenita.

O controle de tempo e temperatura de reaquecimento deve ser suficiente para que ocorra dissolução dos precipitados de nióbio e suficiente para que o titânio impeça o crescimento descontrolado dos grãos austeníticos (17).

### 3.5.4 Laminação controlada

O processamento termomecânico de aços microligados vem sendo cada vez mais utilizado para aperfeiçoar a resistência de produtos laminados. A laminação controlada consiste na utilização de temperaturas de laminação abaixo da temperatura de não recristalização da austenita. Nesse caso, a grande quantidade de deformação aplicada na



região de não recristalização implica numa maior densidade de defeitos cristalinos (contornos de grão e subgrão, bandas de deformação) que atuam como sítios de nucleação para a ferrita pró-eutetóide, refinando o tamanho de grão (17).

A adição de elementos microligantes (Nb, V, Ti) elevam a temperatura de não recristalização ( $T_{nr}$ ). A acumulação da deformação acontece quando a austenita é deformada a uma temperatura baixa o suficiente para produzir a precipitação induzida por deformação, que inibe a recristalização.

O nióbio é o mais efetivo no aumento da temperatura de não recristalização (conforme a figura 5), devido à precipitação induzida por deformação ocorrer nas temperaturas de laminação (17).

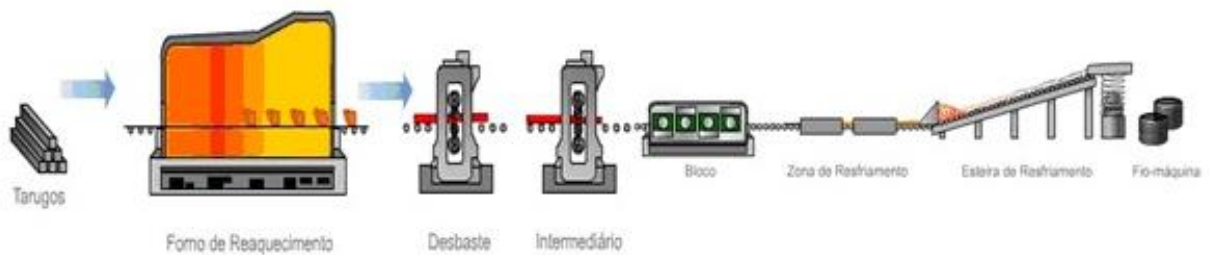
## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 Considerações iniciais

Este trabalho teve como motivação a obtenção de um aço microligado ao nióbio SAE 1312 MOD laminado em fio máquina redondo na Gerdau Aços Especiais Piratini que atenda as propriedades prévias para aplicação em parafusos da classe 8.8 segundo a ISO 898-1.

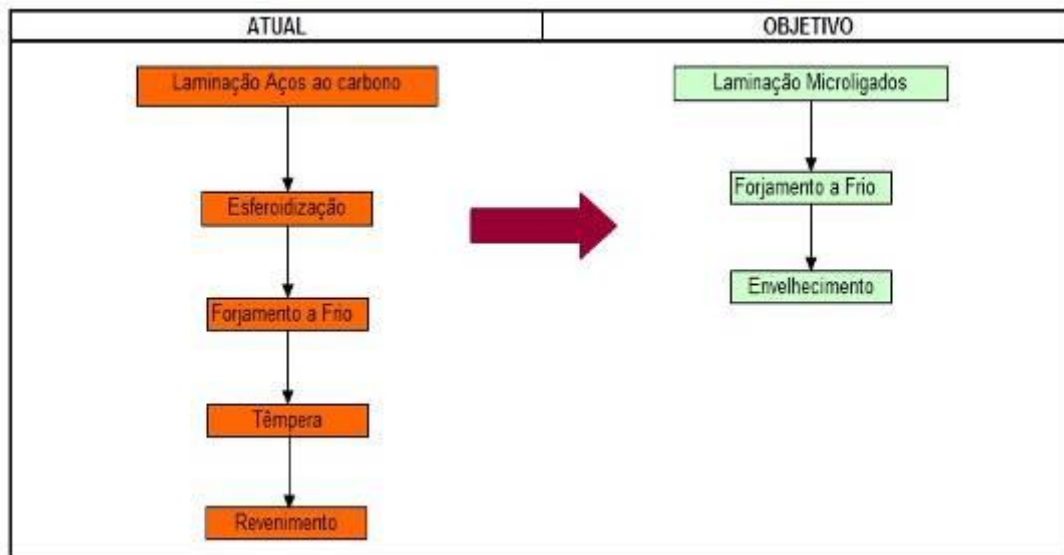
A obtenção de fio máquina é realizada através do processo de conformação mecânica de laminação de tarugos em formato de fio com seção redonda. O processo inicia com o reaquecimento dos tarugos em altas temperaturas, para adquirir plasticidade suficiente para serem laminados com a utilização de cilindros de ferro fundido.

O fio máquina é o material de partida para uma série de produtos, incluindo arames, pregos e os parafusos do setor automotivo. A figura 11 (19) apresenta uma representação esquemática da laminação de fio máquina redondo na Gerdau Aços Especiais Piratini.



**Figura 11 - Representação esquemática da laminação de fio máquina redondo na Gerdau Aços Especiais Piratini (19).**

O foco deste trabalho é verificar a influência do resfriamento controlado no Cooling Conveyor nas propriedades do fio máquina laminado com o objetivo de eliminar os tratamentos térmicos posteriores, conforme figura 12, substituindo o beneficiamento das peças por um tratamento de envelhecimento, caso necessário.



**Figura 12 - Comparação entre os processos de fabricação de parafusos de alta resistência.**

A eliminação dos tratamentos térmicos do fio máquina no processo tradicional para aplicação em parafusos trará uma série de benefícios para a empresa, tais como, eliminação dos custos de tratamento térmico, diminuição no tempo de fabricação do material e disponibilidade dos fornos para tratamento de outros materiais.

O processo de verificação da influência do resfriamento nas propriedades do fio máquina contou com a realização de alguns experimentos, onde foram avaliadas as propriedades mecânicas e a qualidade superficial do material.

## 4.2 Material

O estudo deste trabalho foi realizado no aço microligado ao nióbio SAE 1312 MOD laminado em fio máquina redondo na bitola de 12,70mm na Gerdau Aços Especiais Piratini. A tabela 2 apresenta a composição química desenvolvida para este trabalho.

**Tabela 2 - Composição química do aço SAE 1312 MOD**

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Al	Cu	N
Mín	0,09	1,65	0,15						0,03	0,025	0,02		
Máx	0,14	1,85	0,35	0,025	0,025	0,25	0,25	0,06	0,04	0,04	0,035	0,35	0,1

### 4.3 Laminação de Fio Máquina na Gerdau Aços Especiais Piratini

A laminação de fio máquina na Gerdau Aços Especiais Piratini é realizada no laminador 2 que possui uma configuração combinada entre um arranjo aberto e um arranjo contínuo. A figura 13 (20) apresenta uma representação esquemática desta combinação de arranjos.



Figura 13 - Representação esquemática do laminador 2 da Gerdau Aços Especiais Piratini (20).

#### 4.3.1 Forno de reaquecimento

O objetivo do reaquecimento dos tarugos é obter a homogeneidade de temperaturas entre o núcleo e a superfície da peça para facilitar a deformação durante a laminação. O forno de reaquecimento de tarugos do laminador 2 da Gerdau AEP utiliza gás natural como combustível e o movimento dos tarugos no interior do forno é feito através de soleiras móveis.

O interior do forno possui três zonas de aquecimento: pré-aquecimento, aquecimento e encharque. Esta última zona trabalha com uma variação de temperatura semelhante à segunda zona de aquecimento, o que garante a homogeneidade da temperatura na superfície do tarugo e no seu interior. As temperaturas são ajustadas de forma gradual e são controladas com a utilização de padrões definidos de aquecimento ao longo das três zonas para evitar o aquecimento brusco do tarugo (principalmente na primeira zona), evitando o aparecimento de defeitos no material.

Devido às altas temperaturas de reaquecimentos dos tarugos, ocorre a formação de carepa na superfície do material. A carepa é um co-produto oriundo da oxidação da superfície do aço, quando submetido ao gradiente térmico, ao meio corrosivo ou à simples ação do

tempo. No ramo siderúrgico, provém, basicamente, das operações unitárias de lingotamento contínuo e laminação.

Tais resíduos são óxidos de ferro constituídos, principalmente, por wustita ( $\text{FeO}$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Na saída da gaiola de desbaste é utilizado um descarepador para retirar a carepa da superfície dos tarugos através de jateamento de água a altas pressões, garantindo que os defeitos (incrustações e fragmentação em partículas menores ao longo da superfície da barra) provocados pela carepa não ocorram.

### 4.3.2 Desbaste

A etapa de conformação é definida por três diferentes denominações: Desbaste, trem intermediário e trem acabador. Estas três etapas se diferenciam pelas reduções aplicadas durante a conformação. O desbaste para a laminação ocorre com o objetivo de reduzir inicialmente a seção do material. Neste estágio se deseja desmanchar a estrutura bruta de fusão, então as reduções nos passes não devem ser excessivas, já que a estrutura periférica do tarugo pode fragilizar na conformação. O objetivo é causar reduções controladas na seção do tarugo para que no trem intermediário ocorram as reduções maiores.

A figura 14 (20) apresenta a gaiola desbastadora, que funciona com uma configuração de três cilindros laminadores (Gaiola Trio) dispostos horizontalmente. O material não se encontra em dutos fechados, sendo este o único momento em que o laminador é classificado como aberto.



**Figura 14 - Gaiola trio do laminador 2 da Gerdau AEP de arranjo aberto (20).**

### 4.3.3 Trem Intermediário

Já na segunda etapa de conformação, o trem 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.

O trem intermediário possui gaiolas de laminação com cilindros no formato horizontal e vertical intercalados e em alguns pontos são utilizadas caixas de resfriamento. A figura 15 (20) apresenta o trem intermediário contínuo em linha no laminador 2 da Gerdau AEP. O objetivo das caixas de resfriamento, como parte da laminação termomecânica, é dissipar parte do calor do material de forma a reduzir sua temperatura a um nível ideal para laminação, já que o processo de conformação gera energia interna no material elevando sua temperatura.



Figura 15 - Trem intermediário de laminação contínuo da Gerdau AEP (20).

### 4.3.4 Trem acabador

Durante a última etapa de conformação, o trem 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.

O trem acabador da laminação 2 da Gerdau AEP é composto por gaiolas de laminação que operam com dois discos de metal duro cada, produzindo bitolas com ajuste fino de precisão. Para conduzir a barra do trem intermediário até o trem acabador são utilizadas

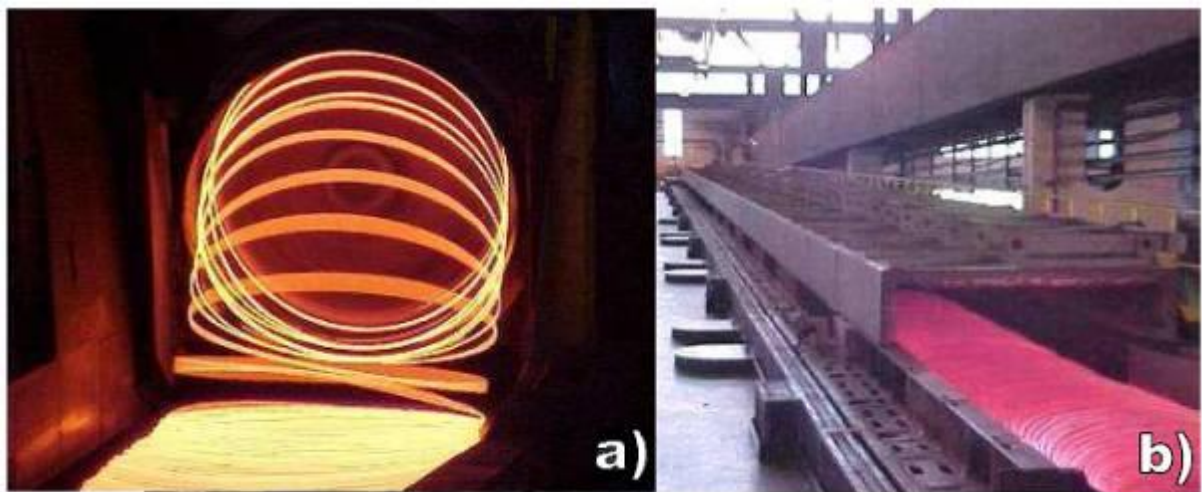
buchas e caixas roletadas, que vão guiando o material sem permitir a rotação dentro do canal ou desvio de trajetória.

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.

#### 4.3.5 Cooling Conveyor (Transportador de espiras)

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. Esta última etapa do processo de laminação acontece no transportador de espiras.

O Cooling Conveyor (transportador de espiras - figura 16 (20)) é um equipamento de 49 metros de comprimento integrante do Laminador 2 da Gerdau AEP, 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 16 - a) Formador de espiras e b) Transportador de espiras da Gerdau AEP (20).**

Com o auxílio deste equipamento é possível aplicar diferentes condições 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.

#### 4.4 Diagrama de Resfriamento Contínuo – CCT

Para avaliar a influência do resfriamento nas propriedades mecânicas e na microestrutura do material foi realizada uma simulação termomecânica em simulador físico da marca Gleeble 3500. A curva CCT para o aço microligado ao nióbio SAE 1312 MOD obtida na Gerdau Aços Especiais Piratini é apresentada na figura 17.

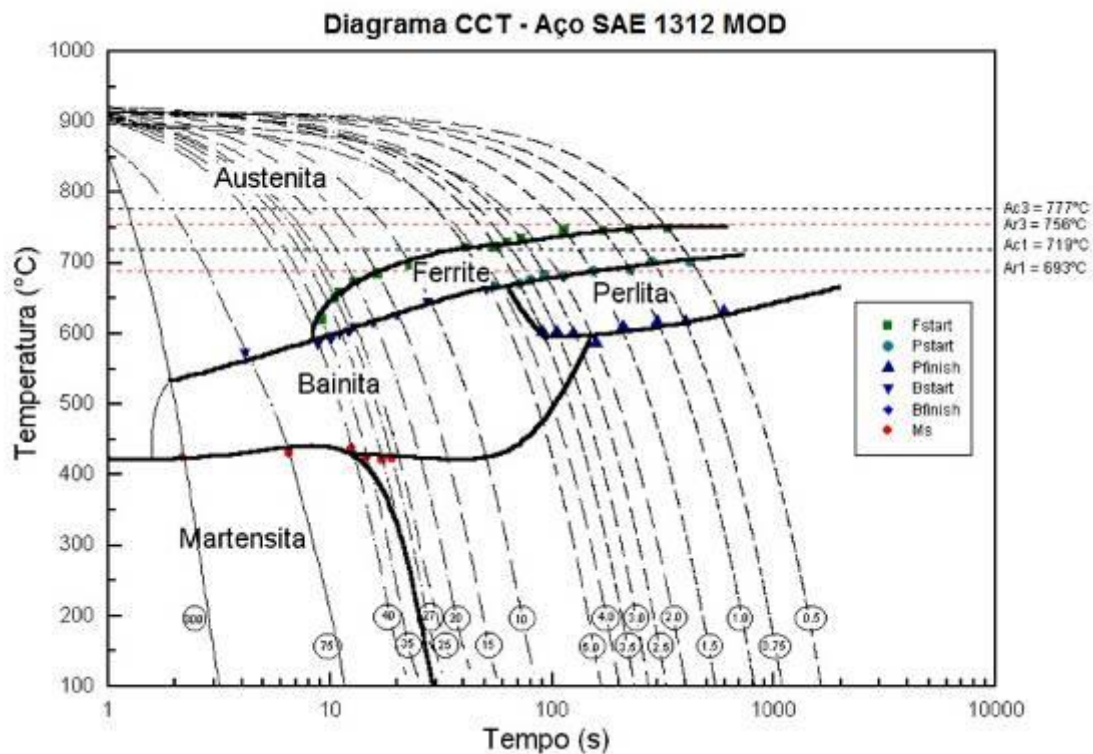


Figura 17 - Diagrama CCT do aço SAE 1312 MOD obtido por simulação termomecânica (Gleeble) na Gerdau Aços Especiais Piratini.

A curva foi obtida após normalização e usinagem dos corpos de prova. A simulação consiste em elevação à temperatura superior a de austenitização e posterior resfriamento em taxas que variam de 0,5 a 40°C. Segundo a curva, percebe-se a redução das temperaturas de transformação devido a presença de elementos microligantes e o grande campo bainítico presente, o que exige uma taxa de resfriamento mais lenta para minimizar a presença deste constituinte, para não afetar o processo de trefilação posterior. Porém, a taxa de resfriamento



não pode ser muito baixa, pois pode ocorrer precipitação interfásica, o que afeta diretamente a ductilidade do material.

Com base na curva de resfriamento apresentada na figura 17 foram realizados experimentos para determinar as condições de resfriamento propícias para se atingir as propriedades mecânicas ideais no fio máquina laminado.

## 4.5 Experimentos

Para se avaliar a influência do resfriamento nas propriedades do aço SAE 1312 MOD laminado em fio máquina, foram realizados três experimentos no Cooling Conveyor, aonde o material foi processado em diferentes condições de resfriamento.

O aço utilizado para este trabalho foi fornecido pela Gerdau Aços Especiais Piratini. O processamento deste material envolveu a laminação a quente no laminador 2 conforme padrões internos, respeitando o processamento citado na revisão bibliográfica, seção 3.5.3 e 3.5.4.

A temperatura de entrada no bloco acabador foi mantida constante e em valor baixo com o objetivo de minimizar o tamanho de grão austenítico e garantindo que a transformação da austenita ocorresse totalmente dentro do equipamento, de acordo com a curva CCT apresentada na figura 17.

A tabela 3 apresenta as condições dos três experimentos realizados neste trabalho.

**Tabela 3 - Condições de resfriamento para os experimentos 1, 2 e 3.**

<b>Experimento</b>	<b>Taxa de resfriamento</b>	<b>Velocidade de transporte</b>	<b>Capotas</b>	<b>Ventiladores</b>
1	Alta	20m/min	Abertas	Ligados
2	Média	20m/min	Abertas	Desligados
3	Baixa	20m/min	Fechadas	Desligados

No experimento 1 foi utilizada uma taxa de resfriamento alta, que consiste na utilização de todas as capotas abertas, todos os ventiladores ligados e uma velocidade de transporte das espiras de 20m/min com 5% de incremento de velocidade por segmento.

No experimento 2 foi utilizada uma taxa de resfriamento média, utilizando todas as capotas abertas e todos os ventiladores desligados com uma velocidade de transporte das espiras de 20m/min com 5% de incremento de velocidade por segmento.

No experimento 3 foi utilizada uma taxa de resfriamento baixa, utilizando todas as capotas fechadas e os ventiladores desligados com uma velocidade de transporte das espiras de 20m/min com 5% de incremento de velocidade por segmento.

## 4.6 Retirada de amostras

Para avaliar a influência de cada condição testada nos três experimentos propostos é necessária uma correta amostragem do material em análise. A amostragem realizada neste trabalho é demonstrada na figura 18, que também apresenta o perfil térmico durante o resfriamento das espiras do fio máquina no Cooling Conveyor.

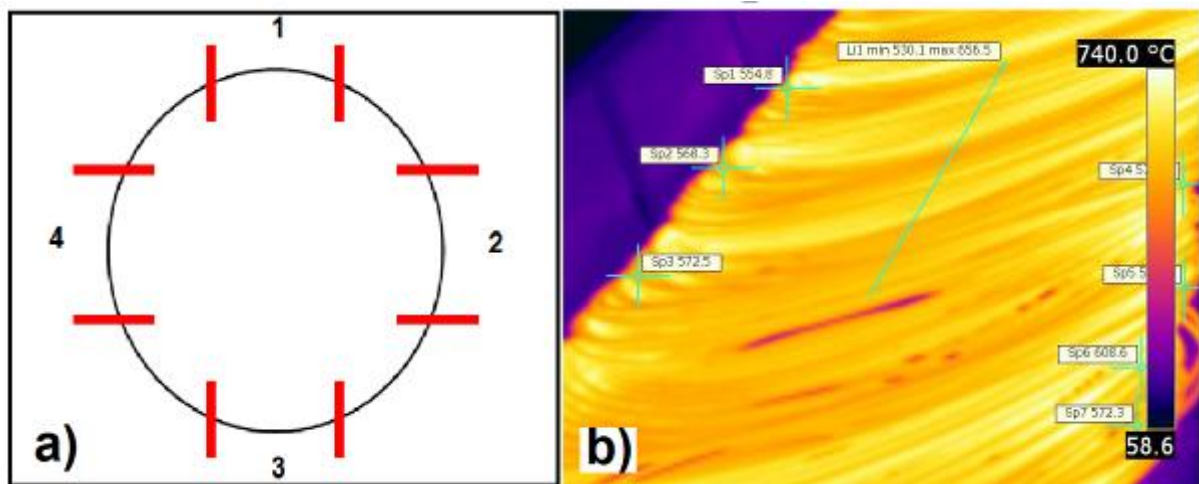


Figura 18 - a) Representação esquemática da amostragem do fio máquina b) Perfil térmico do fio máquina durante o resfriamento no Cooling Conveyor.

Foram retiradas quatro amostras (400mm) de uma mesma espira do meio de cada rolo em cada experimento, em um total de 12 amostras para os três experimentos desenvolvidos. Para inspeção visual e por partículas magnéticas foi retirada uma amostra de 300mm de cada rolo dos três experimentos. Todas as amostras foram retiradas após o Cooling Conveyor.

## 4.7 Métodos de caracterização e análises

### 4.7.1 Ductilidade a quente

Para realização deste ensaio foi utilizado o simulador físico Gleeble 3500 na condição de menor taxa de deformação no laminador. As amostras foram submetidas à deformação em temperaturas entre 800 e 1250°C.

#### **4.7.2 Inspeção por correntes parasitas**

Foi realizada inspeção durante o processo dos materiais utilizando o método de correntes parasitas induzidas no fio máquina durante o processo de laminação. O aparelho gera um campo magnético induzido através das correntes parasitas, que ao ser perturbado pela presença de defeitos superficiais no material, produz uma indicação em formato gráfico.

Este sistema de inspeção online é posicionado após o bloco acabador e antes do Cooling Conveyor.

#### **4.7.3 Inspeção visual e partículas magnéticas**

As amostras retiradas para inspeção visual foram inspecionadas em lupa com aumento de 10 vezes e após foram inspecionadas com auxílio de partículas magnéticas.

#### **4.7.4 Tamanho de grão**

A determinação do tamanho de grão austenítico foi realizada utilizando o método planimétrico e a norma ASTM E112. A análise foi realizada inicialmente com o tratamento térmico das amostras em forno do tipo mufla à aproximadamente 920°C. As amostras foram lixadas, polidas e após sofreram um processo de oxidação para salientar os contornos de grão.

#### **4.7.5 Dureza**

Foram realizadas medidas de dureza Brinell em todas as amostras em Durômetro Wolpert DIA Testor 2N, com carga de 187,5 kg e indentador esférico de 2,5mm de diâmetro.

#### **4.7.6 Profundidade de descarbonetação**

Para determinar a profundidade da camada descarbonetada das amostras as amostras foram embutidas, lixadas e polidas com pasta de diamante (granulometria de 1µm) com posterior ataque de solução de Nital (2%). As imagens foram realizadas em Microscópio Óptico Olympus modelo BX60.

#### **4.7.7 Microestrutura**

Para o ensaio de microestrutura as amostras foram embutidas, lixadas e polidas com pasta de diamante (granulometria de  $1\mu\text{m}$ ) com posterior ataque de solução de Nital (2%). As imagens foram realizadas em Microscópio Óptico Olympus modelo BX60.

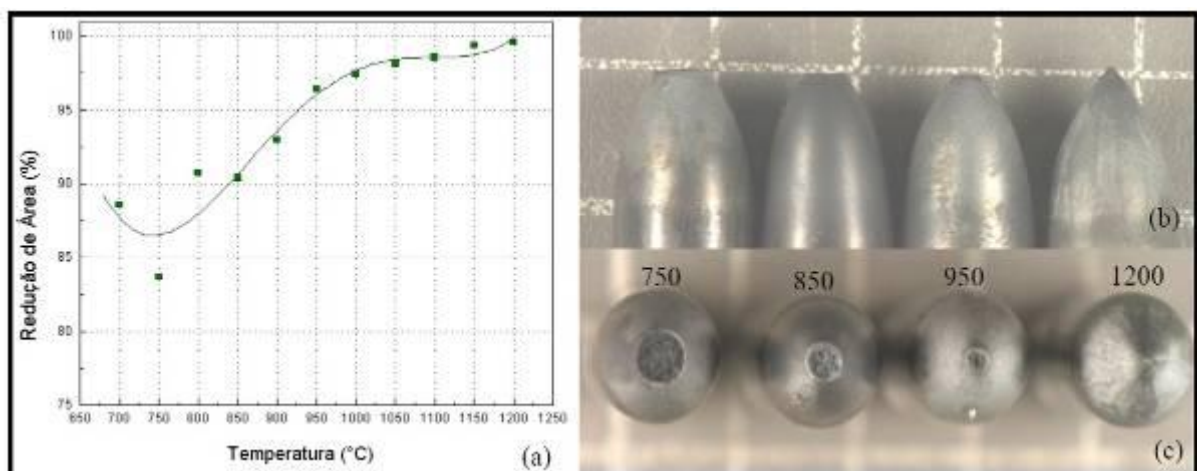
#### **4.7.8 Ensaio de tração**

Para determinação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de limite de resistência, limite de escoamento, redução de área e alongamento na máquina de ensaios Instron 4493.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ductilidade a quente

A figura 19(a) apresenta a curva de ductilidade a quente em forma de redução de área versus temperatura, é possível perceber que a ductilidade apresenta valores adequados em todo o intervalo de temperaturas utilizado na laminação termomecânica do material. Na figura 19(b) e (c) são apresentadas as amostras utilizadas no ensaio, percebe-se o aumento da ductilidade com o aumento da temperatura e a região de fratura do material.



**Figura 19 - a) Ductilidade a quente (redução de área) sob deformação no intervalo de temperaturas de laminação do aço SAE 1312 MOD. (b) e (c) Amostras utilizadas no ensaio e perfil de fratura dos materiais nas temperaturas de 750, 850, 950 e 1200°C.**

### 5.2 Inspeção por correntes parasitas

A inspeção a quente realizada por correntes parasitas, após o bloco acabador do laminador, foi utilizada para avaliar a qualidade superficial do material laminado. O material laminado nas três condições de resfriamento não apresentou indicação de defeitos em nenhum dos experimentos.

### 5.3 Inspeção visual e por partículas magnéticas

A qualidade superficial do material laminado foi avaliada através da inspeção visual (figura 20(a)) com lupa e com auxílio de partículas magnéticas (figura 20(b)) realizada após o resfriamento no Cooling Conveyor. O material laminado nos três experimentos de resfriamento não apresentou defeitos superficiais ou anormalidades na formatação dos rolos de fio máquina.

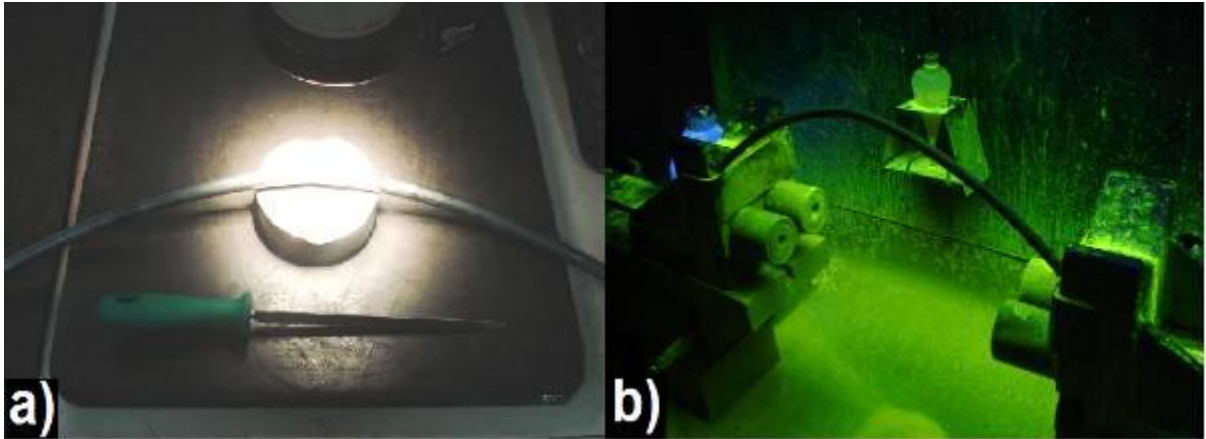


Figura 20 - a) Inspeção visual com lupa (aumento 10x). b) Inspeção visual com auxílio de partículas magnéticas.

### 5.4 Tamanho de grão

A tabela 6 apresenta o tamanho de grão austenítico para os experimentos 1 (alta taxa de resfriamento), 2 (média taxa de resfriamento) e 3 (baixa taxa de resfriamento).

Tabela 4 - Tamanho de grão austenítico (ASTM E112) para os três experimentos.

	Tamanho de grão (ASTM E112)		
Experimento	1	2	3
Tamanho de grão	9	8	8

## 5.5 Dureza

A tabela 5 apresenta os resultados de dureza para os experimentos 1 (alta taxa de resfriamento), 2 (média taxa de resfriamento) e 3 (baixa taxa de resfriamento).

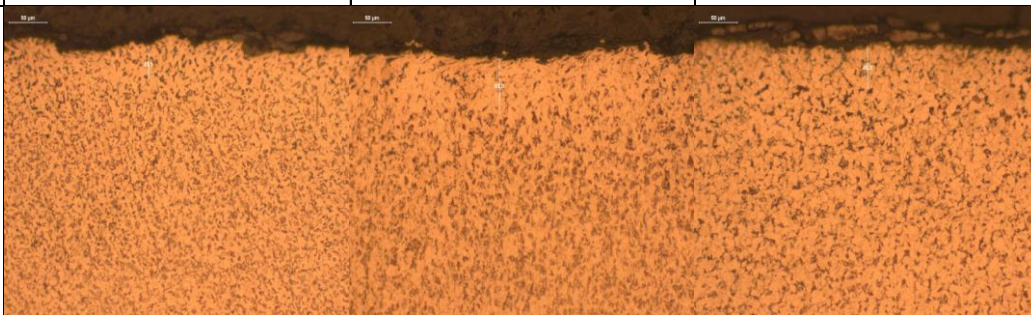
**Tabela 5 - Resumo dos resultados de dureza Brinell (HB) para os três experimentos.**

	Dureza Brinell (HB)		
Experimento	1	2	3
Média	205	180	192
Desvio padrão	3,14	2,42	3,87

## 5.6 Profundidade de descarbonetação

Os valores de descarbonetação média para o aço laminado nos três experimentos é apresentado na tabela 4.

**Tabela 6 - Resumo dos valores de descarbonetação média para os três experimentos.**

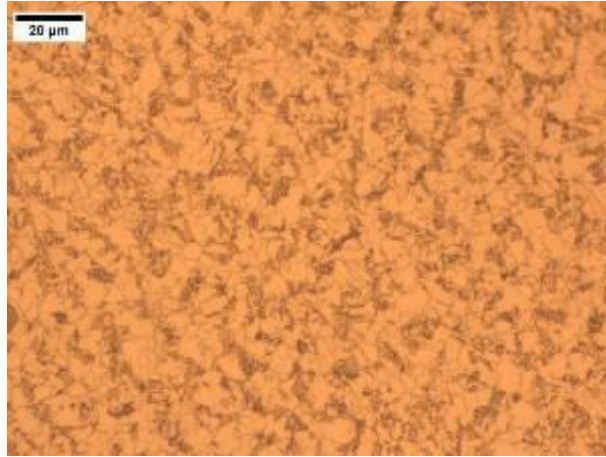
	Profundidade de descarbonetação (mm)		
Experimento	1 (Taxa de resfriamento alta)	2 (Taxa de resfriamento média)	3 (Taxa de resfriamento baixa)
			
Descarbonetação média	0,06	0,04	0,05
Desvio padrão	0,017	0,013	0,012

É possível observar que os valores de descarbonetação média apresentaram pequena variação nos resultados quando comparados às condições de resfriamento testadas no Cooling Conveyor.

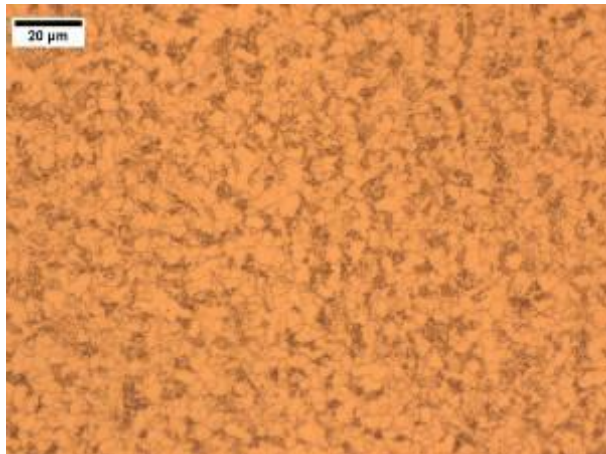


## 5.7 Microestrutura

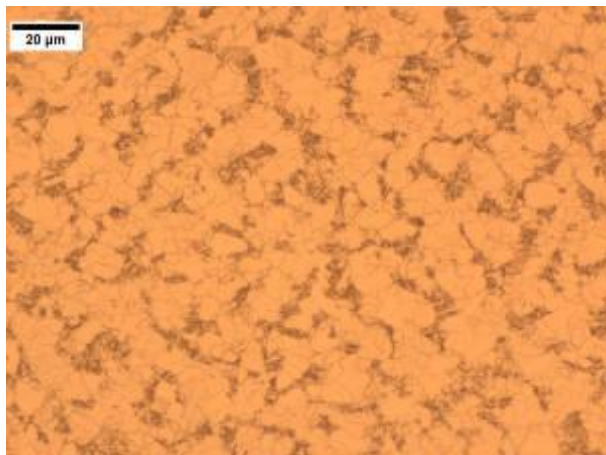
As figuras 21,22 e 23 apresentam as imagens de microestrutura para os experimentos 1 (taxa de resfriamento alta), 2 (taxa de resfriamento média) e 3 (taxa de resfriamento baixa).



**Figura 21 - Microestrutura do experimento 1.**



**Figura 22 - Microestrutura do experimento 2.**



**Figura 23 - Microestrutura do experimento 3.**



Percebe-se pelas figuras 21, 22 e 23 que as alterações nas condições de resfriamento produziram variações na microestrutura das amostras, alterando as propriedades mecânicas do material.

A amostra com taxa de resfriamento alta apresentou uma microestrutura mais refinada e maior presença de bainita em comparação com a amostra da taxa média de resfriamento. A taxa baixa de resfriamento apresentou uma microestrutura mais grosseira e com a presença da fase bainítica reduzida em comparação com as demais.

## 5.8 Ensaio de tração

### 5.8.1 Limite de resistência e escoamento

A figura 24 apresenta os valores dos limites de resistência e de escoamento, respectivamente, para os três experimentos realizados.

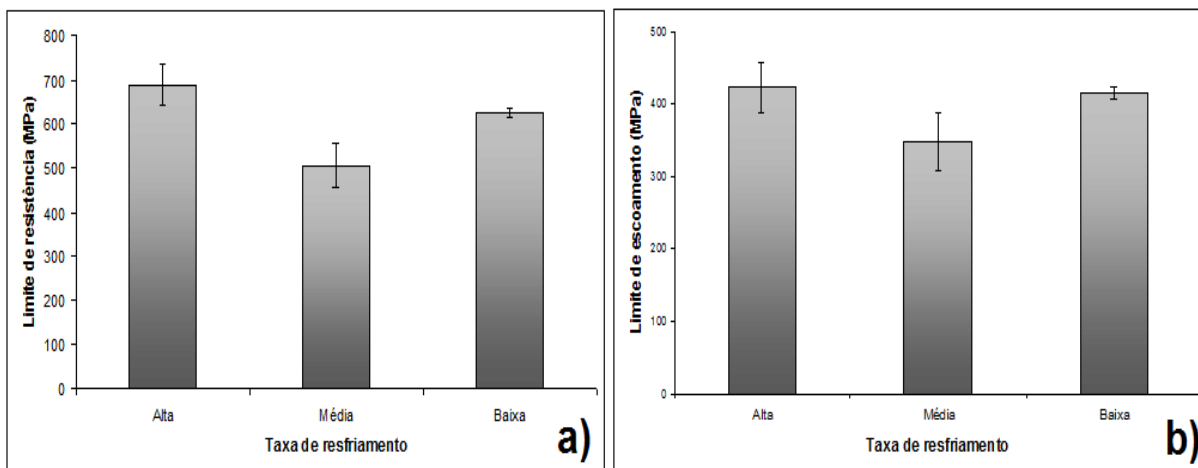


Figura 24 - Propriedades mecânicas do fio máquina SAE1312mod nas diferentes condições testadas: (a) Limite de Resistência e (b) Limite de Escoamento.

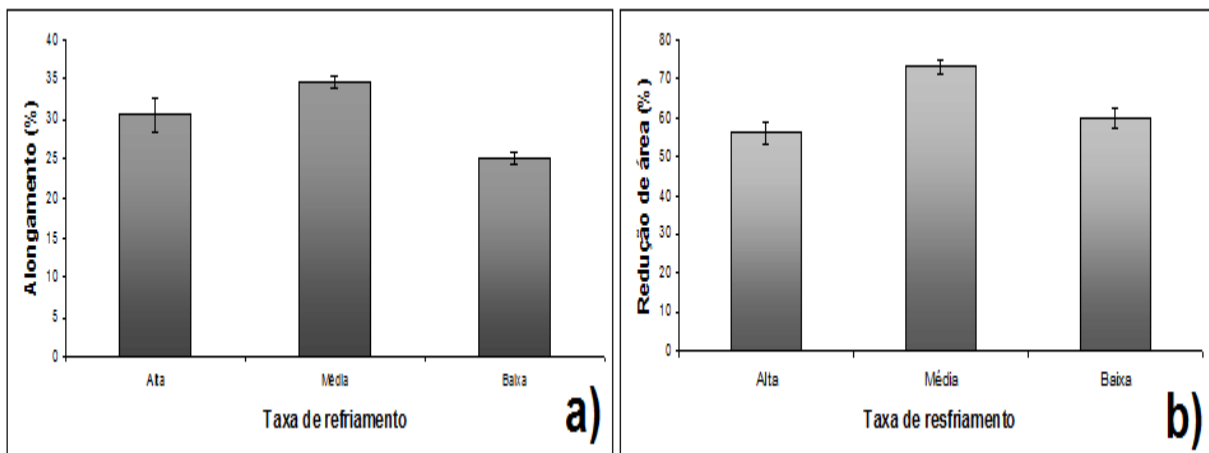
Conforme mostrado na figura 24 os maiores valores de limite de resistência e escoamento foram alcançados utilizando a maior taxa de resfriamento. Os valores destas propriedades mecânicas são diretamente afetados pelo tamanho de grão austenítico, pelo tamanho e morfologia das fases ferrita e perlita e pela atuação dos mecanismos endurecedores de precipitação.

Analisando-se as microestruturas apresentadas nas figuras 21, 22 e 23 e os valores de propriedade mecânica da figura 24, observa-se a diminuição dos valores de resistência e escoamento da condição de maior taxa de resfriamento para a taxa média, devido a um menor

refinamento da microestrutura e pela diminuição da fase bainítica. O aumento da resistência e do escoamento na condição de menor taxa de resfriamento em comparação a taxa média é devido à ocorrência de precipitação interfásica. Percebe-se a presença de uma microestrutura mais grosseira na taxa de resfriamento lenta, em comparação com a taxa média e alta.

### 5.8.2 Alongamento e redução de área

A figura 25 apresenta os valores de ductilidade na forma de alongamento e redução de área, respectivamente, para os três experimentos realizados.



**Figura 25 – Propriedades mecânicas do fio máquina SAE1312mod nas diferentes condições testadas: (a) Alongamento e (b) Redução de área.**

A relação entre limite de resistência e alongamento é bastante coerente, conforme as figura 24 e 25, com o alongamento mais baixo nas amostras de maior limite de resistência.

A norma ISO 898-1 especifica para a classe 8.8 dos parafusos um limite de resistência e de escoamento de 800 e 640 MPa respectivamente, e alongamento de 12%. Para estes resultados, o ponto ótimo ocorre na máxima taxa de resfriamento. Neste ponto, o fio-máquina apresenta os requisitos prévios para aplicação em parafusos da classe 8.8 com limite de resistência próximo a 700 MPa e limite de escoamento entre 425 e 460 MPa.

O incremento necessário nas propriedades será adquirido pelos mecanismos de encruamento (trefilação) e precipitação na ferrita (envelhecimento).

## 6. CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica apresentada e nos resultados dos três experimentos de resfriamento realizados no processo de laminação termomecânica para a liga teste (tabela 2), do aço SAE 1312 modificado ao nióbio, pode-se concluir que:

- Foi possível desenvolver um processo de resfriamento na laminação termomecânica que atendesse as especificações prévias do fio máquina redondo, com aplicação em parafusos da classe 8.8 da ISO 898-1, eliminando o processo de esferoidização no fio máquina e da têmpera nos parafusos (processamento convencional);
- A adição do nióbio não provocou redução da ductilidade para taxas de deformação utilizadas na laminação, possibilitando menores temperaturas de laminação sem fragilização do material e com redução do tamanho de grão;
- A alteração nas condições de resfriamento ocasionou variações na microestrutura dos materiais, alterando os valores das propriedades mecânicas;
- A profundidade da camada descarbonetada não sofreu alteração significativa nas três condições de resfriamento testadas;
- Os melhores resultados que combinam limite de resistência e alongamento ocorrem na maior taxa de resfriamento (experimento 1 – ventiladores ligados e capotas abertas), aonde o fio máquina atinge limite de resistência próximo a 700 MPa e limite de escoamento entre 425 e 460 MPa.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Avaliar a presença, disposição e morfologia dos precipitados utilizando Microscopia eletrônica de transmissão para as diferentes condições de resfriamento realizadas;
- Realizar o processo de trefilação dos materiais estudados e avaliar as propriedades mecânicas do arame;
- Realizar tratamento térmico de envelhecimento das amostras com os melhores valores de propriedade mecânica;
- Intensificar o uso do resfriamento no Cooling Conveyor (transportador de espiras) para a eliminação de tratamento térmicos posteriores;
- Ampliar melhorias obtidas com o trabalho para outros tipos de aço.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GENTILE, F. C. E S. T. BUTTON - Estudo Do Processo De Cross-Wedge Rolling Para A Produção De Eixos Escalonados Com Aços Microligados; Trabalho apresentado no XXI Senafor, 23 e 24/10/2001, Gramado, RS.
- (2) WOODHEAD, J. H. e KEOWN, S. R.; Em HSLA Steels: Metallurgy and Applications; ASM International, Beijing; China; p. 15; 1985.
- (3) DEARDO, A. J.; Em 8th Process Technology Conference Proceeding, Iron and Steel Society, Warrendale; p.67; 1988.
- (4) PALMIERE, E. J.; Precipitation Phenomena in Microalloyed Steels.; Metal. Trans.; V7a; p.915- 923; 1976.
- (5) CUDDY, L. J.; Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite. Eds. A. J. DeArdo, G. A. Ratz and P. J. Wray; AIME; Warrendale; p. 129; 1982.
- (6) ALBIERO, W. Metalurgia ABM. v.37, n.281, p.192, 1981.
- (7) DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2a Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981. p.166.
- (8) PICKERING, F. B. Physical Metallurgical and The Design of Steels. 1a Ed. Essex: Applied Science Publishers Ltd., London, 1978. 275p.
- (9) CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução. 5a Ed. Rio de Janeiro: editora LTC, 2002. p.116.
- (10) ENGL, B. Cold Rolled HSLA Sheet and Strip Products. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM NIOBIUM 2001, Orlando. Proceedings. Niobium Science & Technology. Bridgeville: The minerals, Metals & Materials Society – TMS, 2001. p.675-698.
- (11) LESLIE, W. C. The physical metallurgy of steels. Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1982. p.396
- (12) MATLOCK, D.; Speer, J. Microalloying concepts and application in long products – 2008. Materials Science and Technology, 2009.
- (13) TITHER, G. Niobium in Steel Casting and Forgings.
- (14) GLADMAN, T. The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels. The Institute of Materials, London, UK, 1997.
- (15) EDMONDS, D.V. Precipitation in Microalloyed Higher Carbon Steels. Fundamentals and Application of Microalloying Forging Steels. The Minerals, Metals and Materials Society, 1996, p.111
- (16) BORATTO, F. Fundamentos de laminação controlada. São Paulo, ABM, 1989. 425p.

- (17) SANTOS, R. J. Desenvolvimento de aços microligados para parafusos. Tese de mestrado. UFMG. 1990.
- (18) ISO. Mechanical properties of fasteners; part 1: bolts, screws and studs. ISO 898-1. 2 ed. Switzerland, 1988.
- (19) Laminação, Relatório Interno Gerdau, número 503, 2007.
- (20) PLENTZ, R. S. Otimização do processo de resfriamento do aço mola SAE 9254 durante a laminação. Tese de mestrado. UFRGS, 2009.