

# O EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE REVENIMENTO EM CHAPAS GROSSAS SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS MARTENSÍTICOS DE BAIXO TEOR DE CARBONO <sup>1</sup>

*Marcos Roberto Fernandes Noro*<sup>2</sup>

*Kenji Camey*<sup>3</sup>

*José Fernando Pacheco*<sup>4</sup>

*Luiz Carlos Sousa Rebelo*<sup>5</sup>

*Paulo Sérgio R. de Paula*<sup>6</sup>

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico de revenimento em chapas grossas sobre as propriedades mecânicas de aços martensíticos de baixo teor de carbono, para fornecimento conforme os requisitos da norma ASTM A514 H. A filosofia adotada no desenvolvimento teve início através da produção de um lote experimental, utilizando os parâmetros no processamento de chapas na qualidade ASTM A514 B. Nenhum dos parâmetros de processo utilizado no tratamento térmico de têmpera e revenimento de chapas grossas foi alterado, de forma a conhecer o desempenho do produto conforme parâmetros técnicos existentes. Posteriormente, baseados em conceitos da literatura pertinente e comparando-os com os dados obtidos no lote experimental, buscou-se a otimização das propriedades do produto, alterando a temperatura de revenimento, visando a produção em escala industrial. Pode-se afirmar que a alteração no processo de tratamento térmico de revenimento foi fundamental para a melhoria e uniformidade nas propriedades mecânicas consolidando a reprodutibilidade e o controle do processo, garantindo assim o fornecimento junto ao mercado internacional e fortalecendo a imagem da empresa no contexto siderúrgico mundial.

**Palavras Chave:** Tratamento térmico; Chapas grossas; Tempera; Revenido.

## **EFFECT OF TEMPERING HEAT TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF PLATES MADE OF LOW CARBON MARTENSITIC STEEL**

### **Abstract**

This study aims to evaluate the effect of tempering heat treatment on heavy plates, specifically on the mechanical properties of martensitic low carbon steels to meet ASTM A514 H specifications. No process parameters of the quenching and tempering heat treatment were changed. The results were compared with the information got from a literature review in order to optimize product performance. It was decided to lower the tempering temperature from the results of this review. It is possible to conclude that the temperature change was fundamental to improve the uniformity of mechanical properties, consolidating process stability and process control, thus strengthening the company image in global market.

**Key words:** Heat treating; Heavy plates; Quenched; Tempering.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista; Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente; COSIPA, Cubatão/ SP.*

<sup>3</sup> *Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, Ph.D.*

<sup>4</sup> *Técnico em Metalurgia; Assistente de Operação da Gerência de Acabamento do Chapas Grossas; COSIPA, Cubatão/ SP.*

<sup>5</sup> *Técnico em Metalurgia; Assistente de Produto da Gerência de Qualidade; COSIPA, Cubatão/ SP.*

<sup>6</sup> *Técnico em Metalurgia; Assistente de Produto da Gerência de Controle Integrado; COSIPA, Cubatão/ SP.*

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tratamento Térmico

É de domínio geral que as propriedades mecânicas dos aços são controladas pela sua microestrutura. Na maioria dos casos, a exigência básica de um aço é a obtenção de uma alta resistência mecânica aliada a uma boa tenacidade. Estas propriedades são decorrentes do controle de sua microestrutura e muitas vezes alcançadas através da realização de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento.

O objetivo do trabalho é avaliar o efeito do tratamento térmico de revenimento em chapas grossas sobre as propriedades mecânicas de aços martensíticos de baixo teor de carbono, para fornecimento conforme os requisitos da norma ASTM A514 H.<sup>(1)</sup>

Inicialmente foi produzido um lote experimental de chapas grossas classe ASTM A 514 H, utilizando os mesmos parâmetros de produção de chapas grossas na qualidade ASTM A 514 B.

Posteriormente, baseado em conceitos e informações da literatura e comparando com os resultados de propriedades mecânicas obtidas neste lote experimental, tem-se por objetivo a otimização das propriedades mecânicas de chapas grossas, alterando as variáveis de processo do tratamento térmico de têmpera e revenimento, para então, aplicar estes novos parâmetros à produção em escala industrial.

O desenvolvimento deste trabalho irá contribuir para que a empresa aumente o seu mix de produtos, garantindo o fornecimento junto ao mercado internacional de chapas grossas na classe ASTM A 514 H. Até o momento a empresa fornece neste mercado na qualidade ASTM A514 B, onde a espessura do produto é limitada a 31,75 mm. O fornecimento de acordo com a norma ASTM A 514 H torna possível a comercialização deste produto com espessuras até 50,80 mm.

O produto chapas grossas em estudo é um material estrutural utilizado na construção civil, pontes e navios; possui um alto valor agregado, tornando atrativo seu fornecimento, atendendo as necessidades dos nossos clientes e fortalecendo a imagem da empresa no contexto siderúrgico mundial.

## 1.2 O Processo de Produção de Chapas Grossas – Tratamento Térmico.

O procedimento de fabricação na área de Laminação a Quente de Chapas Grossas da COSIPA inicia-se no reaquecimento das placas no forno “Walking Beam” que são laminadas, posteriormente, no laminador quadro reversível tipo 4HI.

Estas chapas após os processamentos na Linha de Acabamento de Chapas Grossas são direcionadas para a Linha de Tratamento Térmico, onde primeiramente são submetidas ao jateamento por granalhas de aço para remoção da oxidação superficial. Em seguida, são aquecidas até a temperatura de austenitização em forno de tubos radiantes com atmosfera controlada por nitrogênio, evitando assim a descarbonetação e os demais inconvenientes causados pela oxidação. As chapas austenitizadas passam através da máquina de têmpera onde são temperadas. A máquina de têmpera consiste essencialmente de uma zona de alta têmpera e uma zona de baixa têmpera onde a chapa é submetida a resfriamento através de chuveiros, até a temperatura ambiente.

Após a têmpera, as chapas são submetidas ao tratamento de revenimento, onde a temperatura e o tempo de tratamento são definidos em função das propriedades mecânicas desejadas.<sup>(2)</sup>

A Figura 1 ilustra o fluxo de processo na produção de chapas grossas tratadas termicamente.

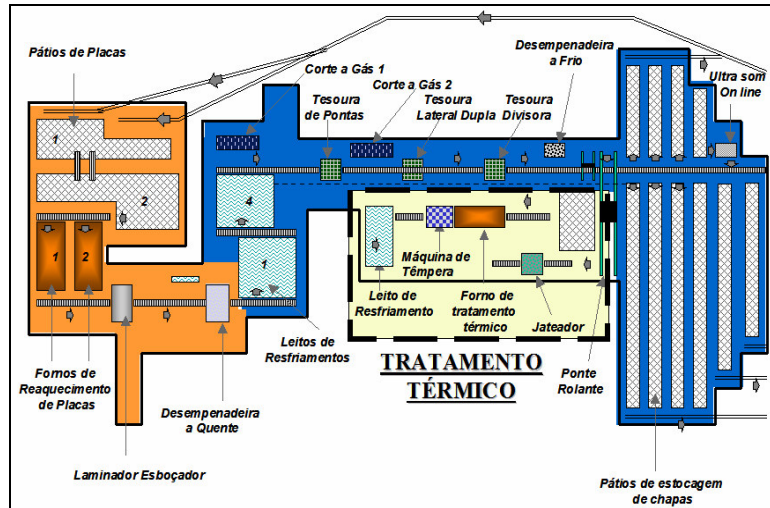


Figura 1: Processo de Produção de Chapas Grossas – Tratamento Térmico.

### 1.3 Revenimento

#### 1.3.1 O processo de revenimento

O revenimento é um tratamento subsequente à têmpera, através do qual se procura provocar um melhor balanceamento entre dureza e resistência a esforços bruscos do material temperado.

O revenido consiste no reaquecimento dos aços temperados em temperaturas inferiores à zona crítica ( $723^{\circ}\text{C}$ ), permanência nestas temperaturas por determinado tempo e posterior resfriamento ao ar.

Os objetivos principais deste tratamento são a tenacificação da estrutura martensítica por precipitação de carbonetos, diminuir a dureza superficial, diminuir a fragilidade, diminuir a heterogeneidade estrutural e aliviar as tensões.

O alívio de tensões e a recuperação da ductilidade são alcançados através da precipitação e coalescimento dos carbonetos, decorrente da difusão do carbono, processo termicamente ativado e dependente da temperatura de revenimento.

Na Figura 2 o diagrama esquemático do processo de transformação de têmpera e revenido.

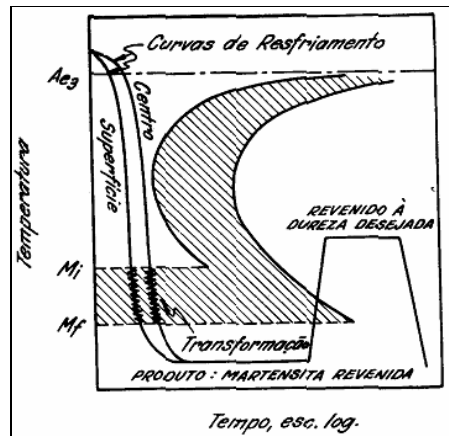


Figura 2: Diagrama esquemático de transformação de têmpera e revenido.<sup>(2)</sup>

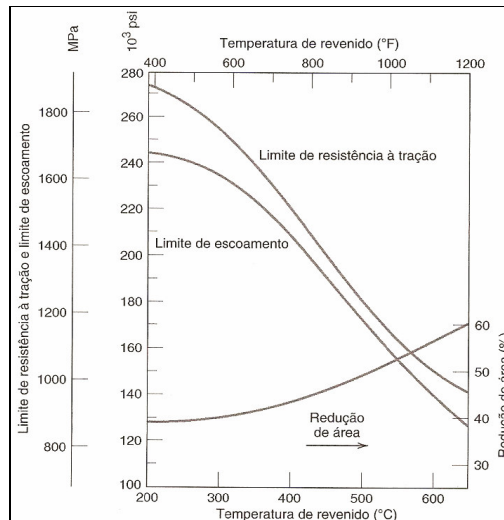
### 1.3.2 Relação entre tempo, temperatura de revenimento, microestrutura e propriedade mecânica

O revenimento pode ser considerado como uma transformação de fases promovida pela difusão, de um estado metaestável (martensita) para o estado de equilíbrio constituído de ferrita e carbonetos. Com o aumento do tempo, a dureza diminui, o que corresponde ao crescimento e a coalescência das partículas de cementita. Em temperaturas próximas da temperatura eutetóide [700°C (1.300°F)] e após várias horas a microestrutura terá se transformado em cementita globulizada, com grandes esferóides de cementita precipitadas no interior da fase contínua ferrita. De maneira correspondente, a martensita com excesso de revenido é relativamente macia e dúctil.

A dureza e a resistência mecânica dependem, em parte, do elevado número de contornos e interfaces na microestrutura, medidos pela quantidade de área de contornos ou interfaces por unidade de volume que existe entre as fases ferrita e cementita, para as numerosas e muito finas partículas de cementita. A fase cementita, dura, reforça a matriz de ferrita ao longo dos contornos, e esses contornos também atuam como barreiras ao movimento das discordâncias durante a deformação plástica. A fase ferrita, contínua, também é muito dúctil e relativamente tenaz, o que corresponde para a melhoria nessas duas propriedades para a martensita revenida.

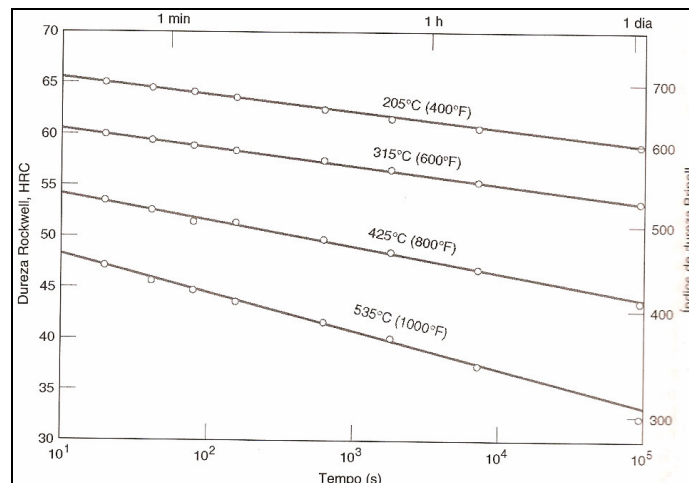
O tamanho das partículas de cementita influencia o comportamento mecânico da martensita revenida; o aumento no tamanho das partículas diminui a área de contornos entre as fases ferrita e cementita e, conseqüentemente, resulta em um material mais mole e menos resistente, mais tenaz e mais dúctil.

O tratamento térmico de revenimento determina o tamanho das partículas de cementita em função das variáveis de processo que são a temperatura e o tempo. Uma vez que a difusão do carbono está envolvida na transformação da martensita em martensita revenida, o aumento da temperatura irá acelerar o processo da difusão, a taxa de crescimento das partículas de cementita, subseqüentemente, a taxa de amolecimento. A dependência do limite de resistência à tração e do limite de escoamento, bem como da ductilidade, em relação à temperatura de revenido para um aço-liga está mostrada na Figura 3.



**Figura 3:** Os limites de resistência à tração e de escoamento e à ductilidade (%RA) em função da temperatura de revenimento para um aço-liga (tipo 4340) temperado em óleo (Adaptado da figura fornecida por cortesia da Republic Steel Corporation).<sup>(3)</sup>

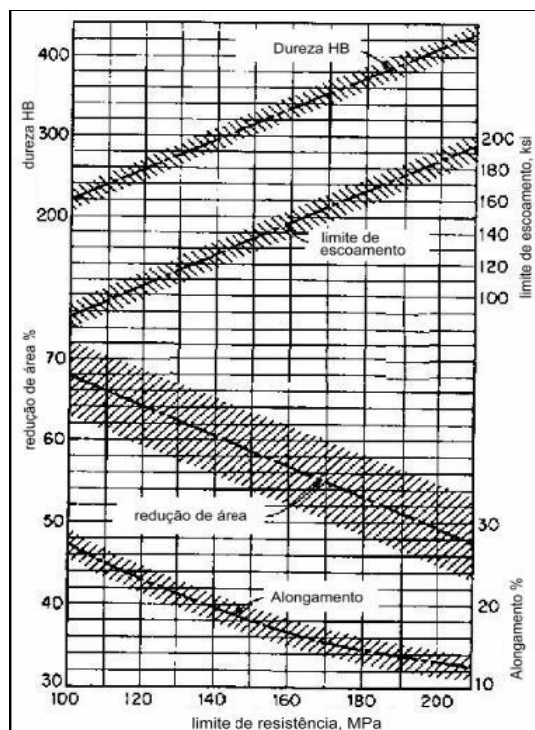
A dependência da dureza em relação ao tempo para um aço com composição eutetóide temperado em água está apresentada na Figura 4 para diferentes temperaturas. Com o aumento do tempo, a dureza diminui o que corresponde ao crescimento e a coalescência das partículas de cementita.



**Figura 4:** A dureza em função do tempo de revenimento para um aço comum ao carbono (1080) com composição eutetóide que foi temperado em água.<sup>(3)</sup>

A Figura 5 mostra a correlação existente entre as propriedades mecânicas de um aço após o tratamento térmico de têmpera e revenimento.

Em vista do exposto, percebe-se que a temperatura de revenimento pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.<sup>(4-7)</sup>



**Figura 5:** Relação entre dureza e propriedades de tração de aços após tratamento térmico de têmpera e revenimento.<sup>(7)</sup>

### 1.3.3 Transformações que ocorrem durante o revenido dos aços

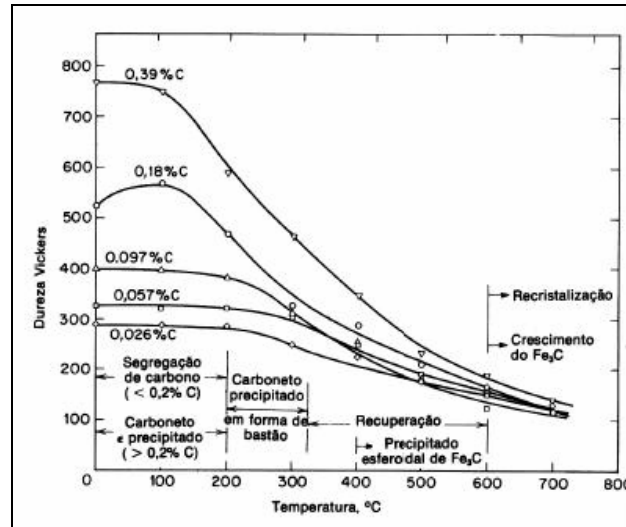
Conforme a temperatura de revenido verifica-se as seguintes transformações:<sup>(8,9)</sup>

- entre 25°C e 100°C, ocorre segregação ou redistribuição do carbono em direção as discordâncias; essa pequena segregação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono;
- entre 100°C e 250°C, às vezes chamado de 1° estágio do revenido, ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo epsilon, de fórmula  $Fe_{2-3}C$ , e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor de elementos de liga; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60 HRC;
- entre 200°C e 300°C, às vezes chamado de 2° estágio do revenido, ocorre transformação de austenita retida e a dureza Rockwell continua a cair.
- entre 250° e 350°C, o 3° estágio do revenido, ocorre precipitação da cementita  $Fe_3C$  em forma de bastões e filmes contínuas nos contornos de agulhas e plaquetas de martensita;
- entre 400°C e 600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordâncias; os bastões de  $Fe_3C$  sofrem esferoidização se tornando esferoidal, a estrutura de ferrita acicular é ainda mantida, a dureza Rockwell cai para valores variando de 45 HCR a 25 HCR;
- entre 500°C e 600°C, somente nos aços contendo titânio (Ti), cromo (Cr), molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb) ou tungstênio (W), há precipitação de carbonetos de elementos de liga; a transformação é chamada de 4° estágio do revenido e leva em certos aços ao “endurecimento secundário”.

Finalmente, entre 600°C e 700°C, ocorrem recristalização e crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta a forma nitidamente esferoidal; a ferrita

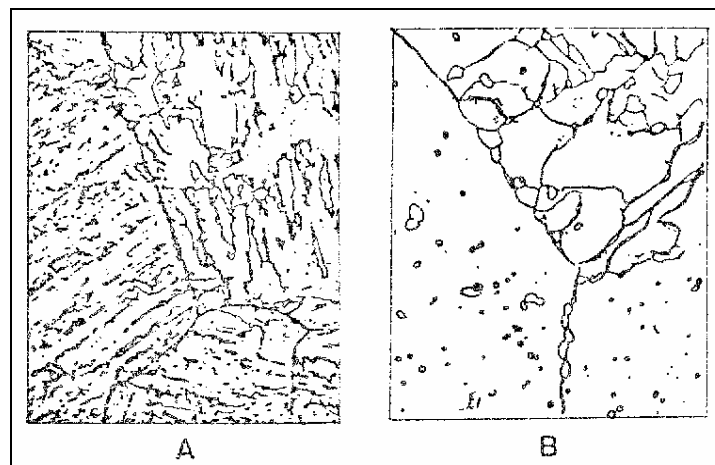
apresenta forma equi-axial; a estrutura é freqüentemente chamada de “esferoidal” e caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20 Rockwell C.

As diferentes etapas do revenimento são ilustradas na Figura 6, na qual são colocadas para diferentes teores de carbono as curvas de evolução da dureza para as diferentes temperaturas de revenimento.



**Figura 6:** Dureza da martensita de ligas Fe-C, revenidas por 1 hora à temperatura indicada.<sup>(9)</sup>

Na Figura 7 observa-se a evolução morfológica da martensita revenida em função do tempo de revenimento, onde após tratamentos prolongados obtém-se uma estrutura de carbonetos Fe<sub>3</sub>C grosseiros em contornos de grão ferríticos.



**Figura 7:** A estrutura da liga Fé – 0,18%C, temperada e revenida a 600 °C por A = 10 minutos e B = 96 horas.<sup>(9)</sup>

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material estudado é um aço fabricado de acordo com a norma ASTM A 514 H. É um aço da classe de 80 kgf/mm<sup>2</sup> de resistência a tração utilizada

principalmente na fabricação de pontes, navios e na construção civil. O processo utilizado para a obtenção desta qualidade é a têmpera e revenimento.<sup>(1,10)</sup>

As dimensões produzidas foram:

Espessura: 38,10 mm a 50,80 mm  
Largura: 2.438 mm a 3.048 mm  
Comprimento: 6.096 mm a 12.192 mm

As faixas de composição química para atender a produção de chapas grossas, segundo a especificação ASTM A 514 H, são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Faixas de composição química segundo a ASTM A 514 H (% peso)

C	0,120 / 0,210	Mo	0,200 / 0,300
Mn	0,950 / 1,300	Cr	0,400 / 0,650
P máx.	0,035	Ni	0,300 / 0,700
S máx.	0,035	V	0,030 / 0,080
Si	0,200 / 0,350	B	0,0005 / 0,0050

As propriedades mecânicas especificadas, segundo a especificação ASTM A 514 H, são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Propriedades Mecânicas Especificadas segundo a ASTM A 514 H

LE mín. MPa (TT)	690
LR MPa	760 / 895
Along. Mín. % ( 1 ) L <sub>o</sub> = 50 mm	≥ 16
Redução de área mín. (%)	45

## 2.2 Métodos

Inicialmente foi produzido um lote experimental de 285 t, sendo distribuídas nas seguintes dimensões:

- Espessura de 38,10 mm - 110 t.
- Espessura de 50,80 mm - 175 t.

Nenhum dos parâmetros de processo utilizado no tratamento térmico de têmpera e revenimento de chapas grossas ASTM A 514 B foi alterado, de forma a avaliar as propriedades da chapa grossa assim produzida conforme parâmetros técnicos existentes (temperatura e tempo de austenitização, velocidade de resfriamento, e temperatura e tempo de forno para o revenimento).

Posteriormente, diminuiu-se a temperatura de revenimento para se obter propriedades mecânicas (LE e LR maiores que os obtidos no lote experimental) mais acima do limite mínimo da faixa admissível. Todas as outras variáveis de processo foram mantidas constante.

O lote experimental foi caracterizado mecanicamente, conforme exigência da norma ASTM A 514 H, tendo sido medidos pelo limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e redução de área.

No lote experimental foram coletadas e analisadas 62 amostras.



A amostragem (corpo de prova) também segue as exigências da norma ASTM A 514 H, ou seja, uma amostra por esboço tratado termicamente, conforme ilustrado na Figura 8.

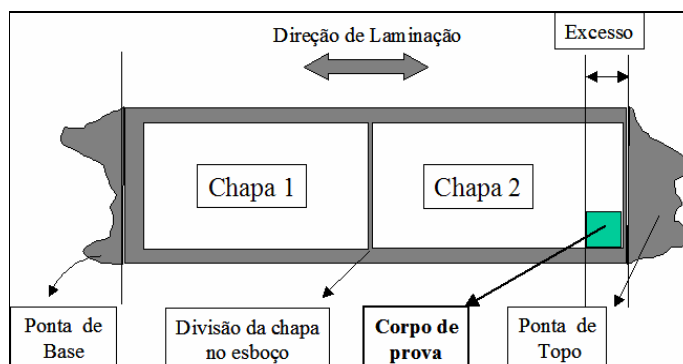


Figura 8: Retirada do corpo de prova conforme norma ASTM A 514 H.

A produção em escala industrial da qualidade ASTM A514 H iniciou-se no mês de agosto de 2007 e foram coletadas e analisadas 173 amostras.

O total de amostras coletadas e analisadas do lote experimental e da produção em escala industrial foi de 235 (corpos de prova).

### 3 RESULTADOS

Os resultados de propriedades mecânicas do lote experimental e da produção em escala industrial de chapas grossas diferenciam no processo de tratamento térmico na utilização de uma menor temperatura de revenimento para o processamento da produção em escala industrial em relação ao lote experimental.

#### 3.1 Limite de Escoamento

Na Tabela 3, tem-se a média dos dados obtidos nos ensaios mecânicos para a propriedade mecânica de limite de escoamento, o requisito da norma ASTM A 514 H e o ganho ou perda de propriedade no comparativo entre o lote experimental e a produção em escala industrial em função da espessura.

**Tabela 3:** Comparativo dos resultados do limite de escoamento entre o lote experimental e a produção em escala industrial

Espessura (mm)	38,1	50,8
LE (ASTM (min))	690	690
Lote Experimental	723	710
Escala Industrial	743	720
Ganho/ Perda (%)	2,76	1,41

#### 3.2 Limite de Resistência

Na Tabela 4, tem-se a média dos dados obtidos nos ensaios mecânicos para a propriedade mecânica de limite de resistência, o requisito da norma ASTM A 514 H e o ganho ou perda de propriedade no comparativo entre o lote experimental e a produção em escala industrial em função da espessura.

**Tabela 4:** Comparativo dos resultados do limite de resistência entre o lote experimental e a produção em escala industrial

<b>Espessura (mm)</b>	<b>38,1</b>	<b>50,8</b>
<b>LR (min) - ASTM</b>	760	760
<b>Lote Experimental</b>	788	780
<b>Escala Industrial</b>	806	786
<b>LR (max) - ASTM</b>	895	895
<b>Ganho (%)</b>	2,28	0,77

### 3.3 Alongamento

Na Tabela 5, tem-se a média dos dados obtidos nos ensaios mecânicos para a propriedade mecânica de alongamento, o requisito da norma ASTM A 514 H e o ganho ou perda de propriedade no comparativo entre o lote experimental e a produção em escala industrial em função da espessura.

**Tabela 5:** Comparativo dos resultados do alongamento entre o lote experimental e a produção em escala industrial

<b>Espessura (mm)</b>	<b>38,1</b>	<b>50,8</b>
<b>ALONG. (min) - ASTM</b>	16	16
<b>Lote Experimental</b>	23	24
<b>Escala Industrial</b>	22	22
<b>Ganho (%)</b>	-4,35	-8,33

### 3.4 Redução de Área

Na Tabela 6, tem-se a média dos dados obtidos nos ensaios mecânicos para a propriedade mecânica de redução de área, o requisito da norma ASTM A 514 H e o ganho ou perda de propriedade no comparativo entre o lote experimental e a produção em escala industrial em função da espessura.

**Tabela 6:** Comparativo dos resultados de redução de área entre o lote experimental e a produção em escala industrial

<b>Espessura (mm)</b>	<b>38,1</b>	<b>50,8</b>
<b>RA. (min) - ASTM</b>	45	45
<b>Lote Experimental</b>	71	72
<b>Escala Industrial</b>	68	70
<b>Ganho (%)</b>	-4,22	-2,78

## 3 DISCUSSÃO

Com base nos estudos da revisão bibliográfica e correlacionando as variáveis de processo no tratamento térmico (temperatura de revenimento e/ou tempo de forno) com as propriedades mecânicas obtidas no lote experimental, foi definido para a produção em escala industrial, diminuir a temperatura de revenimento, visando o ganho das propriedades mecânicas de limite de escoamento e limite de resistência sem prejudicar a qualidade final do produto em relação às propriedades de alongamento e redução de área.

Observa-se que conforme as Tabelas 3 e 4 que as propriedades mecânicas do limite de escoamento e limite de resistência estão em conformidade com a norma ASTM A 514 H, porém próximos do limite mínimo exigido (Lote Experimental). Já as

propriedades mecânicas de alongamento e redução de área, apresentam uma boa margem de segurança em relação ao limite mínimo requerido pela norma ASTM A 514 H, conforme as Tabelas 5 e 6 (Lote Experimental).

O ganho ou a perda em porcentagem das propriedades mecânicas da produção em escala industrial, ou seja, após a alteração no processo do tratamento térmico com adoção de uma menor temperatura de revenimento, tem-se a seguir quantificado:

- O limite de escoamento apresentou um aumento de 2,76% para espessura de 38,10 mm e 1,41 % para espessura de 50,8 mm, conforme a Tabela 3.
- O limite de resistência apresentou um aumento de 2,28% para espessura de 38,10 mm e 0,77 % para espessura de 50,8 mm, conforme a Tabela 4.
- O alongamento apresentou uma diminuição de 4,35% para espessura de 38,10 mm e 8,33 % para espessura de 50,8 mm, conforme a Tabela 5.
- A redução de área apresentou uma diminuição de 4,22% para espessura de 38,10 mm e 2,78% para espessura de 50,8 mm, conforme a Tabela 6.

Pode-se observar através da Figura 3 (os limites de resistência à tração e de escoamento e à ductilidade (%RA), em função da temperatura de revenimento), da Figura 5 (relação entre dureza e propriedades de tração de aços após tratamento térmico de têmpera e revenimento) e da Figura 6 (dureza da martensita de ligas Fe-C revenidas por 1 hora á temperatura indicada), que o aumento da temperatura de revenimento causa um maior amolecimento do material temperado, conseqüentemente, quando se adota uma menor temperatura de revenimento, tem-se maiores valores nas propriedades mecânicas de limite de escoamento e limite de resistência, e, menores valores nas propriedades mecânicas de alongamento e redução de área.

Os dados ilustrados de propriedades mecânicas com o tratamento térmico de revenimento na literatura estudada (Figuras 3, 5 e 6) comparado com os resultados de propriedades mecânicas entre o lote experimental e a produção em escala industrial, demonstrados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, evidenciam a correlação entre a teoria e a pratica industrial, bem como comprova a eficiência da alteração de processo proposto.

#### **4 CONCLUSÕES**

Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico de revenimento em chapas grossas sobre as propriedades mecânicas de aços martensíticos de baixo teor de carbono, para fornecimento conforme os requisitos da norma ASTM A514 H.

A redução da temperatura de revenimento promoveu elevação das propriedades mecânicas de resistência (limite de escoamento e limite de resistência) deslocando-as para valores mais afastados do limite mínimo da faixa admissível.

Complementam os objetivos do trabalho: a busca pela otimização do desempenho do produto, a redução de custos no processo e o atendimento as necessidades dos nossos clientes, que são os fatores que geram valor e fortalecem a imagem da empresa no contexto siderúrgico mundial.

Pode-se afirmar que houve um ganho significativo nas propriedades mecânicas de limite de escoamento e limite de resistência, e, que a perda das propriedades de alongamento e redução de área não prejudicou a qualidade final do produto.

Conclui-se que a alteração no processo de tratamento térmico de revenimento foi fundamental para a melhoria nas propriedades mecânicas consolidando a reprodutibilidade de resultados e melhor controle do processo.

### **Agradecimentos**

À Companhia Siderúrgica Paulista – Cosipa, do Sistema Usiminas que proporcionou a possibilidade da realização deste trabalho.

Aos amigos José Herbert Dolabela da Silveira, Antonio Augusto Gorni e ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin pela orientação e o total apoio manifestado durante o desenvolvimento do trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Norma ASTM – Designation ASTM A 514/A514M – 05 – Standard Specification for High-Yield-Strength, Quenched and Tempered Alloy Steel Plate, Suitable for Welding.
- 2 Apostila de Desenvolvimento de Chapas Grossas Tratadas Termicamente. Unidade de Metalurgia da Laminação a Quente – USIMINAS.
- 3 William D. Callister, Jr - Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução; Editora LTC. 5ª edição /2002.
- 4 GRUM, J., SLAVKO, B., ZUPANČIČ, M., Influence of quenching process parameters on residual stresses in steel. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, 2001, 57-70.
- 5 PIETIKÄINEN, J., Considerations about tempered martensite embrittlement. Materials Science and Engineering A273 – 275,1999, 466-470.
- 6 Robert E. Reed – Hill; Princípios de Metalurgia Física - Editora Guanabara Dois. 2ª edição - Rio de Janeiro, 1982.
- 7 W. G. Patton, Metallurgical Progress, vol. 43, 1943.
- 8 Vicente Chiaverini - Aços e Ferros Fundidos – Tratamentos Térmicos; ABM - 7ª edição/ 2005.
- 9 André Paulo Tschiptschin, Hélio Goldenstein, Amilton Sinátori Metalografia dos Aços; ABM - 1ª edição/ 1988.
- 10 Manual de Requisitos Químicos e Mecânicos da COSIPA, 2005.