**Um Guia Para Padronização do Processo de Tratamento Térmico em Fornos Contínuos**

Da Maia, B.I1; Futami, A. H. 1; De Oliveira, M. A.1

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção -UNISOCIESC – Centro Universitário SOCIESC – Rua Albano Schmidt, 3333, Boa Vista, Joinville –SC

**Resumo:** Este trabalho apresenta um guia prático para a padronização do processo de tratamento térmico em fornos contínuos. Os testes descritos neste artigo foram realizados em uma metalúrgica que utiliza este processo no seu fluxo de produção, as amostras utilizadas para validação dos testes são casos reais da rotina de manufatura. De acordo com os resultados encontrados neste estudo pode-se concluir a possibilidade de padronização no processo de tratamento térmico para os diferentes tipos de aço em fornos contínuos.

**Palavras Chave**: Tratamento Térmico; Aço Carbono; Fornos Contínuos; Têmpera; Cementação

**Abstract:** This work presents a practical guide for the standardization of the heat treatment process in continuous furnaces. The tests described in this article were performed in a metallurgical company that uses this process in its production flow, the samples used for validation of the tests are real cases of the manufacturing routine. According to the results found in this study it is possible to conclude the possibility of standardization in the heat treatment process for the different types of steel in continuous furnaces.

**Keywords:** Heat treatment; Carbon steel; Continuous Ovens; Quenching; Cementation

**1 Introdução**

Os processos de tratamento térmico consistem em procedimentos de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, objetivando uma melhoria nas propriedades do material por meio de alterações provocadas na sua estrutura [1,2,5,8,9]. Dentre as diversas modificações que podem ser efetuadas através dos diferenciados tratamentos térmicos, destacam-se a eliminação de tensões internas; aumento ou diminuição de dureza; aumento da resistência mecânica; melhoras na ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, resistência ao calor, propriedades de corte e resistência à corrosão; ou ainda, modificação das propriedades elétricas e magnéticas [3,4,6,7].

O comportamento de um aço durante o tratamento térmico depende basicamente das temperaturas de aquecimento e resfriamento, do tempo de permanência nestas temperaturas, das velocidades de aquecimento e resfriamento, como também da atmosfera no seu aquecimento [2,3]. Estes fatores, porém, sofrem modificações de acordo com a composição química, dimensões e forma do aço.

O tratamento térmico tema deste artigo é realizado em linha contínua, esta linha permite que o material seja submetido aos processos de têmpera e revenimento de maneira contínua.

Inicialmente, registravam-se em receitas os parâmetros de tratamento térmico de cada produto que passava pela linha. Assim, cada produto teria a sua receita armazenada. Entretanto, por este método os parâmetros da linha devem ser ajustados com frequência, gerando horas improdutivas, custos de insumos, variações nas propriedades mecânicas, etc.... A oportunidade de melhoria está ancorada que ao invés de considerar uma receita para cada produto, pode-se construir receitas constituídas por um conjunto de materiais que pudessem ser tratados com os mesmos parâmetros, reduzindo assim a frequência dos ajustes necessários na linha. Para o agrupamento destes materiais foram levados em consideração a composição química, a dureza especificada para o revenimento e a espessura do material.

No presente trabalho, tem-se como objetivo geral analisar o comportamento dos materiais de cada receita construída, através de ensaios na linha contínua de tratamento térmico, na tentativa de reduzir o número de receitas e otimizar a produção. Dentre os objetivos específicos, procura-se:

- Analisar a dureza dos materiais, tanto temperados quanto temperados e revenidos com os mesmos parâmetros e comparar com a faixa de dureza especificada para o final do tratamento térmico;

- Comparar, por medição de dureza, a superfície do material tratado termicamente com o seu núcleo, tanto para a seção da extremidade como para a seção da metade do comprimento, verificando se existem diferenças significativas.

- Comparar a dureza da seção da metade do comprimento com a dureza da seção da extremidade.

**2 Processo de tratamento térmico**

Dependendo da temperatura em que se encontra, um aço-carbono pode apresentar variação na sua estrutura cristalina [1,3,4]. Uma das transformações que ocorrem durante o aquecimento desse tipo de aço é a mudança do Ferro α para o Ferro γ. Durante esta transformação o ferro muda sua estrutura cristalina passando de cúbico de corpo centrado (Ferro α) para cúbico de face centrada (Ferro γ) [2,5]. Uma das importâncias desta transformação é que o Ferro γ consegue manter o carbono em solução sólida, sendo esta solução chamada de austenita. Este fato, porém, não acontece no Ferro α, pois apenas uma quantidade desprezível de carbono (aproximadamente 0,008% à temperatura ambiente) dissolve-se no Ferro α à temperatura ambiente, sendo esta quantidade considerada desprezível.

Quando a austenita é resfriada a uma temperatura que a torna instável, o ferro transforma sua forma alotrópica de γ para α, expulsando o carbono da solução sólida. O carbono então, se combina ao ferro e forma o carboneto Fe3C que possui reticulado complexo com poucos planos de escorregamento, sendo extremamente duro. Esse carboneto combinado ao ferro α forma a fase lamelar perlita. Entretanto, é importante lembrar que, para ocorrer este processo é necessária uma variação lenta da temperatura.

**2.1 Processo de Têmpera**

A têmpera é definida como um resfriamento rápido realizado sobre um aço que se encontra numa temperatura acima da sua temperatura crítica. Este resfriamento pode ser obtido em meios como óleo, água, salmoura, ou até mesmo o ar. Por este processo, a transformação da austenita sob temperaturas elevadas é impedida, se transformando diretamente em martensita, que é a estrutura de mais alta dureza de um aço [5,6].

A martensita é atualmente admitida como uma estrutura tetragonal e apresenta uma dureza muito elevada. Os fatores básicos que determinam essa elevada dureza são: a precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção destas em solução sólida supersaturada na estrutura do ferro α, impedindo o escorregamento; distorção do reticulado; tensões internas e tamanho de grão muito pequeno [2].

**2.2 Variáveis que influenciam na temperabilidade de um aço**

**2.2.1 Tamanho de grão da austenita**

Nos aços em geral, o aparecimento da fase austenita ocorre pela transformação de uma estrutura de cementita e ferrita que foi aquecida até o campo austenítico. Os grãos de austenita se formam por nucleação heterogênea nas interfaces cementita-ferrita. Inicialmente, o grão de austenita formado é pequeno. Entretanto, quando o aço é submetido a altas temperaturas e tempos longos o grão de austenita torna-se maior [3].

Um dos fatores que determinam as propriedades físicas de um material, como resposta à têmpera, é justamente o tamanho de grão da austenita obtido antes do material ser resfriado. À medida que o tamanho de grão da austenita aumenta, mais as curvas de início e fim de transformação são deslocadas para a direita.

A formação de perlita é mais rápida em um aço de granulação mais fina que em um aço de granulação maior. Isto porque, um aço que apresenta grão fino possui uma área de contorno de grão muito maior que um aço de granulação grosseira, existindo assim, uma área maior para a nucleação heterogênea da perlita. Além disso, como a perlita começa a se formar nos contornos de grão da austenita, em um tamanho de grão grande a total transformação da perlita é mais lenta [4]. Por estes motivos, com o aumento do grão de austenita as curvas de início e fim de transformação são deslocadas para a direita.

Conclui-se então que, a temperabilidade de um aço de granulação fina é menor que a de um aço de granulação grosseira. Todavia, a fragilidade de um aço que apresenta grãos grosseiros é maior que a de um aço de grãos mais finos, com tendência a apresentar trincas de têmpera.

A posição das curvas de transformação pode sofrer influência também da homogeneidade da austenita. Quanto maior a quantidade de carbonetos residuais ou de regiões ricas em carbono, ou seja, quanto menos homogênea for a austenita, mais para a esquerda é deslocada a curva de início de transformação, fazendo com que a formação da perlita seja iniciada mais rapidamente devido à tendência em se formar por meio dos carbonetos residuais que atuam como núcleos [8].

Dois fatores que influenciam no tamanho de grão da austenita são a temperatura e o tempo para austenitização. Quanto maior o tempo sob as temperaturas de austenitização ou quanto mais altas forem estas temperaturas maior será o crescimento da austenita.

O controle do tamanho de grão da austenita de um aço pode ser realizado pela adição de determinados elementos de liga em baixos teores. Dentre estes elementos estão o alumínio, o titânio, o zircônio e o vanádio.

**2.2.2 Teor de Carbono**

À medida que o teor de carbono é aumentado as curvas de transformação tendem a se deslocar para a direita, aumentando então a temperabilidade do aço. Porém, ainda assim, ligas simples de ferro-carbono apresentam baixa temperabilidade. Então, comercialmente, na necessidade de se aumentar a temperabilidade, trabalha-se muito com aços-carbono constituídos de elementos de liga.

**2.2.3 Elementos de Liga**

Com exceção do cobalto, todos os elementos de liga adicionados aos aços promovem um deslocamento para a direita das curvas de início e fim de transformação.

Basicamente todos os elementos de liga se dissolvem na austenita, ou seja, em temperaturas nas quais o aço contém apenas austenita, os elementos de liga encontram-se totalmente dissolvidos no ferro γ. Porém, no resfriamento, ao se atingir a zona crítica, alguns elementos ficam dissolvidos no ferro α e outros tendem a formar carbonetos. Assim, quanto maior o número de elementos de liga, maior é a complexidade e o número dessas reações e, conseqüentemente, maior é o tempo para iniciá-las e completá-las, atrasando o início e o fim da transformação da austenita. É por este motivo que os elementos liga provocam o deslocamento das curvas para a direita.

Os elementos de liga, por outro lado, abaixam as temperaturas correspondentes ao início e fim da formação da martensita. Então, em alguns tipos de aço com alto teor de elementos de liga, pode não se ter formação completa da martensita à temperatura ambiente, provocando o surgimento de uma certa quantidade de "austenita retida".

**2.2.4 Influência da seção da peça**

A retirada de calor pelo meio de resfriamento é feita diretamente da superfície do aço, provocando o aparecimento de um gradiente de temperatura entre o interior e a superfície das peças que impede que o endurecimento seja uniforme por toda a seção.

Então, a seção da peça provoca influência na velocidade de resfriamento, visto que o resfriamento no interior é mais lento que na superfície.

**2.3 Processo de Revenimento**

Como já descrito, após o processo de têmpera o material encontra-se com excessiva dureza e em estado de tensões internas. O revenido então, é um tratamento térmico que permite um alívio ou remoção dessas tensões internas, como também corrige a excessiva dureza e a fragilidade do material, melhorando sua ductilidade e tenacidade. A figura 2 ilustra o processo de revenimento após a têmpera do aço.

É recomendável que o revenido seja realizado logo após a têmpera, no intuito de diminuir a perda de peças por ruptura. Aquecendo-se a martensita o reticulado instável passa para um reticulado estável cúbico centrado, as tensões são aliviadas e ocorre uma precipitação de partículas que crescem e se aglomeram de acordo com o tempo e a temperatura.

Assim como na têmpera, no processo de revenimento não apenas a temperatura é importante, mas também o tempo de permanência nesta temperatura.

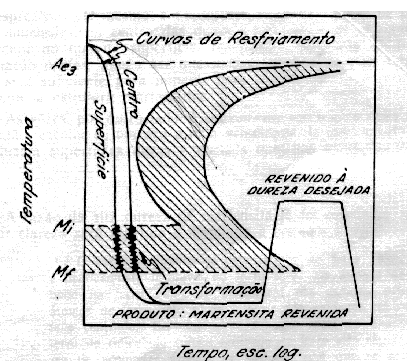


Figura 2 – Diagrama de transformação ilustrando os processos de têmpera e revenido.

(Aços Carbono e Aços-Liga: 2ªed. São Paulo, 1965).

**2.4 Características dos Aços Temperados e Revenidos na Linha Contínua de Tratamento Térmico.**

Aço 10B22:

Apesar do baixo teor de carbono, este tipo de aço torna-se temperável devido à presença do Boro.

A adição de boro ao aço propicia um deslocamento para a direita da curva de início de transformação, e também desloca para a direita a curva de fim de transformação, porém, relativamente pouco. Por conseqüência, o boro permite que a temperabilidade do aço seja aumentada.

Admite-se que o boro forma um composto submicroscópico nos contornos de grãos, atrasando então a transformação da austenita que começa nos contornos de grão.

Composição Química: Carbono (0,18-0,23%); Manganês (0,70-1,00%); Fósforo (0,04% máx.); Enxofre (0,05% máx.); Boro (0,0005-0,003%).

Aplicação: porcas e parafusos temperados e revenidos.

Aço 10B30:

Também devido à presença do Boro, este tipo de aço apresenta boa temperabilidade, podendo adquirir elevadas propriedades mecânicas.

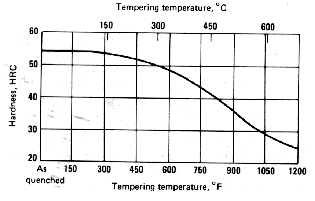
Composição Química: (0,28-0,34%); Manganês (0,60-0,90%); Fósforo (0,04% máx.); Enxofre (0,05% máx.); Boro (0,0005-0,003%).

Aplicação: parafusos temperados e revenidos que necessitam de propriedades mecânicas elevadas.

**Aço 5135:**

Composição Química: Carbono (0,33-0,38%); Manganês (0,60-0,80%); Fósforo; (0,030%); Enxofre (0,04%); Cromo (0,75%-1,00%); Silício (0,15-0,35%).

Aplicação: parafusos especiais que necessitam de elevadas propriedades mecânicas.



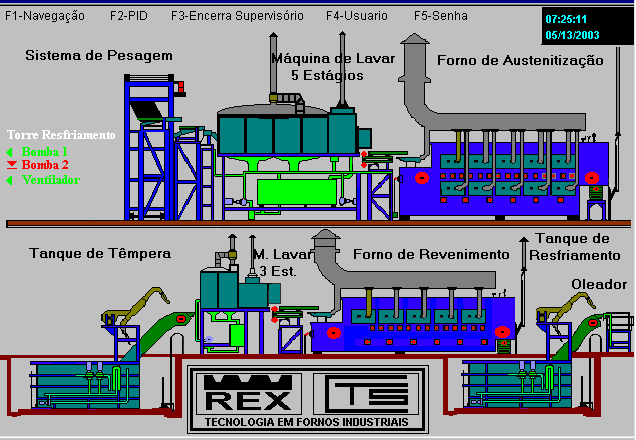
|  |  |
| --- | --- |
| Fig.3 – Relação entre a temperatura de revenimento |  |
| e a dureza para o aço 5135. Os valores representam |  |
| uma média baseada numa estrutura completamente |  |
| temperada. |  |
| (American Society for Metals, Heat Treater`s Guide, 1982). |
|  |
|  |

**3 MÉTODO EXPERIMENTAL**

# 3.1 Funcionamento da Linha Contínua de Têmpera e Revenimento-700 kg/h

A linha Contínua de Têmpera e Revenimento, modelo LCTT-G-700 a gás, é acompanhada de um computador instalado com um software, permitindo assim uma comunicação com o CLP (Controlador Lógico Programável) para troca de informações de entrada e saída de dados.

O tratamento térmico das peças é efetuado em 7 etapas: Sistema de Pesagem, Máquina de Lavar de 5 Estágios, Forno de Austenitização, Tanque de Têmpera, Máquina de Lavar de 3 Estágios, Forno de Revenimento e Tanque de Resfriamento. A figura 6 mostra um esboço da linha contínua com suas etapas.

 Fig. 6 – Esboço da Linha Contínua de Tratamento Térmico

# A seguir, estão descritas as sete etapas para o tratamento térmico na linha contínua.

# Etapa 1 - Sistema de Pesagem

O operador, primeiramente, utiliza um carrinho para posicionar o container com as peças no elevador. Então, o elevador é acionado, transportando o container até chegar ao topo onde se encontra uma calha de dosagem grossa. O próximo passo consiste do despejo das peças nesta calha de dosagem grossa. Para isto, o container é girado em 3 etapas, descarregando 1/3 da carga por vez. A calha de dosagem grossa possui um silo vibratório que possibilita o transporte das peças por vibração até uma calha de dosagem fina. Após a passagem por esta calha, também por vibração, uma determinada massa de peças cai numa balança. Esta massa é controlada por uma célula de carga de pesagem que a balança possui. Ao se aproximar de 10kg, que corresponde aproximadamente 80% da carga da receita, o CLP envia um sinal para diminuir a vibração, evitando que se ultrapasse a carga da receita. Passado aproximadamente 1 minuto, a pesagem desejada é atingida, cerca de 11,9kg, e o CLP faz com que as vibrações das calhas de dosagem grossa e fina sejam interrompidas. Então, a balança recebe um giro, despejando as peças na Máquina de Lavar de 5 Estágios.

# Etapa 2 - Máquina de Lavar de 5 Estágios

Durante esta etapa, são retirados traços de óleo e outros resíduos provenientes do processo de fabricação, deixando as peças limpas e praticamente secas antes de entrarem no forno de austenitização.

O transporte das peças nesta máquina é efetuado por um tambor rotativo. Este tambor é constituído de orifícios que permitem a entrada dos componentes da lavação. Estes componentes são aquecidos por queimadores a gás, sendo que cada banho possui um queimador.

O tambor rotativo transporta as peças em 5 estágios:

**1º Estágio – Desfosfatização**

Antes da trefilação a matéria - prima (fio-máquina) recebe a adição de fosfato para lubrificação. Porém, é necessário se fazer a desfosfatização, pois a presença do fosfato produz uma carepa óxida frágil na peça dentro do forno.

O desfosfatizante, assim como os outros componentes da lavação, é transportado do tanque de armazenamento (situado abaixo da Máquina de Lavar de 5 Estágios) até o tambor rotativo por meio de uma bomba.

**2º Estágio - Água Quente**

Neste estágio, a água quente é utilizada para a remoção do desfosfatizante.

**3º Estágio - Desengorduramento com Detergente**

O detergente é utilizado para a remoção de resíduos.

**4º Estágio - Água Quente**

Neste estágio, a água quente remove o detergente.

**5º Estágio – Secagem**

A secagem é realizada por um ventilador que aproveita os gases residuais do aquecimento dos líquidos, e também por apoio elétrico.

O tempo total para a realização destes estágios depende da velocidade do tambor rotativo.

Os componentes da lavação estão separados por compartimentos, cada um com depósito de líquido lateral que recolhe os resíduos de óleo e espuma. Os compartimentos do desfosfatizante e do detergente possuem um sistema de retirada de óleo sobrenadante.

Após a lavação, o tambor rotativo despeja as peças numa máquina de dois movimentos. Esta máquina consiste de uma rampa que realiza movimento vibracional, permitindo o deslocamento das peças até o Forno de Austenitização, e movimento oscilatório (horizontal), permitindo que as peças sejam distribuídas uniformemente no forno.

# Etapa 3 - Forno de Austenitização

O forno de austenitização possui uma comporta de entrada horizontal e uma comporta intermediária vertical. Estas comportas são acionadas por cilindros pneumáticos que permitem a vedação do forno e diminuição do consumo de atmosfera. Estando a primeira comporta aberta, as peças que estão vibrando e oscilando na máquina de dois movimentos são depositadas dentro de um compartimento de maneira uniforme, estando a comporta 2 fechada. Quando a vibração da máquina de dois movimentos é interrompida, a comporta 1 é fechada e a comporta 2 é aberta, permitindo o despejo uniforme das peças na esteira. Quando a comporta 2 se fecha, a comporta 1 é novamente aberta e a máquina de dois movimentos recomeça a vibração, iniciando um novo ciclo.

A esteira transportadora (liga especial com 25% de Cr e 35% de Ni com baixo carbono) realiza a entrada das peças no forno.

O aquecimento das peças é realizado por cinco zonas de aquecimento, controladas por termopares ligados ao sistema, sendo quatro zonas a gás (zona1, zona 2, zona 3 e zona 4) e uma elétrica (zona 5). Na última zona de aquecimento (zona 5) um ventilador faz circular a atmosfera interna, homogeneizando a temperatura.

A atmosfera do forno de austenitização é controlada por metanol, vaporizado antes de sua entrada no forno e responsável pela atmosfera carbonetante; propano, utilizado quando ocorre queda de potencial de carbono, e nitrogênio, que torna a atmosfera inerte evitando a presença de oxigênio responsável pela oxidação e descarbonetação das peças. Utilizam-se 85% de metanol, 1% de propano (no máximo) e 15% de nitrogênio. Estes componentes são adicionados ao forno na forma gasosa, sendo que o nitrogênio e o propano, por serem miscíveis, são misturados no painel de fluxo e injetados por uma tubulação, e o metanol é adicionado por uma tubulação capilar até um vaporizador, onde é aquecido e vaporizado. Uma cortina de nitrogênio na entrada do forno impede a entrada de oxigênio quando as comportas são abertas. Estes três componentes da atmosfera do forno estão armazenados em tanques situados fora do local em que a linha se encontra.

O potencial de carbono do forno é controlado automaticamente por uma sonda de zircônio ligada ao painel de controle. Caso o potencial de carbono da peça seja maior que o da atmosfera, a sonda acusa e o propano é injetado no forno automaticamente, garantindo um potencial de carbono constante.

Para impedir trocas de calor, o forno é revestido internamente com mantas de fibra cerâmica e pedras refratárias especiais, com espessuras suficientes para assegurar a isolação térmica.

O tempo de permanência das peças no forno depende da velocidade da esteira.

# Etapa 4 - Tanque de Têmpera

Após o aquecimento as peças são temperadas em um tanque de têmpera contínuo com óleo entre 55ºC e 65ºC. Na área de caída das peças uma placa com canal resfriado por água permite o acoplamento, com junta hermética, do "chute” (bica de caída) das peças por gravidade, possibilitando que as peças continuem em atmosfera controlada. No "chute" estão instalados uma junta resfriada por água, um condensador dos vapores provenientes do óleo, um extrator destes vapores para queima constante no ambiente e duas cortinas de óleo que aprisionam os gases produzidos pela têmpera, reduzindo ao mínimo a passagem e impedindo que estes gases entrem no forno.

O tanque de têmpera possui resistências de aquecimento, que juntamente com o sistema de recirculação do óleo através do trocador de calor, mantém a temperatura do óleo dentro do valor exigido na têmpera.

A retirada das peças do tanque de têmpera é realizada por uma esteira de malha. Um insulflador de ar posicionado acima da esteira remove o excesso de óleo das peças. A esteira então, despeja as peças numa calha inclinada, que permite a entrada das peças na Máquina de Lavar de 3 Estágios.

# Etapa 5 - Máquina de Lavar de 3 Estágios

Nesta etapa, são retirados os traços de óleo e outros resíduos provenientes da têmpera em óleo, deixando as peças limpas e secas em 3 estágios:

**1º Estágio: Detergente Quente**

Este estágio tem como finalidade remover o óleo de têmpera das peças.

**2º Estágio: Água Quente**

A água quente é utilizada para remoção do detergente.

**3º Estágio: Secagem**

Assim como na secagem da máquina de lavar de 5 estágios, este estágio é realizado por um ventilador que aproveita os gases residuais do aquecimento dos líquidos e também por apoio elétrico.

O transporte das peças nesta máquina é efetuado por um tambor rotativo semelhante ao da Máquina de Lavar de 5 Estágios, porém de menor tamanho.

Finalizando esta etapa, as peças são despejadas numa outra máquina de dois movimentos, que transporta e distribui uniformemente as peças no Forno de Revenimento.

**Etapa 6 - Forno de Revenimento**

Ao entrar no forno de revenimento uma esteira (liga 18Cr Ni8) realiza o transporte das peças, permitindo que as mesmas sejam passadas por três zonas de aquecimento.

Quando se utiliza uma temperatura de revenimento acima de 500ºC, um fluxo de nitrogênio é adicionado para manter a atmosfera inerte. A temperatura dentro do forno de revenimento é homogeneizada com o auxílio de quatro ventiladores que permitem a circulação da atmosfera interna.

Assim como no forno de austenitização, a velocidade da esteira é que determina o tempo em que as peças serão revenidas, sendo que quanto maior o tempo de permanência da peça no forno menor será sua dureza.

Após o revenimento as peças caem no Tanque de Resfriamento/Enegrecimento através do "chute", assim como no forno de austenitização.

# Etapa 7 - Tanque de Resfriamento

O tanque de resfriamento/enegrecimento contém o óleo de enegrecimento, que tem a função de formar uma camada de proteção na peça.

As peças enegrecidas são retiradas do tanque por uma esteira de malha com insulflador de ar que retira os traços de óleo, levando as peças até uma calha inclinada que as despeja no container, finalizando assim a Linha Contínua de Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento.

# 3.2 Métodos para obtenção das receitas

Na linha contínua de tratamento térmico são tratados os produtos que a empresa estudada processa, a concentração está em produtos conformados a frio, como: parafusos, porcas, pinos, etc.. Para obtenção das receitas foram estudados os parafusos, o qual foram realizados ensaios na linha contínua de tratamento térmico.

**3.3 Ensaios na Linha Contínua de Tratamento Térmico**

No trabalho realizado os produtos tratados na linha contínua de tratamento térmico foram agrupados em receitas. Estas trazem a informação dos parâmetros que devem ser utilizados no tratamento térmico do produto, como potencial de carbono, velocidade da esteira e temperaturas dos fornos de austenitização e de revenimento. Neste trabalho anterior foi determinado que materiais com tipo diferente de aço, dureza especificada para o revenimento diferente, ou variação de espessura acima de 50%, devem ficar em receitas distintas. No presente trabalho realizou-se um registro dos produtos que eram tratados na Linha Contínua de Tratamento Térmico. Por este registro, tornou-se possível a observação dos parâmetros utilizados para aços com composição química, dureza especificada e espessura variadas. Numa análise mais cuidadosa, verificou-se que materiais com o mesmo tipo de aço, porém, com durezas especificadas para o revenimento diferentes e próximas, eram tratados com os mesmos parâmetros na têmpera e no revenimento. Levando em conta este fato, os parâmetros das receitas que apresentavam durezas próximas entre si foram redefinidos, baseando-se no conhecimento dos operadores, como também nos produtos que já estavam registrados no computador da linha. Assim, os parafusos com estas durezas próximas poderiam ser testados com os mesmos parâmetros.

## 3.4 Seleção dos materiais para ensaio

Na empresa estudada, a quantidade de materiais que necessita de tratamento térmico é considerável. Então, seria inviável ensaiar todos os produtos de cada receita. A próxima etapa então, consistiu em selecionar os materiais, no intuito de diminuir a quantidade de ensaios necessários na linha.

Sabe-se que a espessura do aço é um fator que influencia na sua temperabilidade, devido à diferença na velocidade de resfriamento entre a superfície e o centro. Pensando nisto, selecionou-se os materiais de espessura mínima e máxima de cada receita. Assim, se após o ensaio os materiais de espessura mínima e máxima apresentassem dureza dentro do especificado, logicamente, os produtos com espessura intermediária poderiam ser confirmados na mesma receita sem a necessidade de ensaio. Entretanto, surgiu a dúvida se os comprimentos dos produtos também era um fator a ser levado em conta. Então, optou-se por selecionar também os comprimentos mínimo e máximo do material de espessura mínima e os comprimentos mínimo e máximo do material de espessura máxima.

O corte dos materiais era realizado em duas etapas. Primeiramente, eram cortados pedaços com comprimento um pouco maior que o selecionado. Para cada comprimento eram cortados dois pedaços, pois seria necessário analisar a dureza do material temperado e do material temperado e revenido. Posteriormente, os pedaços eram levados ao controle de qualidade para cortar suas extremidades numa máquina com fluido de corte, acertando o comprimento e adquirindo um melhor acabamento. Esta segunda etapa de corte era necessária, pois os materiais devem apresentar uma base estável para a medição de dureza após o ensaio.

Após o corte dos materiais, os mesmos eram armazenados em plásticos contendo a identificação do tipo de aço, bitola e comprimento. Finalmente, os materiais eram levados à linha de tratamento térmico para serem ensaiados.

Para colocar os materiais na linha, era necessário esperar produtos que fossem tratados com os mesmos parâmetros da receita. Por este motivo, muitos materiais só puderam ser ensaiados após um determinado tempo.

A dureza dos materiais deveria ser analisada na têmpera e no revenido. Então, retirava-se um material na têmpera e o outro apenas após o revenimento.

**3.5 Análise de dureza dos materiais ensaiados**

Como as velocidades de aquecimento e resfriamento de um aço são diferentes entre a superfície e o centro, a dureza ao longo da sua seção, como também ao longo do seu comprimento pode apresentar variações. Então, cada seção teve a sua extremidade comparada com o seu núcleo. Além disso, foram comparadas a seção da extremidade do corpo com a seção da metade do seu comprimento.

Então, uma nova etapa de cortes era necessária. Utilizando novamente a máquina com fluido de corte, o material era cortado próximo à extremidade e na metade do comprimento. O corte próximo à extremidade era efetuado a uma distancia de um diâmetro do corpo.

Finalizada a etapa de corte, os corpos eram levados para medição de dureza Rockwell C no durômetro, marca Sussen – Wolpert, tipo Testor HT 1a; ano 1975, instalado no mesmo local da linha. A carga selecionada no durômetro era de 150 Kg.

Para cada material eram efetuadas uma medida no núcleo e duas medidas distantes 2,5 mm da extremidade, tanto para a seção cortada próxima à extremidade como para a seção cortada na metade do comprimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os tipos de aço utilizados na fabricação de parafusos que necessitam de tratamento térmico na linha baseiam-se nas ligas 10B22, 10B30 e 5135.

Para as ligas 5135, 1045 e 1144 o potencial de carbono e as temperaturas do forno de austenitização utilizados são os mesmos. Já para as ligas 10B22 e 10B30 as temperaturas e os potenciais de carbono são um pouco diferentes. Para uma melhor visualização, estão representadas na tabela 1 as faixas de temperatura de austenitização e potencial de carbono para cada uma das ligas. Observa-se na tabela que o potencial de carbono é sempre igual ou maior que o teor de carbono da liga, no sentido de evitar uma descarbonetação na superfície do aço.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Material** | **Potencial de Carbono** | **Temperatura**  **de Austenitização** |
| 10B22 | 0,27 a 0,32% | 850 a 890ºC |
| 10B30 | 0,30 a 0,35% | 850 a 890ºC |
| 5135/ 1045/ 1144 | 0,40 a 0,45% | 850 a 880ºC |

Tabela 1 – Faixas de potencial de carbono e temperatura de austenitização para diferentes ligas

4.1 Parâmetros registrados nos ensaios

Como já descrito anteriormente, os parâmetros para o tratamento térmico de um aço podem variar de acordo com a composição química, dureza desejada e dimensões.

Os dois principais parâmetros da linha de tratamento térmico que podem ser trabalhados para modificação nas propriedades de um aço são as velocidades das esteiras e as temperaturas dos fornos. Quando surge a necessidade de alteração destes parâmetros, deve-se esperar um determinado tempo para que não sejam afetados os parâmetros do produto anterior que está na linha. Se optarmos por modificar a velocidade da esteira, torna-se necessário esperar que todo o lote anterior saia do forno para não alterar o tempo de aquecimento das peças. No caso do forno de revenimento, o tempo necessário para a saída de todo o lote seria de aproximadamente 60 minutos.

Outra opção é ajustar a temperatura. Para isto, pode-se modificar a temperatura da primeira zona quando o último lote do produto anterior passar para a segunda, e assim por diante. Porém, devido à necessidade de um tempo para atingir a nova temperatura, os novos produtos devem entrar no forno somente quando a nova temperatura é estabelecida. Assim, o tempo necessário para a entrada do novo lote é de aproximadamente 20 minutos, considerando um fator de segurança.

Sabe-se que ajustar a temperatura é menos viável economicamente. Porém, é mais viável do ponto de vista de produção, pois o tempo perdido é menor. Como o trabalho das receitas consiste em otimizar a produção da linha, preferiu-se usar a temperatura como ajuste. Porém, a velocidade da esteira pode vir a ser alterada em alguns produtos de maior espessura, pois é necessário um maior tempo para o aquecimento e o resfriamento dos mesmos.

4.2 Descrição das receitas de Parafusos.

Como já explicado, os materiais com o mesmo tipo de aço cujas durezas especificadas são próximas entre si foram submetidos aos mesmos parâmetros de ensaio. Entretanto, ao unir estas durezas, alguns materiais ficaram com uma diferença de espessura maior que os 50% estipulados. Porém, na necessidade de diminuir o número de receitas estes materiais foram testados com os mesmos parâmetros, na tentativa de encaixá-los numa mesma receita.

Quando os materiais de espessura mínima e máxima de uma receita eram ensaiados na linha contínua de tratamento térmico e apresentavam dureza dentro do especificado após o ensaio, a receita dos mesmos era registrada. Porém, quando os materiais de espessura mínima e/ou de espessura máxima não apresentavam dureza dentro do especificado após ensaio, os parâmetros eram redefinidos. Então, outros corpos de prova eram cortados e submetidos a ensaio com os novos parâmetros, até que a receita fosse confirmada.

4.2.1 Parâmetros de Ensaio

Através do software instalado no computador interligado à linha de tratamento térmico, consegue-se obter os valores especificados e os valores reais para alguns parâmetros, como por exemplo, temperaturas dos fornos de austenitização e revenimento, potencial de carbono do forno de austenitização, temperaturas do óleo nos tanques de têmpera e de resfriamento, temperaturas dos líquidos da lavação, entre outros. O software permite ainda que estes valores sejam visualizados graficamente, sendo possível verificar as variações dos parâmetros num certo intervalo de tempo. Então, durante os ensaios, estes parâmetros eram observados para se ter a certeza de que nenhuma variação significativa estava ocorrendo.

Os parâmetros descritos a seguir, usados para a máquina de lavar de 5 estágios, máquina de lavar de 3 estágios e para o tanque de resfriamento foram os mesmos para todos os ensaios. Os ajustes necessários destes parâmetros na linha são realizados com pouca freqüência e, portanto, não influenciam nas propriedades do aço que está sendo tratado.

###### Parâmetros para a Máquina de Lavar de 5 Estágios

Temperatura Especificada da Água: 80ºC

Temperatura Especificada do Detergente: 80ºC

Temperatura Especificada do Ar de Secagem: 150ºC

Velocidade do Tambor: 1rpm

Vibração da Máquina de dois Movimentos: 80%

###### Parâmetros para a Máquina de Lavar de 3 Estágios

Temperatura Especificada da Água: 80ºC

Temperatura Especificada do Detergente: 80ºC

Temperatura Especificada do Ar de Secagem: 160ºC

Velocidade do Tambor: 1rpm

Vibração da Máquina de dois Movimentos: 70%

Parâmetros para o Tanque de Resfriamento/Enegrecimento:

Temperatura Especificada do Óleo de Enegrecimento : 65ºC

Velocidade da Esteira: 600mm/min

Agitador: 100%

A atmosfera do forno de austenitização e os parâmetros do tanque de têmpera podem provocar alterações nas propriedades do aço. Porém, estes não sofrem ajustes com freqüência. Então, estes parâmetros foram mantidos os mesmos para todos os ensaios e estão descritos a seguir.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Pressão Especificada** | **Vazão Especificada** |  |
| Nitrogênio Atmosfera | 4kg/cm² | 64% |  |
| Nitrogênio Cortina | 4kg/cm² | 35% |  |
| Propano | 1kg/cm² | 15% |  |
| Metanol | 2,5kg/cm² | 46% |  |

##### Tabela 2 – Componentes da atmosfera do forno de austenitização

##### **Parâmetros para o Tanque de Têmpera**

Temperatura do Óleo: 60ºC

Velocidade da Esteira: 600mm/min

Agitador: 80%

Os parâmetros que necessitam de ajustes com freqüência na linha contínua de tratamento térmico e que são responsáveis por alterações nas propriedades do aço são, basicamente, o potencial de carbono do forno de austenitização, como também as velocidades das esteiras e as temperaturas dos fornos de austenitização e de revenimento.

A seguir estão descritos os parâmetros obtidos para cada receita. As espessuras que estão sombreadas são materiais cujas bitolas selecionadas não foram encontradas no estoque de trefilados durante o estágio e, conseqüentemente, não puderam ser ensaiadas.

Receita 01

Material: 10B22

Variação de Espessura: 100%

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Dureza Especificada do Revenido | 22/33HRC | 22/33HRC | 25/34HRC | 25/34HRC | 23/34HRC |
| **Espessura (Bitola). Mínima** | M6 | M10 | 1/4 | 3/8 | 1/4 |
| **Espessura (Bitola) Máxima** | M8 | M12 | 5/16 | 7/16 | - |

Forno de Austenitização Forno de Revenimento

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Temperatura Especificada para Zona 1 | 850ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 1 | 470ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 2 | 880ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 2 | 470ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 3 | 890ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 3 | 470ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 4 | 890ºC |  | Velocidade da Esteira | 160mm/min |
| Temperatura Especificada para Zona 5 | 890ºC |  |  |  |
| Velocidade da Esteira | 140mm/min |  |  |  |
| Potencial de Carbono | 0,28% |  |  |  |

Receita 02

Material: 10B22

Variação de Espessura: 88,98%

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Dureza Especificada do Revenido** | 32/39HRC | 33/39HRC |
| **Espessura (Bitola) Mínima** | M10 | 1/4 |
| **Espessura (Bitola) Máxima** | M12 | - |

Forno de Austenitização Forno de Revenimento

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Temperatura Especificada para Zona 1 | 850ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 1 | 420ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 2 | 880ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 2 | 420ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 3 | 890ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 3 | 420ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 4 | 890ºC |  | Velocidade da Esteira | 160mm/min |
| Temperatura Especificada para Zona 5 | 890ºC |  |  |  |
| Velocidade da Esteira | 140mm/min |  |  |  |
| Potencial de Carbono | 0,28% |  |  |  |

**Receita: 03**

Material: 10B30

Variação de Espessura: 57,48%

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Dureza Especificada do Revenido** | 25/34HRC | 22/33HRC | 23/34HRC |
| **Espessura (Bitola) Mínima** | 1/2" | M14 | M18 |
| **Espessura (Bitola) Máxima** | 3/4" | M20 | M20 |

Forno de Austenitização Forno de Revenimento

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Temperatura Especificada para Zona 1 | 850ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 1 | 530ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 2 | 880ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 2 | 530ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 3 | 890ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 3 | 530ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 4 | 890ºC |  | Velocidade da Esteira | 160mm/min |
| Temperatura Especificada para Zona 5 | 890ºC |  |  |  |
| Velocidade da Esteira | 140mm/min |  |  |  |
| Potencial de Carbono | 0,35% |  |  |  |

Receita 04

Material: 10B30

Variação de Espessura: 11,11%

|  |  |
| --- | --- |
| **Dureza Especificada do Revenido** | 39/44HRC |
| **Espessura (Bitola) Mínima** | 9/16” |
| **Espessura (Bitola) Máxima** | 5/8” |

Forno de Austenitização Forno de Revenimento

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Temperatura Especificada para Zona 1 | 850ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 1 | 410ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 2 | 880ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 2 | 410ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 3 | 890ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 3 | 410ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 4 | 890ºC |  | Velocidade da Esteira | 160mm/min |
| Temperatura Especificada para Zona 5 | 890ºC |  |  |  |
| Velocidade da Esteira | 140mm/min |  |  |  |
| Potencial de Carbono | 0,35% |  |  |  |

Receita 05

Material: 10B30

Variação de Espessura: 66,67%

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Dureza Especificada do Revenido** | 32/39HRC | 32/39HRC | 33/39HRC |
| **Espessura (Bitola) Mínima** | M12 | M20 | 5/8” |
| **Espessura (Bitola) Máxima** | M16 | - | 3/4" |

Forno de Austenitização Forno de Revenimento

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Temperatura Especificada para Zona 1 | 850ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 1 | 450ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 2 | 880ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 2 | 450ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 3 | 890ºC |  | Temperatura Especificada para Zona 3 | 450ºC |
| Temperatura Especificada para Zona 4 | 890ºC |  | Velocidade da Esteira | 160mm/min |
| Temperatura Especificada para Zona 5 | 890ºC |  |  |  |
| Velocidade da Esteira | 140mm/min |  |  |  |
| Potencial de Carbono | 0,35% |  |  |  |

4.3 Medidas de dureza dos materiais ensaiados na linha

As medidas de dureza foram realizadas em materiais temperados e materiais temperados e revenidos. Para cada material foram analisadas a influência da espessura da seção e comparadas a seção do centro do comprimento com a seção da extremidade. Estão descritos abaixo os resultados obtidos para as espessuras (bitolas) mínima e máxima com seus comprimentos mínimo e máximo. As bitolas 1/4"x3.1/2” e 7/16”x1.1/2” do aço 10B22 e M12x80 do aço 10B30 apresentam apenas um comprimento. Para as demais bitolas, a seção do centro do comprimento mínimo não teve necessidade de ser analisada, pois sua distância em relação à seção cortada próxima à extremidade é muito pequena.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Dureza do Temperado** | | | | | | | | | **Dureza do Revenido** | | | | | | | | |
| **Receita** | **Bitola** | **Seção-Centro** | | | | **Seção-Extremidade** | | | | **Especificada** | **Seção-Centro** | | | | **Seção-Extremidade** | | | | **Especificada** |
| **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** |
| 1 | M6X10 | - | - | - | **-** | 44 | 42 | 42 | **43** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 31 | 30 | 29 | **30** | 22/33HRC |
| 1 | M6X70 | 45 | 45 | 45 | **45** | 46 | 44 | 46 | **45** | 34/48HRC | 28 | 28 | 28 | **28** | 28 | 29 | 30 | **29** | 22/33HRC |
| 1 | M8X10 | - | - | - | **-** | 39 | 41 | 41 | **40** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 29 | 31 | 29 | **30** | 22/33HRC |
| 1 | M8X120 | 41 | 40 | 39 | **40** | 41 | 41 | 41 | **41** | 34/48HRC | 27 | 27 | 27 | **27** | 29 | 27 | 27 | **28** | 22/33HRC |
| 1 | M10X15 | - | - | - | **-** | 39 | 39 | 40 | **39** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 28 | 29 | 30 | **29** | 22/33HRC |
| 1 | M10X150 | 42 | 41 | 41 | **41** | 41 | 40 | 41 | **41** | 34/48HRC | 27 | 28 | 29 | **28** | 27 | 29 | 29 | **28** | 22/33HRC |
| 1 | M12X20 | - | - | - | **-** | 39 | 40 | 40 | **40** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 29 | 29 | 31 | **30** | 22/33HRC |
| 1 | M12X180 | 41 | 41 | 42 | **41** | 40 | 40 | 41 | **40** | 34/48HRC | 30 | 28 | 29 | **29** | 29 | 27 | 28 | **28** | 22/33HRC |
| 1 | 1/4"X1/2 | - | - | - | **-** | 46 | 46 | 45 | **46** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 32 | 33 | 32 | **32** | 25/34HRC |
| 1 | 1/4"X4" | 47 | 46 | 46 | **46** | 46 | 48 | 46 | **47** | 34/48HRC | 29 | 30 | 31 | **30** | 30 | 30 | 30 | **30** | 25/34HRC |
| 1 | 5/16"X1/2 | - | - | - | **-** | 39 | 40 | 39 | **39** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 33 | 30 | 32 | **32** | 25/34HRC |
| 1 | 5/16"X6" | 42 | 41 | 41 | **41** | 41 | 41 | 41 | **41** | 34/48HRC | 30 | 29 | 29 | **29** | 30 | 31 | 30 | **30** | 25/34HRC |
| 1 | 3/8"X1/2 | - | - | - | **-** | 38 | 39 | 40 | **39** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 29 | 29 | 31 | **30** | 25/34HRC |
| 1 | 3/8"X6" | 41 | 42 | 43 | **42** | 40 | 41 | 40 | **40** | 34/48HRC | 28 | 28 | 28 | **28** | 30 | 29 | 30 | **30** | 25/34HRC |
| 1 | 7/16"X9/16 | - | - | - | **-** | 39 | 40 | 40 | **40** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 30 | 31 | 32 | **31** | 25/34HRC |
| 1 | 7/16"X4" | 39 | 39 | 39 | **39** | 39 | 40 | 40 | **40** | 34/48HRC | 29 | 29 | 29 | **29** | 29 | 30 | 30 | **30** | 25/34HRC |
| 1 | 1/4"X3.1/2 | 44 | 43 | 43 | **43** | 43 | 43 | 44 | **43** | 34/48HRC | 28 | 27 | 27 | **27** | 27 | 28 | 27 | **27** | 23/34HRC |
| 1 | 7/16"X1.1/2 | - | - | - | **-** | 40 | 41 | 42 | **41** | 34/48HRC | 27 | 28 | 28 | **28** | 30 | 31 | 30 | **30** | 25/34HRC |
| 2 | M10X30 | - | - | - | **-** | 43 | 43 | 43 | **43** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 38 | 38 | 38 | **38** | 32/39HRC |
| 2 | M10X90 | 44 | 44 | 44 | **44** | 43 | 42 | 44 | **43** | 34/48HRC | 37 | 36 | 36 | **36** | 38 | 39 | 38 | **38** | 32/39HRC |
| 2 | M12X40 | - | - | - | **-** | 44 | 44 | 46 | **45** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 36 | 36 | 36 | **36** | 32/39HRC |
| 2 | M12X80 | 42 | 43 | 43 | **43** | 42 | 43 | 45 | **43** | 34/48HRC | 34 | 35 | 35 | **35** | 35 | 35 | 35 | **35** | 32/39HRC |
| 2 | 1/4"X3/4 | - | - | - | **-** | 43 | 43 | 43 | **43** | 34/48HRC | - | - | - | **-** | 33 | 35 | 37 | **35** | 33/39HRC |
| 2 | 1/4"X2.1/4 | 44 | 45 | 45 | **45** | 44 | 43 | 43 | **43** | 34/48HRC | 37 | 35 | 35 | **36** | 36 | 35 | 36 | **36** | 33/39HRC |

Tabela 3 - Medidas de dureza dos aços trefilados 10B22 ensaiados na linha contínua de tratamento térmico.

Notas: N = ponto medido no núcleo da seção;

E = ponto medido a 2,5 mm da extremidade da seção.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Dureza do Temperado** | | | | | | | | | **Dureza do Revenido** | | | | | | | | |
| **Receita** | **Bitola** | **Seção-Centro** | | | | **Seção-Extremidade** | | | | **Especificada** | **Seção-Centro** | | | | **Seção-Extremidade** | | | | **Especificada** |
| **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** | **N** | **E** | **E** | **Média** |
| 3 | 1/2x1.3/4 | Falta de Material | | | | | | | | 40/50HRC | Falta de Material | | | | | | | | 25/34HRC |
| 3 | 3/4x1.1/4 | 40/50HRC | 25/34HRC |
| 3 | 3/4x6" | 40/50HRC | 25/34HRC |
| 3 | M14x25 | - | - | - | **-** | 50 | 48 | 48 | **49** | 40/50HRC | - | - | - | **-** | 26 | 29 | 29 | **28** | 22/33HRC |
| 3 | M14x150 | 49 | 49 | 49 | **49** | 49 | 48 | 49 | **49** | 40/50HRC | 30 | 30 | 30 | **30** | 30 | 31 | 30 | **30** | 22/33HRC |
| 3 | M20x85 | 49 | 47 | 49 | **48** | 49 | 49 | 50 | **49** | 40/50HRC | 30 | 32 | 32 | **31** | 29 | 32 | 33 | **31** | 22/33HRC |
| 3 | M20x130 | 48 | 47 | 48 | **48** | 49 | 49 | 50 | **49** | 40/50HRC | 31 | 33 | 33 | **32** | 28 | 32 | 33 | **31** | 22/33HRC |
| 3 | M18x30 | - | - | - | **-** | 49 | 49 | 50 | **49** | 40/50HRC | - | - | - | **-** | 27 | 32 | 33 | **31** | 23/34HRC |
| 3 | M18x150 | 48 | 49 | 50 | **49** | 49 | 50 | 49 | **49** | 40/50HRC | 29 | 32 | 31 | **31** | 28 | 34 | 34 | **32** | 23/34HRC |
| 3 | M20x30 | - | - | - | **-** | 49 | 50 | 49 | **49** | 40/50HRC | - | - | - | **-** | 30 | 33 | 33 | **32** | 23/34HRC |
| 3 | M20x150 | 48 | 51 | 51 | **50** | 49 | 49 | 49 | **49** | 40/50HRC | 32 | 33 | 33 | **33** | 32 | 34 | 33 | **33** | 23/34HRC |
| 4 | 9/16x1.5/8 | - | - | - | **-** | 47 | 49 | 48 | **48** | 40/50HRC | - | - | - | **-** | 41 | 41 | 41 | **41** | 39/44HRC |
| 4 | 9/16x2.1/4 | 49 | 48 | 49 | **49** | 49 | 49 | 48 | **49** | 40/50HRC | 40 | 41 | 41 | **41** | 40 | 41 | 41 | **41** | 39/44HRC |
| 4 | 5/8x54 | Falta de Material | | | | | | | | 40/50HRC | Falta de Material | | | | | | | | 39/44HRC |
| 4 | 5/8x2.1/2 | 40/50HRC | 39/44HRC |
| 5 | M12x80 | 47 | 48 | 48 | **48** | 48 | 49 | 49 | **49** | 40/50HRC | 36 | 37 | 37 | **37** | 37 | 37 | 37 | **37** | 32/39HRC |
| 5 | M16X70 | Falta de Material | | | | | | | | 40/50HRC | Falta de Material | | | | | | | | 32/39HRC |
| 5 | M16X130 | 40/50HRC | 32/39HRC |
| 5 | M20X60 | 49 | 49 | 48 | **49** | 48 | 49 | 48 | **48** | 40/50HRC | 35 | 36 | 36 | **36** | 35 | 36 | 36 | **36** | 32/39HRC |
| 5 | M20X80 | 49 | 49 | 49 | **49** | 48 | 49 | 48 | **48** | 40/50HRC | 36 | 36 | 36 | **36** | 35 | 36 | 36 | **36** | 32/39HRC |
| 5 | 5/8X4" | Falta de Material | | | | | | | | 40/50HRC | Falta de Material | | | | | | | | 33/39HRC |
| 5 | 3/4X2.3/4 | 40/50HRC | 33/39HRC |

Tabela 4 - Medidas de dureza dos aços trefilados 10B30 ensaiados na linha contínua de tratamento térmico.

Notas: N = ponto medido no núcleo da seção;

E = ponto medido a 2,5mm da extremidade da seção.

Nota-se que todas as durezas medidas ficaram dentro do especificado tanto para a têmpera como para o revenido.

Para as mesmas bitolas de mesmo comprimento, as médias obtidas na seção do centro do comprimento e na seção da extremidade não apresentaram diferenças significativas, variando no máximo dois graus de dureza.

Analisando as médias de dureza do núcleo e da extremidade de uma mesma seção, também se observa que não há diferenças significativas.

5 CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados utilizando material trefilado, dos registros dos produtos passados pela linha de tratamento térmico e do conhecimento dos operadores, o número de receitas necessárias pôde ser reduzido a ponto de otimizar a produção da linha, devido à diminuição dos ajustes necessários nos parâmetros dos Fornos de Austenitização e de Revenimento.

No caso dos parafusos, com aços do tipo 10B22 e 10B30, conseguiu-se reduzir para cinco receitas.

A variação de espessura para determinadas receitas ficou acima de 50%. Nos parafusos tem-se uma variação de até 100% numa mesma receita. No caso dos parafusos, os ensaios e a posterior análise de dureza não indicaram problemas quanto a esta diferença de espessura.

Pela análise de dureza efetuada nos produtos que foram submetidos a ensaios, notou-se que os valores sofrem pouca variação ao longo do comprimento e da seção da peça. Para todos os comprimentos e bitolas e/ou espessuras selecionados para ensaio, verificou-se que não há diferenças significativas de dureza entre o núcleo e a extremidade das seções, como também, não há diferenças significativas de dureza entre a seção da metade do comprimento e a seção da extremidade. Baseado nisto, pode-se afirmar que o tratamento térmico na linha contínua é eficiente e permite uma transformação homogênea das propriedades do aço.

Em algumas etapas surgiu a necessidade de encaixar produtos novos que estavam sendo tratados na linha, durante o estágio, nas receitas que estavam sendo construídas. As receitas obtidas devem ser atualizadas sempre que algum produto diferente estiver sendo tratado na linha.

Este artigo apresentou um guia prático para padronização do processo de tratamentos térmicos em fornos contínuos, com a padronização é possível dar escala na manufatura, reduzir custos com ajustes frequentes nos parâmetros do forno e manter sempre o mesmo padrão para os tratamento térmicos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] Anumula, R., Nookaraju, M., Selvaraj, K., Reddy, I. A. K., & Narayanan, V. (2013). A novel vanadium n-propylamino phosphate catalyst: synthesis, characterization and applications. *Materials Research*, *16*(1), 181-189.

[2] Bhadeshia, H., & Honeycombe, R. (2017). *Steels: microstructure and properties*. Butterworth-Heinemann.

[3] Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2009). Engineering materials. *Nature*, *25*, 28.

[4] da Maia, B. I., Futami, A. H., & de Oliveira, M. A. (2017). Desempenho de torque em porcas DIN 934 com Nylok® x porcas DIN 985 conforme a IFI 555. *Revista da UNIFEBE*, *1*(20), 43-54.

[5] Deb, P., & Chaturvedi, M. C. (1982). Coarsening behavior of cementite particles in a ferrite matrix in 10B30 steel. *Metallography*, *15*(4), 341-354.

[6] Dini, G. H. (2017). Estudo de diferentes ciclos de tratamento térmico de esferoidização para aços da família AISI 51XX.

[7] Edmonds, D. V., He, K., Rizzo, F. C., De Cooman, B. C., Matlock, D. K., & Speer, J. G. (2006). Quenching and partitioning martensite—A novel steel heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, *438*, 25-34.

[8] Hamada, A., & Kömi, J. (2018). Effect of microstructure on mechanical properties of a novel high-Mn TWIP stainless steel bearing vanadium. *Materials Science and Engineering: A*, *718*, 301-304.

[9] Hosseini, V. A., Karlsson, L., Hurtig, K., Choquet, I., Engelberg, D., Roy, M. J., & Kumara, C. (2017). A novel arc heat treatment technique for producing graded microstructures through controlled temperature gradients. *Materials & Design*, *121*, 11-23.

Krauss, G. (1990). Steels: heat treatment and processing principles. *ASM International, 1990,*, 497.

[10] Kim, Y. A., Muramatsu, H., Hayashi, T., Endo, M., Terrones, M., & Dresselhaus, M. S. (2004). Thermal stability and structural changes of double-walled carbon nanotubes by heat treatment. *Chemical Physics Letters*, *398*(1-3), 87-92.

[11] Kommel, L., & Kimmari, E. (2006). Boron carbide based composites manufacturing and recycling features. *Materials Science*, *12*(1), 48-52.

[12] Gill, F. L. (1968). *Boron Steels for Mechanical Fasteners* (No. 680127). SAE Technical Paper.

[13] Koistinen, D. P., & Marburger, R. E. (1959). A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *acta metallurgica*, *7*(1), 59-60.

[14] Santofimia, M. J., Zhao, L., & Sietsma, J. (2009). Microstructural evolution of a low-carbon steel during application of quenching and partitioning heat treatments after partial austenitization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *40*(1), 46.

[15] Shin, S., Jang, J., Yoon, S. H., & Mochida, I. (1997). A study on the effect of heat treatment on functional groups of pitch based activated carbon fiber using FTIR. *Carbon*, *35*(12), 1739-1743.

[16] Spirdione, J., Visser, W., Maciejewski, K., & Ghonem, H. (2017). Role of pearlite colonies on the dynamic flow stress of low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, *679*, 446-454.

[17] Suzuki, H., & McEvily, A. J. (1979). Microstructural effects on fatigue crack growth in a low carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *10*(4), 475-481.

[18] Takagi, H., Maruyama, K., Yoshizawa, N., Yamada, Y., & Sato, Y. (2004). XRD analysis of carbon stacking structure in coal during heat treatment. *Fuel*, *83*(17-18), 2427-2433.

[19] Thelning, K. E. (2013). *Steel and its heat treatment*. Butterworth-Heinemann.

[20] Zia, A. W., Zhou, Z., Shum, P. W., & Li, L. K. Y. (2017). The effect of two-step heat treatment on hardness, fracture toughness, and wear of different biased diamond-like carbon coatings. *Surface and Coatings Technology*, *320*, 118-125.

[21] Yudasaka, M., Ichihashi, T., Kasuya, D., Kataura, H., & Iijima, S. (2003). Structure changes of single-wall carbon nanotubes and single-wall carbon nanohorns caused by heat treatment. *Carbon*, *41*(6), 1273-1280.

[22] Wang, S., Chen, Z. H., Ma, W. J., & Ma, Q. S. (2006). Influence of heat treatment on physical–chemical properties of PAN-based carbon fiber. *Ceramics International*, *32*(3), 291-295.