

Um guia para padronização do processo de tratamento térmico em fornos contínuos

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

¹Programa de Mestrado em Engenharia de Produção - UNISOCIESC – Centro Universitário SOCIESC – Rua Albano Schmidt, 3333, Boa Vista, Joinville –SC
(recebido em 22-01-2018; aceito em 26-08-2019)

*inaciodamaia@gmail.com

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

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, foram utilizados testes de dureza de núcleo e extremidade dos produtos, bem como os testes para definir os parâmetros de regulagem do forno, como velocidade da esteira, temperatura em cada câmara do forno, temperatura da água, temperatura do detergente, temperatura do óleo de enegrecimento, entre outros. As amostras utilizadas para validação dos testes são casos reais da rotina de uma indústria que manufatura esses produtos. De acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa como: homogeneidade dos valores nas medições de dureza, baixa dispersão dos valores de dureza, controle dos parâmetros de regulagem do forno e da criação das receitas, pode-se concluir a possibilidade de padronização do 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 ovens. The tests described in this article were carried out in a metallurgical company that uses this process in its production flow, tests of core and end hardness of the products were used, as well as tests to define the kiln setting parameters such as belt speed, temperature in each oven chamber, water temperature, detergent temperature, blackening oil temperature, among others. The samples used for validation of the tests are real cases of the industry routine that manufactures those products. According to the results found in this research as: homogeneity of the values in the hardness measurements, low dispersion of the hardness values, control of the furnace regulation parameters and the creation of the recipes, it is possible to conclude the possibility of standardization of the treatment process for different types of steel in continuous ovens.

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

Introdução

Os processos de tratamentos térmicos 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 [3,4,6,7,13,15].

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 [2,3,5,16,18,20]. Estes fatores, porém, sofrem modificações de acordo com a composição química, dimensões e forma do aço.

O tratamento térmico realizado em linha contínua, permite que o material seja submetido aos processos de têmpera e revenimento de maneira contínua. No presente trabalho, tem-se como objetivo geral analisar o comportamento dos materiais de acordo com cada receita construída e através de ensaios realizados na linha contínua de tratamento térmico, na tentativa de reduzir o número de receitas e otimizar a produção.

Dependendo da temperatura em que se encontra, um aço-carbono pode apresentar variação na

sua estrutura cristalina [1,3,4,13,14]. 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) [2,5,17,21]. 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 Fe_3C 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.

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 [2,8,15,18,22].

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.

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.

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.

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.

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". O revenido 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.

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.

Materiais e Métodos

A linha Contínua de Têmpera e Revenimento com capacidade de 700 Kg/h, 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 1 mostra um esboço da linha contínua com suas etapas.

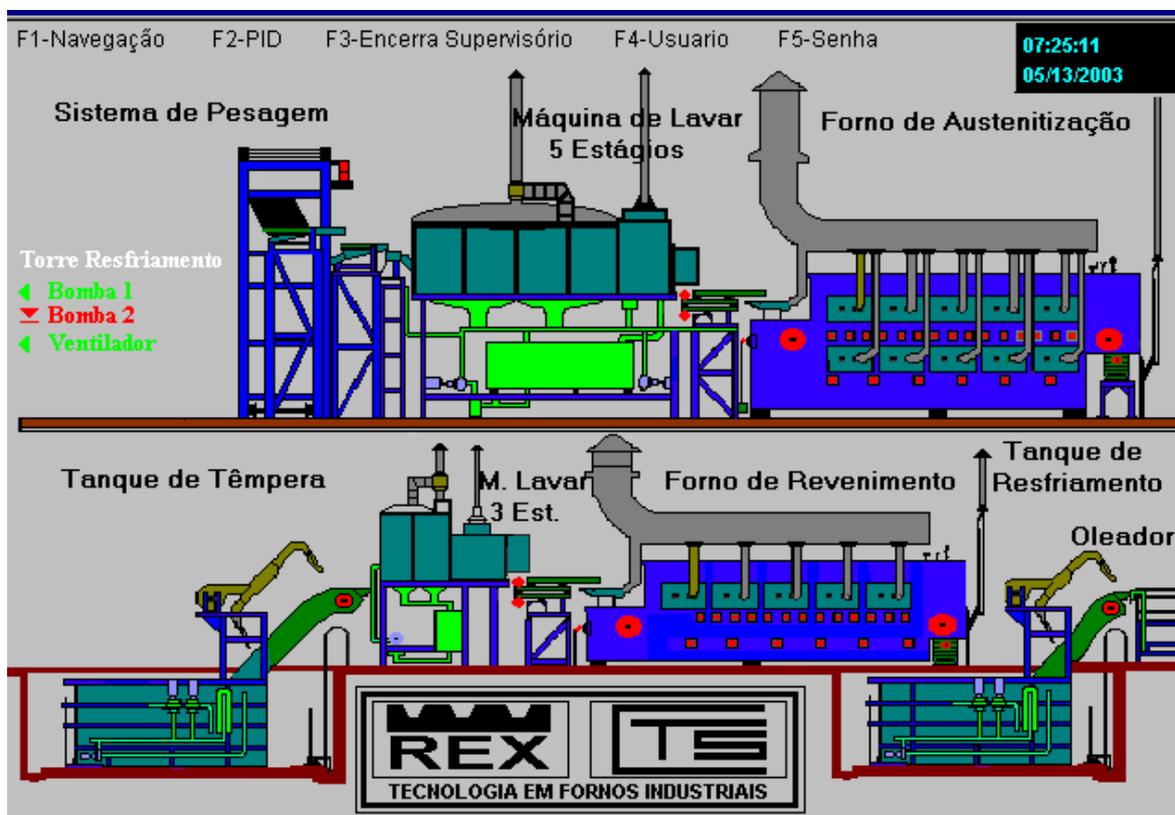


Figura 1 – Esboço da Linha Contínua de Tratamento Térmico.

Para o sistema de pesagem que é a 1ª etapa do processo, 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.

A máquina de lavar é o 2º estágio do processo, 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.

A 3ª etapa do processo é o forno de austenitização. O aquecimento das peças é realizado por cinco zonas de aquecimento, controladas por termopares ligados ao sistema, sendo quatro zonas a gás (zona 1, 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. O tempo de permanência das peças no forno depende da velocidade da esteira. Após o aquecimento, na 4ª etapa, as peças são alocadas em um tanque de têmpera contínuo com óleo entre 55°C e 65°C, possibilitando que as peças continuem em atmosfera controlada.

Na 5ª etapa as peças passam pela máquina de lavar, nesta etapa, são retirados os traços de óleo e outros resíduos provenientes da têmpera em óleo, deixando as peças limpas e secas.

A 6ª etapa refere-se ao revenimento, quando se utiliza uma temperatura de revenimento acima de 500°C, 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. A última etapa passa pelo 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, finalizando assim a Linha Contínua de Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento.

Métodos para obtenção das receitas

Inicialmente, registravam-se em procedimentos 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.... aplicados a 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.

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.

Ensaio na Linha Contínua de Tratamento Térmico

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 foi determinado que diferentes tipos de aços, durezas especificadas para o revenimento, ou variação de espessura acima de 50%, devem permanecer em receitas distintas. 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.

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 eram fatores 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.

Análise de dureza dos materiais ensaiados

Como as velocidades de aquecimento e resfriamento dos aços 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 distância 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.

Resultados e Discussões

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

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.

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

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

Parâmetros registrados nos ensaios

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.

Descrição das receitas de Parafusos.

Os produtos com o mesmo tipo de aço cujas durezas especificadas são próximas entre si foram submetidos aos mesmos parâmetros de ensaio.

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 eram registradas. 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.

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 frequência 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: 80°C
 Temperatura Especificada do Detergente: 80°C
 Temperatura Especificada do Ar de Secagem: 150°C
 Velocidade do Tambor: 1rpm
 Vibração da Máquina de dois Movimentos: 80%

Parâmetros para a Máquina de Lavar de 3 Estágios

Temperatura Especificada da Água: 80°C
 Temperatura Especificada do Detergente: 80°C
 Temperatura Especificada do Ar de Secagem: 160°C
 Velocidade do Tambor: 1rpm
 Vibração da Máquina de dois Movimentos: 70%

Parâmetros para o Tanque de Resfriamento/Enegrecimento:

Temperatura Especificada do Óleo de Enegrecimento: 65°C
 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 frequência. Então, estes parâmetros foram mantidos os mesmos para todos os ensaios e estão descritos a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – Componentes da atmosfera do forno de austenitização

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

Parâmetros para o Tanque de Têmpera

Temperatura do Óleo: 60°C

Velocidade da Esteira: 600mm/min

Agitador: 80%

Os parâmetros que necessitam de ajustes com frequência 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. Além dos parâmetros de regulagem se faz necessário estabelecer os limites de espessura (neste caso diâmetro) máximo e mínimo para se obter a dureza em detrimento de determinada receita.

A seguir estão descritos os parâmetros obtidos para cada receita.

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

Temperatura Especificada para Zona 1	850°C
Temperatura Especificada para Zona 2	880°C
Temperatura Especificada para Zona 3	890°C
Temperatura Especificada para Zona 4	890°C
Temperatura Especificada para Zona 5	890°C
Velocidade da Esteira	140mm/min
Potencial de Carbono	0,28%

Forno de Revenimento

Temperatura Especificada para Zona 1	470°C
Temperatura Especificada para Zona 2	470°C
Temperatura Especificada para Zona 3	470°C
Velocidade da Esteira	160mm/min

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

Temperatura Especificada para Zona 1	850°C
Temperatura Especificada para Zona 2	880°C
Temperatura Especificada para Zona 3	890°C
Temperatura Especificada para Zona 4	890°C
Temperatura Especificada para Zona 5	890°C
Velocidade da Esteira	140mm/min
Potencial de Carbono	0,28%

Forno de Revenimento

Temperatura Especificada para Zona 1	420°C
Temperatura Especificada para Zona 2	420°C
Temperatura Especificada para Zona 3	420°C
Velocidade da Esteira	160mm/min

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

Temperatura Especificada para Zona 1	850°C
Temperatura Especificada para Zona 2	880°C
Temperatura Especificada para Zona 3	890°C
Temperatura Especificada para Zona 4	890°C
Temperatura Especificada para Zona 5	890°C
Velocidade da Esteira	140mm/min
Potencial de Carbono	0,35%

Forno de Revenimento

Temperatura Especificada para Zona 1	530°C
Temperatura Especificada para Zona 2	530°C
Temperatura Especificada para Zona 3	530°C
Velocidade da Esteira	160mm/min

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

Temperatura Especificada para Zona 1	850°C
Temperatura Especificada para Zona 2	880°C
Temperatura Especificada para Zona 3	890°C
Temperatura Especificada para Zona 4	890°C
Temperatura Especificada para Zona 5	890°C
Velocidade da Esteira	140mm/min
Potencial de Carbono	0,35%

Forno de Revenimento

Temperatura Especificada para Zona 1	410°C
Temperatura Especificada para Zona 2	410°C
Temperatura Especificada para Zona 3	410°C
Velocidade da Esteira	160mm/min

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

Temperatura Especificada para Zona 1	850°C
Temperatura Especificada para Zona 2	880°C
Temperatura Especificada para Zona 3	890°C
Temperatura Especificada para Zona 4	890°C
Temperatura Especificada para Zona 5	890°C
Velocidade da Esteira	140mm/min
Potencial de Carbono	0,35%

Forno de Revenimento

Temperatura Especificada para Zona 1	450°C
Temperatura Especificada para Zona 2	450°C
Temperatura Especificada para Zona 3	450°C
Velocidade da Esteira	160mm/min

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 na sequencia 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. Os dados encontrados estão descrito conforme as Tabelas 3 e 4.

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

Receita	Bitola	Dureza do Temperado (HRC)								Especificada	Dureza do Revenido (HRC)								Especificada
		Seção-Centro				Seção-Extremidade					Seção-Centro				Seção-Extremidade				
		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

Notas: N = ponto medido no núcleo da seção; E = ponto medido a 2,5 mm 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.

Conclusões

A partir dos ensaios realizados, 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. Esse ganho de produtividade se dá principalmente pela padronização das receitas, devido à

diminuição dos ajustes necessários nos parâmetros dos Fornos de Austenitização e de Revenimento.

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

Receita	Bitola	Dureza do Temperado (HRC)								Especificada	Dureza do Revenido (HRC)								
		Seção-Centro				Seção-Extremidade					Seção-Centro				Seção-Extremidade				Especificada
		N	E	E	Média	N	E	E	Média		N	E	E	Média	N	E	E	Média	
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
5	M12x80	47	48	48	48	48	49	49	49	40/50HRC	36	37	37	37	37	37	37	37	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

Notas: N = ponto medido no núcleo da seção; E = ponto medido a 2,5mm da extremidade da seção.

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.

Por fim, este artigo apresentou um guia prático para padronização do processo de tratamentos térmicos em fornos contínuos, com a padronização das receitas é

possível dar escala na manufatura visto a menor necessidade de ajustes do forno, ganho de processamento em escala, facilidade de treinamento dos operadores, redução de custos com ajustes frequentes nos parâmetros do forno e manutenção constante do mesmo padrão para os tratamentos 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.N