

Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica

Carlos Roberto Ferreira

Eng° Metalurgista, mestrando, REDEMAT/UFOP - E-mail: wmcar@zipmail.com.br

Fernando Gabriel da Silva Araújo

Dr., Prof. Adjunto, Dep. de Física, REDEMAT/UFOP - E-mail: fgabriel@iceb.ufop.br

Cristovam Paes de Oliveira

Dr., Prof. Adjunto, REDEMAT/UFOP

André Barros Cota

Dr., Prof. Adjunto, Dep. de Física, REDEMAT/UFOP

Resumo

Esse trabalho descreve o tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos sem costura para a produção de hastes para sondagem geológica. São determinados, através de análises metalográficas e ensaios mecânicos, os parâmetros ideais para as etapas de têmpera e revenido, a fim de obter hastes nacionais tratadas com qualidade similar às disponíveis no mercado internacional. A determinação dos parâmetros operacionais do equipamento de indução eletromagnética, para têmpera e revenimento de tubos de aço SAE-1045, utilizados na confecção das hastes, permitiu obter um perfil de dureza sem grandes flutuações de valor, variando suavemente de um valor máximo próximo a 45HRc na extremidade externa da faixa tratada, para um valor mínimo próximo a 35HRc, no final da mesma.

Palavras-chave: Indução eletromagnética, hastes de sondagem, tratamento térmico

Abstract

This work describes the production of geological drill rods through electromagnetic induction thermal treatment of tubes. The research aims at determining, through metallography, mechanical tests and field tests, the ideal induction hardening and tempering parameters, to produce drill rods with qualities similar to the ones available in the international market. The determination of the induction hardening and tempering parameters of SAE-1045 steel tubes, for the production of geological drill rods, was capable of producing hardness profiles with low fluctuations in values, ranging from a maximum value of 45HRc close to the extremity, to minimum values close to 35HRc at the end of the treated region.

Keywords: *Electromagnetic induction, geological drill rods, thermal treatment*

1. Introdução

O tratamento térmico por indução eletromagnética é sem dúvida um dos mais efetivos processos de tratamento térmico para diversas aplicações, incluindo: têmpera total, têmpera superficial, revenido, alívio de tensões, recozimento, normalização, sinterização de metais pulverizados e outros^[1]. Na maioria das aplicações, o tratamento térmico por indução é usado somente em partes selecionadas da peça. O processo é executado em tempo muito curto e com alta eficiência, porque a energia é aplicada somente na parte onde o tratamento térmico é requerido. Isto promove alta produtividade, poucas distorções na geometria da peça, permite o uso de pequeno espaço físico para instalação de equipamentos e gera benefícios ambientais^[2,3].

No aquecimento por indução convencional, todas as três maneiras de transferência de calor (condução, convecção e radiação) estão presentes, sendo que as transferências de calor por convecção e radiação refletem os valores de perda de calor. Um alto valor de perda de calor reduz a eficiência da bobina de indução.

A profundidade de penetração de corrente, em determinado objeto sob tratamento, é definida pelo limite no qual a densidade de corrente alcança 37% do valor obtido na superfície^[4], conforme pode ser calculado pela equação 1^[1].

$$\delta = (\rho / \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f)^{1/2} \quad \text{eq.1}$$

$$\text{ou } \delta = 503 (\rho / \mu \cdot f)^{1/2}$$

sendo:

δ = profundidade de penetração, em metros;

ρ = resistividade elétrica do metal, em $\Omega \cdot \text{m}$;

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo;

μ = permeabilidade magnética da peça;

f = frequência do campo magnético alternado da bobina, em Hz.

A velocidade de aquecimento por indução de alta frequência varia de 27 a 227°C/s, o que chega a 100 vezes mais rápido que a velocidade de aquecimento

no forno convencional e condiciona importantes particularidades da transformação microestrutural. Isto ocorre porque a velocidade de nucleação da austenita cresce mais rapidamente que sua velocidade de crescimento linear. Em decorrência disto, acima das temperaturas de início (A_{c1}) e de fim (A_{c3}) da transformação em austenita, formam-se grãos austeníticos pequenos, com tamanhos médios variando de 2 a 7 μm ^[4]. Devido à elevada velocidade de aquecimento e à curta exposição à temperatura máxima, os ciclos dos processos de difusão mostram-se incompletos e os átomos de carbono distribuem-se não uniformemente na estrutura da austenita^[4].

O processo de têmpera de tubos, nos tratamentos térmicos por indução eletromagnética, permite obter uma estrutura martensítica na região tratada da peça, cuja variação de dureza ao longo da peça depende da distribuição de temperatura, da microestrutura prévia do aço, do seu teor de carbono, das condições de resfriamento e temperabilidade do aço e, por fim, do grau de superendurecimento, um fenômeno relacionado às altas velocidades de aquecimento, onde os valores de dureza aumentam de 2 a 8 pontos HRc, em relação ao máximo valor de dureza obtido, para um dado tipo de aço, por tratamento convencional. Isso permite, para situações onde se requer alta dureza superficial, usar uma classe de aço inferior à necessária, para a mesma aplicação, nos tratamentos em fornos convencionais. O superendurecimento pode ser atribuído ao fino tamanho de grão austenítico do aço tratado termicamente por indução eletromagnética, que resulta em pequenos pacotes de martensita na têmpera.

O tempo total para se completar o processo de endurecimento superficial, utilizando indução eletromagnética e incluindo-se os ciclos de austenitização e têmpera, é muito pequeno, em média de 5 a 27 segundos por componente^[1,10]. Tempo e temperatura são dois parâmetros críticos no revenimento por indução. Usualmente, adotam-se, para o revenimento por indução, temperaturas entre 300°C e 600°C^[1] com tempos um

pouco mais longos que os empregados na austenitização^[1].

Em tubos para sondagem geológica, o tratamento térmico por indução eletromagnética, abordado nesse trabalho, é especialmente adequado, por vários fatores. Trata-se de tubos de comprimento da ordem de metros, nos quais se tem a necessidade de maior dureza, principalmente nas extremidades, pois são as porções nas quais são usinadas as rosca de engate dos tubos, com conseqüente redução da espessura da parede. A necessidade de alta dureza nessas porções advém da menor espessura, conjuntamente com os esforços de rosqueamentos repetidos, associados à abrasão, tração e flexão durante a perfuração, já que esta tende a assumir uma trajetória helicoidal.

2. Procedimento experimental

O trabalho consistiu em tratar termicamente, por indução eletromagnética, tubos de fabricação nacional, de aço SAE-1045, com 3m de comprimento, 7cm de diâmetro externo e 0,5cm de espessura, na composição 0,48 %C, 0,85% Mn, 0,24% Si, 0,010% P, 0,005% S, 0,01% Cr, 0,02% Mo, 0,02% Al e 0,001 % Ti. Foi utilizado um equipamento de indução eletromagnética fabricado pela empresa Inductoheat, com ajustes e adaptação de projeto feitos por técnicos da Geosol e pelos autores. O equipamento foi adquirido com financiamento da FINEP, através de um projeto PADCT, tendo, como consorciadas, a Fundação Gorceix e a Geosol.

O tratamento de aquecimento por indução eletromagnética foi executado em várias condições de têmpera e revenimento, com correlações de tempo e potência de tratamento, versus temperatura atingida em cada etapa. As faixas de temperatura e tempo utilizadas foram de 800 a 1000°C, por 9 a 12s contínuos, para austenitização, e de 400 a 550°C, por 15 a 25s pulsados, para revenimento. Foi feita, a seguir, a correlação entre tratamento térmico e perfil de dureza obtido ao

longo do comprimento dos tubos e determinação das condições de têmpera e revenimento a serem utilizadas na produção dos tubos.

A têmpera dos tubos foi feita através de uma ducha de água, projetada para uma rápida remoção de calor, permitindo desenvolver a dureza e a estrutura do aço desejadas. Para evitar deformações na peça tratada em posição horizontal, ela foi mantida sob rotação constante, durante todo o tratamento.

Os tubos produzidos tiveram suas propriedades analisadas e comparadas com as dos outros, para várias condições de processamento, no sentido de obter controle e flexibilidade no processo.

3. Resultados e discussão

Tradicionalmente, aços SAE 1045 são austenitizados para têmpera a temperaturas por volta de 850°C ($T > A_{c3}$) em um intervalo de tempo de 15 a 30 minutos e revenidos a temperaturas próximas a 500°C , por 1h (uma hora). Porém, no tratamento térmico por indução eletromagnética, os tempos de aquecimento são da ordem de 10 segundos para austenitização e 20 segundos para revenimento.

A Figura 1 mostra fotomicrografias, com aumento de 1100X, da secção

reta da parede de um tubo de aço SAE 1045 no estado de entrega (a), e após o tratamento de têmpera e revenimento por indução eletromagnética (b). As regiões de relevo suave na Figura 1a, do aço no estado de entrega, correspondem a grãos de ferrita, enquanto as regiões com lamelas correspondem aos grãos de perlita. Na Figura 1b, a estrutura corresponde a regiões de martensita e martensita revenida, porém, ainda apresentando regiões que correspondem aos grãos de ferrita que não se transformaram em austenita no aquecimento. Isto revela que não houve homogeneização do teor de carbono e a transformação em austenita não se completou, durante o curto período de austenitização da estrutura. Revela também que parte da martensita não é revenida nos curtos tempos de tratamento. Essas observações implicam que as curvas de transformação do aço são deslocadas para maiores temperaturas, quando os tempos de aquecimento são da ordem de segundos.

O equipamento controla o ciclo de temperatura através da potência aplicada e tempo de circulação de corrente. Logo, a temperatura alcançada, em cada tratamento, será função, além dos parâmetros do equipamento, das características geométricas, estruturais e de composição da peça tratada. Uma consequência disto é que as temperaturas de tratamento são também resultado dos experimentos. No revenimento, porém, como a tem-

peratura sobe mais lentamente em função da potência pulsada, pode-se determinar, ainda, a temperatura máxima como parâmetro inicial.

Para a austenitização, foram empregadas temperaturas entre 900 e 997°C , no modo contínuo, nos tempos de 11 e 12 segundos. No revenimento, foram empregadas temperaturas entre 400 e 554°C , no modo pulsado, por tempos entre 15 e 18s. Foram feitas combinações variadas de condições de têmpera e revenimento, para os valores extremos e intermediários do intervalo acima, resultando em diferentes perfis de dureza.

A Figura 2 mostra os perfis de dureza ao longo da região tratada de tubos, nas condições extremas do intervalo de parâmetros para têmpera e revenimento testados. Todos os tratamentos de indução eletromagnética foram feitos a uma frequência de 10kHz e os resfriamentos foram feitos sempre com água e aditivo a 30°C . Os parâmetros de tratamento são mostrados nos próprios gráficos. Em todos os tratamentos, há uma grande perda de dureza entre 15 e 17cm da extremidade da haste, correspondendo à região de transição, a partir da qual não houve austenitização.

Em todas as condições de tratamento, observou-se o aumento da dureza ao final da região austenitizada, logo antes da região de transição. Esse aumento da dureza está provavelmente relacionado a heterogeneidades do revenimento ou

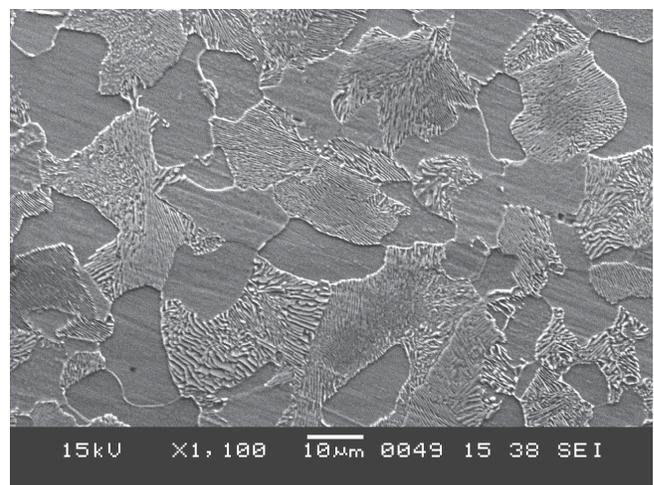
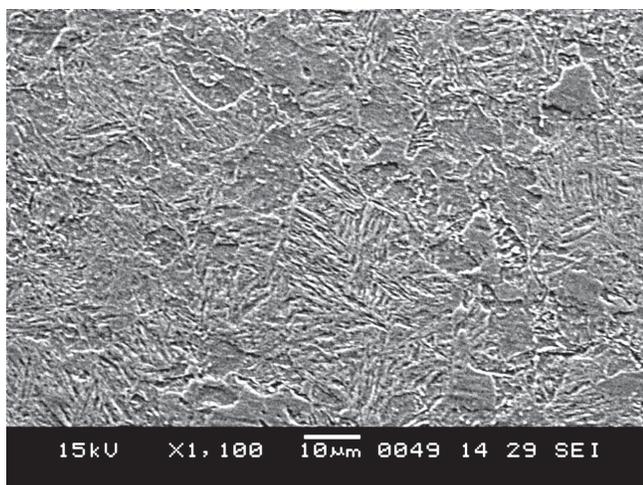


Figura 1 - Fotomicrografias da secção reta da parede de um tubo de aço SAE 1045 no estado de entrega (a), e após o tratamento de têmpera e revenimento por indução eletromagnética (b). 1100X

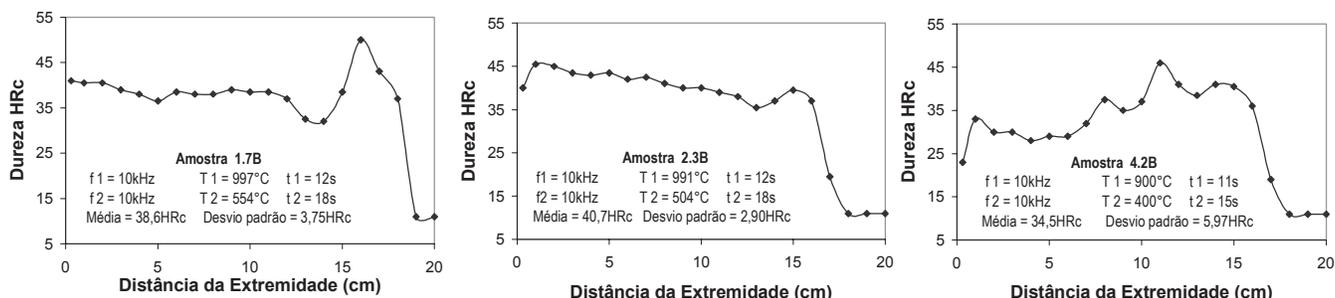


Figura 2 - Perfis de dureza, ao longo da região temperada e revenida, por indução eletromagnética, de tubos para sondagem geológica, nas condições extremas do intervalo de parâmetros para têmpera e revenimento testados. Os parâmetros com sub-índice 1 correspondem à austenitização e os parâmetros com sub-índice 2 correspondem ao revenimento.

a tensões de compressão na região, resultantes das diferenças de dilatação entre a porção austenitizada e temperada da peça e a porção que não alcançou a temperatura de austenitização.

Da análise dos perfis de dureza, foi escolhida a condição de tratamento térmico por indução eletromagnética, que produziria tubos com perfil de dureza sem grandes flutuações de valor, decaindo suavemente de um valor máximo próximo a 45HRC na extremidade, para um valor mínimo próximo a 35HRC no final da região tratada, com forma próxima à observada nos tubos produzidos fora do Brasil.

Tais parâmetros, que geraram o melhor perfil de dureza, são mostrados na figura 2b. Foi empregada uma temperatura de austenitização próxima de 1000°C, com potência contínua aplicada por 12 segundos, associada a uma temperatura de revenimento de 500°C, com potência pulsada aplicada por 18s. O tratamento nessas condições implicou durezas médias próximas de 40HRC com desvio-padrão inferior a 3HRC, em um perfil de dureza com decréscimo suave, desde a extremidade da haste, até o fim da região tratada.

Foram produzidos vários tubos com tratamentos sob as mesmas condições do tubo da Figura 2b e apresentando perfil de dureza semelhante àquele, confirmando a reprodutibilidade do método. Foram tratados, nessas condições, 150 tubos de aço SAE 1045, com 3,0m de comprimento e diâmetro externo de 7,0cm,

que estão em teste de campo, para verificação de durabilidade e desempenho.

4. Conclusões

A operação do equipamento especificada a uma frequência de 10kHz, com uma potência máxima de 150kW, mostrou-se eficaz no tratamento térmico por indução eletromagnética de tubos, para a produção de hastes de sondagem.

O solenóide acoplado ao equipamento, para o tratamento das hastes, resultou em região temperada e revenida não inferior a 15cm de extensão e de dureza na superfície da região tratada não inferior a 30HRC.

Tratamentos térmicos por indução eletromagnética, de tubos de aço SAE 1045 com 7cm de diâmetro externo e 0,5 cm de espessura, com austenitização a uma temperatura máxima de 991°C por 12s e revenimento a uma temperatura máxima de 504°C por 18s, são capazes de produzir materiais com propriedades mecânicas adequadas à confecção de hastes de sondagem para prospecção geológica.

5. Agradecimentos

À GEOSOL - Geologia e Sondagens Ltda e à FINEP pelo importante investimento em pesquisa, à Fundação Gorceix e à REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais.

6. Referências Bibliográficas

- 1- RUDNEV, V. I., LOVELESS, D. L., COOK, R. L., BLACK, M. R. Induction heat treatment: basics principles, computation, coil construction, and design considerations, In: TOTTEN, G. E., HOWES, M. A. H. *Steel Heat Treatment Handbook*, M. New York: Dekker, 1997. p. 765-867.
- 2- LOVELESS, D., RUDNEV, V., COOK, R., AND BOUSSIE, T. *Innovative space saving idea for induction heat treating*. Industrial Heating, march, 1998" p. 53-58.
- 3- RUDNEV, V., LOVELESS, D., LAMONTE, J., DEMIDOVICH, V., POWELL, J. *A balanced approach to induction tube and pipe heating*. p. 53
- 4- NOVIKOV, ILIA. *Teoria dos tratamentos térmicos dos metais*. Editora UFRJ, 1994. p.337-340.
- 5- INDUCTOHEAT - *Manual do Equipamento*, 2001.
- 6- GRUM, JANEZ. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, v.144, p. 212-226, 2001.
- 7- KRISTOFFERSEN, H., VOMACKA, P. Influence of parameters for induction hardening on residual stresses, *Materials & Design*, v. 22, p. 637-644, 2001.
- 8- CUNNINGHAM, J. L., MEDLIN, D. J., KRAUSS, G. Effects of induction hardening and prior cold work on a microalloyed medium carbon steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 8, p. 401-408, 1999.
- 9- TJERNBERG, A. Fatigue lives for induction hardened shafts with subsurface crack initiation, *Engineering Failure Analysis*, v.9, p. 45-61, 2001.
- 10- RUDNEV, V. I., LOVELESS, D. L., MILLER, P. J., BLACK, M. R. Progress in study of induction surface hardening of carbon steels, gray irons and ductile irons, *Industrial Heating*. 1996.

Artigo recebido em 16/10/2003 e aprovado em 28/02/2004.