

TRATAMENTOS TÉRMICOS POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE TUBOS DE AÇO SAE 4130 PARA UTILIZAÇÃO COMO HASTES DE SONDAGEM GEOLÓGICA¹

Marciano Quites Macedo²

Carlos Roberto Ferreira³

Fernando Gabriel da Silva Araújo⁴

Ronaldo Soares Eisele⁵

Resumo

Esse trabalho descreve os parâmetros ótimos para as etapas de têmpera e revenimento, através de testes dureza em amostras tubulares sem costura, do aço SAE 4130, a fim de obter material adequado para a utilização como hastes para perfuração em sondagem geológica. Inicialmente amostras do material no estado de entrega foram caracterizadas através de ensaios de dureza, tração e de metalografia. Posteriormente foram tratadas amostras em um forno de indução eletromagnética com variação da potência aplicada e tempo de circulação de corrente, para as etapas de austenitização e revenimento. Os ensaios de microdureza mostraram que o tratamento foi efetivo ao longo da espessura de todas as amostras. As amostras tratadas com 90 kW de potência durante 15 s, com circulação contínua de corrente, para a austenitização e 150 kW durante 22 s pulsados para o revenimento, apresentaram valores de dureza entre 37 HRc e 40HRc ao longo da região tratada, limites de resistência e de escoamento próximos aos indicados pela literatura, para a mesma classe de aço submetida outros métodos de aquecimento. Os resultados obtidos para o aço estudado foram satisfatórios.

Palavras-chave: Indução eletromagnética; Hastes de sondagem; Tratamento térmico.

INDUCTION HEAT TREATMENTS OF SAE 4130 STEEL TUBES FOR USE AS DRILL RODS

Abstract

In this study, was determined the optimal parameters for quenching and tempering, through tests on samples seamless tube, steel SAE 4130, to obtain material suitable for use as *drill rods* for exploration geological survey. Initially samples of the material in the delivery were characterized by testing the hardness, tensile and metallography. Subsequently samples were treated in a furnace of electromagnetic induction to change the power applied and duration of the current movement to the steps of austenitization and tempering. The microhardness tests showed that the treatment was effective over the thickness of all samples. The samples treated with 90kW of power for 15s, with continuous movement of current, for austenitization 22s pulse and 150kW during the tempering, the hardness varied between 37 and 40HRc along the treated region, and limits of resistance to the flow coming indicated by the literature for the same type of steel under other methods of heating. The results for the steel studied were satisfactory.

Key words: Electromagnetic induction; Geological drill rods; Thermal treatment.

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

2 *Físico, Msc. Eng. de Materiais – E-mail: marcianomacedo@geosol.com.br*

3 *Engº Metalurgista, Msc., Doutorando Eng. de Materiais, REDEMAT/UFOP - E-mail: carlosferreira@geosol.com.br*

4 *Dr., Prof. Associado, Dep. Física, REDEMAT/UFOP – E-mail: fgabriel@iceb.ufop.br.*

5 *Engº Geólogo, Geosol Geologia e Sondagem Ltda – E-mail: logística@geosol.com.br*

1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico por indução eletromagnética é um processo que vem sendo cada vez mais utilizado em campos diversos da engenharia. Este desenvolvimento se dá devido a algumas vantagens em relação aos tratamentos convencionais, como a rapidez em alcançar temperaturas elevadas aumentando a produtividade, a facilidade em tratar partes específicas de peças e ferramentas, a obtenção de uma menor superfície oxidada, entre outras.⁽¹⁾

O aquecimento por indução eletromagnética consiste em induzir uma corrente elétrica na peça a ser tratada através de um campo eletromagnético, esta corrente induzida aumenta a temperatura da peça devido ao efeito Joule e à histerese.⁽²⁾

Para o tratamento térmico por indução eletromagnética é necessário um projeto bem elaborado do indutor de corrente, pois um indutor mal projetado pode resultar em um perfil de temperatura não uniforme através da espessura da peça metálica, devido a efeitos eletromagnéticos.⁽²⁾ Estes efeitos podem causar problemas nas propriedades mecânicas obtidas, em relação às esperadas após tratamento.

O aquecimento por indução proporciona altas taxas de aquecimento o que afeta a cinética da formação da austenita, deslocando esta transformação para temperaturas mais altas.^(3,4)

As temperaturas de tratamento apropriadas para aços não dependem somente da taxa de aquecimento, mas são funções da microestrutura anterior e também da concentração de carbono.⁽³⁾ Os aços com grandes carbonetos estáveis não são tão susceptíveis ao endurecimento por indução e devem ser submetidos a um aquecimento prolongado e a temperaturas mais altas para a austenitização. Como consequência, um tempo mais longo de fornecimento de calor pode conduzir ao crescimento do grão austenítico prévio, maior superfície de oxidação e descarbonetação, além de maior distorção da forma da peça.⁽⁵⁾

Os contornos de grão austeníticos são sítios preferenciais para a nucleação das fases pro-eutetóides e perlita. Portanto, se o tamanho de grão austenítico em um aço é grosseiro, poucos sítios de nucleação estão disponíveis e como resultado a temperabilidade martensítica é aumentada.⁽⁶⁾ Por outro lado, o tamanho dos pacotes de martensita está diretamente relacionado ao tamanho dos grãos austeníticos prévios, e desta maneira, tanto o tamanho do pacote de martensita como o tamanho de grão austenítico podem ser correlacionados com propriedades mecânicas^(6,7). Então, quando se aumenta o tamanho dos grãos austeníticos, segundo a relação Hall-Petch, ocorre diminuição dos limites de resistência e de escoamento.

Neste trabalho foram obtidos os parâmetros mais adequados para o tratamento térmico por indução eletromagnética das extremidades de tubos do aço SAE 4130, para a utilização como hastes de prospecção para sondagem geológica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, amostras de um tubo sem costura do aço SAE 4130, no estado de entrega, de composição 0,29%C, 0,52%Mn, 0,013%P, 0,003%S, 0,19%Si, 0,01%Ni, 0,97%Cr, 0,16%Mo, 0,008%Cu, foram caracterizadas através de ensaios de dureza, tração e ensaio metalográfico. Posteriormente, amostras com diâmetro externo de

91mm e espessura 47,5mm, foram tratadas termicamente com variação de parâmetros em um forno de indução eletromagnética.

Foi utilizado um equipamento de indução eletromagnética fabricado pela empresa Inductoheat, que tem como principais características, uma potência máxima de operação de 150 kW, frequência fixa de 10kHz, operação nos modos contínuo e pulsado, controle do tratamento por definição das potências e tempos de operação e monitoramento da temperatura por pirômetro óptico.

As faixas de potência e tempo de indução utilizadas para o aquecimento foram de 90 kW a 97,5 kW e de 11 s a 15s contínuos, para a austenitização e no revenimento variou-se o tempo de 15 s a 30s com 150 kW pulsado. A têmpera das amostras foi feita através de ducha de solução polimérica projetada para promover maior remoção de calor e a peça foi mantida em rotação durante todo o processo para evitar deformações.

Após o tratamento térmico, foram cortadas amostras com aproximadamente 10 mm de largura ao longo do comprimento dos tubos tratados termicamente. Após preparação das superfícies foram obtidos os perfis de dureza Rockwell - HR_c ao longo do comprimento das amostras tratadas. Através da análise dos valores de dureza foram determinados os parâmetros mais adequados para o tratamento térmico. Estes parâmetros foram fixados para verificar a reprodutibilidade do tratamento térmico, o que foi feito com o tratamento de mais três amostras. Nestas amostras foram verificados o tamanho de grão austenítico prévio, os limites de resistência e de escoamento, através de três corpos de prova em cada amostra, e seus valores comparados com valores encontrados na literatura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura inicial do aço estudado consiste de ferrita e perlita, sendo a ferrita os grãos claros e a perlita os grãos escuros da Figura 1. A amostra apresentou uma fração volumétrica de ferrita de $V_{\alpha 0} = (48 \pm 0,6)\%$ e a estrutura de bandas vista na Figura 1 é devida aos processos de laminação e trefilação para a fabricação dos tubos de onde as amostras foram retiradas.

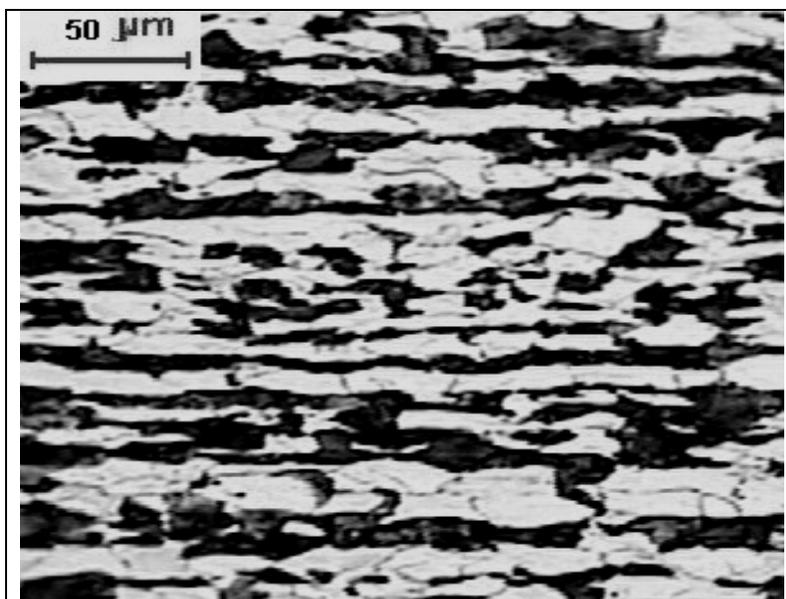


Figura 1. Imagem de microscopia ótica do aço SAE4130 no estado de entrega; amostra atacada com nital, com concentração 2%, durante 20s, ampliação de 200x.

Utilizando as equações de Andrews,⁽⁷⁾ os valores das temperaturas críticas de início e final de formação da austenita (Ac_1 e Ac_3) para o aço deste estudo, no aquecimento lento, são: $Ac_1 = (739)^\circ C$ e $Ac_3 = (814)^\circ C$. Como no aquecimento por indução eletromagnética a taxa de aquecimento é muito alta, a temperatura de final de formação da austenita é mais elevada.⁽⁸⁾

A amostra no estado de entrega apresentou uma dureza de aproximadamente 25 HRc e um limite de resistência de 816 MPa.

Como o tempo de indução de corrente para o aquecimento é extremamente curto, quanto menor o tempo de indução, mais heterogêneo foi o perfil de temperatura na peça e conseqüentemente o perfil de dureza ao longo da região tratada. A Figura 2 mostra os perfis de dureza na região tratada termicamente de quatro amostras e os respectivos parâmetros de indução eletromagnética.

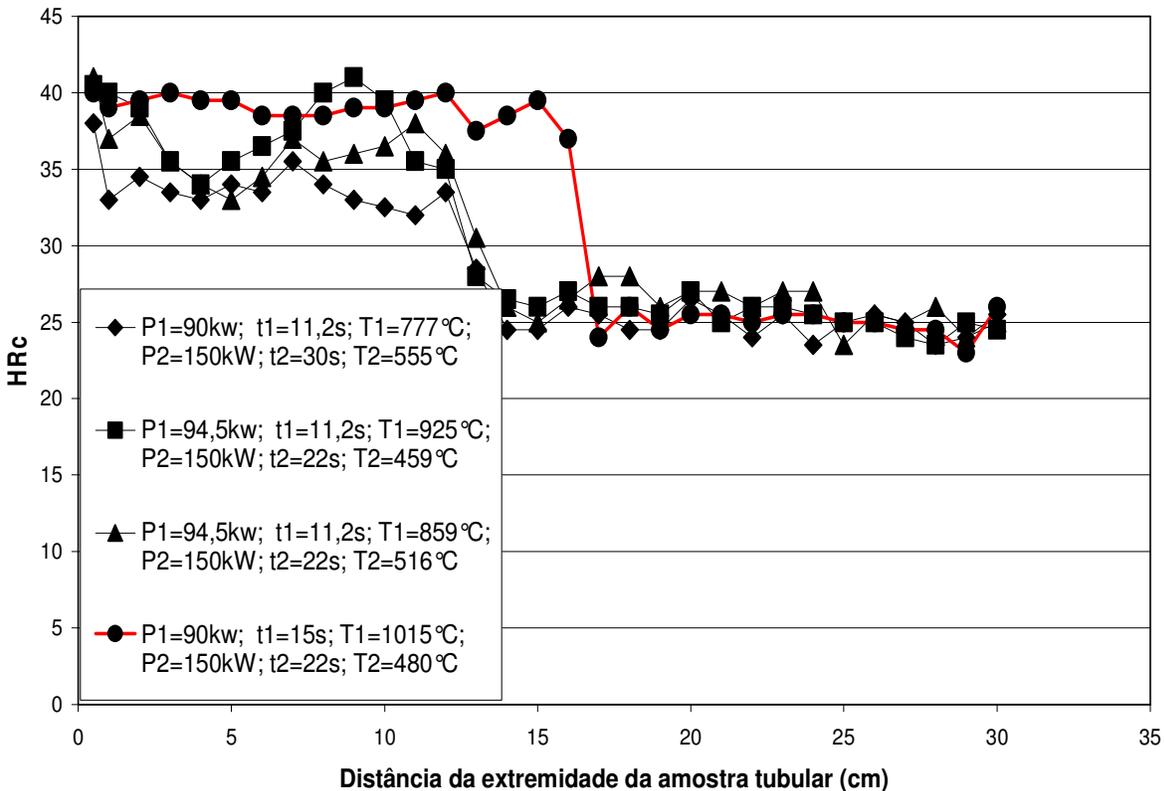


Figura 2. Gráfico mostrando o perfil de dureza Rockwell - HRc ao longo da região tratada das amostras tubulares e seus respectivos parâmetros de tratamento por indução, sendo: P₁ e t₁ a potência e o tempo de indução para a austenitização; T₁ a temperatura de têmpera; P₂ e t₂ a potência e o tempo de indução para o revenimento; T₂ a temperatura de revenimento.

Os parâmetros selecionados para tratamento térmico, a partir dos resultados do ensaio de dureza, de tubos para fabricação, em caráter experimental, de haste para prospecção para sondagem geológica, foram os da amostra austenitizada por indução com 90 kW durante 15 s e revenida com 150 kW durante 22 s. Esta amostra apresentou o perfil mais homogêneo, com valores de dureza compreendidos entre 37 HRc e 40 HRc.

Ferreira et al.⁽⁹⁾ obtiveram valores de dureza compreendidos entre 35 HRc e 45 HRc ao longo da região tratada termicamente por indução eletromagnética, de tubos do aço SAE 1045. Os materiais tratados naquele estudo apresentaram desempenho satisfatório em testes de campo como hastes de prospecção para sondagem geológica com aqueles valores de dureza.

A reprodutibilidade do tratamento térmico, com os parâmetros selecionados, em outras amostras, foi satisfatória não apresentando grandes variações do perfil de dureza entre as amostras.

A Figura 3 mostra o perfil de microdureza ao longo da espessura da amostra tratada com os parâmetros selecionados. No tratamento térmico por indução, a profundidade de penetração de corrente é função da frequência de indução,⁽¹⁰⁾ quanto menor a frequência maior a profundidade de penetração de corrente e, conseqüentemente, maior a profundidade da região tratada. Para a frequência de

10 kHz, os parâmetros utilizados resultaram em um tratamento efetivo em toda a espessura da amostra, como mostra a Figura 3.

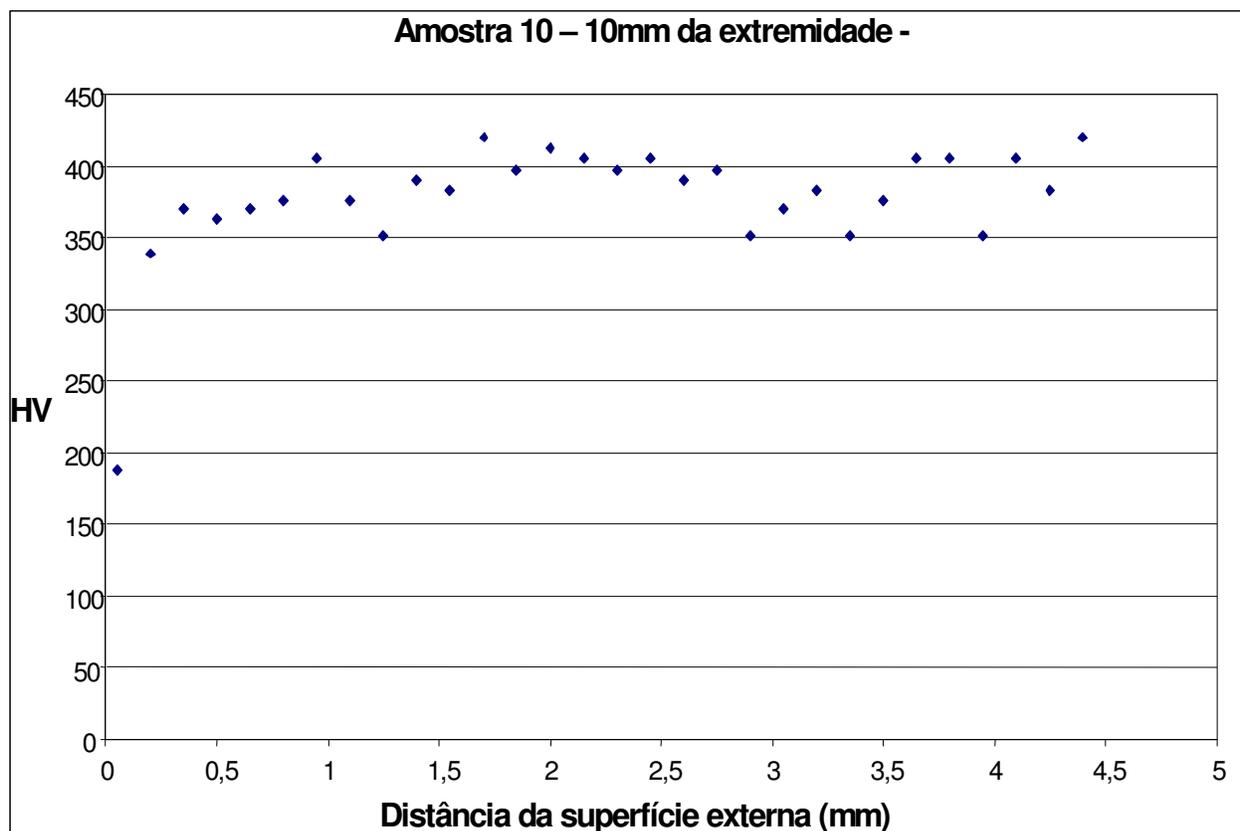


Figura 3. Perfil de microdureza Vickers, da amostra tratada com os parâmetros selecionados, ao longo da espessura da região tratada termicamente a 1cm da extremidade.

A Figura 4 mostra a microestrutura da região tratada, a 10 mm da extremidade, obtida através de microscopia eletrônica de varredura, de amostras do aço tratado neste trabalho com os parâmetros selecionados. A amostra apresentou uma microestrutura de martensita revenida, sem regiões contendo ferrita não transformada.

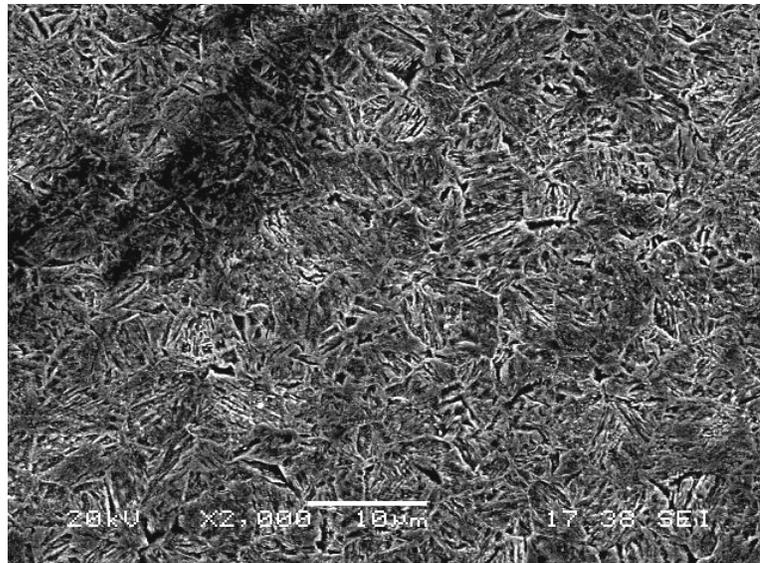


Figura 4. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do aço SAE 4130, após tratamento térmico de têmpera e revenimento por indução eletromagnética, com os parâmetros selecionados. Ataque químico de nital de concentração 2% durante 20 segundos, ampliação de 2000X;

A Figura 5 mostra os contornos dos grãos austeníticos prévios através de microscopia óptica, revelados por ataque químico, da amostra austenitizada por indução eletromagnética com os parâmetros selecionados.

No tratamento térmico por indução eletromagnética as altas taxas de aquecimento resultam em tamanhos de grãos austeníticos pequenos e heterogêneos devido aos curtos intervalos de tempo de tratamento. Os pacotes de martensita que se formam a partir da austenita, são limitados pelos contornos de grão da austenita⁽⁷⁾. Desta forma, cada pacote de martensita é efetivamente um grão austenítico e a resistência do material pode ser diretamente relacionada ao tamanho de grão austenítico prévio segundo a relação de Hall-Petch.⁽⁷⁾ O tamanho médio de grão austenítico prévio obtido nesta amostra foi de 11 µm com um limite de resistência de 1208MPa e limite de escoamento de 1.183 MPa. A literatura indica valores de limite de resistência e de escoamento de 1.380 MPa e 1.170 MPa respectivamente, para têmpera em água a partir de 845°C a 870°C, revenido a 450°C e limite de resistência e de escoamento de 1.170 MPa e 1.000 MPa respectivamente para revenimento a 500°C, para o aço SAE 4130 tratado termicamente em forno convencional.⁽¹⁰⁾

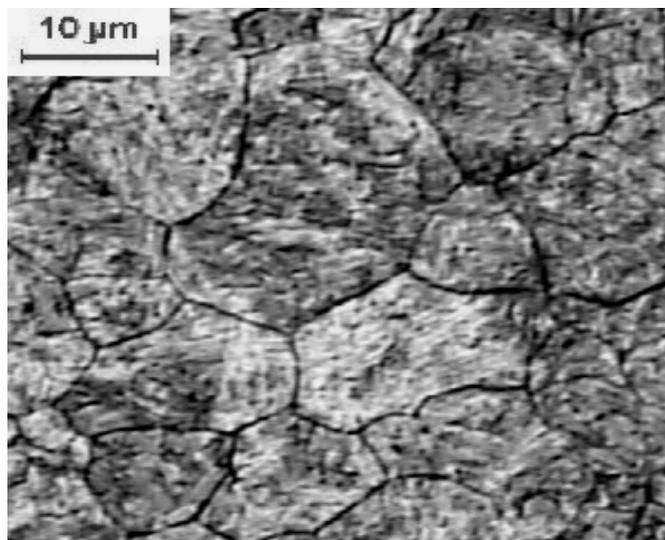


Figura 5. Fotomicroscopia óptica do aço SAE 4130, após tratamento térmico de têmpera e revenimento por indução eletromagnética, com os parâmetros selecionados. Ataque químico com solução contendo 2 g de ácido pícrico, 240 ml de água destilada, 2ml de ácido clorídrico e 10 gotas de teepol durante 4 minutos.

4 CONCLUSÃO

O tratamento térmico de amostras de tubos sem costura do aço SAE 4130, com diâmetro externo de 91 mm, espessura 47,5 mm, no forno de indução eletromagnética com frequência de 10kHz, potência aplicada de 90 kW, durante 15 s para a austenitização e 150 kW de potência durante 22s para o revenimento, resultou em uma região tratada termicamente sem grandes variações dos valores de dureza, não ficando abaixo de 37 HRC. As amostras tratadas com esses parâmetros apresentaram valores de limite de resistência e de escoamento próximos àqueles citados na literatura para o aço SAE 4130 tratado em forno convencional.

A frequência de 10 kHz mostrou, através dos valores de microdureza, resultar em um tratamento efetivo ao longo de toda a espessura do material.

Os tratamentos térmicos utilizando os parâmetros ótimos são capazes de produzir material com propriedades mecânicas adequadas à confecção de hastes de sondagem para prospecção geológica.

REFERÊNCIAS

- 1 RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; COOK, R. L. e BLACK, M. R. Handbook of induction Heating, Ed. Marcel Dekker,2003, p 11 – 136.
- 2 MARTINS, N. Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1975. p 189-303.
- 3 LOVELESS, D. L.; COOK, R. L.; RUDNEV, V. I. Considering Nature and Parameters of Power Supplies for Efficient Induction Heat Treating ; Industrial Heating, June 1995.
- 4 Rudnev,V. Can Fe-Fe₃C phase transformation diagram be directly applied in induction hardeningof steel? , Professor Induction Series, Heat Treating Progress, ASM Int., June/July, 2003, pp.27.

- 5 RUDNEV, V. Induction Heat Treating: The Basics & Beyond. In: II Conferência Brasileira de Temas de Tratamento Térmico, 2004, Atibaia, São Paulo, 22 a 25 de novembro de 2004
- 6 NOVIKOV, I. Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais, Editora UFRJ, 1994, p.337-340.
- 7 KRAUSS, G. Steels: Heat Treatment and Preprocessing Principles. ASM International, 1990, p. 145-256.
- 8 OLIVEIRA, F.L.G.; ANDRADE, M.S.; COTA, A.B. Kinetics of Austenite Formation During Continuous Heating in a Low Carbon Steel. Materials Characterization, vol 58, pg 256-261, 2007.
- 9 FERREIRA, C. R.; Araújo, F. G. S.; Oliveira, C. P.; Cota, A. B.; Tratamento Térmico Por Indução Eletromagnética em Tubos de Aço SAE 1045 Para produção de Hastes de Sondagem Geológica - REM: Revista de Escola de Minas; Ouro Preto, Março de 2004.
- 10 ASM Metals Hand Book. vol. 4