

PRODUÇÃO DE COROAS DE PERFURAÇÃO USANDO INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA COMO FONTE DE AQUECIMENTO.

Ferreira, C.R. ⁽¹⁾; Sade, W ⁽¹⁾; Guimarães, P.H.B.P ⁽¹⁾; Araújo, F.G.S ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto Federal Minas Gerais (IFMG), Campus Ouro Branco, Rua Afonso Sardinha, 90, Ouro Branco – MG, 35420-000, e-mail address: carlos.ferreira@ifmg.edu.br

⁽²⁾ Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Departamento de Física.

Resumo

Neste trabalho, foram realizadas investigações para estabelecer parâmetros que permitiram otimizar a operação de um forno de aquecimento por indução eletromagnética, especialmente desenvolvido, para fusão de ligas metálicas e, assim, produzir, para perfuração em sondagem geológica, coroas em escala real. As coroas produzidas consistiram de compósitos de pós de W, sinterizados com uma liga, infiltrante, Cu-43Zn-1Sn (% em peso), consolidados através de aquecimento por indução eletromagnética em moldes de grafite. Foram determinados os parâmetros eletromagnéticos, as condições de tempo e de temperatura que produziram coroas com características adequadas às operações de perfuração para sondagem geológica. A produção de coroas por indução eletromagnéticas permitiu reduzir o tempo total, para conformação, de 60 minutos em fornos convencionais, para 7 minutos em fornos de indução.

Palavras chave: perfuração, sondagem geológica, indução eletromagnética.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente coroas usadas em perfuração para sondagem geológica são consolidadas em fornos elétricos, do tipo mufla, sendo necessário para aquecimento e densificação, do conjunto moldado, um intervalo de tempo de aproximadamente 60 minutos, dos quais 35 a 45 minutos são gastos para atingir uma isoterma de 1050 °C (encharque) e o tempo restante é gasto na manutenção de uma faixa de

temperatura (1150 °C) na qual ocorrerá a etapa de infiltração da liga e consequente consolidação da coroa.

A escolha do aquecimento por indução eletromagnética é devida, principalmente, ao tempo reduzido de duração das etapas para aquecimento e infiltração de uma liga metálica no esqueleto poroso, pois elas são executadas em alguns segundos, enquanto nos processos convencionais de aquecimento, as etapas, são executadas em dezenas de minutos. O aquecimento por indução eletromagnética é, em princípio, de alta eficiência, alta produtividade, permite aquecimento somente em regiões selecionadas e exige menor espaço físico para instalação de equipamentos gerando, assim, benefícios ergonômicos e ambientais. (1,2)

A velocidade de aquecimento por indução eletromagnética, de alta frequência, pode alcançar mais de 300 °C/s, o que chega a ser 100 vezes mais rápido que a velocidade de aquecimento em forno mufla e podem condicionar importantes particularidades na transformação microestrutural dos metais (2).

Os sistemas de aquecimento por indução eletromagnética combinam fenômenos eletromagnéticos e de transferência de calor e, qualquer material condutor de eletricidade poderá ser aquecido. Assim, quando imerso em campo magnético variável, aparecerá no material uma força eletromotriz induzida, que provocará a circulação de uma corrente elétrica, induzida, chamada corrente de Foucault. A circulação de corrente nos materiais se dará, preferencialmente na superfície, provocando o aquecimento da região por efeito Joule (3).

Os sistemas de indução consistem de dois condutores; um é o indutor que transporta a corrente da fonte e o outro é a peça localizada próxima ao indutor. Correntes são induzidas na peça por um campo magnético, externo, alternado. A figura 1 ilustra, esquematicamente, a análise eletromagnética no sistema, composto por uma bobina de múltiplas voltas, para aquecimento de tubos por indução.

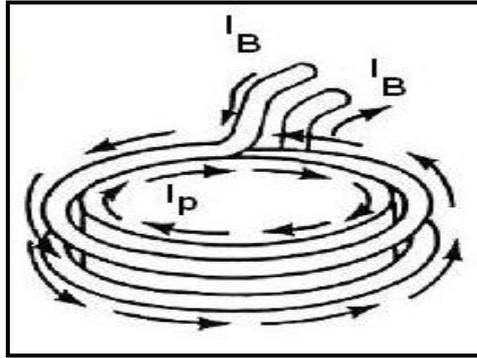


Figura 1 - Análise eletromagnética de um sistema composto por uma bobina de múltiplas voltas (I_B = corrente na bobina) para aquecimento, por indução, de tubulares (I_P = corrente na peça) ^(3,4)

Devido aos vários fenômenos eletromagnéticos, a distribuição de corrente dentro de um indutor e de uma peça não é uniforme. Essa não uniformidade causa um perfil de temperatura também não uniforme na peça. Uma distribuição de corrente não uniforme pode ser causada por vários fenômenos eletromagnéticos. Como exemplo de fenômenos eletromagnéticos tem-se; o efeito superficial que é provocado pela distribuição de corrente não uniforme dentro de uma seção através do condutor e o efeito de anel eletromagnético que resulta em grande parte corrente fluindo dentro de uma fina camada superficial interna. ^(1,2,3)

Para o cálculo da distribuição da densidade de corrente, ao longo da espessura de uma peça, adota-se, frequentemente, a equação (A) apresentada a seguir ^(4,5).

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \times e^{-y/\delta} \quad (\text{A})$$

Onde:

\mathbf{I} - é a densidade de corrente (A/m^2) em uma distância y (m) da superfície ao centro da peça;

\mathbf{I}_0 - é densidade de corrente na superfície da peça (A/m^2);

δ - é a profundidade de penetração de corrente (m).

Devido ao efeito superficial, aproximadamente 86% da corrente concentra-se na camada superficial do condutor, em uma região chamada de camada de penetração na qual, despende-se, aproximadamente 87% de toda energia calorífica. O grau do efeito superficial depende da frequência da corrente alternada e de propriedades, como resistividade elétrica e permeabilidade magnética relativa, do material aquecido. A profundidade de penetração da corrente, diminui com a elevação da frequência e aumenta com a resistividade da peça ^(1,3).

De acordo com a equação (A) a densidade de corrente induzida, numa peça, tem seu valor máximo na superfície e reduz exponencialmente em direção ao centro da peça. A profundidade de penetração de corrente em determinado objeto é definida pelo limite no qual a densidade de corrente alcança 37% do valor obtido na superfície ^(4,5).

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi executado seguindo as seguintes etapas:

1. Testes preliminares do equipamento de aquecimento, por indução eletromagnética, para produção de coroas para sondagem geológica, visando um ajuste no equipamento básico
2. Alterações no projeto do forno de indução para tornar possível a programação do equipamento para operação em ciclos de aquecimento de modo contínuo e, também, no modo pulsado;
3. Seleção de uma liga metálica, “infiltrante”, para composição da matriz, metálica, aplicada na produção de coroas para perfuração em sondagem geológica;
4. Correlações de tempo de circulação de corrente e potência de aquecimento, versus temperatura máxima atingida para fusão e infiltração de uma liga “infiltrante”, em função do diâmetro da coroa (diâmetro interno 47,60 mm e diâmetro externo 75,30 mm) produzida;
5. Avaliação estrutural das matrizes metálicas obtidas em função da temperatura máxima atingida e das misturas empregada

A metodologia do trabalho consistiu no estudo das propriedades físicas, da seleção e do uso de uma mistura de tungstênio, pulverizado, de tamanhos médios distintos, 35 % W (2,8 - 4,4 μm) acrescidos de 65 % W (14 -17 μm), para a obtenção da matriz metálica e produção das coroas.

A mistura de metais, pulverizados, foi homogeneizada em túbula durante 15 minutos sob velocidade de 80rpm, moldada em moldes de grafite e submetida a uma etapa de sinterização e infiltração metálica por fase líquida de uma liga de composição Cu-43Zn-1Sn (% em peso), de ponto de fusão 870 °C, sob a forma de arames de 4 mm em diâmetro cortados em pedaços de 5,0 cm de comprimento.

Após moldagem procedeu-se, para consolidação das coroas sem diamantes, os ciclos de aquecimento. Para melhorar a fluidez da liga infiltrante, através do esqueleto poroso, fez-se, em cada coroa, a adição de 7,0 g de um pó fluxante (bórax - anidro).

Encerrado os ciclos de aquecimentos procedeu-se a compactação e densificação das coroas. As peças sofreram, simultaneamente, fora do forno; prensagem uniaxial sob pressão da ordem de 800 Psi e resfriamento, com água em circulação no interior das bandejas de apoio instaladas nas prensas. A figura 2 apresenta fotografias do equipamento já operacional e etapas do processo de obtenção das coroas.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 2 - Fotografias de (a) a (c) do equipamento já operacional nas etapas do aquecimento por indução eletromagnética e, em (d), prensagem para fabricação de coroas de perfuração para sondagem geológica.

O equipamento, de indução eletromagnética, usado no presente estudo possui o inversor IGBT (transistor bipolar com gatilho isolado) que funciona como um comutador, permitindo ligar o equipamento quando uma tensão positiva é aplicada à base, e o desligando, quando a tensão está perto de zero ou indo para valores negativos em relação ao emissor. Uma configuração do circuito ponte em meia onda foi projetada, para fornecer uma saída de baixa tensão (tipicamente 50 – 100 V) para a bobina de aquecimento por indução de baixa impedância ⁽³⁾. As especificações do equipamento são ⁽⁶⁾:

- Fonte: trifásica 60 hz.
- Potência máxima: 50,0 kw.
- Freqüência: 7 – 10 khz.
- Tensão: 460 V.
- Indutor: 215 mm de diâmetro e 154 mm de comprimento (para coroas de até 100 mm de diâmetro).

Por uma questão técnica, tal equipamento mostrado na figura 3, não controla os ciclos diretamente pela temperatura, mas pela potência aplicada e pelo tempo de circulação de corrente. Esse fato ocorre em função de que as variações de temperatura são muito rápidas no processo, com muitas flutuações, em poucos segundos, influenciadas, inclusive, pelas características do material trabalhado.

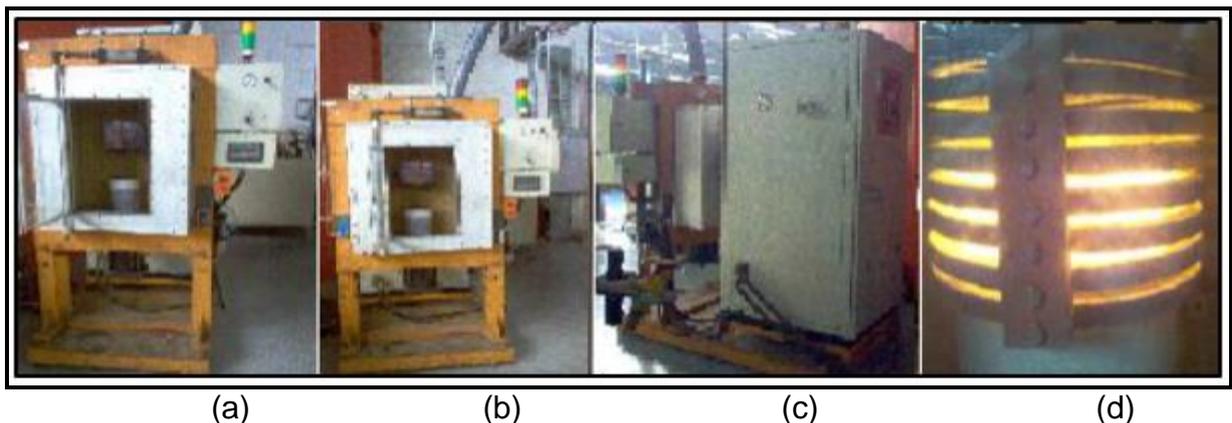


Figura 3 - Forno de indução eletromagnética: em (a) e (b) aspectos da câmara de aquecimento, em (c) vista lateral do compartimento no qual se encontram os dispositivos elétricos do forno e em (d) aspectos da bobina de indução durante uma operação de aquecimento ⁽²⁾.

O monitoramento dos ciclos térmicos do processo foi feito com um pirômetro ótico no qual o valor de emissividade térmica, usado para o grafite, foi ajustado em 0,72. A temperatura mínima, para leitura e apresentação dos valores no painel digital do equipamento, foi estabelecida em 700 °C e o valor máximo em 1350°C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As altas velocidades de aquecimento desenvolvidas nesse trabalho não permitem o controle do processo, por temperatura da peça, de maneira que a potência e o tempo de aquecimento foram ajustados, para se alcançar às temperaturas desejadas.

Para consolidação das coroas, os valores de potência, de tempo para circulação de corrente elétrica e, do tempo para aquecimento, foram realizados com rigor, em face de tais valores se constituírem em parâmetros críticos do processo de produção, por indução eletromagnética, de coroas para sondagem geológica, livres de defeitos.

A tabela 1 apresenta a relação das condições de potência, de tempo de aquecimento e as respectivas temperaturas, máximas, alcançadas em cada fase do ciclo de aquecimento, por indução eletromagnética, que resultaram em peças isentas de defeitos. Nessa tabela a letra (P) indica que o modo de circulação de corrente foi pulsado.

Tabela 1: Relação entre as condições de potência, tempo de aquecimento e temperaturas alcançadas em cada ciclo de aquecimento que permitiram a produção de coroas de perfuração.

INFILTRANTE	PARÂMETROS			
	FREQUÊNCIA = 10kHz			
AMOSTRA	CICLOS	POTÊNCIA (KW)	TEMPO (s)	T MAX. (°C)
9	1	20	30	679
	2	25	30	909
	3	35	20	1052
	4	40	280	1150

Para a fusão e infiltração de uma liga Cu-43Zn-1Sn, foram gastos durante a circulação de corrente elétrica, nos modos contínuo e pulsado (P), tempos de 80 e 280 segundos respectivamente, permitindo atingir a temperatura de 1150 °C. Foram feitas combinações variadas de condições de aquecimento, para os valores extremos e intermediários do intervalo acima, resultando em diferentes condições de conformação.

Sob as mesmas condições da amostra 9 (tabela 1) foram produzidas 20 peças, confirmando a reprodutibilidade do método. A figura 4 apresenta algumas das coroas produzidas



Figura 4 - Amostras das coroas de perfuração produzidas, por indução eletromagnética, segundo os parâmetros da amostra 9.

Com o funcionamento normal do equipamento, sob as mesmas condições da amostra 9 (tabela 1) foram produzidas, por indução eletromagnética, 20 coroas confirmando a reprodutibilidade do método. Incluindo as manobras de posicionamento e movimentação, foram produzidas 9 unidades por hora resultando em um tempo médio de produção, de 6 a 7 minutos para cada coroa. Se comparada com a rota convencional de produção em forno mufla, para o mesmo intervalo de tempo, o uso de indução eletromagnética, permitirá mediante ajustes triplicar a produção de coroas

Em todas as condições de processamento nas quais se usou partículas da liga metálica infiltrante Cu-43Zn-1Sn de massa inferior a 3,0 g (25 mm) observou-se a ocorrência de projeções, para fora do molde, de partículas das ligas infiltrantes. Tal evento ocorreu quando se aplicou, ao circuito elétrico, no primeiro ciclo de aquecimento, potência superior a 27,5 kw. Esse fenômeno se deu no início da

circulação de corrente elétrica para realizar o aquecimento e sinterização das coroas e, está provavelmente, relacionado ao campo magnético induzido na liga infiltrante.

Experimentalmente, foi comprovado que devido ao início de circulação de corrente, no primeiro ciclo para aquecimento, houve perda de liga infiltrante superior 60 g, uma vez que partículas a liga Cu-43Zn-1Sn, sobreposta ao “esqueleto” de metais pulverizados moldados, foram arremessadas para fora do molde. Tal derrame gerou peças defeituosas devido à falta de penetração do metal infiltrante nos diâmetros interno e externo, na “face” das coroas e na região de conexão da coroa às demais ferramentas para sondagem geológica.

Para atenuar as perdas metálicas devido às projeções de partículas, resultantes dos fenômenos eletromagnéticos, poderá ser aumentada a massa de cada segmento ou partículas da liga Cu-43Zn-1Sn em uso. Assim, para iniciar o processo de aquecimento com uma potência de 40 kw as partículas da liga infiltrante, Cu-43Zn-1S deverão apresentar massa mínima de 8,0 gramas.

CONCLUSÕES

A operação do equipamento, de indução eletromagnética, especificada a uma frequência de 10 kHz, com uma potência mínima, aplicada no modo contínuo, de 20 kw para realização do primeiro ciclo de aquecimento, durante 30 s, seguidos dos ciclos cujas potências aplicadas, também no modo contínuo, foram de 25 e 35 kw por 30 e 20 s respectivamente, e a máxima potência de 40 kW aplicada de modo pulsado durante 280 s mostrou-se eficaz, quando se usou a liga Cu-43Zn-1Sn, para a produção de coroas de perfuração para prospecção geológica;

O aquecimento por indução eletromagnética, para fusão e infiltração de ligas metálicas em misturas de pós de tungstênio, se mostrou eficaz para produzir estruturas isentas de defeitos volumétricos e adequadas à confecção de coroas de perfuração para prospecção geológica, quando se realiza ciclos, durante 360 s, para aquecimento de uma liga Cu-43Zn-1Sn até uma temperatura máxima de 1150 °C.

Quando no início do processo de aquecimento, por indução eletromagnética, se aplicou potência acima de 25 kW para fusão de partículas, da liga Cu-43Zn-1Sn, de massa individual inferior a 3,0 g, houve projeções de tais partículas. A perda de

liga infiltrante, fato que ocorre em função de ela se derramar devido ao início de circulação da corrente elétrica, sendo superior a 60 g, resulta em peças incompletas, o que leva à perda do produto sinterizado.

Para reduzir as perdas da liga infiltrante, durante o início da circulação de corrente, no processo de aquecimento por indução eletromagnética, com aplicação de potência a partir de 25 kW, recomenda-se usar partículas metálicas da liga Cu-43Zn-1Sn com massa mínima de 8,0 g;

Como mencionado, o equipamento usado controla o ciclo de temperatura através da potência aplicada e do tempo de circulação de corrente. Logo, a temperatura alcançada em cada etapa de aquecimento será função, além dos parâmetros do equipamento, das características geométricas, estruturais e de composição das coroas consolidadas. Uma consequência disto, é que as temperaturas de aquecimento são também resultados dos experimentos.

Na etapa de infiltração metálica, a temperatura, em função da potência pulsada, sobe mais lentamente. Sendo assim, pode-se determinar a temperatura máxima como parâmetro inicial do processo de produção.

BIBLIOGRAFIA.

1. FERREIRA, C.R. **Produção de Coroas por indução eletromagnética para sondagem geológica em quartzito.** 2010, 210 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT – UFOP/MG, Ouro Preto
2. FERREIRA, C.R. **Tratamento térmico por indução eletromagnética de hastes de aço SAE 1045 para sondagem geológica.** 2004, 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT – UFOP/MG, Ouro Preto.
3. 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*, New York: M. Dekker, 1997. p. 765-874.
4. RUDNEV, V., **Induction heat treating: the basics & beyond.** In: II Conferência Brasileira de Temas de Tratamento Térmico, Atibaia – SP: 2004.

5. WEISS, K. **In-line tempering on induction heat treatment equipment relieves stresses advantageously.** Industrial Heating, 1995.
6. INDUCTOHEAT, Manual do equipamento de aquecimento por indução eletromagnética

PRODUCTION DRILLING BITS USING ELECTROMAGNETIC INDUCTION AS A HEATING SOURCE.

Abstract

In this work, investigations were carried out to establish parameters that allow optimizing the operation of a heating furnace by electromagnetic induction, specifically designed for melting metal alloys and thereby produce, for drilling into geological survey, diamond bits real scale. The bits produced consisted of W powder composite, with a sintered alloy infiltrating Cu-43Zn-1SN (wt%) consolidated by heating by electromagnetic induction in graphite molds. Were determined electromagnetic parameters, conditions of time and temperature to produce bits with adequate characteristics to drilling operations for geological survey. The production of diamond bits by electromagnetic induction reduced the total time for conformation, 60 minutes in conventional ovens, for 7 minutes in induction furnaces.

Keywords: drilling, geological survey, electromagnetic induction.