



**REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA
DE MATERIAIS
UFOP - CETEC - UEMG**

**Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Dissertação de Mestrado**

**TRATAMENTO TÉRMICO POR
INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE
HASTES DE AÇO SAE 1045 PARA
SONDAGEM GEOLÓGICA**

Autor: CARLOS ROBERTO FERREIRA

Orientador: Prof. Fernando Gabriel S. Araújo

Co-Orientador: Prof. Cristovam Paes de Oliveira.

Ouro Preto, janeiro de 2004.

M383t Ferreira, Carlos Roberto.
Tratamento térmico por indução eletromagnética de haste de aço SAE 1045 para sondagem geológica. / Carlos Roberto Ferreira. – Ouro Preto: UFOP, 2004.
96p.: il., color., tabs.; Graf.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de pós-graduação em Engenharias de Materiais. Departamento de Metalurgia e Materiais. Rede Temática em Engenharia de Materiais.

1. Materiais - Teses. 2. Aço - Tratamento térmico – Teses 3. Processo de endurecimento superficial. 4. Indução eletromagnética. 5. Geologia. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de pós-graduação em Engenharias de Materiais. Departamento de Metalurgia e Materiais. Rede Temática em Engenharia de Materiais. II. Título.

CIDU: 671.78:669

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - CETEC - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais

“Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética de Hastes de Aço SAE 1045 para Sondagem Geológica”

Autor: Carlos Roberto Ferreira

Dissertação defendida e aprovada, em 26 de janeiro de 2004, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Fernando Gabriel da Silva Araújo - Orientador
Univ. Federal de Ouro Preto/REDEMAT

Prof. Dr. Vicente Tadeu Lopes Buono
Univ. Federal de Minas Gerais/DEMET

Prof. Dr. Cristovam Paes de Oliveira
Univ. Federal de Ouro Preto/REDEMAT

Eng.º Ronaldo Eisele
Geologia e Sondagens Ltda-GEOSOL

AGRADECIMENTOS

Aos professores, Fernando Gabriel e Cristovam Paes de Oliveira pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho e por compartilharem comigo seus conhecimentos.

A GEOSOL Ltda, pela inovadora e louvável iniciativa em pesquisa, principalmente neste convênio com a Fundação Gorceix e a REDEMAT, do qual resultou este trabalho.

À Fundação Victor Dequech, à Fundação Gorceix, a REDEMAT e à FINEP.

Ao Eng. Claret Rodrigues da Cunha, Diretor Presidente da Geosol.

Ao Eng. Ronaldo Eisele, Diretor de Logística da Geosol.

Ao Eng. Eurípedes Palazzo, Presidente da Fundação Victor Dequech.

Ao Eng. João Luís Nogueira de Carvalho, Diretor Técnico da Geosol.

Ao Geólogo Dalmo Pereira, Diretor Comercial da Geosol.

À Geóloga Nilza Torres de Andrade Saraiva, Diretora Comercial da Geosol.

Ao Sr. Fábio Jacob Ferreira, Supervisor de oficina da Geosol.

Ao Sr. Antônio Silva de Oliveira, Torneiro Mecânico da Geosol.

Aos funcionários da oficina mecânica do departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais –DEMET/UFOP e da GEOSOL que mostraram disposição e aplicação em contribuir

ÍNDICE

TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE HASTES DE AÇO SAE 1045 PARA SONDAÇÃO GEOLÓGICA.....	1
Agradecimentos.....	2
Resumo.....	7
Abstract.....	8
Lista de figuras.....	9
1. Introdução.....	14
Objetivos do Estudo.....	16
2. Revisão Bibliográfica.....	16
2.1. Fenômenos básicos de transferência de calor no tratamento térmico.....	17
2.2. Fenômenos eletromagnéticos básicos no aquecimento por indução.....	20
2.2.1 Efeito Superficial.....	21
2.2.2 Efeito eletromagnético de proximidade.....	24
2.2.3 Efeito de anel eletromagnético.....	25
2.3. Aquecimento e resfriamento durante o tratamento térmico por indução.....	26
2.3.1 Aquecimento.....	26
2.3.2 Perfil de temperatura: “da superfície ao centro da peça”.....	31
2.3.3 Considerações físicas para seleção do aquecimento por indução em tubos.....	32
2.3.4 Projeto e considerações físicas para seleção do aquecimento por indução.....	33
2.3.5 Resfriamento.....	35
2.3.6. Têmpera.....	35
2.4. Aspectos Metalúrgicos.....	36
2.4.1. Transformação Martensítica.....	36
2.4.2. Tensões residuais após o tratamento.....	38
2.4.3. Super Endurecimento.....	41
2.4.4. Revenimento por indução.....	41
2.5. Referências Bibliográficas.....	42
3. Procedimento Experimental.....	44
3.2. Procedimento Experimental.....	45
3.3. Tratamentos Térmicos por Indução Eletromagnética.....	46

3.4. Testes de Bancada	50
3.5. Testes de Campo	51
3.6. Referências Bibliográficas	53
4. Caracterização das Hastes Comerciais	54
4.1. Introdução.....	54
4.2. Procedimento Experimental	54
4.3. Resultados e Discussão.....	55
4.3.1 Análise Química.....	55
4.3.2. Ensaio de Dureza	55
4.3.3. Análise da Microestrutura	58
4.3.4. Conclusões	64
4.3.5. Referência Bibliográfica	65
5. Produção e Caracterização de Hastes de Aço SAE 1045	66
5.1. Introdução.....	66
5.2. Procedimento Experimental.	67
5.3. Materiais Utilizados	69
5.4. Resultados e Discussão.....	70
5.5. Conclusões.....	77
Bibliografia.....	78
6. Estudo Comparativo das Hastes de Sondagem	79
6.1. Introdução.....	79
6.2. Procedimento Experimental	79
6.3. Resultados e Discussão.	80
6.4. Conclusões	84
7. Testes de campo das hastes.	85
7.1. Introdução.....	85
7.2. Procedimento.....	85
7.3. Resultados e Discussão.	87
7.4. Conclusões.	94
8. Conclusões Gerais.	96
9. Recomendações.	98

RESUMO

O presente estudo emprega tratamento térmico, por indução eletromagnética, em tubos de aços nacionais sem costura, para produção de hastes para sondagem geológica, visando adequá-las a alcançarem desempenhos operacionais de durabilidade e eficiência equivalentes aos das hastes comerciais importadas, com possibilidade de redução de custos. O projeto global, do qual este trabalho é parte integrante foi contratado e financiado pela FINEP, co-financiado pela GEOSOL Ltda e executado por uma parceria entre a GEOSOL, a Fundação Gorceix, a Fundação Victor Dequech e a REDEMAT. Foram determinados, através de análises químicas, metalográficas, ensaios mecânicos e testes de campo, parâmetros adequados de tratamento térmico por indução eletromagnética, para as etapas de têmpera e revenimento, a fim de se obter hastes de perfuração nacionais de alto desempenho. As hastes de sondagem, com 3 (três) metros de comprimento foram tratadas termicamente apenas em suas extremidades, nas regiões onde são usinadas as roscas. A determinação dos parâmetros de operação do equipamento, para têmpera e revenimento por indução eletromagnética de tubos sem costura em aço SAE1045, para confecção de hastes de sondagem, permitiu produzir um 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. Os resultados finais obtidos mostram que as hastes produzidas apresentaram alto desempenho nos testes de campo, quando comparadas com aquelas importadas de dois grandes fabricantes internacionais.

ABSTRACT

This work applies electromagnetic induction thermal treatment on tubes, produced by the Brazilian industry, to produce geological drill rods with performance characteristics of durability and efficiency similar to commercial drill rods, hence providing an equivalent device at lower costs. The project was sponsored by FINEP, co-financed by GEOSOL Ltd, and carried out by a partnership among GEOSOL, Fundação Gorceix, Fundação Victor Dequech and REDEMAT. The research determined induction hardening and tempering parameters suited to produce drill rods with qualities similar to the ones available in the international market, through metalography, mechanical tests and field research. The induction hardening of the 3m long drill rods was carried out only at their ends, where the threads are machined. The determination of the induction hardening and tempering parameters of SAE1045 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 a minimum values close to 35HRc at the end of the treated region. The drill rods produced presented high performance in use.

LISTA DE FIGURAS.

Capítulo 2

Fig.2.1: Condições típicas de aplicações de tratamento térmico por indução eletromagnética.....	15
Fig. 2.2: Condutividade térmica e calor específico de um aço carbono comum e de um aço inoxidável.....	16
Fig. 2.3: Perdas de calor por convecção e por radiação em aquecimento por indução.....	17
Fig. 2.4: Análise eletromagnética no sistema de aquecimento por indução de tubos.....	19
Fig. 2.5: Resistividade elétrica de aços.	21
Fig. 2.6: Distribuição da intensidade do campo magnético (H) e da permeabilidade magnética (μ) ao longo de um cilindro homogêneo de aço carbono.....	22
Fig. 2.7: Variação típica da profundidade de penetração de corrente durante o aquecimento por indução em uma peça de aço carbono.....	22
Fig. 2.8: Distribuição da corrente em barras condutoras devido ao efeito de proximidade.	23
Fig. 2.9: Efeito de anel em condutores retangulares e cilíndricos.....	24
Fig. 2.10: Perfis de temperatura e densidade de potência em diferentes estágios de aquecimento por indução eletromagnética de um cilindro de aço de 5cm de diâmetro.	26
Fig. 2.11: Diagrama de transformação isotérmica em aço com 0,45%C com estrutura inicial de ferrita e perlita.	27
Fig. 2.12: Variação das temperaturas de equilíbrio das energias de Gibbs da austenita e da martensita de mesma composição, e da temperatura M_i em função do teor de carbono no sistema FeC	29
Fig. 2.13: Representação esquemática da variação típica das propriedades físicas dos aços comuns.	30
Fig. 2.14: Representação esquemática da eficiência elétrica eficiência térmica versus espessura do refratário.	31
Fig.2.15: Eficiência da bobina em função da frequência, para tubos e cilindros.	32
Fig.2.16: Diagrama de fase Fe-C.	35

Fig.2.17: Diagrama esquemático TRC para aço carbono.	35
---	----

Capítulo 3

Fig.3.1: (a) Vista geral do equipamento, (b) vista da câmara de aquecimento e resfriamento do equipamento.....	45
Fig.3.2: Fotografias das etapas de operação de tratamento térmico de austenitização e têmpera, por indução eletromagnética de tubos de aço SAE 1045.	47
Fig.3.3: Hastes tratadas e rosqueadas, início da operação de sondagem e estado da rosca na região tratada, após operação.	50

Capítulo 4

Fig.4.1: Perfis de microdureza ao longo da parede de haste 7de perfuração BSi tratada termicamente.	53
Fig.4.2: Perfis de microdureza ao longo da parede de haste de perfuração LRi tratada termicamente.	54
Fig.4.3: Perfis de dureza Rockwell (HRc) das extremidades (rosca macho e rosca fêmea) da haste de sondagem comercial BSi.	55
Fig.4.4: Perfis de dureza Rockwell (HRc) das extremidades (rosca macho e rosca fêmea) da haste de sondagem comercial LRi.	56
Fig.4.5: Micrografias da seção reta da parede da haste LRi, mostrando a superfície externa (a), o meio da parede (b) e a superfície interna(c).	57
Fig.4.6: Micrografias da seção reta da parede da haste LRi, mostrando a superfície externa (a), a região adjacente a ela (b), o meio da parede (c) e a superfície interna(d).	58
Fig.4.7: Micrografias da seção reta da parede da haste LRi, na região da rosca macho,mostrando a superfície externa da rosca (a), a região do dente(b) o meio da parede (c) e a superfície interna(d).	59
Fig.4.8: Micrografias da seção reta da parede da haste BSi, região sem tratamento térmico, mostrando a superfície externa (a), o meio da parede (b) e a superfície interna(c).	60

Fig.4.9: Micrografias da seção reta da parede da haste BSi, região tratada da rosca macho, mostrando a superfície externa próxima a um dente do rosca(a), o meio da parede (b) e a superfície interna(c).61

Capítulo 5

Fig.5.1: Perfil de dureza Rockwell (HRc) ao longo do comprimento do tubo de aço SAE 1045, sem costura, no estado de entrega. 68

Fig.5.2: Perfil de microdureza Vickers (HV) ao longo da espessura do tubo de aço SAE 1045, sem costura, no estado de entrega.68

Fig.5.3: Fotomicrografia por MEV da seção reta da parede de um tubo de aço SAE 1045, sem costura, no estado de entrega e após op tratamento de têmpera e revenimento por indução eletromagnética.....70

Fig.5.4: Perfis de dureza Rockwell (HRc) ao longo da região temperada e revenida, por indução eletromagnética, de tubos para sondagem geológica.72

Fig.5.5: Perfil de dureza Rockwell (HRc) do aço SAE 1045 tratado termicamente segundo parâmetros selecionados.....73

Fig.5.6: Perfil de microdureza Vickers (HV) do aço SAE 1045 no estado de entrega e tratado termicamente.74

Fig.5.7: Fotografia do equipamento instalado.....75

Capítulo 6

Fig.6.1: Perfil de dureza Rockwell (HRc) ao longo da extremidade das hastes TT, BSi e LRi. Região da rosca macho.79

Fig.6.2: Perfil de dureza Rockwell (HRc) ao longo da extremidade das hastes TT, BSi e LRi. Região da rosca fêmea.80

Fig.6.3: Perfis de microdureza Vickers (HV) ao longo da espessura das paredes das hastes de aço SAE 1045 tratadas termicamente por indução eletromagnética neste trabalho, TT, e não tratadas NT.81

Capítulo 7

Fig.7.1: Fotografias da sonda rotativa n° 102 NKS BOYLES (a) e Sonda rotativa Geosol n°80.	83
Fig.7.2: Fotografia do mostrando o aspecto da rosca macho da haste TT antes de se iniciar os testes de campo.....	84
Fig.7.3: Perfil de desgaste apresentado pelas hastes TT, NT e BSi durante teste de campo.	86
Fig.7.4: Aspecto físico das hastes após teste de campo.	87
Fig.7.5: Perfil de desgaste apresentado no diâmetro externo das hastes TT, durante testes de campo de longa duração.	89
Fig.7.6: Fotografia da haste TT trincada durante serviço.....	91

LISTA DE TABELAS.

Capítulo 2

Tabela 2.1: Profundidade de penetração de corrente versus frequência aplicada.....	20
Tabela 2.2: Efeito de revenimento em um aço SAE1045.	37
Tabela 2.3: Influência dos parâmetros do processo de têmpera por indução eletromagnética, de peça cilíndrica de aço, sobre a tensão axial residual e a profundidade de endurecimento.....	38

Capítulo 3

Tabela 3.1: Temperaturas para austenitização e têmpera e revenimento programados para tratamentos térmicos de hastes de aço SAE 1045 por indução eletromagnética.	44
Tabela 3.2: Relação entre as condições de potência e tempo de aquecimento, com as temperaturas alcançadas em cada fase do ciclo de tratamento térmico por indução eletromagnética, para cada amostra submetida à análise.....	46

Capítulo 4

Tabela 4.1: Composições químicas (%) dos aços das hastes de sondagem BSi e LRi.....	53
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1: Composição química do aço SAE 1045 utilizado na confecção dos tubos.....68

Capítulo 7

Tabela 7.1: Valores das medidas iniciais e finais do diâmetro externos das hastes testadas em campo, após 260m de perfuração.....85

Tabela 7.2: Dados referentes aos furos de sondagem onde foram testadas as hastes TT, NT e BSi.85

Tabela 7.3: Profundidade perfurada, Inclinações dos furos e composição mineralógica apresentada pelo subsolo sondado durante os testes realizados com as hastes TT..... 88

Tabela 7.4: Valores médios das medidas iniciais e finais em milímetros (mm), das diversas regiões das hastes TT utilizadas para teste de campo.....91

1. INTRODUÇÃO

As empresas brasileiras de geologia e mineração apresentam forte demanda de equipamentos e pessoal familiarizado com métodos avançados de exploração mineral, capazes de mantê-las entre as mais competitivas no mercado mundial.

A maior parte dos equipamentos e materiais para pesquisas minerais são de origem estrangeira, com preços em dólar. Entre os materiais importados, encontram-se as hastes de sondagem, que são tubos de aço sem costura utilizados em equipamentos de sondagem. Hastes tratadas termicamente apresentam durabilidade média cinco vezes maior que as não tratadas, obtendo-se uma combinação das variáveis qualidade e durabilidade, que se reflete em menores custos.

O presente trabalho emprega tratamento térmico por indução eletromagnética de tubos nacionais sem costura para produção de hastes, visando adequá-las a alcançarem desempenhos operacionais de durabilidade e eficiência equivalentes aos das disponíveis no mercado, usualmente importadas, obtendo-se assim um material de características similares a estas últimas, porém com custos muitas vezes menores.

As hastes foram tratadas em equipamento de tratamento térmico por indução eletromagnética projetado e construído pela Cia. Inductoheat em parceria com as equipes técnicas da Fundação Gorceix e da Geosol. Tal equipamento encontra-se instalado e operando em um galpão da Fundação Gorceix, anexo às instalações da GEOSOL. Um vasto conjunto de tubos sem costura de aço SAE1045, de produção nacional, foi tratado em várias condições de têmpera e revenimento, para a produção de hastes de sondagem, que foram submetidas a avaliações em laboratório e no campo. Tal processo resultou no desenvolvimento de tecnologia nacional para produção de hastes de sondagem, tratadas termicamente por indução eletromagnética.

Os tratamentos térmicos visam modificar as principais propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos, sendo os aços, aqueles que melhor respondem a tais processos. Assim, dependendo do tratamento, esses materiais sofrem transformações estruturais importantes, com agregação de certas propriedades, as quais são estendidas, normalmente, a distâncias importantes na massa do corpo considerado ^[1,2,3]. Entretanto, com frequência ocorre à necessidade de se fabricar peças ou elementos de máquinas que obrigatoriamente devem apresentar uma boa resistência à abrasão e ao desgaste, associado a uma boa resistência ao choque. Isso é muito comum na indústria mecânica e, nesse caso, é preciso que sejam conferidas certas propriedades

particulares às camadas externas desses corpos, através de tratamentos térmicos localizados que tenham por objetivo provocar o endurecimento destas. Esse procedimento melhora consideravelmente a resistência à fadiga e à abrasão.

Os processos de endurecimento localizado podem ser classificados em três categorias: ^[3].

- Tratamentos mecânicos, com deformação plástica do metal, localizada na superfície (deformação plástica superficial).
- Têmpera após aquecimento (austenitização) sem modificação da composição química.
- Tratamentos termoquímicos, que modificam a composição química das camadas superficiais, com o auxílio de tratamento térmico.

A utilização de um ou outro processo é função das propriedades que se deseja obter na superfície. A forma geométrica das peças a serem tratadas, o curto tempo de tratamento, a alta eficiência e a baixa energia consumida no processo, tornam o tratamento térmico por indução eletromagnética particularmente interessante para a confecção de hastes de sondagem. Esse processo se enquadra na segunda categoria supracitada, na qual a região tratada sofre apenas um aquecimento a temperaturas superiores à temperatura de transformação austenítica (*Ac3* - *diagrama FeC*), seguido de um resfriamento com velocidades superiores à velocidade crítica. ^[3].

O tratamento térmico por indução eletromagnética é sem dúvida um dos mais efetivos processos de tratamento térmicos para uma variedade de aplicações, incluindo têmpera total, têmpera superficial, revenimento, alívio de tensões, recozimento, normalização e sinterização de metais pulverizados, entre outros. ^[1]

Na maioria dessas aplicações, o tratamento térmico por indução eletromagnética é usado somente em locais selecionados da peça tratada. Apesar desse processo reduzir o desgaste, ele pode afetar a resistência natural do material, tornando-o quebradiço. Esse processo é executado em um tempo muito curto e com alta eficiência por que a energia é somente aplicada na região requerida para tratamento térmico, o que promove uma alta produtividade, menos distorções na geometria da peça, permite o uso de menos espaço físico para instalação de equipamentos, gerando benefícios ergonômicos e ambientais ^[4,5].

No presente trabalho, determinaram-se, através de análises metalográficas, ensaios mecânicos e testes de campo, os parâmetros ideais para as etapas de têmpera e revenimento, a fim de obter hastes nacionais tratadas com qualidades compatíveis com as das hastes importadas. A escolha do tratamento térmico por indução é devida, principalmente, à necessidade de

tratamento térmico somente em regiões selecionadas, nas extremidades das hastes, o que gera grandes restrições para os tratamentos convencionais. Além disso, a duração das etapas no tratamento térmico por indução são bem menores que em outros processos térmicos, pois elas são executadas em alguns segundos, enquanto os processos comuns de tratamentos térmicos são executados em horas ou dias.

OBJETIVOS DO ESTUDO.

Os objetivos do trabalho são os seguintes:

- Desenvolver hastes de sondagem de fabricação nacional capazes de substituir as importadas.
- Aumentar a vida útil das hastes. Uma haste termicamente tratada tem duração de quatro a seis vezes maior que a haste não tratada.
- Desenvolver tecnologia de tratamento térmico, com variação de parâmetros, de modo a se ter uma gama de produtos adequados às condições litológicas e de profundidade mutável, durante a sondagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um tratamento térmico por indução eletromagnética é uma complexa combinação de fenômenos metalúrgicos, eletromagnéticos e de transferência de calor. Os fenômenos de transferência de calor e eletromagnéticos são fortemente correlacionados e determinam as propriedades físicas dos materiais tratados ^[1].

Qualquer material condutor de eletricidade pode ser aquecido por indução eletromagnética. Quando imerso em campo magnético variável, aparece no material uma força eletromotriz induzida, que provoca a circulação de uma corrente elétrica, chamada corrente de Foucault. A circulação de corrente nos materiais dá-se preferencialmente na superfície, provocando o aquecimento da região por perdas por efeito Joule ^[1].

A habilidade de se fornecer energia dentro de uma parte específica de uma peça no aquecimento por indução e de se obter o desejado tratamento térmico depende de muitos fatores,

cujos mais importantes são as propriedades térmica e eletromagnética dos materiais, a potência aplicada, a frequência selecionada, a velocidade de aquecimento, o processo e a velocidade de resfriamento, a susceptibilidade do material ao tratamento térmico (temperabilidade), a forma e as dimensões da peça a ser tratada^[4].

A figura 2.1 apresenta um gráfico da potência necessária em função da frequência aplicada para processos metalúrgicos que utilizam aquecimento indutivo.

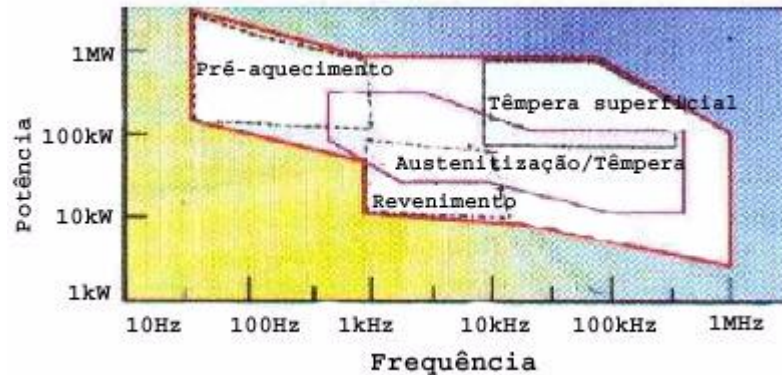


Figura 2.1. Condições típicas de aplicações de tratamento térmico por indução eletromagnética.^[1,6]

2.1. FENÔMENOS BÁSICOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO TRATAMENTO TÉRMICO

No aquecimento convencional, três maneiras de transferência de calor (condução, convecção e radiação) estão presentes. O calor é transferido por condução das regiões de alta temperatura para as de baixa. Um alto valor de condutividade térmica do metal resulta numa intensa transferência de calor da superfície quente para o centro frio. O fluxo de calor por condução, q_{cond} , é proporcional à queda de temperatura ao longo da distância, ou seja, ao decréscimo do gradiente de temperatura, onde a constante de proporcionalidade é λ , a condutividade térmica do material, como mostrado na equação 2.1.^[1]

$$q_{\text{cond}} = - \lambda \text{ grad } T \quad \text{eq. 2.1}$$

A transferência de calor por convecção é realizada pelo movimento de fluidos, gás ou ar, conforme a equação 2.2.

$$q_{\text{conv.}} = \alpha(T_S - T_a) \quad \text{eq. 2.2}$$

Onde: q_{conv} - Fluxo de calor por convecção, (w/m^2).

α - Coeficiente de transferência de calor por convecção, ($\text{w/m}^2\text{°C}$).

T_S - Temperatura da superfície.

T_a - Temperatura do ambiente

No terceiro modo de transferência de calor, radiação de calor, o calor se transfere de uma peça quente para uma peça fria pela emissão e absorção de radiação eletromagnética.

Nos aquecimentos por indução, as transferências de calor por convecção e radiação desempenham forte papel na perda de calor. Um alto valor de perda de calor reduz a eficiência da bobina de indução.^[1]

A figura 2.2 apresenta os valores típicos de calor específico e condutividade térmica de um aço comum e de um aço inoxidável, indicando que estes coeficientes são função da temperatura.

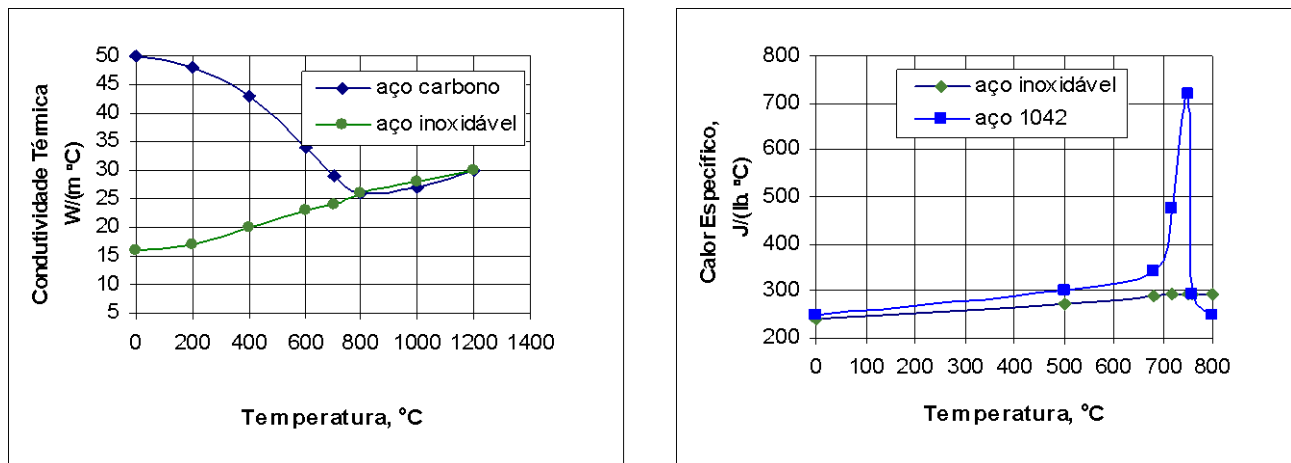


Figura 2.2. Condutividade térmica e calor específico de um aço carbono comum e de um aço inoxidável^[1].

Os valores de calor específico (C) indicam a quantidade de energia que deve ser absorvida por uma peça para alcançar a requerida temperatura. Um alto valor de calor específico corresponde a uma maior potência requerida.

A condutividade térmica (λ) designa a razão na qual o calor percorre (flui) através da peça. Um material com alto λ deverá conduzir o calor mais rapidamente do que um de menor λ . Quando λ é alto, é mais fácil de se obter uma distribuição uniforme de temperatura ao longo da espessura da peça, o que tem grande influência no processo de têmpera total. Entretanto, na têmpera superficial ou de regiões selecionadas, um alto valor de λ se torna uma desvantagem, devido à tendência de igualar a distribuição de temperatura no interior da peça, resultando no resfriamento da superfície, o que requer maior potência no processo para manter as camadas superficiais aquecidas na temperatura final desejada ^[1].

A figura 2.3 mostra as perdas de calor por convecção e radiação no aquecimento por indução, com o aumento de temperatura^[1]. A figura revela que, devido às perdas por radiação, altas temperaturas diminuem fortemente a eficiência do processo.

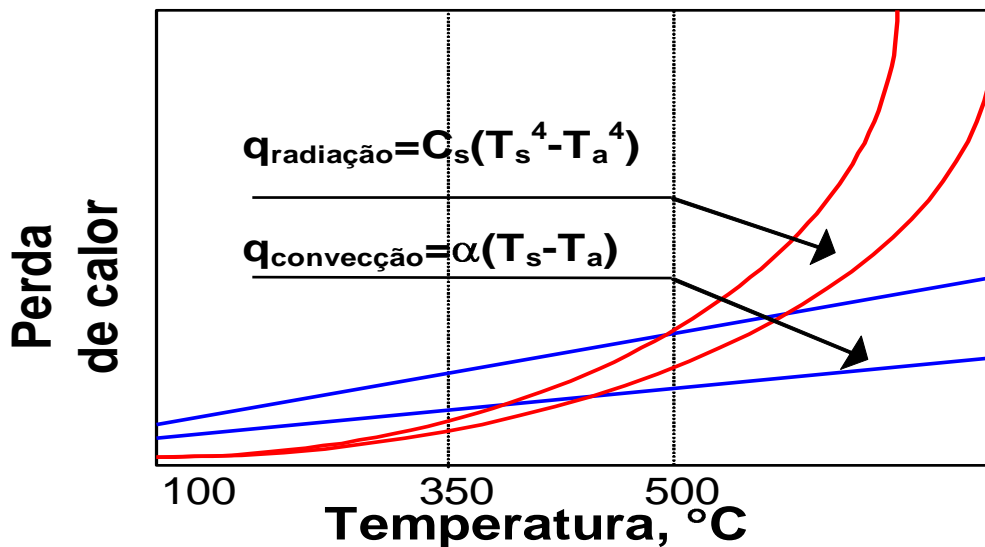


Figura 2.3. Perdas de calor por convecção e por radiação em aquecimento por indução^[1].

2.2. FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS BÁSICOS NO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

A aplicação de tensão alternada a uma bobina condutora resulta em corrente alternada no circuito da bobina, produzindo em seu interior um campo magnético variável com o tempo, com a mesma frequência aplicada. Em uma peça condutora posicionada no interior da bobina, são induzidas correntes parasitas, ou de Foucault, em sentido tal que produzam, por sua vez, um campo magnético induzido que se opõe à variação do fluxo magnético da bobina. As correntes parasitas produzem calor por efeito Joule, ou seja, com uma potência diretamente proporcional ao produto da resistência elétrica da região percorrida pelo quadrado da corrente ($P= Ri^2$). A figura 2.4 ilustra um sistema de aquecimento por indução eletromagnética de tubos, utilizando uma bobina de indução de múltiplas voltas ^[1,7].

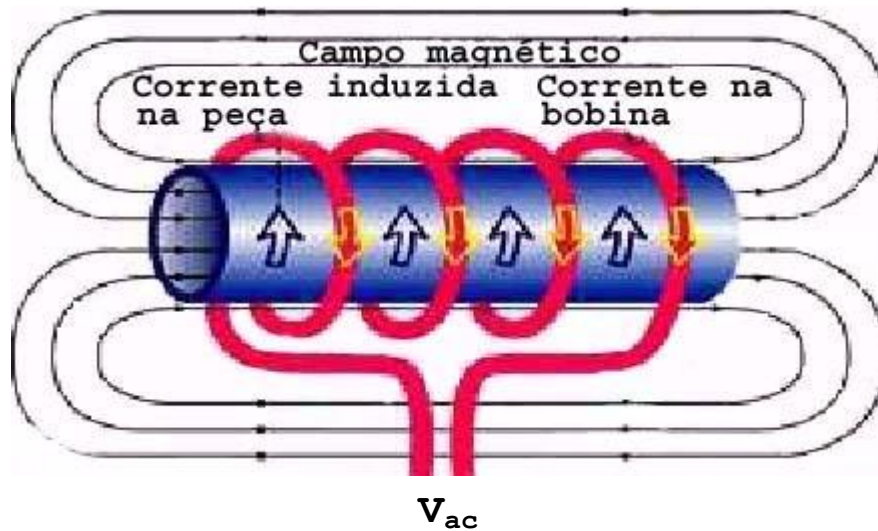


Figura 2.4. Análise eletromagnética no sistema de aquecimento por indução de tubos.^[6]

Devido a vários fenômenos eletromagnéticos, a distribuição de corrente dentro de um indutor e de uma peça não é uniforme. Esta 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, principalmente, pelos efeitos superficial, de proximidade e de anel^[1,8].

2.2.1 EFEITO SUPERFICIAL

Quando uma corrente alternada atravessa um condutor, a distribuição de corrente não é uniforme. O valor máximo da densidade de corrente sempre estará localizado na superfície do condutor e diminuirá da superfície para o seu interior (em direção ao centro). Este fenômeno de distribuição de corrente não uniforme dentro de uma seção através do condutor é chamado de efeito superficial. Este efeito sempre ocorre quando há correntes alternadas, sendo também encontrado na peça localizada dentro da bobina (figura 2.4).

Devido ao efeito superficial, aproximadamente 86% da corrente concentra-se na camada superficial do condutor, em uma região chamada de camada de referência ou de penetração, δ . O grau do efeito superficial depende da frequência da corrente alternada e de propriedades do material aquecido, como resistividade elétrica e permeabilidade magnética relativa^[1].

O efeito superficial pode ser descrito por uma equação diferencial, cuja solução demonstra que a corrente induzida em uma superfície plana reduz exponencialmente em direção ao centro da peça. A profundidade de penetração de corrente em determinado objeto em tratamento é definida pelo limite no qual a densidade de corrente alcança 37% do valor obtido na superfície^[8,9], conforme pode ser calculado pela equação 2.3.^[10]

$$\delta = (\rho / (\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot f))^{1/2} \quad \text{eq. 2.3}$$

sendo:

δ = profundidade de penetração.

ρ = resistividade da peça.

μ_0 = permeabilidade magnética no vácuo.

μ = permeabilidade magnética da peça.

f = frequência do campo magnético alternado da bobina.

Para os aços, pode-se considerar que, acima do ponto Curie, a profundidade (δ) de penetração da corrente, em mm, é aproximadamente^[8]:

$$\delta = 500/f^{1/2} \quad \text{eq. 2.4}$$

Onde f é a frequência da corrente em Hertz.

Na camada com essa espessura, dispende-se aproximadamente 87% de toda energia calorífica. Conseqüentemente, a profundidade de penetração da corrente, δ , diminui com a elevação de sua freqüência. Assim, por exemplo, para o aço SAE 1045 a 850 °C tem-se os valores mostrados na tabela 2.1.

f (Hz)	50	10.000	70.000	400.000
δ (mm)	80	5,5	2,1	0,9

Tabela 2.1. Profundidade de penetração de corrente versus freqüência aplicada.^[8]

Na utilização do efeito de superfície, está baseado o aquecimento por indução de elevada freqüência para a têmpera superficial.^[8]

Nos cálculos práticos, a permeabilidade magnética de uma peça não magnética, μ , é próxima à do ar e assume valor 1. A resistividade elétrica (ρ) dos materiais é uma função da temperatura como ilustrado para aços na figura 2.5. Durante o ciclo de aquecimento, a resistividade elétrica dos aços pode aumentar o seu valor de 4 a 5 vezes em relação ao valor inicial.

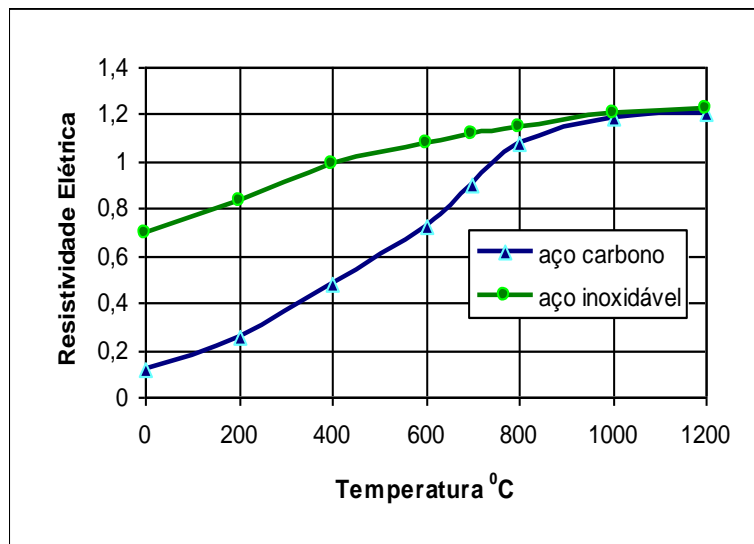


Figura 2.5. Resistividade elétrica de aços ($\mu\Omega.m$)^[1].

Similar à distribuição da corrente, a intensidade do campo magnético apresenta valor máximo na superfície da peça com queda exponencial em direção ao centro, como mostrado na figura 2.6. A permeabilidade magnética também varia dentro do corpo magnético. Com o aumento da distância da superfície, μ aumenta e, após atingir novamente seu máximo, em $H=H_{\text{crítico}}$ (campo magnético) torna a reduzir^[1].

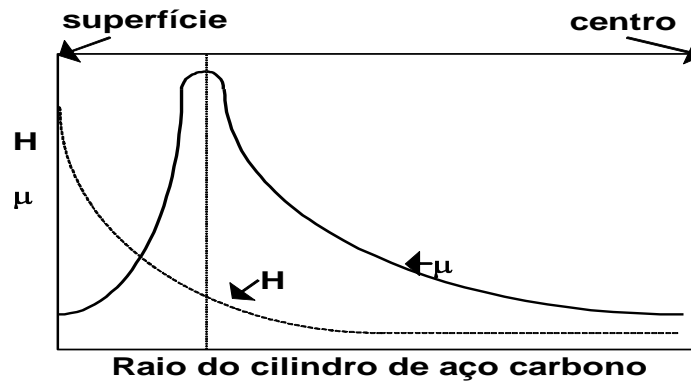


Figura 2.6. Distribuição da intensidade do campo magnético (H) e da permeabilidade magnética relativa (μ) ao longo de um cilindro homogêneo de aço carbono^[1].

A profundidade de penetração também é função da temperatura. No início do ciclo de aquecimento, a penetração de corrente dentro do aço aumenta, devido ao aumento da resistividade elétrica do metal com a temperatura, figura 2.7. Próximo da temperatura crítica T_c (temperatura de Curie) a permeabilidade cai drasticamente, para uma unidade, pois o metal se torna não magnético, aumentando ainda mais a profundidade de penetração. Após o aquecimento acima da temperatura crítica T_c , a profundidade de penetração continuará a aumentar devido ao aumento na resistividade elétrica do metal, entretanto, a razão de crescimento não será tão significativa quanto a transição através da temperatura de Curie^[1].

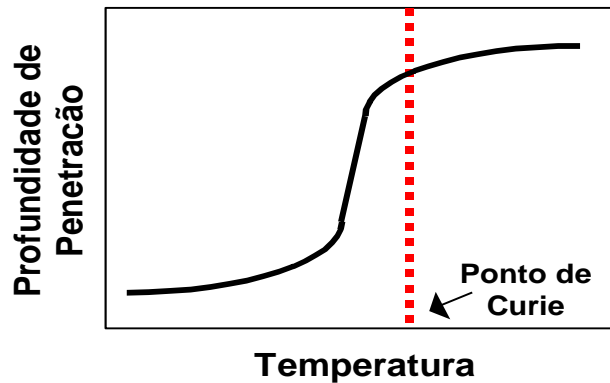


Figura 2.7. Variação típica da profundidade de penetração de corrente durante o aquecimento por indução em uma peça de aço carbono^[1].

A variação de δ numa peça de aço, durante o tratamento térmico por indução, muda drasticamente o grau do efeito superficial. Este fator é de grande importância no projeto de um equipamento de indução para têmpera de aço carbono, onde a diferença de temperatura superfície-centro é primeiramente um resultado do efeito superficial^[1].

2.2.2 EFEITO ELETROMAGNÉTICO DE PROXIMIDADE

Quando ocorre um fluxo de corrente em direções opostas, através de dois condutores paralelos, um forte campo magnético se forma na área entre estes, figura 2.8. As linhas do campo magnético, que são produzidas nas barras paralelas, têm a mesma direção, fazendo com que o campo magnético resultante entre as barras seja muito forte. Se as correntes têm a mesma direção, então as linhas do campo magnético têm direções opostas na área entre as barras, e assim elas se cancelam. O aumento da distância entre as barras diminui a potência do efeito de proximidade^[1].

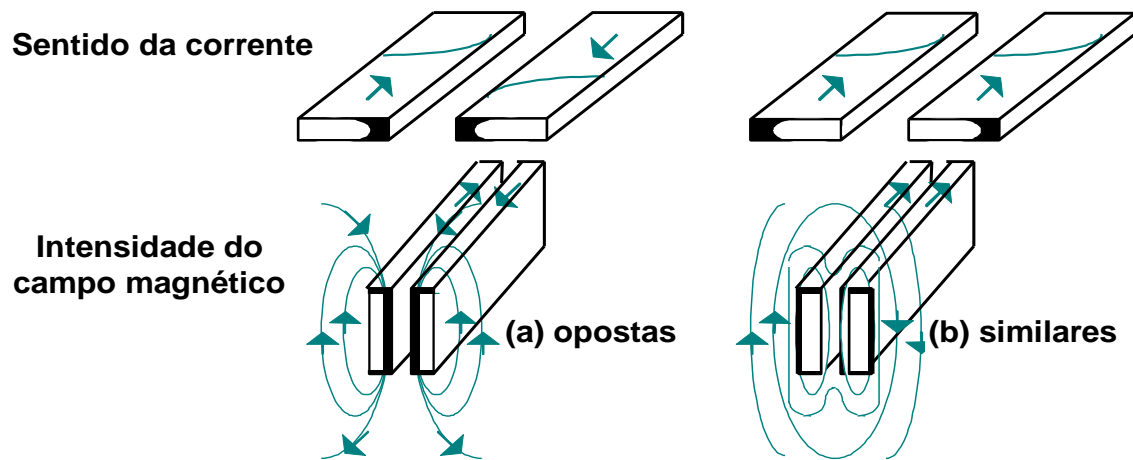


Figura 2.8. Distribuição da corrente em barras condutoras devido ao efeito de proximidade^[1].

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 parasitas são induzidas na peça por um campo magnético alternado externo. Devido aos efeitos de proximidade, as correntes da bobina e as induzidas na peça se concentrarão nas áreas faciais de uma a outra.

2.2.3 EFEITO DE ANEL ELETROMAGNÉTICO

Se a barra de condução é curva, em forma de anel, como mostrado na figura 2.9, ocorrerá também a redistribuição da corrente. As linhas de fluxo magnético se concentrarão dentro do anel, e assim a densidade do campo magnético será alta nessa região. Como resultado, a maior parte da corrente fluirá dentro de uma fina camada superficial interna. Este efeito de anel é similar ao efeito de proximidade e provoca a concentração da corrente na superfície interna da bobina de indução.^[1]

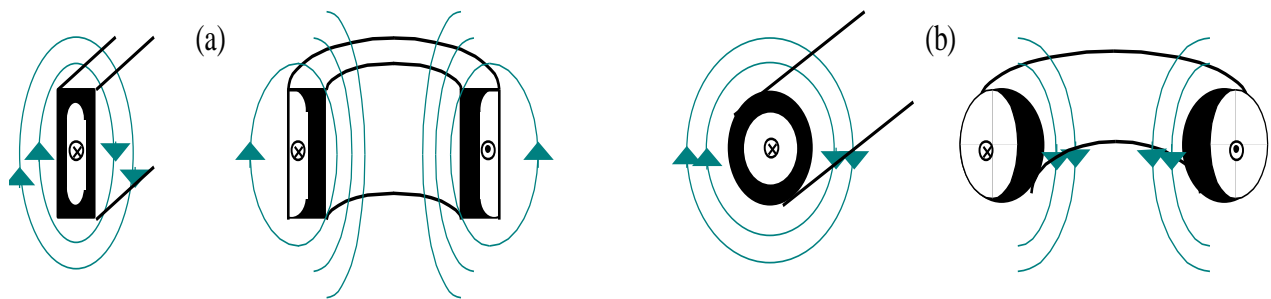


Figura 2.9. Efeito de anel em condutores (a) retangulares e (b) cilíndricos.^[1]

2.3. AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO DURANTE O TRATAMENTO TÉRMICO POR INDUÇÃO

2.3.1 AQUECIMENTO

Se a temperatura do aço sofrer alterações, algumas das propriedades que afetam os processos de eletroaquecimento também se alteram. As mais significantes são a permeabilidade magnética (μ), a resistividade elétrica (ρ), e o calor específico (c). No primeiro estágio do ciclo de aquecimento de um cilindro de aço, a peça é ainda inteiramente magnética, a permeabilidade magnética é extremamente alta, a profundidade de penetração de corrente é muito pequena e o efeito superficial é predominante. Ao mesmo tempo, como a temperatura é relativamente baixa, as perdas de calor na superfície do cilindro são relativamente baixas.

Devido à predominância do efeito superficial, a energia induzida aparece na fina camada superficial da peça, promovendo um rápido aumento na temperatura superficial, o que não ocorre no centro da peça. A figura 2.10a mostra a distribuição de temperatura e a densidade de potência dissipada, que atua como fonte de calor, ao longo do raio da peça, no primeiro estágio de aquecimento, no qual as temperaturas estão abaixo da temperatura de Curie. A temperatura máxima concentra-se na superfície. Esse estágio é caracterizado pelo intenso aquecimento e a existência de um alto diferencial de temperatura em direção ao interior da peça. Como pode ser visto na figura 2.10, o perfil de temperatura não se iguala ao perfil da fonte de calor, devido ao gradiente de condutividade térmica (λ), que transfere o calor da superfície para o centro.^[1]

Durante esse estágio, a eficiência elétrica da bobina aumenta devido ao aumento na resistividade elétrica (ρ) do metal com a temperatura. Ao mesmo tempo, a permeabilidade magnética μ permanece alta, e uma branda redução de μ não causa efeito no aumento da eficiência elétrica. Após um certo tempo, a eficiência elétrica atinge seu máximo e então começa a decrescer, em função da queda brusca da permeabilidade magnética, quando a superfície do material alcança temperaturas acima da temperatura de Curie.

A figura 2.10b mostra o perfil de temperatura e distribuição de calor ao longo do raio do cilindro, após a temperatura superficial ultrapassar a temperatura Curie, já no segundo estágio de aquecimento por indução. Nesse estágio, a resistividade elétrica do aço carbono aumenta aproximadamente duas a três vezes em relação ao seu valor no estágio inicial. Um decréscimo de μ e um aumento de ρ causam alterações de seis a dez vezes mais na profundidade de penetração em relação ao valor no estágio inicial ^[1,11]. Esse estágio pode ser caracterizado como estágio da biproriedade do aço. A superfície da peça se torna não magnética, entretanto, as camadas internas da barra permanecem magnéticas.

Finalmente, a espessura da camada da superfície com propriedades não magnéticas excede a profundidade de penetração da corrente no aço quente e o fenômeno de biproriedade não é mais predominante e logo desaparece. A densidade de energia então terá sua distribuição exponencial clássica, figura 2.10c ^[1].

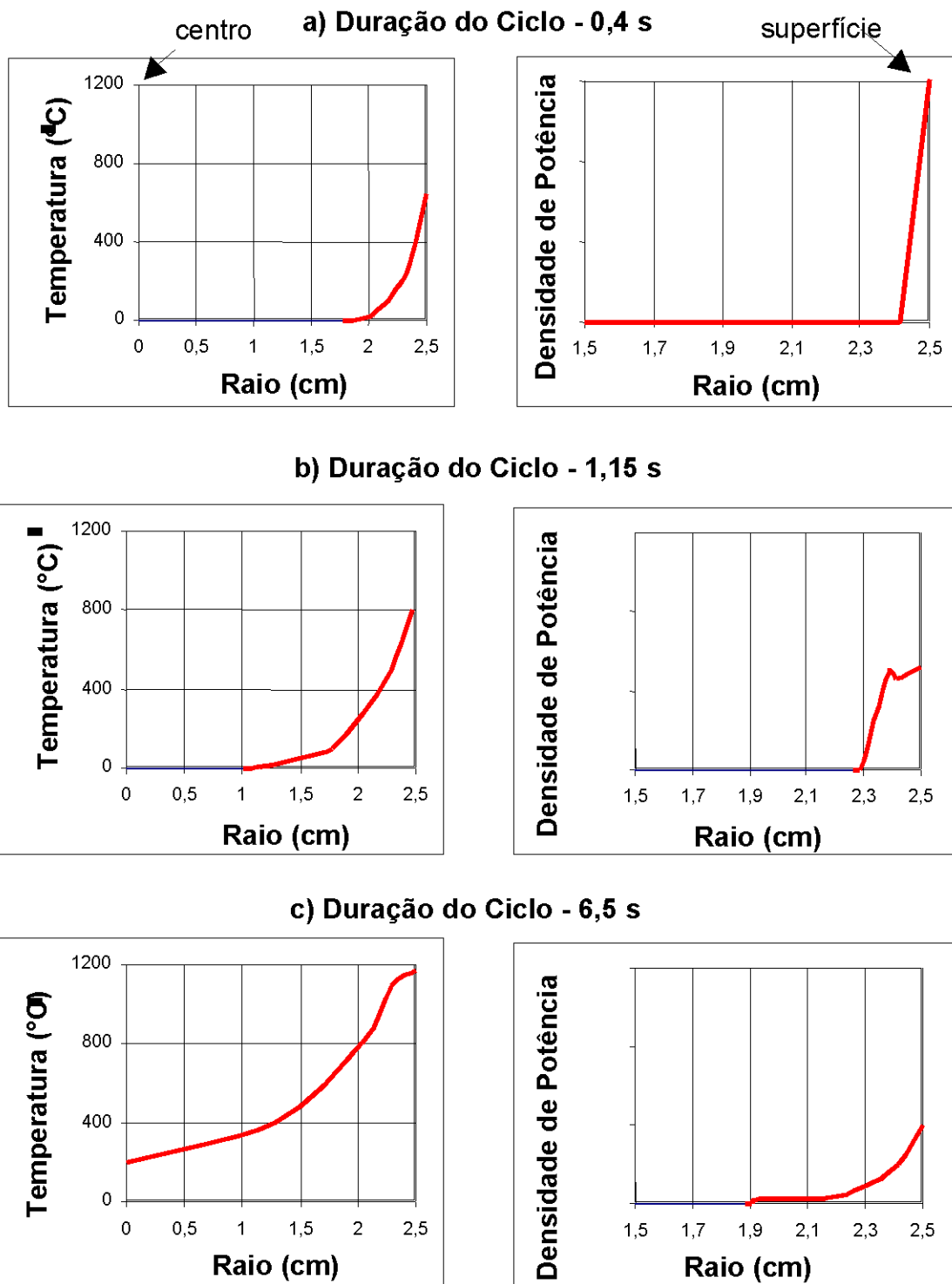


Figura 2.10. Perfis de temperatura e densidade de potência em diferentes estágios de aquecimento por indução eletromagnética de um cilindro de aço de 5cm de diâmetro (frequência de 25kHz)^[1].

O tempo e a temperatura de tratamento térmico por indução eletromagnética são importantes fatores no estabelecimento da estrutura do metal^[1-12]. O aquecimento rápido permite a concentração do calor na camada superficial. Quanto maior o tempo de indução de calor na peça, maior a massa aquecida e maior a expansão, conduzindo a uma maior distorção^[1].

Para minimizar a região de distorção, é desejável ter um tempo de aquecimento o mais curto possível. Entretanto, há algumas limitações. Primeiro, o material deve alcançar a temperatura mínima necessária na profundidade a ser endurecida. Segundo, como resultado de um tempo curto, será promovido alto gradiente de temperatura e tensões térmicas podem alcançar seus valores críticos^[1,2,13,14,15,16].

A velocidade de aquecimento por indução de alta frequência varia de, aproximadamente, 30 a 300 °C/s, o que é muitas vezes maior que a velocidade de aquecimento em forno convencional, e condiciona importantes particularidades da transformação microestrutural.^[8]

Na figura 2.11, é visto que, com a elevação da velocidade de aquecimento, a transformação de fase se desloca para a região de temperaturas mais altas. A isto se deve acrescentar que nos aços hipoeutetóides a elevação da temperatura durante aquecimento por indução ultrapassa a velocidade de difusão do carbono. Como resultado, a ferrita livre transforma-se em austenita de baixo carbono.^[8]

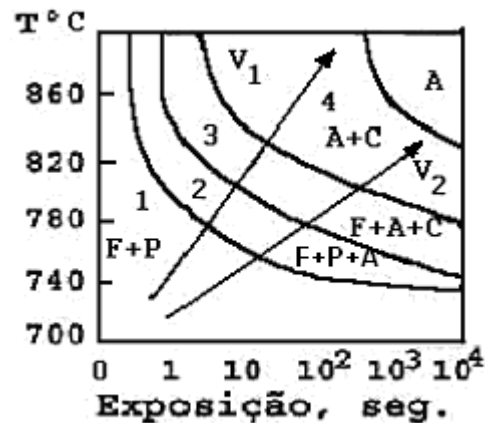


Figura 2.11. Diagrama de transformação isotérmica da austenita em aço com 0,45% C, com estrutura inicial de ferrita e perlita^[8].

Por exemplo, o aço SAE1040, no processo convencional de aquecimento em forno, é austenitizado/temperado entre 840 e 860 °C, enquanto no aquecimento por indução eletromagnética, com velocidade de 250 °C/s é austenitizado entre 880 e 920°C.

Com a elevação do grau de superaquecimento, a velocidade de nucleação da austenita cresce mais rapidamente que sua velocidade de crescimento linear. Por isto, nas condições de aquecimento de alta frequência, que se diferenciam pelo forte superaquecimento acima dos pontos A_1 e A_3 , bem como pela ausência de exposição na temperatura máxima, forma-se um tamanho de grão austenítico pequeno (de 2 a 7 μ m). Nos fornos para tratamentos térmicos tradicionais, antes da têmpera, geralmente formam-se grãos austeníticos de tamanho maior que 10 μ m.

Devido à elevada velocidade de aquecimento, ao curto tempo de exposição na temperatura máxima, os ciclos dos processos de difusão mostram-se incompletos e os átomos de carbono distribuem-se não uniformemente nos microvolumes da austenita. Por exemplo, no aço SAE 1040 podem formar-se microvolumes da austenita contendo 1,7% C e grãos muito pequenos, Isto é, a grande extensão dos contornos de grãos e a não uniformidade na distribuição de carbono fazem com que a austenita fique menos resistente à transformação perlítica. Por isto, após o aquecimento por indução, exige-se um resfriamento de têmpera intenso^[8].

Nos microvolumes de austenita, com diferentes concentrações de carbono formam-se cristais de martensita que também se diferenciam pela composição. Nas regiões de austenita com menor concentração de carbono, a temperatura M_i , de início da formação de martensita durante a têmpera, é mais elevada, como mostrado na figura 2.12. Entre M_i e a temperatura ambiente, a austenita com grão muito pequeno transforma-se em cristais de martensita^[8].

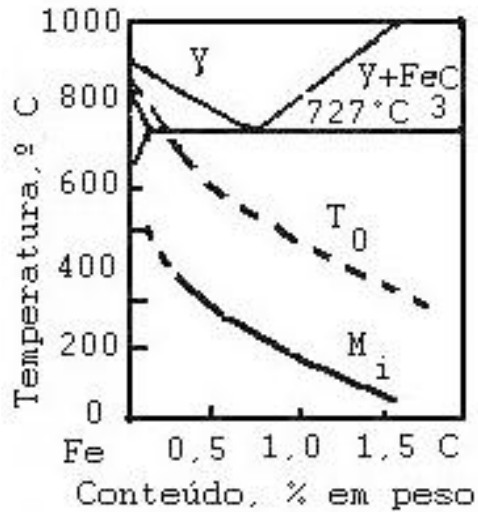


Figura 2.12. Variação das temperaturas de equilíbrio das energias de Gibbs da austenita e da martensita de mesma composição, e da temperatura M_i , em função do teor de carbono no sistema FeC. [8]

A linha T_0 mostra as temperaturas de equilíbrio metaestável da austenita super-resfriada com a martensita, de concentração em carbono. Cada ponto da linha T_0 corresponde, para um aço de determinada composição, à interseção das curvas de energia de Gibbs da austenita e da martensita [8].

2.3.2 PERFIL DE TEMPERATURA: “DA SUPERFÍCIE AO CENTRO DA PEÇA”.

Dependendo dos parâmetros do processo, um sistema de aquecimento por indução será constituído por uma ou várias bobinas de indução. O desafio surge no fato de que o perfil de temperatura da “superfície ao centro da peça” sofre alterações à medida que a peça passa através da bobina de indução. Assim, o centro de uma barra maciça é aquecido somente por condutividade térmica e tende a ser aquecido mais suavemente que a superfície.

A principal razão para o déficit de aquecimento no centro da peça é o efeito superficial e depende das propriedades do metal e da frequência aplicada. Nos metais que apresentam alta condutividade térmica, o controle da frequência, isoladamente, permite melhorar sensivelmente a uniformidade de distribuição de temperatura. Metais com baixa condutividade térmica, como o aço inox, o titânio e o aço carbono, necessitam de um cuidado adicional para se obter a

uniformidade de temperatura necessária, incluindo a determinação cuidadosa do número de bobinas de indução, projeto, distribuição de potência ao longo da linha de indutores, controle e escolha de frequência.^[16]

2.3.3 CONSIDERAÇÕES FÍSICAS PARA SELEÇÃO DO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO EM TUBOS

Condutividade térmica, calor específico e condutividade elétrica dos metais são funções não lineares da temperatura da peça, figura 2.13. Ao mesmo tempo, a permeabilidade magnética, principalmente para materiais ferromagnéticos, é forte função da intensidade do campo magnético e da temperatura^[1]. Durante o aquecimento por indução, os valores para permeabilidade magnética de aços podem variar mais que cem vezes^[1,4,5]. Ao mesmo tempo, sua resistividade elétrica pode variar em até seis vezes. Como resultado dessas variações, a penetração de corrente pode apresentar variações de até 15 vezes, em um aço SAE1040. Devido a estas variações, a distribuição da densidade de corrente na peça aquecida por indução muda drasticamente durante o ciclo de aquecimento. Condutividade térmica e calor específico variam duas e quatro vezes, respectivamente.

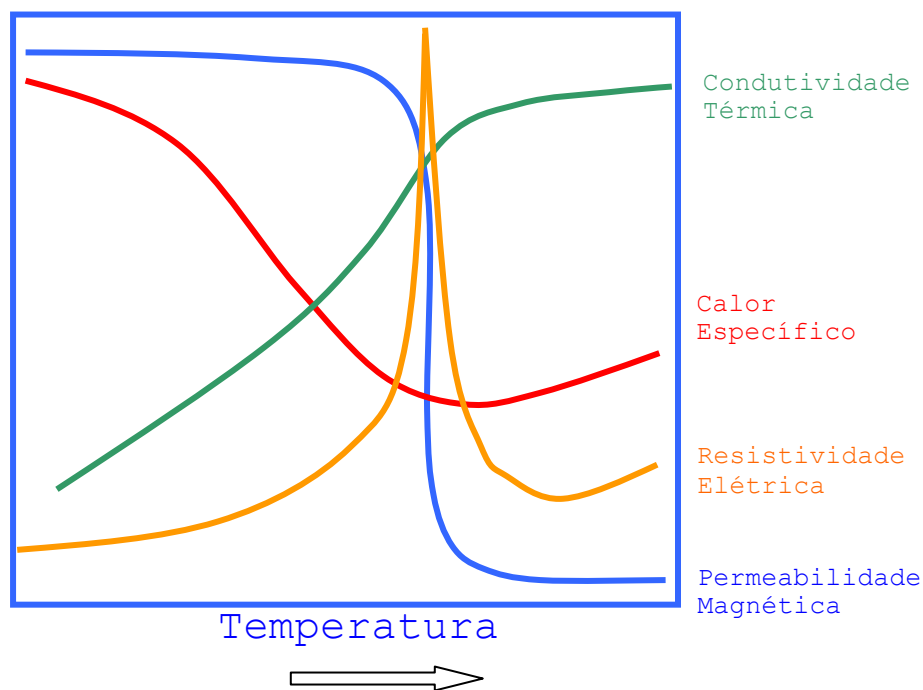


Figura 2.13. Representação esquemática da variação típica das propriedades físicas dos aços comuns em função da temperatura.^[5]

Para processos de aquecimento por indução de peças de alta complexidade, é necessário o uso de software para análise do aquecimento, visando obter melhores características na interação entre fenômenos eletromagnéticos e fenômenos de transferência de calor. Uma análise precisa dos parâmetros do processo, incluindo potência necessária da bobina, frequência ideal e perfil de temperatura, é fundamental para o entendimento dos fenômenos eletromagnéticos e a transferência de calor ^[5].

2.3.4 PROJETO E CONSIDERAÇÕES FÍSICAS PARA SELEÇÃO DO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

Perdas por radiação e convecção afetam a eficiência térmica da bobina de aquecimento por indução eletromagnética. Perdas por convecção são as maiores causas de perda de calor e ocorrem mais em aplicações a baixa temperatura (<350°C). Em altas temperaturas, perdas de calor por radiação são maiores que por convecção ^[1]. O uso de isolamento térmico pode reduzir a perda de calor, porém resulta no aumento do espaço entre a peça e a bobina, diminuindo a intensidade do campo magnético entre a bobina e o tubo, com conseqüente redução da eficiência elétrica da bobina, figura 2.14. A eficiência da bobina de indução é uma combinação de eficiência térmica e eficiência elétrica. Portanto, se por um lado refratários permitem melhorar a eficiência térmica da bobina, de outro, resultam na redução da eficiência elétrica. ^[5]

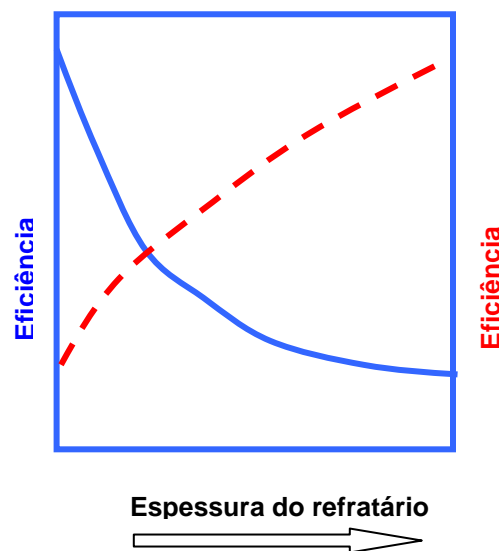


Figura 2.14. Representação esquemática da eficiência elétrica e eficiência térmica versus espessura do refratário ^[5].

Outra característica importante que afeta a escolha da potência necessária, o projeto da bobina e a escolha da frequência é a transferência de calor longitudinal, que cria uma zona de transição que se entende além da região da bobina e que provoca o resfriamento de parte da região tratada. Sem conhecer o comprimento da zona de transição e perfil de temperatura nestas zonas é muito difícil fazer uma avaliação da quantidade total do metal aquecido e, portanto, determinar a potência necessária para aquecer um tubo até a temperatura final no tempo previsto.

A escolha do comprimento da bobina é outra questão crítica, podendo ser bastante contraditório. É claro que um bobina pequena (curta) resulta em pequena massa metálica aquecida e, portanto, em uma pequena necessidade de potência na bobina. Por outro lado, a eficiência elétrica da bobina é também função do comprimento da bobina. A redução do comprimento (L) da bobina resulta na redução de sua eficiência elétrica^[5].

A figura 2.15 apresenta a eficiência da bobina em função da frequência, para tubos e para cilindros sólidos. A frequência ideal para aquecimento por indução de tubos é, tipicamente, mais baixa que a frequência ideal para aquecimento de sólidos cilíndricos. Usualmente, é menor que 10kHz para parede de médio tamanho (<1cm), e menor que 1kHz para tubos de parede espessa (>1cm).

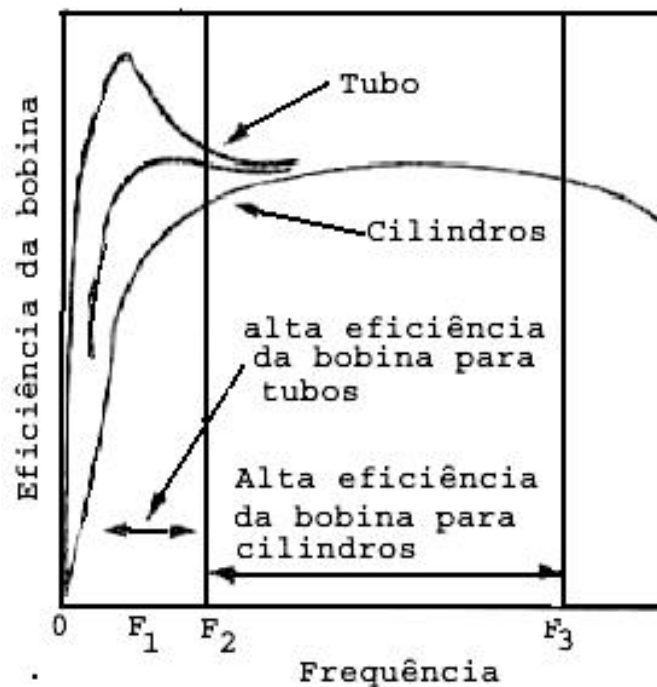


Figura 2.15. Eficiência da bobina em função da frequência, para tubos e cilindros sólidos^[5].

2.3.5 RESFRIAMENTO

A ducha, utilizada na têmpera dos processos de tratamentos térmicos por indução eletromagnética, é projetada para uma rápida remoção de calor, permitindo desenvolver a dureza e a estrutura do metal desejada. Uma ducha não intensa resulta numa branda estrutura perlítica e bainítica no metal, enquanto uma intensa produz estruturas martensíticas. Para alguns tipos de aço, uma ducha irregular ou desigual causará distorções. A intensidade da ducha depende da velocidade do fluido, de seu ângulo incidente na superfície da peça, da temperatura, da composição do fluido e do seu fluxo total. Existem três principais considerações para o dimensionamento do sistema de ducha: tratamento térmico aplicado, estilo do indutor e geometria da peça. Para um melhor desempenho da ducha é desejável a rotação da peça durante sua aplicação, assegurando a uniformidade do resfriamento.

Vários fluidos, tais como soluções aquosas de polímeros, óleos, água e sal, e água direta são usados na ducha. Normalmente se usa água com pequena porcentagem de polímero (8 a 10%) ajudando a eliminar uma barreira de vapor que pode ocorrer com a água direta ^[1,12].

2.3.6 TÊMPERA.

A têmpera permite obter uma estrutura martensítica, com elevada tensão interna residual. O processo é controlado por vários fatores, sendo que os mais importantes são: forma da bobina, número de voltas da bobina, frequência de operação, potência aplicada e intensidade da ducha.

Operações em alta frequência resultam em baixa profundidade endurecida. Alta potência resulta em curto ciclo de tempo. A taxa de aquecimento depende da intensidade do campo magnético, assim, à distância entre peça e bobina também influencia o processo ^[7].

A têmpera superficial, com endurecimento a profundidades de 0,25mm a 1,5mm, alcançado com tratamentos entre 10 kHz a 2 MHz, é realizada com intuito de melhorar a resistência dos componentes ao desgaste ou à fadiga. Se a peça for submetida a esforços intensos, são usuais profundidades entre 1,5mm e 6,4mm e 10 kHz a 1 kHz são necessários. Para melhorar propriedades contra fadiga proveniente de torção e/ou dobramento promove-se por têmpera o endurecimento a profundidades que variam de 1,5 mm a 12,7mm.

A distribuição de dureza ao longo da espessura peça depende da temperabilidade do aço.

O tempo total para se completar o processo de endurecimento superficial utilizando indução eletromagnética (aquecimento e resfriamento) normalmente é muito pequeno, em média de 5 a 27 segundos por componente.^[11]

2.4. ASPECTOS METALÚRGICOS

2.4.1 TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA.

Analisando a figura 2.16, quando um aço no estado austenítico (CFC) é resfriado nas condições de equilíbrio, ele se transforma em ferrita (CCC) e cementita (Fe_3C). A figura 2.17 mostra que quando o aço for resfriado rapidamente, os átomos de carbono não terão tempo suficiente para se difundirem através da rede cristalográfica do ferro e uma fase de transição instável, denominada martensita, será formada.

A transformação martensítica envolve ação de cisalhamento, na qual átomos deslocam-se em conjunto. O carbono em solução sólida não tem condições cinéticas para se difundir, ficando aprisionado em posições intersticiais da fase CCC, distorcendo-a, resultando numa rede tetragonal. O resfriamento rápido promove altas taxas de nucleação da nova fase, de maneira que martensita formada terá grãos extremamente finos, de forma acicular.

A martensita apresenta-se como uma estrutura cristalina com grandes distorções e altas concentrações de tensão, que resulta em alta dureza e fragilidade. Peças em aço com microestrutura martensítica ou martensita revenida exibem elevada dureza e apresentam-se frágeis para muitas aplicações.^[7,8]

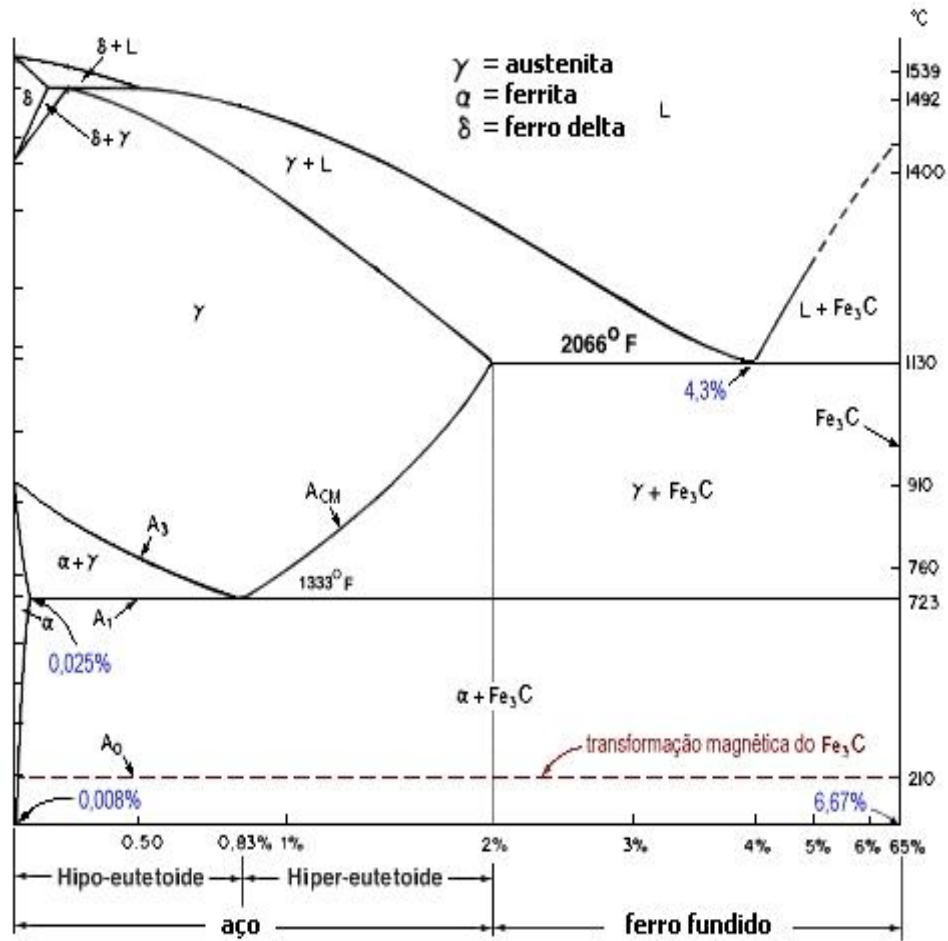


Figura 2.16. Diagrama de fase Fe-C [10].

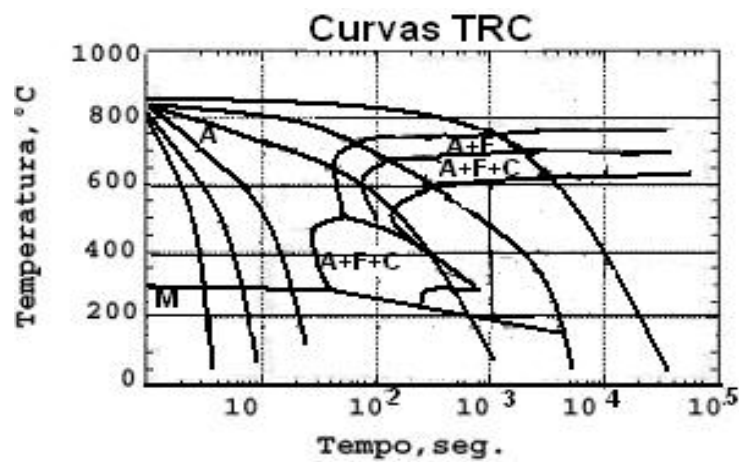


Figura 2.17. Diagrama esquemático TRC para o aço carbono [7].

2.4.2. TENSÕES RESIDUAIS APÓS O TRATAMENTO

Devido a certos aspectos do tratamento de têmpera utilizando aquecimento por indução, o mecanismo de formação de tensões residuais aqui é diferente de outros tratamentos térmicos.

Genericamente falando, há dois diferentes tipos de tensões: tensões térmicas e tensões de transformação. As tensões de transformação ocorrem devido às mudanças microestruturais que aparecem em decorrência da transformação da austenita em martensita, e as tensões térmicas são causadas pelas diferentes magnitudes e gradientes de temperaturas. A tensão residual total é uma combinação de ambas componentes. ^[1,9]

No caso da têmpera superficial por indução eletromagnética, há uma fina camada superficial onde ocorre à transformação austenita-martensita^[17]. Duas tensões opostas agem nesta camada. Devido ao drástico decréscimo de temperatura na superfície, ocorre uma redução de volume, gerando tensões de tração. Na continuação do resfriamento, a martensita se forma, com expansão de volume, gerando tensões de compressão. Quando termina o resfriamento, uma combinação de tensões de tração e compressão coexistem na peça.

Tensões de compressão na superfície tendem a aumentar a dureza do aço, conferindo proteção contra trincas causadas por ranhuras microscópicas. Entretanto, as condições globais de tensões, com um máximo de tensões de tração tipicamente localizado abaixo da área de endurecimento, aumentam a fragilidade e a sensibilidade à trinca, sendo necessário o alívio de tensões na região. ^[1,18]

Um caminho convencional de alívio de tensões é submeter tais regiões a temperaturas de revenimento, em fornos os quais, em geral, estão localizados em outra área operacional, sendo necessário espaço extra e tempo para transporte das peças. Além disso, o revenimento em fornos convencionais consome tempo da ordem de 2 a 3 horas.

Para suprir esta desvantagem, desenvolveu-se o processo de revenimento por indução^[1]. O revenimento é necessário para aliviar algumas dessas tensões e reduzir significativamente a tensão trativa abaixo da superfície, enquanto conserva a benéfica tensão compressiva superficial. ^[18]

Os parâmetros corretos do processo para revenimento por indução devem ser encontrados por medidas de dureza. A tabela 2.2 mostra valores de tensões residuais em um aço SAE 1045, após têmpera e revenimento ^[1,9].

O comportamento à fadiga de regiões temperadas por indução depende largamente da real combinação da profundidade de endurecimento e da distribuição das tensões residuais ao longo da espessura da peça. Um estudo experimental^[14] das tensões residuais das camadas superficiais de amostras cilíndricas de aço AISI 4130 nas condições temperado-revenido e normalizado foi realizado, variando-se os parâmetros do processo para alcançar uma profundidade de endurecimento constante. As amostras mostraram um estado de tensões bi-axial constante na superfície. As direções das principais tensões pouco desviaram das direções longitudinal e circunferencial definidas. Entretanto, as tensões de cisalhamento na superfície foram de pequena magnitude.

A experiência mostrou que os parâmetros do processo de têmpera por indução influenciam significativamente o estado de tensão residual de regiões temperadas por grandes extensões. As tensões residuais foram medidas pelo método de difração de raios X.

	Dureza	Tensões residuais máximas (kgf/mm²)			
Tratamento térmico	Superficial	Normal		Axial	
Após têmpera	(HRC)	Compressão	Tração	Compressão	Tração
Revenimento convencional					
a 100°C	60	70	45	48	28
a 200°C	55	48	35	30	23,5
Revenimento por indução					
a 200°C	60	63	38	43	23
a 300°C	55	40	26	25	28

Tabela 2.2. Efeito de revenimento em um aço SAE1045^[1,9].

Em outro estudo^[18], foram testados eixos endurecidos por indução, pelo ensaio de fadiga com uma carga de torção. Nesse trabalho, foram considerados somente os testes de fadiga que proporcionaram o surgimento de trincas abaixo da camada endurecida no núcleo do material. As medidas das tensões residuais, pelo método de difração de raios X, e a simulação do processo de endurecimento mostraram que as tensões residuais de tração são elevadas no núcleo do material e de grande influência na sua durabilidade. As simulações do processo de endurecimento foram executadas com diferentes parâmetros. Os testes de fadiga indicaram que os parâmetros do

processo, tais como tempo, densidade de potência e frequência, influenciam significativamente na vida de fadiga.

Pôde-se perceber que um menor efeito de endurecimento e maior tempo de têmpera beneficiam a resistência à fadiga. Devem-se combinar os efeitos de temperatura de austenitização e velocidade de resfriamento para se conseguir alcançar a camada endurecida especificada, entretanto, as tensões residuais podem ser muito diferentes para a mesma profundidade de endurecimento, em função da combinação empregada. A tabela 2.3 indica a influência dos diferentes parâmetros do processo na tensão axial residual e na profundidade de endurecimento.^[18]

Parâmetros	Tração no núcleo	Compressão na superfície	Profundidade endurecida
Aumento da potência na bobina	aumenta	diminui	aumenta
Diminuição da rotação da peça de aço	não muda	diminui	aumenta
Aumento da frequência de c.a.	não claro	aumenta	diminui
Diminuição na velocidade de resfriamento	diminui	diminui	não muda

Tabela 2.3. Influência dos parâmetros do processo de têmpera por indução eletromagnética, de peça cilíndrica de aço, sobre a tensão axial residual e a profundidade de endurecimento.^[18]

Em outro estudo ^[16], avaliou-se um aço ao vanádio AISI1045 (10V45) submetido à têmpera por indução superficial em três profundidades nominais de endurecimento (2, 4 e 6mm), com posterior revenimento em um forno convencional a 190°C por 1h. As microestruturas martensíticas superficiais apresentaram carbonetos lamelares residuais, devido à dissolução incompleta dos carbonetos da perlita na microestrutura martensítica. Verificou-se que a capacidade máxima de torque de peças produzidas com este classe de aço é muitas vezes ampliada pelo aumento da profundidade da camada endurecida ^[15,18].

2.4.3 SUPER ENDURECIMENTO.

O super endurecimento é um fenômeno, associado à têmpera por indução, onde o valor de dureza aumenta de 2 a 8 pontos HRc, em relação ao máximo valor de dureza obtido para um dado tipo de aço por um tratamento convencional. O superendurecimento é decorrente do curto tempo de tratamento empregado no sistema de aquecimento por indução^[8,11] e pode ser atribuído ao fino tamanho de grão do aço endurecido por indução. Isto ocorre porque o aço é austenitizado em um tempo curto, resultando em grãos de pequeno tamanho.^[8]

2.4.4 REVENIMENTO POR INDUÇÃO

O tratamento de revenimento é realizado com o objetivo de diminuir a fragilidade da martensita, tornando-a dúctil e tenaz. O que ocorre, na realidade, é uma sensível diminuição das tensões internas típicas da martensita e diminuição de dureza em consequência de mudanças estruturais importantes que dependem da temperatura e do tempo aplicado.^[19]

Tempo e temperatura são dois parâmetros críticos no revenimento por indução. As temperaturas para esse processo são sempre abaixo da temperatura de transformação (linha A₁ do diagrama Fe-C, figura 2.16.). Usualmente, adota-se a faixa de 120 a 600°C. Se o aço for aquecido abaixo de 100°C, não haverá modificações microestruturais importantes.^[17]

A faixa de 120 a 300°C é considerada de baixa temperatura para o revenimento, promovendo pequenas modificações estruturais e alívio de tensões com conseqüente redução de dureza.

Se o aço for revenido acima de 600°C, mudanças significativas ocorrerão em sua microestrutura, podendo resultar em perda de dureza, salvo para alguns aços microligados.^[19]

É importante minimizar o tempo entre a têmpera e as operações de revenimento. Um longo “tempo transiente” talvez permita a tensão residual produzir distorções e/ ou fraturas que poderão inutilizar a peça.

O processo de revenimento por indução eletromagnética envolve a difusão dos átomos de carbono, para formação de novas fases, além do alívio de tensões. No processo por indução eletromagnética, empregam-se segundos para se completar o processo de têmpera e alguns segundos a mais, ou poucos minutos, para o revenimento.^[19]

É preferível usar baixa frequência para revenimento por indução eletromagnética, pois a temperatura empregada é sempre abaixo do ponto Curie. Como consequência, a parte aquecida retém suas propriedades magnéticas e o efeito de superfície é muito evidenciado. A baixa frequência no revenimento permite melhor homogeneização da temperatura da peça, fator fundamental para o alívio de tensões^[18].

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; COOK, R. L. e BLACK, M. R. Induction Heat Treatment: Basics Principles, Computation, Coil Construction, and Design Considerations, In: TOTTEN, G. E. e HOWES, M. A. H. Steel Heat Treatment Handbook, M. Dekker, NY, p 765-874, 1997.
2. 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.
3. OLIVEIRA, C. P., ARAUJO, F. G. S. Relatório Parcial - Projeto TIEFAM, 2000.
4. LOVELESS, D. ; RUDNEV, V. ; COOK, R. ; AND BOUSSIE, T. “Innovative space saving idea for induction heat treating”; Industrial Heating, March 1998” p. 53- 58.
5. RUDNEV, V; LOVELESS, D. ; LAMONTE, J. ; DEMIDOVICH, V. ; AND POWELL.J. A Balanced approach to induction tube and pipe heating; p. 53
6. KOZAR,R. Optimizing The Use of Eddy Currents for Hardening Quality Control; p.3
7. WEISS, K. In-Line Tempering on Induction Heat Treatment Equipment Relieves Stresses Advantageously, Industrial Heating, 1995.
8. NOVIKOV.I.Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais, Editora UFRJ, 1994, p.337-340.
9. LOVELESS, D., RUDNEV, V.; LANKFORD, L. ; DESMIER, G. AND MEDHANIE, H. Advanced Non-rotational Induction Crankshaft Hardening Technology Introduced Automotive Industry.; Industrial Heating, November, 2000.

10. ASM Metals Hand Book. vol. 4
11. RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; MILLER, P. J. e BLACK, M. R. Progress in Study of Induction Surface Hardening of Carbon Steels, Gray Irons and Ductile Irons, Industrial Heating, 1996.
12. INDUCTOHEAT - Manual do equipamento de tratamento térmico por indução eletromagnética.
13. KRISTOFFERSEN, H. e VOMACKA, P. Influence of Parameters for Induction Hardening on Residual Stresses, Materials & Design, v.22, p. 637-644, 2001.
14. CUNNINGHAM, J. L.; MEDLIN, D. J. e 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.
15. TJERNBERG, A. Fatigue Lives for Induction Hardened Shafts With Subsurface Crack Initiation, Engineering Failure Analysis, v.9, p. 45-61, 2001.
16. RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; SCHWEIGERT, K. e DICKSON, P. Efficiency and Temperature Considerations in Induction Re-Heating of Bar, Rod and Slab, Industrial Heating, 2000.
17. BERTINI, L. e FONTANARI, V. Fatigue Behaviour of Induction Hardened Notched Components, International Journal of Fatigue, v.21, p. 611-617, 1999.
18. WEISS, K; RUDNEV, V.; COOK, R., LOVELESS, D.; BLACK, M. Induction Tempering Of Steel, Advanced Materials & Process, August, 1999.
19. RUDNEV, V. I.; BOUSSIE, T. G.; LOVELESS, D. L.; AND COOK, R. Heat treating of carbon steels and modern ductile (nodular) irons. Proceedings of the 16 th conference, ASM International, Materials PARK, OHIO, p. 107-116, 1996.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

No presente trabalho, por razões econômicas, ditadas pela geometria das peças a serem tratadas e pelo curto tempo e baixa energia despendida, interessa-nos o tratamento térmico por indução eletromagnética.

O processo aproveita a propriedade que têm as peças metálicas de serem boas condutoras de corrente elétrica. Assim, quando colocadas num campo magnético promovido pela passagem de uma corrente elétrica em uma bobina, aparece na peça uma força eletromotriz induzida que provoca a circulação de uma corrente elétrica (corrente de Foucault), visto que tal peça é um circuito fechado. A circulação de corrente dá-se preferencialmente na superfície devido ao “efeito superficial” provocando o aquecimento desta região por perdas RI^2 (efeito Joule) ^[1].

A velocidade de aquecimento depende da intensidade do campo magnético bem como da resistência da peça ao fluxo de corrente induzida. A espessura da camada aquecida é tanto menor quanto maior a frequência aplicada à bobina, usualmente da ordem de 01 kHz a 01 MHz. Existem outros fatores que influenciam na espessura desta camada que são, por exemplo, a forma da bobina, a distância entre a bobina e a peça, o tempo de aquecimento, a condutividade térmica do material etc. ^[4]

O processo, de maneira geral, consiste na realização de uma têmpera, limitada a uma camada do metal (alguns mm), sem modificar estruturalmente o metal subjacente. Para realizar-se o tratamento, promove-se um aquecimento rápido da camada superficial a uma temperatura acima de Ac_3 e resfria-se drasticamente a seguir, de maneira que o calor não seja transmitido ao interior da peça.

São consideráveis os benefícios da utilização de hastes de melhor qualidade e durabilidade no processo de sondagem geológica. Para isto há preferência da utilização de hastes tratadas termicamente que apresentam durabilidade média cinco vezes maior do que as não tratadas, obtendo-se uma combinação das variáveis tempo e durabilidade, que se reflete em menores custos ^[3].

As hastes de sondagem são tratadas termicamente por indução apenas em suas extremidades, nas regiões onde são usinadas as roscas. Trata-se das regiões que sofrem os maiores esforços, tanto de flexão, uma vez que a trajetória dos furos é sempre helicoidal, quanto de abrasão, que nelas é ainda mais crítica, já que as paredes onde se abrem roscas perdem espessura.

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho foi executado segundo as seguintes etapas:

1. Análise química, metalográfica e levantamento das propriedades mecânicas de amostras de hastes comerciais importadas, visando definir o tipo de aço a utilizar e as propriedades mecânicas a se produzir nas hastes do trabalho em pauta.
2. Start-up do equipamento de tratamento térmico, concebido inicialmente para processamento dos tubos disponíveis comercialmente.
3. Testes preliminares, visando ajuste no equipamento básico.
4. Determinação de várias condições de têmpera e revenimento das hastes, com correlações de tempo e potência de tratamento, versus temperatura atingida em cada etapa.
5. Correlação entre tratamento térmico e perfil de dureza obtido ao longo do comprimento das hastes.
6. Tratamento térmico das hastes nas condições especificadas, com torneamento subsequente das roscas.
7. Testes de campo com as hastes tratadas, para verificação do comportamento das mesmas nas condições locais de campos de exploração e minas brasileiras.
8. Comparação com desempenho de similares comerciais importadas.
9. Medições do diâmetro externo das hastes para avaliar desgaste.

3.3. TRATAMENTOS TÉRMICOS POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Tradicionalmente, aços SAE 1045 são austenitizados para têmpera a temperaturas por volta de 850°C e revenidos a temperaturas próximas a 500°C, com tempos de encharque em torno de 1h (uma hora). Porém, no tratamento térmico por indução eletromagnética, os tempos de aquecimento são da ordem de poucos segundos. Desta forma, fez-se necessário determinar quais condições de tempo e temperatura produziriam regiões tratadas de acordo com as especificações estabelecidas para este estudo. Foram planejadas as temperaturas para austenitização e têmpera e revenimento mostradas na tabela 3.1. As têmperas foram feitas sempre com água e aditivo a 30°C, por 15 segundos, e a mesma taxa de resfriamento foi aplicada após o revenimento para reduzir a temperatura da peça tratada termicamente, eliminando uma possível fonte de acidentes (queimaduras) durante o manuseio do produto tratado.

LOTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Austenitização (°C)	1000	1000	900	900	900	950	950	950	900	800
Revenimento (°C)	550	500	400	50	500	500	400	450	300	400

Tabela 3.1: Temperaturas para austenitização e têmpera e revenimento programados para tratamentos térmicos de hastes de aço SAE 1045 por indução eletromagnética.

O equipamento, mostrado na figura 3.1, por uma questão técnica, não controla os ciclos diretamente pela temperatura, mas pela potência aplicada e o tempo de circulação de corrente. Isto é uma imposição do fato de as variações de temperatura serem muito rápidas no processo, com muitas flutuações em poucos segundos, influenciadas, inclusive, pelas características do material tratado.



(a)



(b)

Figura 3.1. (a) vista geral do equipamento, (b) vista da câmara de aquecimento e resfriamento do equipamento.

Portanto, foram feitos inúmeros experimentos para definir quais potências e tempos de aplicação de corrente produziram as temperaturas desejadas. De cada lote foi retirada uma haste, devidamente identificada, para confecção de amostras para ensaios metalográficos e de dureza. Os resultados do tratamento destas hastes, bem como os parâmetros do processo utilizados estão na tabela 3.2, que relaciona as condições de potência e tempo de aquecimento, com as temperaturas alcançadas em cada fase do ciclo de tratamento térmico por indução eletromagnética.

Amostra	Frequência (kHz)	Austenitização p/ Têmpera			Revenimento		
		Potência (kW)	Tempo de aquecimento contínuo (s)	Temperatura (°C)	Potência (kW)	Tempo de aquecimento pulsado (s)	Temperatura (°C)
1.7B	10	98	12	997	150	18	554
2.3B	10	98	12	991	150	18	504
3.3B	10	92	11	909	143	15	400
4.2B	10	92	11	900	143	15	448
5.3B	10	92	11	890	143	15	508
7.1B	10	92	12	966	143	15	502
8.3B	10	92	12	950	143	15	403
9.1B	10	92	12	955	143	15	457
9.3B	10	92	11	884	143	15	311
10.1B	10	92	9	808	143	25	400

Tabela 3.2. Relação entre as condições de potência e tempo de aquecimento, com as temperaturas alcançadas em cada fase do ciclo de tratamento térmico por indução eletromagnética, para cada amostra submetida à análise.

A metodologia do trabalho consistiu em tratar termicamente, por indução eletromagnética, tubos sem costura, de fabricação nacional, de aço SAE 1045, com 3m de comprimento, 7cm de diâmetro externo e 0,5cm de espessura, na composição 0,45%C, 0,85%Mn, 0,24%Si, 0,010%P, 0,005%S, 0,01%Cr, 0,001%Ti, 0,02%Al e 0,02%Mo com o equipamento desenvolvido por uma equipe técnica em projeto anterior, juntamente com a empresa contratada para fabricá-lo, com ajustes e adaptação de projeto feitos por técnicos da Geosol e pela equipe de pesquisa. Abaixo estão as especificações técnicas do equipamento para tratamento térmico por indução eletromagnética utilizado neste trabalho.^[5]

- Sistema de tratamento térmico, para hastes de perfuração de 3 metros de comprimento, carregamento manual, ciclos de têmpera e revenimento programáveis, posicionamento e rotação automáticos, para aquecimento uniforme, jatos de líquido de resfriamento, fonte e controle em estrutura única.
- Fonte transistorizada de 150kW, 10KHz. Operação a 460V, 3 fases, 60Hz, com capacidade para adaptação a outras redes de tensão. Sistema de tubulação da têmpera completo.

- Sistema interno de recirculação de água deionizada, para resfriamento do solenóide de indução.
- Mesa para posicionamento das hastes, com posicionamento pneumático e rotação.
- Controles com terminal de operação.
- Indutor para hastes de até 3 ½”, com 23cm de comprimento e adaptação em grampo, para troca rápida”.
- Chuveiro de têmpera para hastes de até 3-1/2”.
- Pirômetro para monitoramento das temperaturas das hastes.

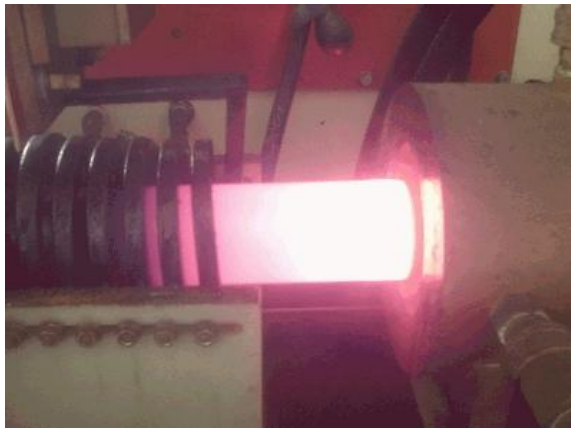
A figura 3.2 mostra imagens o equipamento bem como as diversas às etapas da operação de tratamento térmico das hastes.



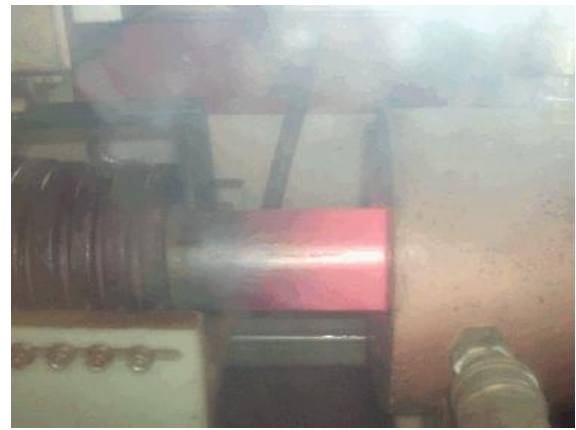
(a)



(b)



(b)



(d)



(e)

Figura 3.2. Fotografias das etapas de operação de tratamento térmico de austenitização e têmpera, por indução eletromagnética de tubos de aço SAE 1045, para fabricação de hastes de perfuração para sondagem geológica. De (a) a (e), em seqüência de tratamento, do início do aquecimento, até a têmpera.

3.4. TESTES DE BANCADA

As hastes produzidas tiveram suas propriedades e desempenhos analisados e comparados com os de hastes comerciais, para várias condições de processamento, no sentido de alcançar controle e flexibilidade no processo, e ainda adaptar as hastes ao solo sondado, visando menores custos para prospecção geológica no Brasil.

As amostras foram cortadas em serra refrigerada com solução constituída de água e polímero e, posteriormente, foram desbastadas em lixadeira mecânica com uso de lixa (cinta) grão 80, obtendo a planicidade adequada para ensaio de dureza Rockwell C (HRc).

Foram feitas medidas de dureza ao longo do comprimento das hastes para determinar o perfil de dureza. Da análise dos perfis obtidos foi escolhida a condição de tratamento térmico por indução eletromagnética que produziria hastes com propriedades mais adequadas aos objetivos propostos.

Para ensaio metalográfico, as amostras foram submetidas a preparação desde a lixa grão 80 até a lixa 4000, seguido de etapa de polimento com pasta de diamante (1 μ m), ataque químico em solução contendo 2 ml de ácido nítrico, HNO₃, e 98 ml de álcool etílico (nital 2%) permitindo, assim, revelar a microestrutura do aço analisado.

3.5. TESTES DE CAMPO

O procedimento de sondagem destina-se a medir a substância mineral útil presente no trecho de terreno atravessado.

A sonda rotativa é composta de inúmeros acessórios, como: conjunto moto-bomba de vazão mínima de 3.000 litros / hora e pressão 600 lbs, tripé, hastes, revestimentos, ferramentas de corte e outros acessórios. Possui mecanismo de avanço e se divide nas classes mecânica, manual e hidráulica e, em todas, os cabeçotes podem girar 360°. Em operação, a sonda imprime na composição uma força para vencer o atrito provocado pela ferramenta de corte. A força de reação exige ancoragem da sonda, quando seu próprio peso não é suficiente para vencê-la.

Com a sonda bem ancorada, dá-se início à operação, introduzindo o revestimento, cujo uso é imposto por solos coesivos de baixa resistência ou arenosos, onde o material fecha, não permitindo a livre passagem da ferramenta. A composição (haste, barrilete, luva e coroa) é acoplada à sonda, que lhe imprime movimento de rotação, com translação em direção ao furo.

A execução dos testes de campo iniciou-se em 14 de outubro de 2002, na Mineração Fazenda Brasileira, com 127 hastes numeradas devidamente preparadas para testes e ainda lubrificadas com graxa grafitosa.

Foram medidos inicialmente, para as hastes:

- Comprimento: 3005mm
- Diâmetro externo: 70mm
-

Inicialmente, foram realizados testes de campo comparativos, empregando hastes de aço SAE 1045, sem tratamento térmico, hastes de aço SAE 1045, tratadas termicamente por indução eletromagnética neste trabalho, e hastes de aço comerciais apresentando 0,42%C. Foi utilizada a sonda rotativa da Geosol nº102 NKS BOYLES. A figura 3.3 mostra detalhes das hastes nos testes de campo. Foram feitas perfurações no total de 331,55m, em solo

predominantemente constituído por carbonato clorita xisto (CCX), a uma inclinação com a vertical de 70°, com velocidade de rotação de 1300rpm, pressão do mandril de 45kgf/cm² e peso total da coluna de 1794kgf.

Todas perfurações foram executadas com auxílio de água em circulação, injetada pelas hastes através da bomba de pistão sob pressão, que é função da profundidade do furo. A pressão aplicada deve ser suficiente para jogar para fora o material desagregado na perfuração.

Foram realizadas quatro operações, ou manobras, para troca de coroa, nos dias 14/10, 15/10 e 16/10/2002 respectivamente. No dia 18/10/2002 pela manhã terminou-se o furo, com 331,55 m de profundidade. As hastes foram retiradas do furo e, seguindo a mesma seqüência de utilização durante a sondagem, foram colocadas sobre um cavalete para a remoção do lubrificante e inspeção visual. A seguir, foram realizadas medidas das roscas e do diâmetro externo das hastes e demais partes de interesse para avaliar o desgaste ocorrido em cada tipo.

Os testes prosseguiram até 19 de setembro de 2003, desta vez utilizando apenas as hastes de aço SAE 1045 tratadas por indução eletromagnética neste trabalho. A distância total perfurada em 23 furos foi de 6432,80 m, sendo 19 furos feitos com a sonda rotativa da Geosol n°102 NKS BOYLES, totalizando 4867,75m, e outros 4 furos totalizando 1424,05m executados com a sonda rotativa Geosol n°80. As hastes foram monitoradas quanto a falhas em serviço e analisadas quanto ao desgaste em uso, para comparação com o desempenho de hastes comerciais Importadas.

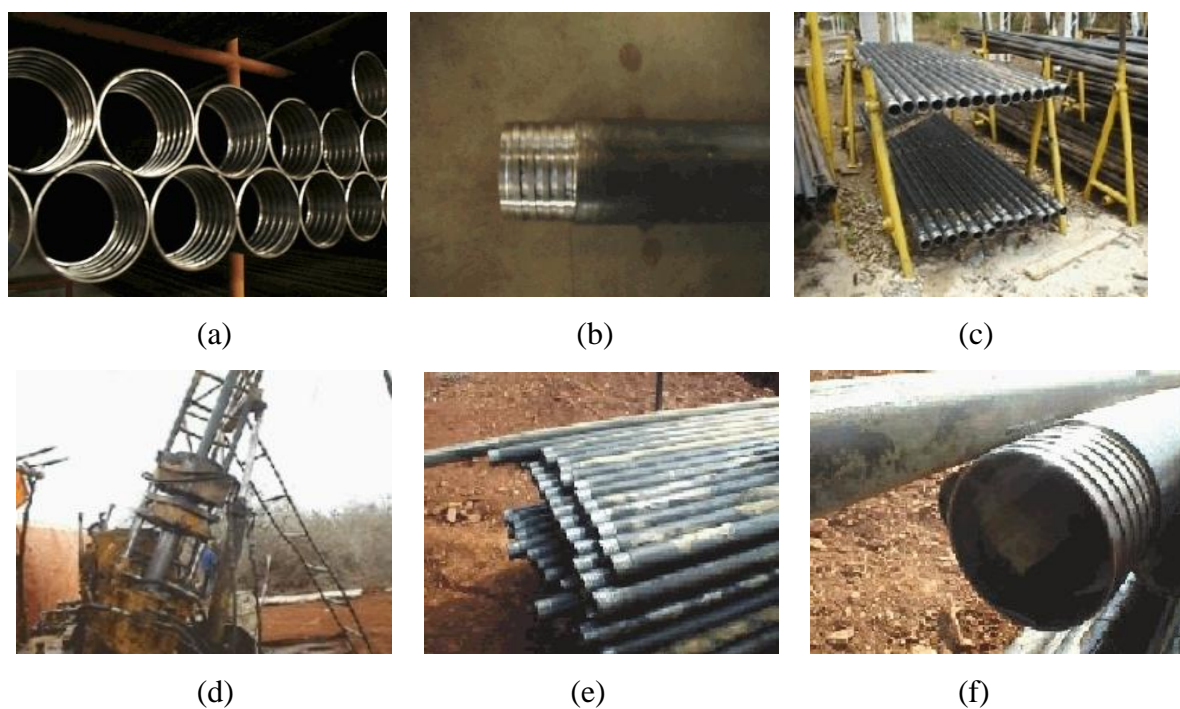


Figura 3.3. (a, b) Hastes tratadas e rosqueadas. (c) Hastes tratadas e rosqueadas no campo para teste. (d) Início de operação de sondagem com hastes tratadas no projeto. (e) Hastes após operação, sem falhas ou desgaste aparente. (f) Estado da rosca na região tratada, após operação.

3.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; COOK, R. L. e BLACK, M. R.; Induction Heat Treatment: Basics Principles, Computation, Coil Construction, and Design Considerations, In: TOTTEN, G. E. e HOWES, M. A. H.; Steel Heat Treatment Handbook, M. Dekker, NY, p. 765-874, 1997.
2. 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.
3. OLIVEIRA, C.P., ARAUJO, F.G.S. Relatório Técnico Parcial; Projeto Tecnologia de Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética de Ferramental para Aplicação em Mineração – TIEFAM; **Ministério da Ciência e Tecnologia**, PADCT – III, março de 2002.
4. ASM Metals Hand Book, vol. 4
5. INDUCTOHEAT. Manual do equipamento Manual do equipamento de tratamento térmico por indução eletromagnética.

4. CARACTERIZAÇÃO DAS HASTES COMERCIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Hastes de sondagem são tubos de aço sem costura, com roscas abertas em suas extremidades, para engate, utilizados como elementos de perfuração em equipamentos de sondagem. São consideráveis os benefícios da utilização de hastes de melhor qualidade e durabilidade no processo. Para isto há preferência da utilização de hastes tratadas termicamente, que apresentam durabilidade média cinco vezes maior do que as não tratadas. ^[1]

Em hastes de sondagem, atenção especial é dada à junção das hastes, pois esta parte exerce grande influência na durabilidade do componente. De maneira a se poder determinar os parâmetros de tratamento térmico por indução eletromagnética de tubos de aço SAE1045, para a produção de hastes de perfuração para sondagem geológica, foi necessária uma etapa inicial de caracterização das propriedades das hastes de sondagem comerciais, descrita neste capítulo. Um dos principais objetivos deste trabalho é determinar as condições de tratamento de tubos de aço nacionais, para produzir hastes de sondagem com propriedades comparáveis às das hastes disponíveis comercialmente. As hastes comerciais serão designadas por BSi e LRi, com o caracter "i" designando o fato de serem importadas.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A caracterização das hastes comerciais importadas iniciou-se por análise química e metalográfica do material usado para sua confecção. Propriedades mecânicas das hastes comerciais importadas foram caracterizadas através de ensaios de dureza convencional (HRc) visando conhecer o perfil de dureza ao longo da região tratada termicamente, e por ensaios de microdureza Vickers, ao longo da secção reta dos tubos, para se determinar a profundidade de tratamento e o perfil de dureza ao longo da secção.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 ANÁLISE QUÍMICA

As hastes BSi e LRi foram submetidas a análises químicas por via úmida, para determinação das composições dos aços utilizados nas suas confecções, apresentando os resultados mostrados na tabela 4.1

Haste\Elemento	Fe%	C%	Si%	Mn%	P%	Ni%	Cr%	Mo%	V%
BSi	98,4	0,42	0,25	0,88	0,04	---	0,10	---	---
LRi	98,1	0,30	0,15	0,50	---	---	0,80	0,15	---

Tabela 4.1. Composições químicas (%) dos aços das hastes de sondagem BSi e LRi.

4.3.2. ENSAIOS DE DUREZA

Os primeiros resultados do trabalho referem-se à análise de dureza da região tratada das hastes produzidas pelos dois maiores fornecedores mundiais de hastes para sondagem geológica, designadas por BSi e LRi.

As hastes BSi apresentaram o perfil de microdureza, ao longo da parede mostrado na figura 4.1, enquanto as hastes LRi apresentaram o perfil de microdureza mostrado na figura 4.2. As medidas de microdureza foram feitas no sentido da superfície externa para a interna das hastes de 5,0mm de espessura, de maneira que o zero da abcissa corresponde à parede externa.

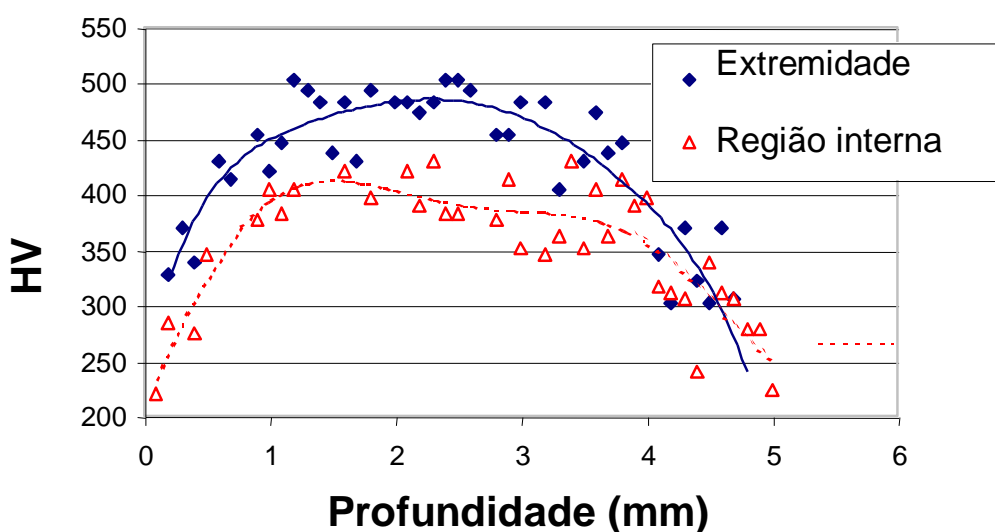


Figura 4.1. Perfis de microdureza ao longo da parede de haste de perfuração BSi, tratada termicamente por indução eletromagnética.

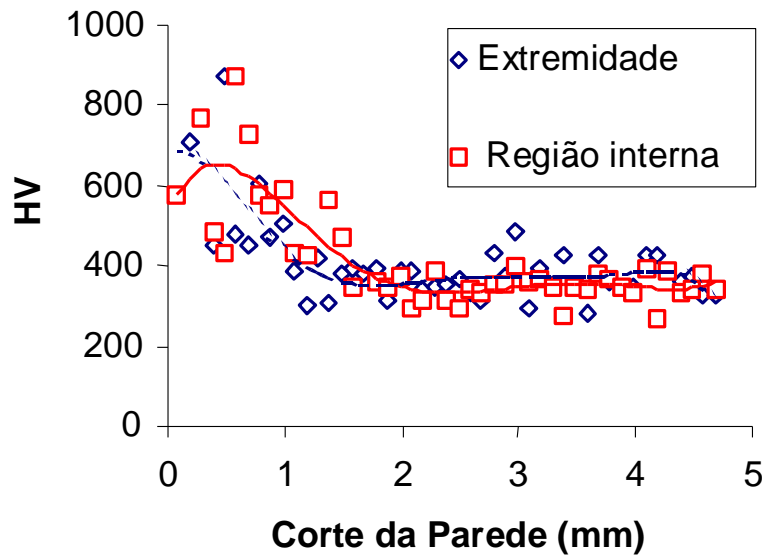


Figura 4.2. Perfil de microdureza ao longo da parede de haste de perfuração LRi, tratada termicamente por indução eletromagnética.

Nas hastes BSi, observa-se que o tratamento promove o endurecimento ao longo de toda a espessura do tubo, porém com amaciamento próximo às superfícies externa e interna. Nas hastes LRi, o tratamento de endurecimento revela-se mais intenso nas superfície externa da haste, suavizando-se no sentido do interior da parede, indicando que foram submetidas a tratamento térmico superficial na parede externa. Os altos valores de microdureza no meio da parede das hastes LRi indicam ainda que elas podem ter sido submetidas inicialmente a um primeiro tratamento térmico de endurecimento, com homogeneização da temperatura ao longo de toda a espessura e posteriormente um segundo tratamento ainda mais superficial, atingindo somente a parte externa da secção reta do tubo.

Quanto à dureza na superfície dos tubos, constata-se, pela análise das figuras 4.3 e 4.4, que as hastes BSi apresentam um perfil de dureza cujo valor inicial é de aproximadamente 35HRc na extremidade, onde são confeccionadas as roscas macho e fêmea, passando por uma região de maior valor (39HRc) e, por fim, decaindo para valores próximos de 25 HRc. As hastes LRi apresentam perfis de dureza com variações fortes, iniciando-se em valores próximos de 40 e 23HRc para as extremidades das roscas fêmea e macho, respectivamente, atingindo valores máximos entre 52 e 57HRC em região intermediária, logo após a porção usinada, seguida de brusca queda para valor mínimo de 23HRc, o que deve corresponder ao final da região tratada termicamente.

Os baixos valores de dureza na região da rosca macho da haste LRi estão relacionados ao fato de a usinagem ter removido a região da superfície externa da haste, uma vez que as hastes LRi foram submetidas a tratamento térmico superficial, como revelou a análise do perfil de dureza Vickers, ao longo da espessura da parede do tubo.

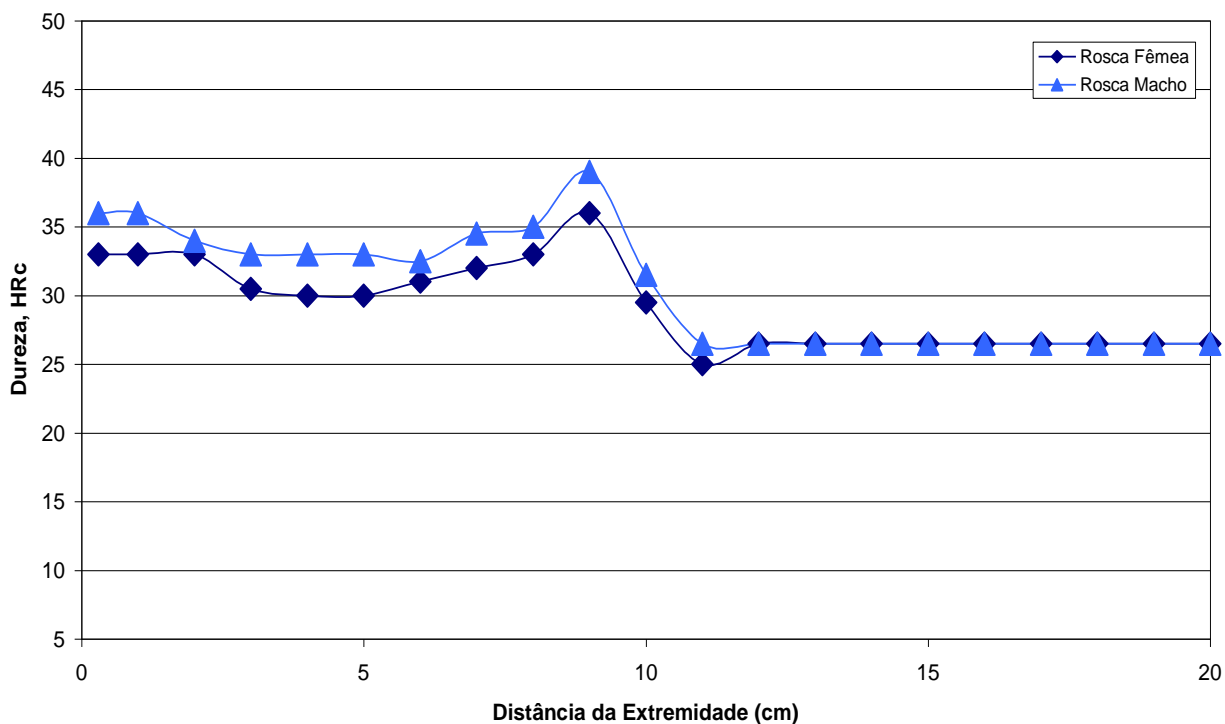


Figura 4.3. Perfil de dureza Rockwell (HRC) das extremidades (rosca macho e rosca fêmea) da haste de sondagem comercial BSi.

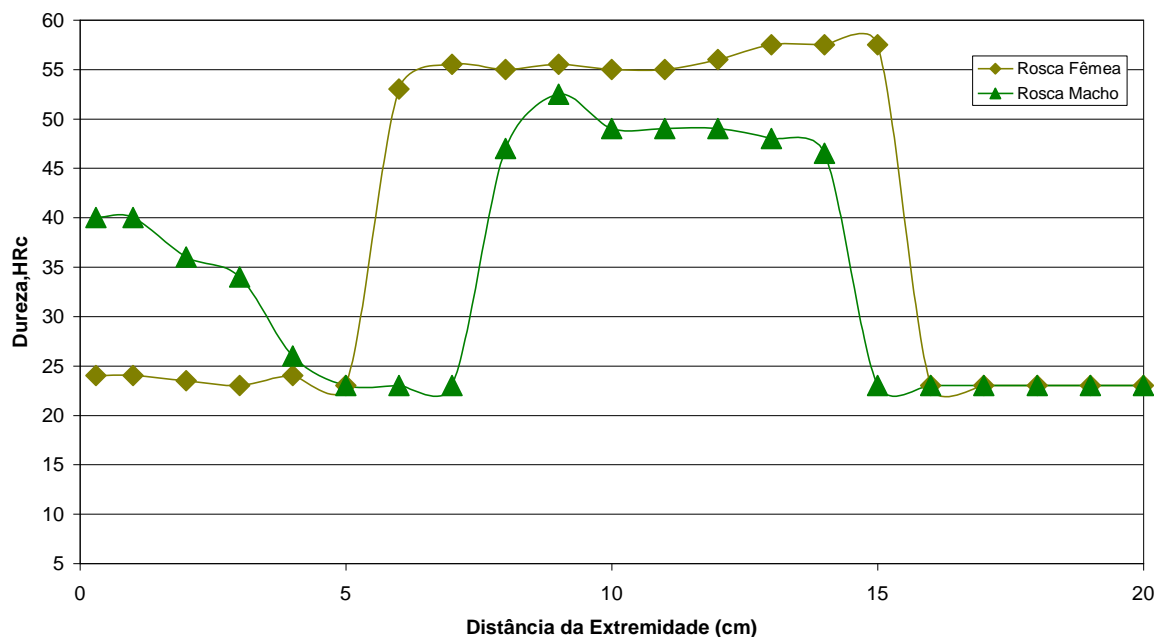
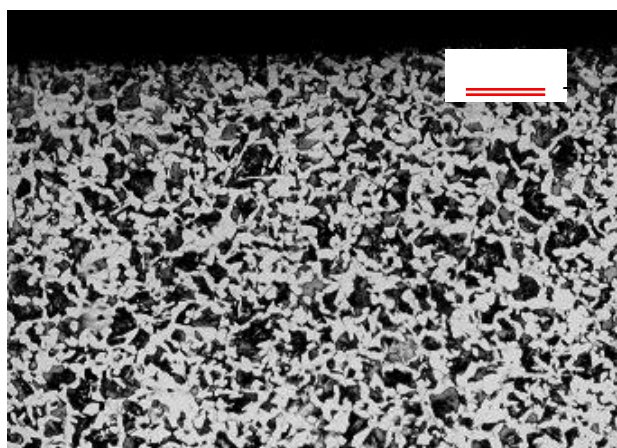


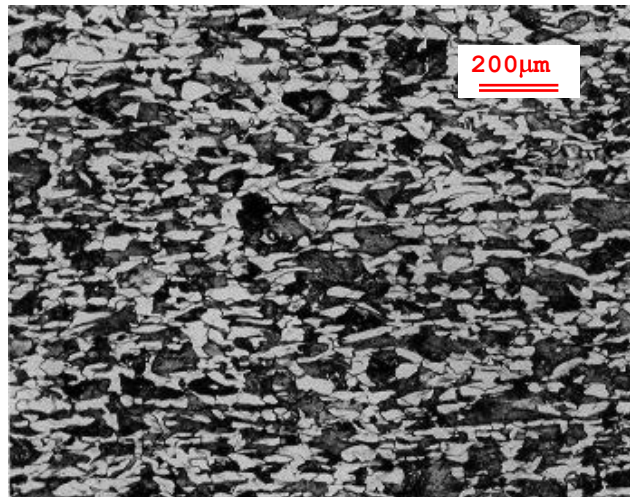
Figura 4.4. Perfil de dureza Rockwell (HRC) das extremidades (rosca macho e rosca fêmea) da haste de sondagem comercial LRi.

4.3.3 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

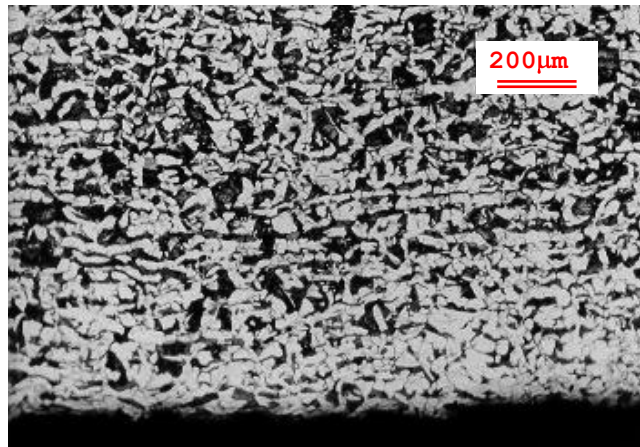
A figura 4.5 mostra aspectos micrograficos ao longo da parede da haste LRi, na região não tratada. Trata-se de um aço hipoeutetóide, com as regiões escuras correspondentes a perlita e as regiões claras correspondentes a ferrita. Observa-se pouca textura induzida por deformação nas regiões próximas às superfícies interna e externa da haste. Não há descarbonetação pronunciada.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5. Micrografias da seção reta da parede da haste LRi, mostrando a superfície externa (a), o meio da parede (b) e a superfície interna (c).

A figura 4.6 (a) a (d) abaixo corresponde a micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste LRi, região sem usinagem, mostrando a superfície externa (a), a região adjacente a ela (b), o meio da parede (c) e a superfície interna (d).

Observa-se a transição da martensita revenida, próxima à superfície externa, para a região de ferrita proeutetóide e perlita.

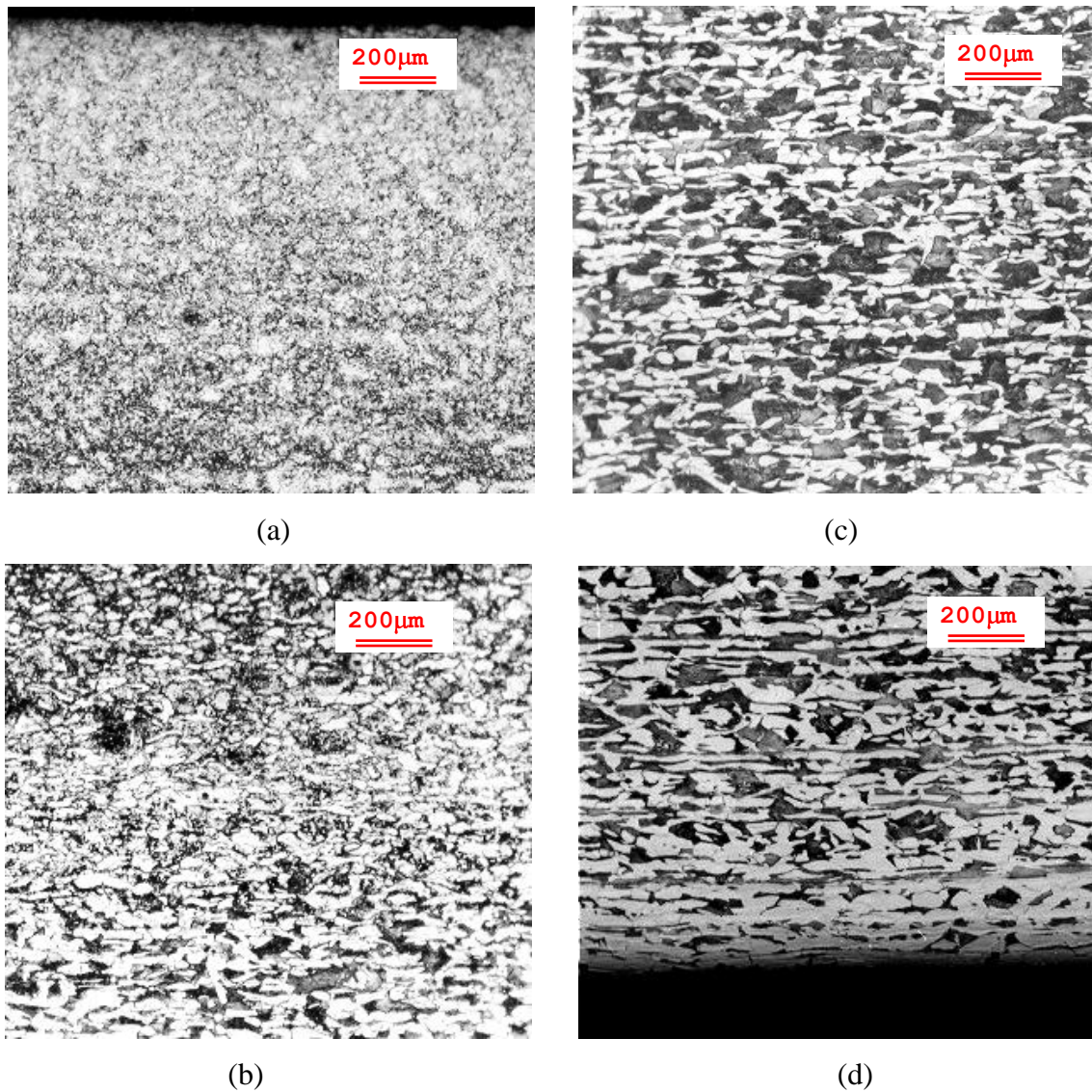


Figura 4.6. Micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste LRi, mostrando a superfície externa (a), a região adjacente a ela (b), o meio da parede (c) e a superfície interna (d).

A figura 4.7 (a) a (d) abaixo corresponde a micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste LRi, na região da rosca macho, mostrando a superfície externa da rosca (a), a região do dente (26X) (b), o meio da parede (c) e a superfície interna (d).

Observa-se a transição da martensita revenida, próxima à superfície externa, para a região de ferrita proeutetóide e perlita.

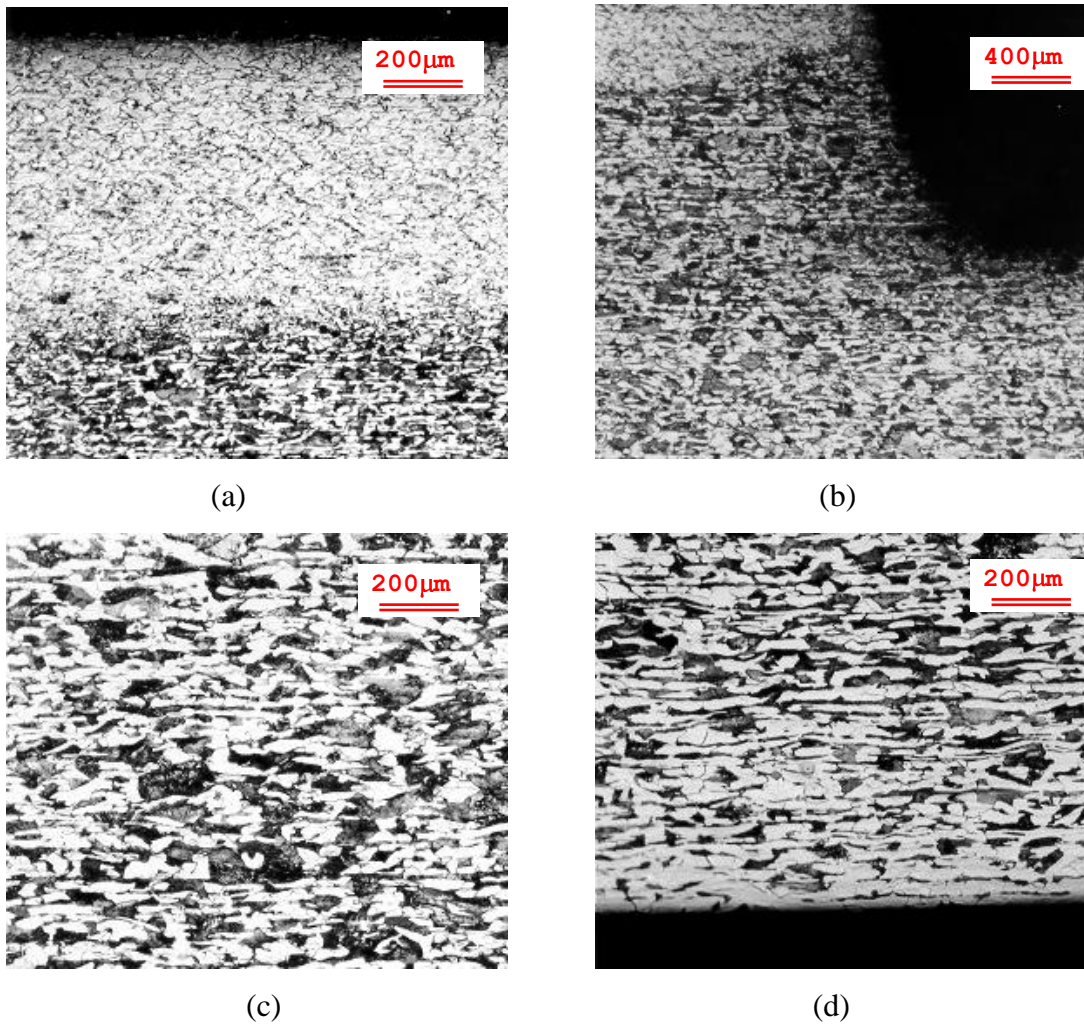
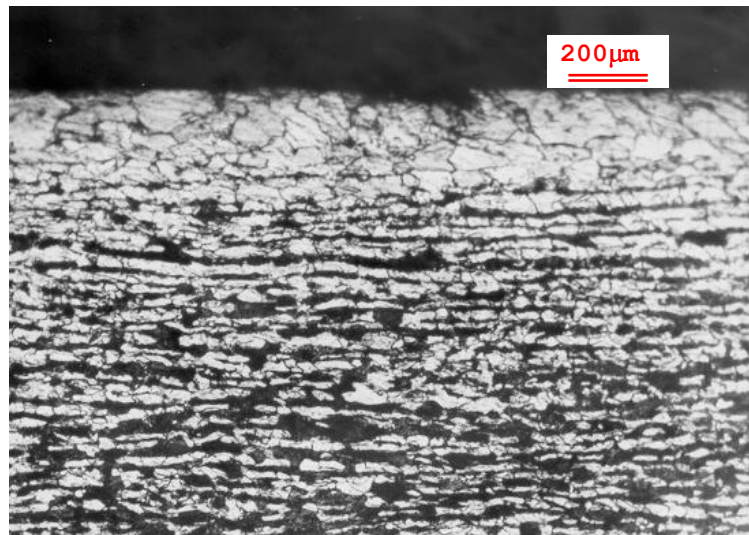


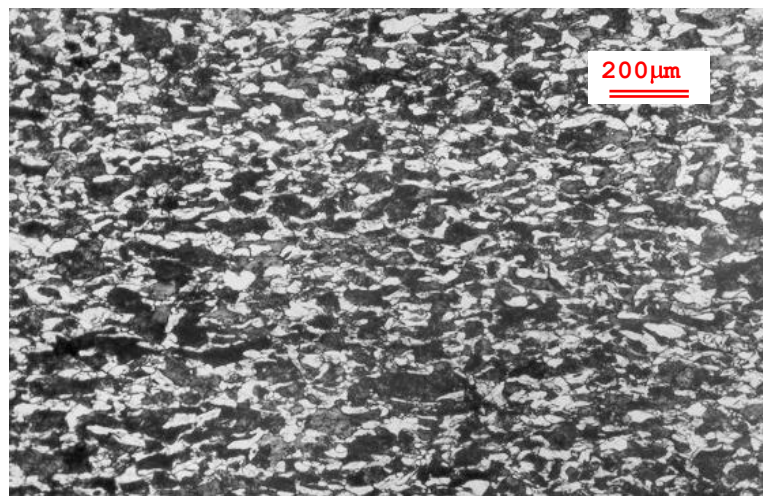
Figura 4.7. Micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste LRi, na região da rosca macho, mostrando a superfície externa da rosca (a), a região do dente (26X) (b), o meio da parede (c) e a superfície interna (d).

A figura 4.8 (a) a (c) abaixo corresponde a micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste BSi, região sem tratamento térmico, mostrando a superfície externa (a), o meio da parede (b) e a superfície interna (c).

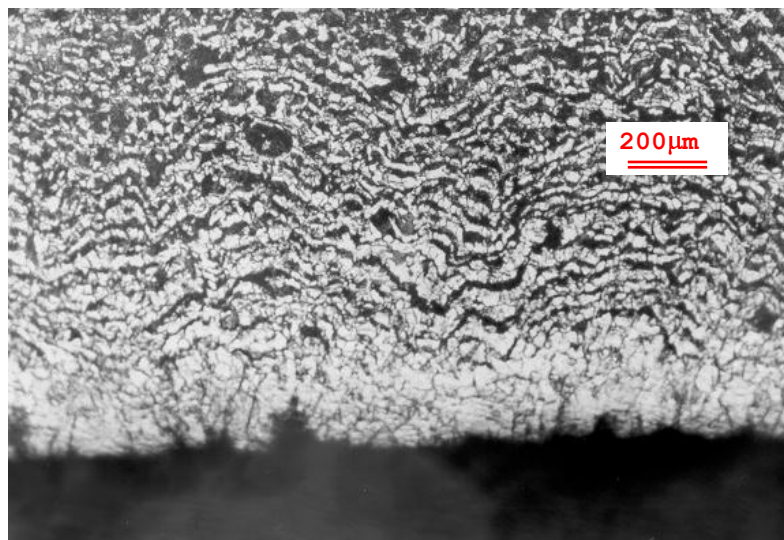
Trata-se de um aço hipoeutetóide, com as regiões escuras correspondentes à perlita e as regiões claras correspondentes à ferrita. Observam-se regiões de descarbonetação, assim como textura induzida por deformação próxima às superfícies interna e externa da haste.



(a)



(b)

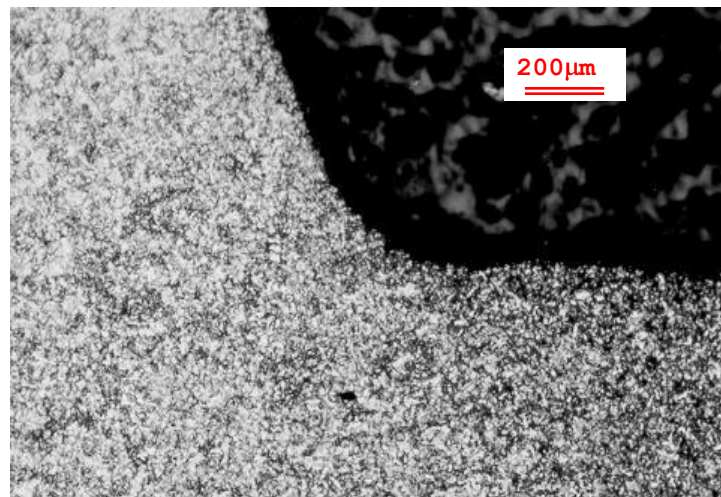


(c)

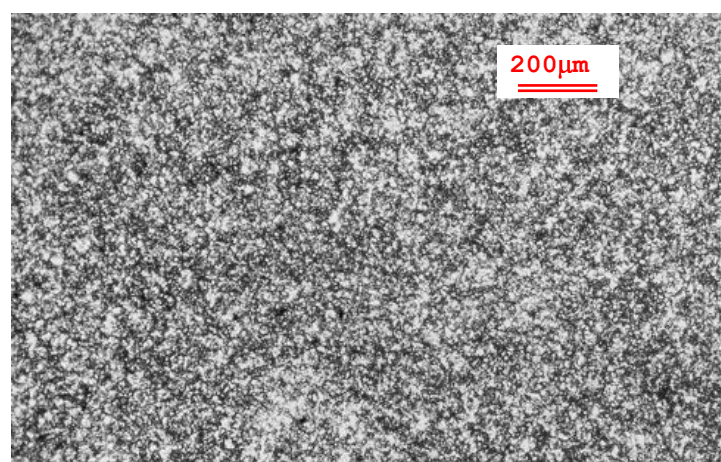
Figura 4.8. Micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste BSi, região sem tratamento térmico, mostrando a superfície externa (a), o meio da parede (b) e a superfície interna (c).

A figura 4.9 (a) a (c) abaixo corresponde a micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste BSi, região tratada da rosca macho, mostrando a superfície externa próxima a um dente da rosca (a), o meio da parede (b) e a superfície interna (c).

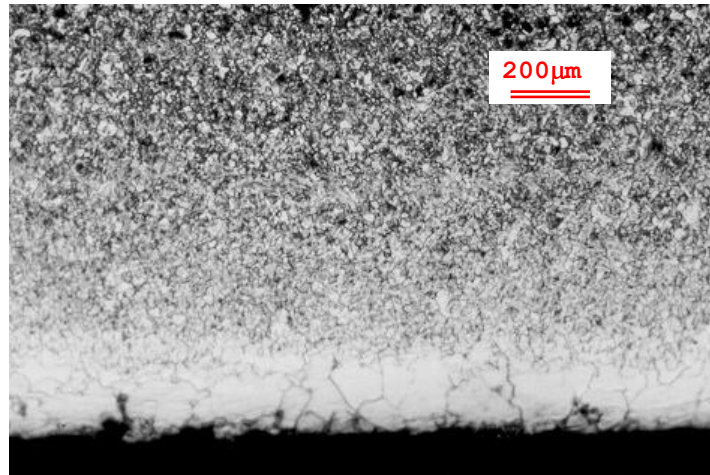
Trata-se de uma martensita revenida ao longo de toda a espessura, confirmando o tratamento térmico uniforme sobre toda a parede da haste. Observa-se uma região de descarbonetação próxima à superfície interna da haste, tendo sido usinada mecanicamente a região correspondente, próxima à superfície externa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.9. Micrografias (52,5X) da seção reta da parede da haste BSi, região tratada da rosca macho, mostrando a superfície externa próxima a um dente da rosca (a), o meio da parede (b) e a superfície interna (c).

4.3.4 CONCLUSÕES

- ✓ As hastes BSi são endurecidas ao longo de toda a parede pelo tratamento térmico por indução eletromagnética, sendo que as regiões de menor dureza, próximas às superfícies, são devidas à descarbonetação que ocorre no material, provavelmente em decorrência do processo de produção das hastes. Já as hastes LRi são mais pronunciadamente endurecidas na região próxima à superfície externa.
- ✓ Enquanto a têmpera e o revenimento são feitos com homogeneização da temperatura nas hastes BSi, as hastes LRi são submetidas a têmpera na superfície externa, talvez sequer chegando a austenitização na superfície interna do tubo. Isto revela, por sua vez, que o tratamento térmico por indução eletromagnética foi feito a baixa frequência – da ordem de 10 a 20kHz – no caso das hastes BSi, enquanto foi feito a alta frequência nas hastes LRi, certamente acima de 100kHz. Deve-se ressaltar que os detalhes dos tratamentos térmicos, por indução eletromagnética, são mantidos sob sigilo pelos fabricantes, que não revelam temperaturas de austenitização, tempos de tratamento ou frequências de operação.
- ✓ Portanto, hastes de sondagem comerciais com performances operacionais semelhantes, são produzidas tanto com baixas quanto com altas frequências no tratamento térmico por indução eletromagnética, resultando, respectivamente, em tubos com paredes temperadas ao longo de toda sua espessura ou apenas próximo à superfície externa.

4.3.5 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. OLIVEIRA, C. P., ARAUJO, F. G. S. Relatório Técnico Final; Projeto Tecnologia de Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética de Ferramental para Aplicação em Mineração – TIEFAM; **Ministério da Ciência e Tecnologia**, PADCT – III, outubro de 2002.

5. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE HASTES DE AÇO SAE 1045

5.1. INTRODUÇÃO

Conforme descrito no capítulo 1, o tratamento térmico por indução eletromagnética é um dos mais efetivos processos de tratamento térmico para diversas aplicações, podendo realizar têmpera total, têmpera superficial, revenido, alívio de tensões, recozimento, normalização, sinterização de metais pulverizados e outros. 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 no local onde o tratamento térmico é requerido^[1]. 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]

No aquecimento por indução eletromagnética, três maneiras de transferência de calor (condução, convecção e radiação) estão presentes, sendo que a transferência de calor por convecção e radiação, reflete o valor de perda de calor.^[3]

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^[3,4], conforme pode ser calculado pela equação 2.3 apresentada no capítulo 2.^[3]

A velocidade de aquecimento por indução 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 convencional e condiciona importantes particularidades da transformação microestrutural. Isto ocorre porque a velocidade de nucleação da austenita é maior que sua velocidade de crescimento linear. Em decorrência disto, acima das temperaturas de início (Ac_1) e de fim (Ac_3) da transformação em austenita, formam-se grãos austeníticos pequenos, com tamanhos médios variando de 2 a 7µm. 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 por tratamento convencional, para um dado tipo de aço. Isso permite, para situações onde se requer alta dureza superficial, usar uma classe de aço inferior à necessária nos tratamentos em fornos convencionais, para a mesma aplicação. 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.^[4]

O tempo total para se completar o processo de endurecimento superficial, utilizando indução eletromagnética e incluindo-se os ciclos de austenitização, têmpera e revenimento é em média, 60 segundos por componente.^[1,2] Tempo e temperatura são dois parâmetros críticos no revenimento por indução. Usualmente, adota-se para o revenimento por indução temperaturas entre 300°C e 600°C com tempos um pouco mais longos que os empregados na austenitização.^[5]

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

5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.

Devido às características mecânicas necessárias à perfuração para sondagem geológica, definiu-se que os aços a serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho devem ter um teor em carbono variando entre 0,35 a 0,5% (aços carbono ou baixa liga). Este limite visa evitar problemas de fissuração na camada temperada^[1]. Os experimentos foram realizados com o aço SAE 1045 (aço carbono não resulfurado, para construção mecânica).^[6]

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 0,45%C, 0,85%Mn, 0,24%Si, 0,010%P, 0,005%S, 0,01%Cr, 0,02 %Al, 0,02Mo% 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 pela equipe de pesquisa. O equipamento de tratamento térmico de tubos por indução eletromagnética tem, como principais características, uma potência máxima de operação de 150kW, 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. As altas velocidades de aquecimento não permitem o controle do processo, por temperatura da peça, de maneira que a potência e o tempo de tratamento de cada material devem ser ajustados, para se alcançar às temperaturas desejadas. O levantamento dos valores de potência, tempo e aquecimento, para cada material e geometria, foram realizados com rigor, em face de se constituírem em parâmetros críticos do processo. A alimentação dos tubos nas regiões da bobina de aquecimento e do jato de líquido refrigerante é feita por controle automático pneumático e as hastes, tratadas na horizontal, são mantidas em rotação durante todo o tempo, com o intuito de se evitar a deformação por efeito gravidade, sobre a parte aquecida.

O equipamento foi adquirido com financiamento da FINEP, através de um projeto do PADCT, tendo como consorciados 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.

O trabalho objetivou identificar quais as condições de potência e tempo de tratamento que produziriam, nos tubos de aço SAE 1045, o perfil de dureza mais adequado à produção de hastes de perfuração para sondagem geológica. Tal perfil de dureza foi definido com base nos resultados de caracterização das hastes comerciais, acrescidos dos seguintes pré-requisitos:

- Alta dureza nas extremidades das hastes, porém dentro dos limites de usinagem;
- Perfil suave de dureza na região tratada;
- Transição suave de dureza entre a região tratada e a zona termicamente afetada (ZTA);
- Níveis de dureza compatíveis com as durezas apresentadas por aços SAE 1045 tratados termicamente por processos convencionais.

A têmpera dos tubos foi feita através de uma ducha de água e polímero, projetada para uma rápida remoção de calor, permitindo desenvolver a dureza desejada. Para se evitar deformações na peça tratada em posição horizontal, ela foi mantida sob rotação constante, durante todo o tratamento. A ducha de água para remoção de calor para as primeiras 77 hastes foi constituída com 10 % de polímero na água, as demais, com 8%.

Os tubos produzidos tiveram suas propriedades analisadas e comparadas a outros comercialmente produzidos, para várias condições de processamento, no sentido de se obter controle e flexibilidade no processo.

Dos tubos tratados, foram extraídas amostras para análise, cortadas em serra refrigerada com água e, posteriormente, desbastadas em lixadeira mecânica com uso de lixa (cinta) grão 80, obtendo-se a planicidade adequada para ensaio de dureza Rockwell C (HRc).

Para ensaio metalográfico, as amostras foram submetidas a preparação desde a lixa grão 80 até a lixa 4000, seguido de etapa de polimento em pastas de diamante (1µm) e ataque químico em solução contendo ácido nítrico em solução com álcool (nital 2%).

5.3. MATERIAIS UTILIZADOS

Tubos em aço SAE 1045 de composição química média apresentada na tabela 5.1, sem costura, ponta lisa, com 3.075,00 mm de comprimento, 70mm de diâmetro externo e 5 mm de espessura.

Lote	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	Al (%)	Ti (%)
02010136	0,450	0,850	0,010	0,005	0,240	0,010	0,020	0,020	0,001

Certificado de inspeção Nº: 0050004686 – V & M do Brasil.

Tabela 5.1 - Composição química do aço SAE 1045 utilizado na confecção dos tubos.

Para adição ao fluido de têmpera, foi utilizado o polímero AQUA QUENCH 365, base sintética concentrada, isento de óleo mineral e nitritos e solúvel em água. Esse polímero não gera chamas, fumaça, fuligem ou vapores e é recomendado para têmpera de metais ferrosos em concentrações que variam de 5% até 50%, dependendo da velocidade de resfriamento desejada^[7].

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tubo de aço SAE 1045 utilizado nesta etapa do projeto para confecção de hastes de sondagem, no seu estado de entrega, tem o perfil de dureza Rockwell apresentado na figura 5.1, com valor médio de 86,2HRb, e o perfil de microdureza Vickers ao longo da espessura do tubo apresentado na figura 5.2, com valores entre 152 e 170HV.

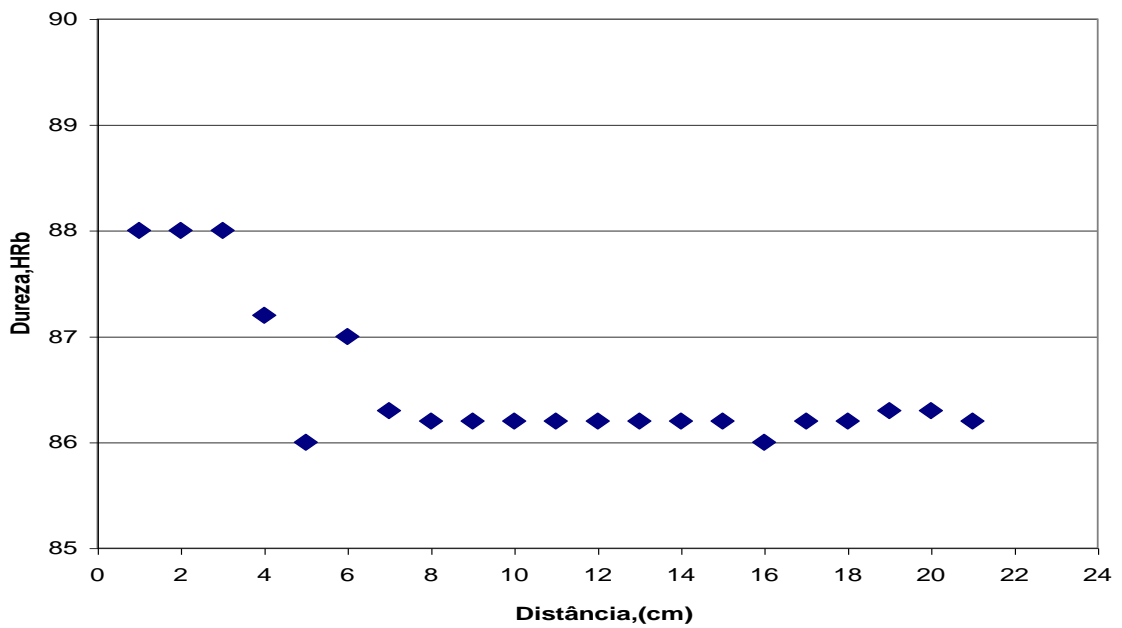


Figura 5.1. Perfil de dureza Rockwell (HRb) ao longo do comprimento de tubo de aço SAE 1045, sem costura, no estado de entrega.

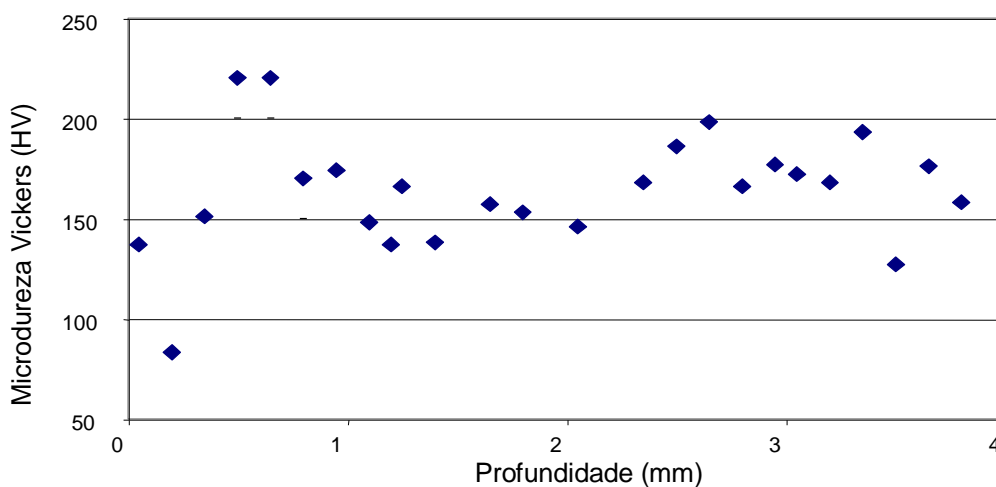
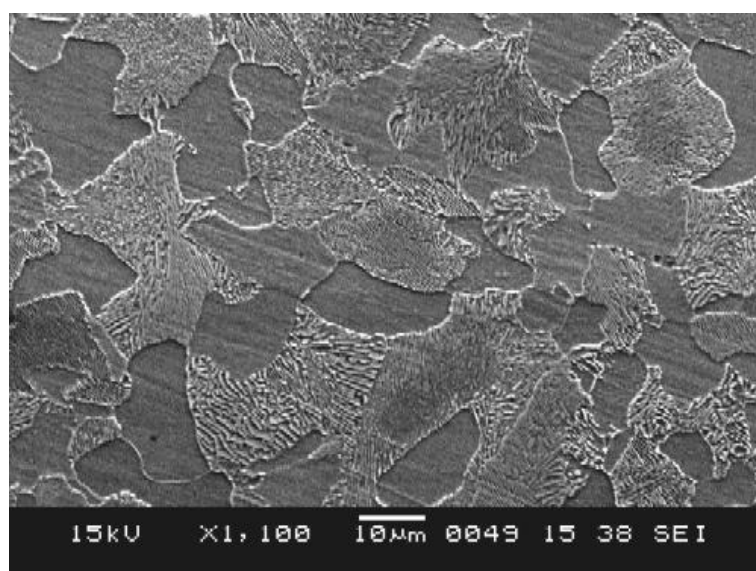


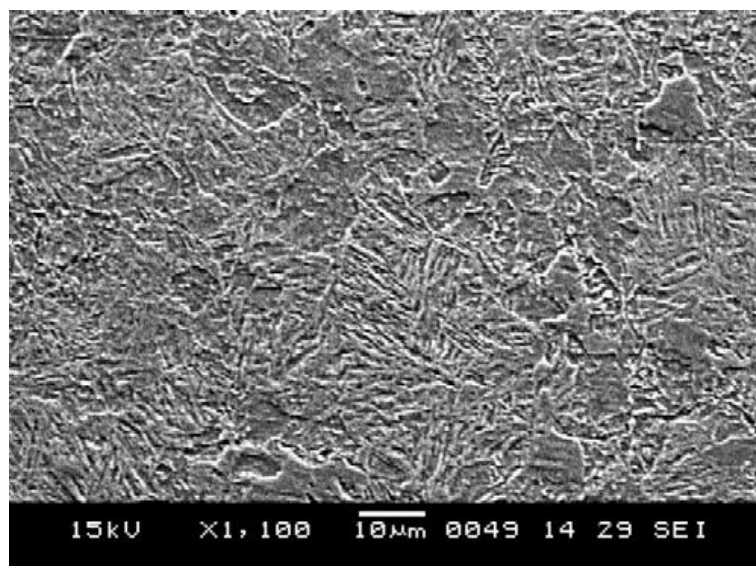
Figura 5.2. Perfil de microdureza Vickers (HV) ao longo da espessura de tubo de aço SAE 1045, sem costura, no estado de entrega.

Conforme mencionado no capítulo 3, tradicionalmente, aços SAE 1045 são austenitizados para tempera 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.^[1]

A figura 5.3 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 tempera e revenimento por indução eletromagnética, (b). As regiões de relevo suave na figura 5.3a, do aço no estado de entrega, correspondem a grãos de ferrita, enquanto as regiões com lamelas correspondem a colônias de perlita. Na figura 5.3b, 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. Estas observações implicam que as curvas de transformação do aço são deslocadas para maiores temperaturas, quando os tempos de aquecimento são da ordem de segundos.



(a)



(b)

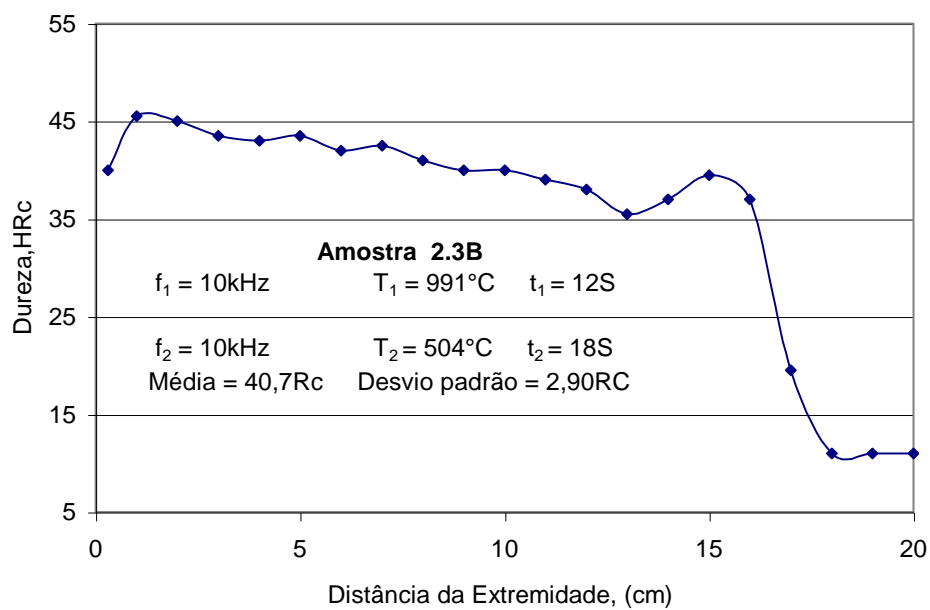
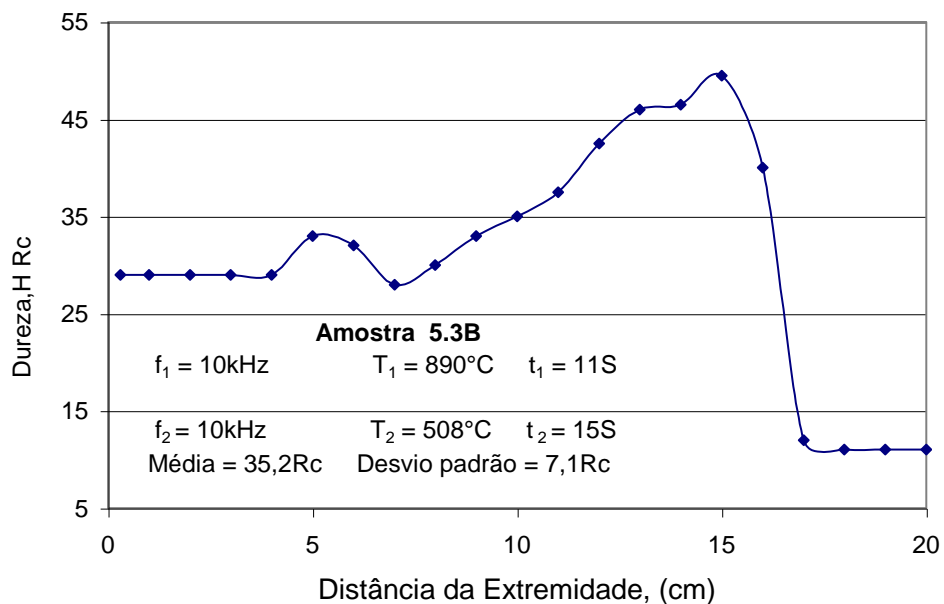
Figura 5.3. Fotomicrografias por MEV da secção reta da parede de um tubo de aço SAE 1045 no estado de entrega, (a), e após o tratamento de têmpera e revenimento por indução eletromagnética, (b). 1100X

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 temperatura 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 5.4 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 por 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 queda de dureza

entre 15 e 17cm da extremidade da haste, correspondendo à região de transição, a partir da qual não houve austenitização.



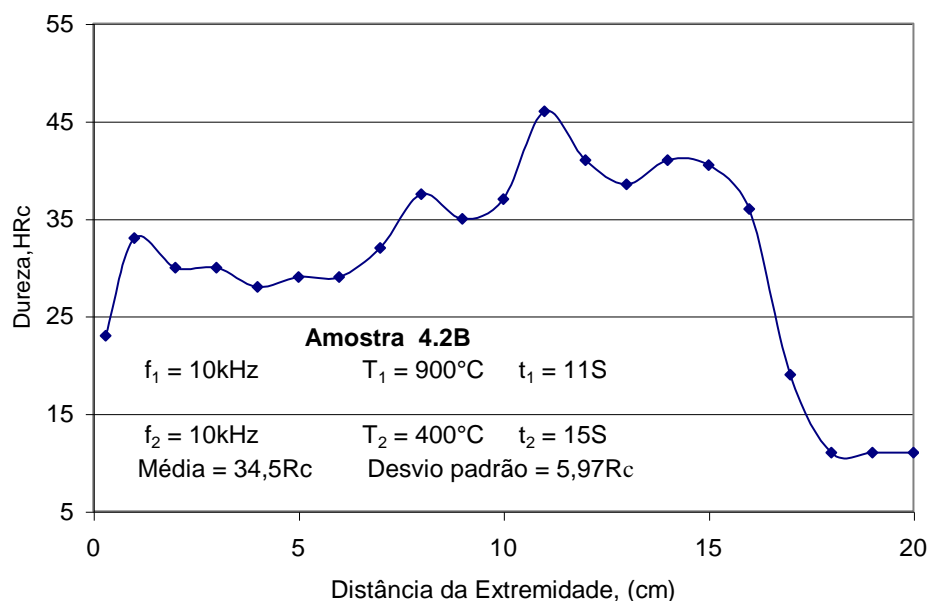


Figura 5.4. Perfis de dureza, ao longo da região temperada e revenida, por indução eletromagnética, de tubos para sondagem geológica, nas condições extremas do intervalo de parâmetros para têmpera e revenimento testados. Os parâmetros com sub-índice 1 correspondem à austenitização e os parâmetros com sub-índice 2 correspondem ao revenimento.

Em todas as condições de tratamento, observou-se o aumento da dureza ao final da região austenitizada, pouco antes da região de transição. Este aumento da dureza está provavelmente relacionado à tensões de compressão na região, resultantes das diferenças de dilatação entre a região austenitizada e temperada da peça e a região que não alcançou a temperatura de austenitização. Durante a têmpera, a região austenitizada sofre uma dilatação brusca em face da transformação da austenita para a martensita, a qual não é acompanhada pela região austenitizada, que mantém a primeira sob compressão. O estado de compressão reduz o tamanho da indentação durante a medida de dureza, resultando em maiores valores. A possibilidade de revenimento menos efetivo ao final da região austenitizada, causando o referido endurecimento, é menos provável, uma vez que a posição se encontra a 7cm da extremidade do indutor e que o revenimento é controlado por temperatura e tempo no modo pulsado, ao invés de por potência e tempo no modo contínuo, como é o caso da 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 comercialmente.

Tais parâmetros, que geraram o melhor perfil de dureza, são mostrados na figura 5.5. 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 nestas condições implicou em 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.

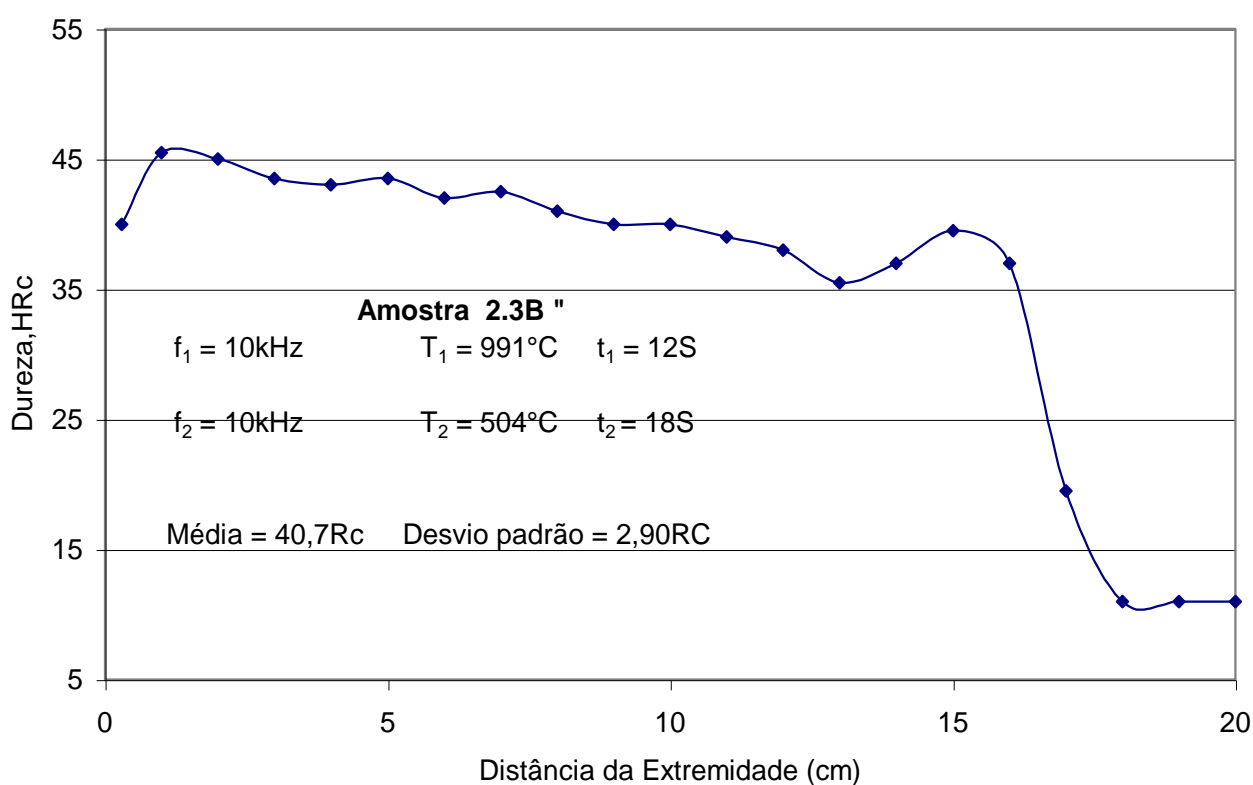


Figura 5.5. Perfil de dureza Rockwell (HRC) do aço SAE 1045 tratado termicamente segundo parâmetros selecionados .

A figura 5.6 apresenta os valores de microdureza para o aço SAE 1045 ao longo da espessura da haste antes e após tratamento térmico segundo os parâmetros estabelecidos para o processo. Nesta, vemos aumento médio de 170 pontos de microdureza Vickers em relação aos valores apresentados pelo mesmo aço nas condições de entrega.

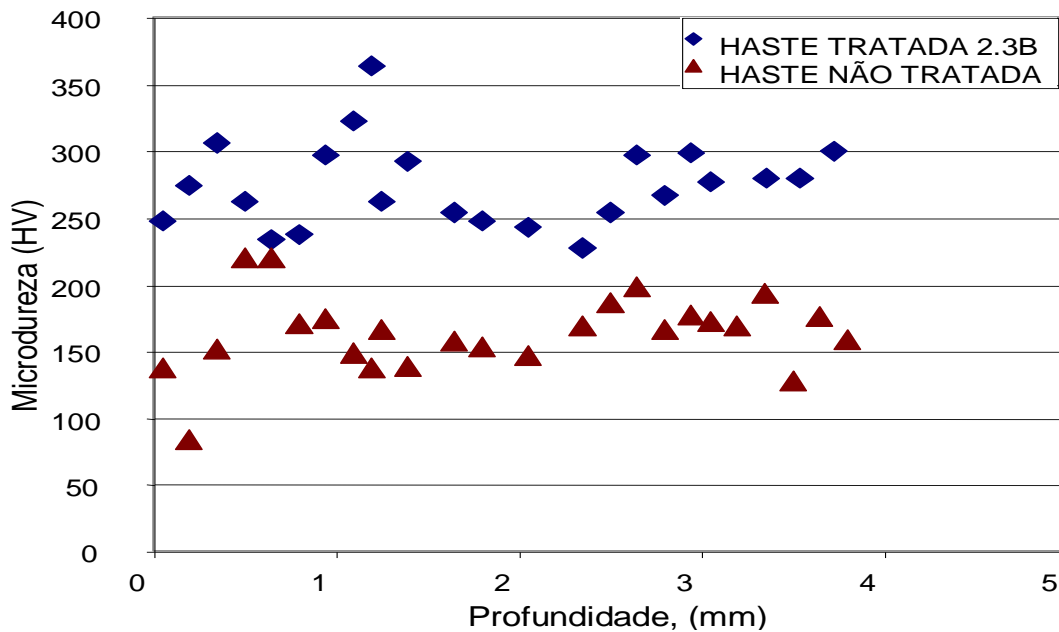


Figura 5.6. Perfil de microdureza vickers (HV) do aço SAE 1045 no estado de entrega e tratado termicamente.

Foram produzidos vários tubos com tratamentos sob as mesmas condições da amostra 2.3B (figura 5.5) e apresentando perfil de dureza semelhante àquele, confirmando a reprodutibilidade do método. Foram tratados nestas condições 127 tubos de aço SAE 1045, com 3,0m de comprimento e diâmetro externo de 7,0cm, que foram submetidos a testes de operação, em campo, para verificação de durabilidade e desempenho.

Com o funcionamento normal do equipamento, foram tratadas termicamente, por indução eletromagnética, 12 hastes por hora, incluindo as manobras de posicionamento e movimentação. Isto resultou em um tempo médio de tratamento para cada haste de 5 a 6 minutos. A figura 7 ilustra o equipamento em operação e as hastes de sondagem produzidas.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7. Fotografias do equipamento já operacional. (a) Vista geral do equipamento instalado. (b) Vista da haste posicionada para têmpera e revenimento. (c) Hastes tratadas e rosqueadas para teste no campo. (d) Estado da rosca na região tratada.

5.5. 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 30RC.
- ✓ Tratamentos térmicos por indução eletromagnética, de tubos de aço SAE 1045 com 70mm de diâmetro externo e 5mm 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 estruturas com propriedades mecânicas adequadas à confecção de hastes de sondagem para prospecção geológica.

5.6. BIBLIOGRAFIA.

1. OLIVEIRA, C. P., ARAUJO, F. G. S. Relatório Técnico Final; Projeto Tecnologia de Tratamento Térmico por Indução Eletromagnética de Ferramental para Aplicação em Mineração – TIEFAM; **Ministério da Ciência e Tecnologia**, PADCT – III, outubro de 2002.
2. ASM Metals Hand Book, vol. 4
3. RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; COOK, R. L. e BLACK, M. R. Induction Heat Treatment: Basics Principles, Computation, Coil Construction, and Design Considerations, In: TOTTEN, G. E. e HOWES, M. A. H.; Steel Heat Treatment Handbook, M. Dekker, NY, 1997. p. 765-874.
4. NOVIKOV. ILIA. Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais, Editora UFRJ, 1994, p.337-340.
5. LOVELESS, D., RUDNEV, V.; LANKFORD, L.; DESMIER, G. and MEDHANIE, H. Advanced Non-rotational Induction Crankshaft Hardening Technology Introduced Automotive Industry; Industrial Heating, November, 2000.
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.
6. Manual de aços; Aços Finos Piratini - Gerdau S/A pp: 9, 27.
7. Catálogo Quenchants, UCON FLUIDS & LUBRICANTS, UNION CARBIDE, abril, 1998.

6. ESTUDO COMPARATIVO DAS HASTES DE SONDAGEM

6.1. INTRODUÇÃO

Como mostrado no capítulo 4, hastes de sondagem comerciais são tratadas tanto em baixas quanto em altas frequências por indução eletromagnética, resultando, respectivamente, em tubos com paredes temperadas ao longo de toda sua espessura ou apenas na região mais próxima à superfície externa.

Hastes comerciais importadas dos dois maiores fabricantes internacionais são comparadas a hastes produzidas neste trabalho. As hastes comerciais identificadas, como BSi e LRi, (o caracter “i” significa “importadas”). As hastes de aço SAE 1045 tratadas por indução eletromagnética, neste trabalho, serão identificadas por TT (tratadas termicamente), enquanto as não-tratadas serão identificadas por NT, com os caracteres “TT” designando “tratamento térmico” e “NT” designando “não tratadas termicamente”, para melhor identificação.

Neste estudo, as hastes BSi, LRi, NT e TT foram caracterizadas quanto às suas microestruturas e propriedades mecânicas (dureza), para posterior correlacionamento com seus desempenhos em campo.

6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O método aplicado para a caracterizar propriedades mecânicas das hastes consistiu em preparar as superfícies das amostras, realizando o desbaste destas, por lixamento, obtendo superfícies planas e isentas de óxidos e outros contaminantes. Em seguida, foram feitos ensaios de dureza Rockwell C (HRc), ensaios microdureza Vickers ao longo da espessura das regiões tratadas e não tratadas das hastes em questão e finalmente comparou-se o perfil de dureza e microdureza apresentado pelas hastes comerciais importadas e pelo aço SAE1045, tratado e não tratado termicamente.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Em hastes de sondagem, atenção especial é dada à junção das hastes, pois esta parte exerce grande influência na durabilidade do componente. O processo de têmpera utilizando indução eletromagnética para aquecimento permite estabelecer um diferencial de dureza entre as cristas da rosca e a raiz da rosca fêmea impedindo o “encavalamento”, o que torna a conexão e desconexão das juntas mais fácil e aumenta a resistência da rosca contra avarias e desgaste.

As roscas macho tratadas termicamente mostram-se resistentes a danos acidentais. Ao se implantar esse processo, a ocorrência de "esfoladura" é praticamente eliminada.

Neste capítulo são apresentadas as propriedades mecânicas representativas de cada tipo de haste BSi, LRi, TT e NT. Os perfis de dureza e microdureza de cada haste individualmente testadas apresentam naturalmente, flutuações em torno dos valores apresentados.

As figuras 6.1 e 6.2 apresentam perfis de dureza obtidos nas extremidades das hastes onde se usinam as roscas, após etapas de tratamentos térmicos (têmpera e revenimento) por indução eletromagnética de baixa frequência nas hastes BSi e TT e de alta frequência nas hastes LRi.

Os parâmetros aplicados nas hastes nacionais (TT) produziram um 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. O tratamento produziu uma dureza média de 40,7HRc, com um desvio padrão de apenas 2,9HRc. Para distâncias maiores de 15cm da extremidade, surge uma zona de transição, na qual observa-se um acentuado decréscimo nos valores de dureza. Este aspecto deve-se ao fato de a temperatura atingida nesta região não ter sido suficiente para provocar mudanças microestruturais.

As hastes comerciais BSi são endurecidas ao longo de toda a parede numa extensão de 9cm pelo tratamento térmico por indução eletromagnética, sendo que as regiões de menor dureza, próximas às superfícies, são devidas a descarbonetação e apresentam um perfil de dureza suave, da extremidade até o final da região tratada. Para distâncias maiores que 9cm, surge uma zona de transição na qual observa-se um decréscimo no valor de dureza para um valor mínimo, próximo a 27HRc.

A haste LRi apresenta, até 5cm da extremidade, valores de dureza próximos a 25HRc (figura 6.1.) para a rosca macho e, para roscas fêmeas (figura 6.2.), um perfil de dureza caindo de

40HRc para aproximadamente 23HRc. Para distâncias entre 5 e 15cm ocorre acentuado acréscimo nos valores de dureza, atingindo valores em torno de 50HRc. Para distâncias maiores de 15cm da extremidade, surge uma zona de transição, na qual observa-se um acentuado decréscimo nos valores de dureza.

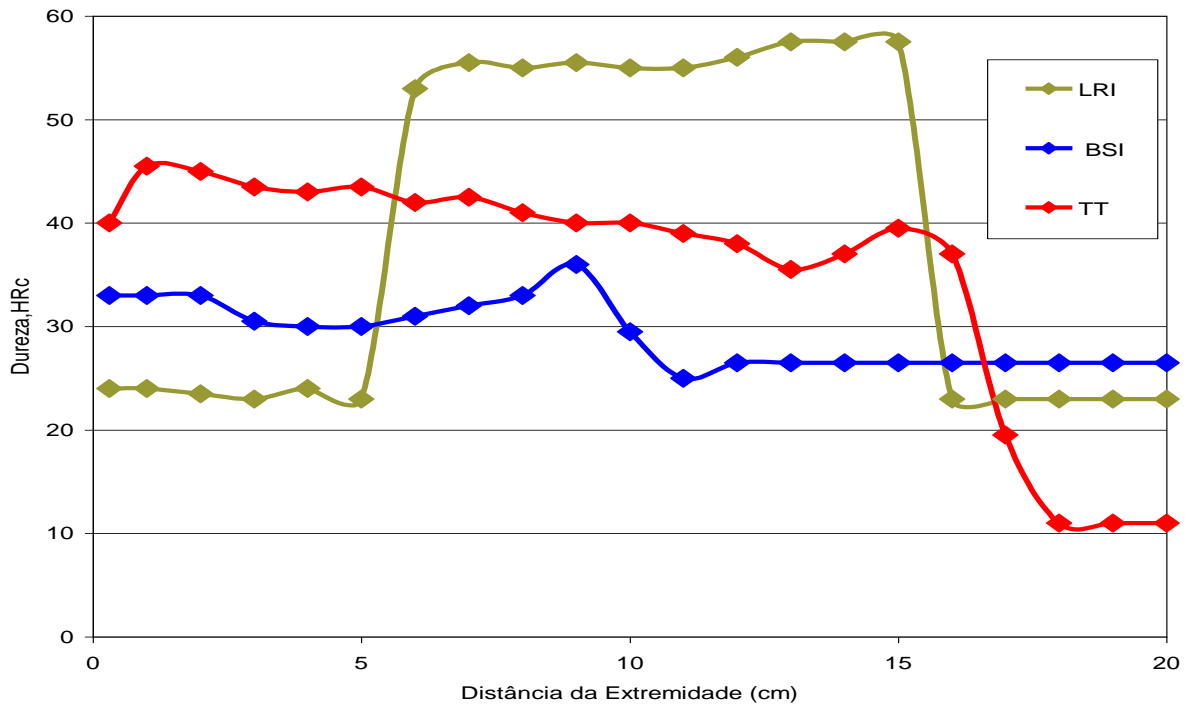


Figura 6.1. Perfil de dureza Rockwell (HRc) ao longo das extremidades das hastes TT, BSi e LRi. Região da rosca macho.

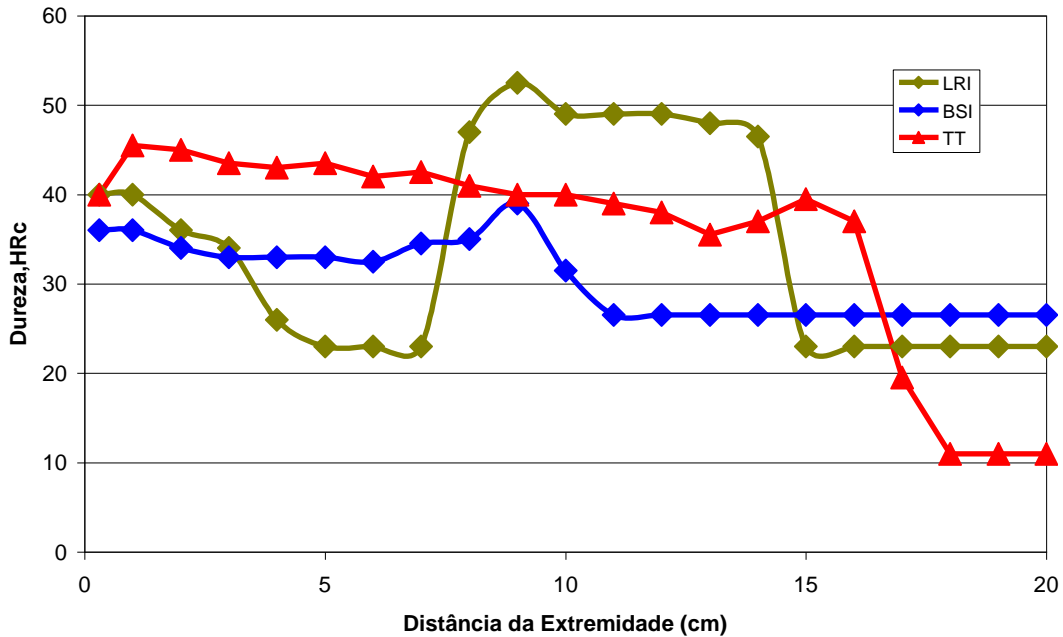


Figura 6.2. Perfil de dureza Rockwell (HRC) ao longo das extremidades das hastes TT, BSi e LRi. Região da rosca fêmea.

Observa-se que a região temperada e revenida das extremidades das hastes estendem-se por aproximadamente 15cm (quinze centímetros) para as hastes TT e LRi e aproximadamente 9cm (nove centímetros) para a haste BSi, seguida por uma zona termicamente afetada, de menor dureza.

A figura 6.3 mostra os perfis de microdureza Vickers ao longo da espessura das paredes das hastes de aço SAE1045, tratadas termicamente por indução eletromagnética neste trabalho, TT, e não tratadas, NT. As hastes TT são endurecidas ao longo de toda a parede pelo tratamento térmico por indução eletromagnética.

As medidas de microdureza foram feitas no sentido da superfície externa para a interna das hastes de 5,0mm de espessura, de maneira que o zero da abcissa corresponde à parede externa.

Da comparação da figura 6.3 com as figuras 4.1 e 4.3, que mostram os perfis de microdureza Vickers das hastes BSi e LRi, respectivamente, pode-se deduzir que, enquanto nas hastes TT e BSi a têmpera e o revenimento são feitos com homogeneização da temperatura ao

longo de toda a espessura, com conseqüente têmpera e revenimento de toda a parede, as hastes LRi são submetidas a uma têmpera superficial, na superfície externa. Os altos valores de microdureza na superfície interna das hastes LRi indicam ainda que elas devem ter sido submetidas a um primeiro tratamento de têmpera e revenimento ao longo de toda a espessura, seguido do tratamento de têmpera superficial.

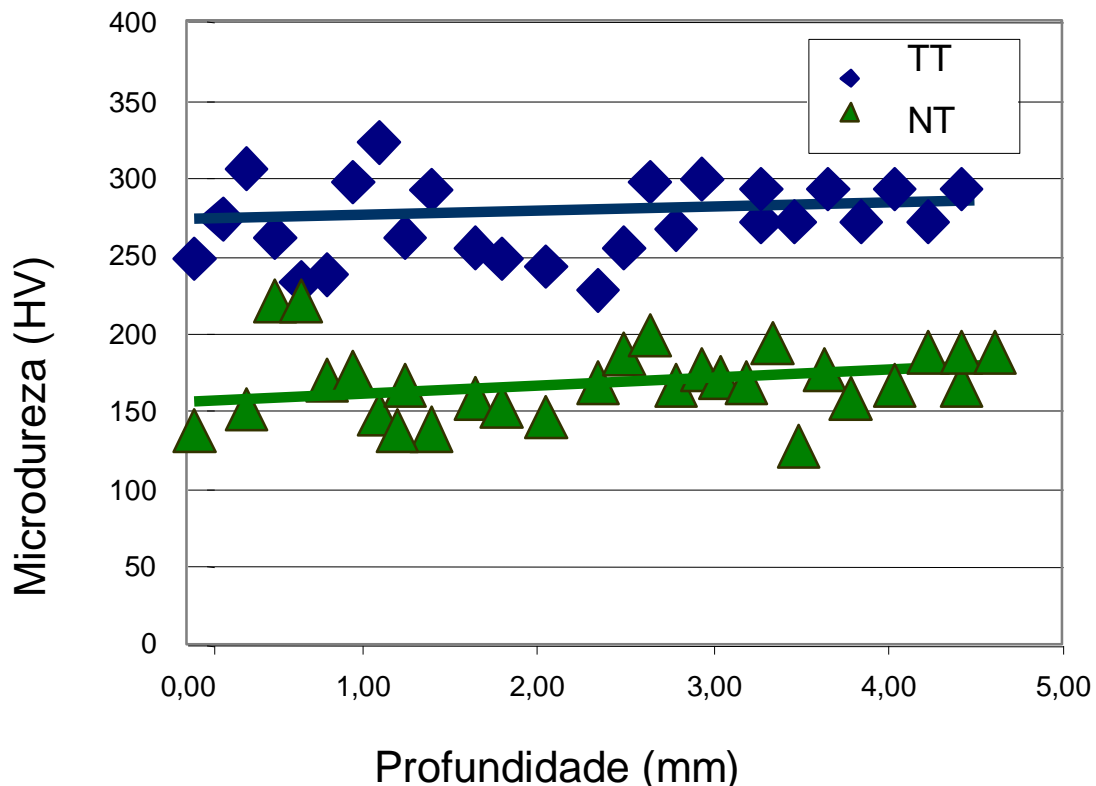


Figura 6.3. Perfis de microdureza Vickers ao longo da espessura das paredes das hastes de aço SAE1045, tratadas termicamente por indução eletromagnética neste trabalho, TT, e não tratadas, NT.

Outro aspecto importante a ser observado é que, ao contrário das hastes BSi, as hastes TT não apresentam amaciamento nas regiões próximas às superfícies interna e externa, o que revela que não houve descarbonetação considerável durante o tratamento.

6.4. CONCLUSÕES

- ✓ Os parâmetros aplicados nas hastes nacionais produziram um perfil de dureza sem grandes flutuações de valor.
- ✓ O tratamento produziu uma dureza média de 40,7HRc, com um desvio padrão de apenas 2,9HRc.
- ✓ As hastes TT são endurecidas ao longo de toda a parede pelo tratamento térmico por indução eletromagnética.
- ✓ Hastes TT não apresentam amaciamento nas regiões próximas às superfícies interna e externa, o que revela que não houve descarbonetação considerável durante o tratamento.

7. TESTES DE CAMPO DAS HASTES.

7.1. INTRODUÇÃO.

Os testes de campo, aqui descritos, têm por objetivo acompanhar o comportamento e comparar o desempenho em serviço das hastes TT, hastes NT, em aço SAE1045 e hastes de sondagem BSi, disponíveis no mercado, conforme especificadas nos capítulos anteriores. As operações de sondagem geológica para testes de campo comparativos foram realizadas na Mineração Fazenda Brasileiro, Teofilândia, BA.

7.2. PROCEDIMENTO

O procedimento de sondagem destina-se a medir a substância mineral útil presente no trecho de terreno atravessado. O equipamento utilizado é uma “sonda rotativa” composta de inúmeros acessórios, como por exemplo: mecanismo de avanço, conjunto moto-bomba, hastes, revestimentos e ferramentas de corte.

As figuras 7.1 (a) e 7.1 (b) mostram detalhes das sonda em operação durante os teste de campo.



(a)



(b)

Figura 7.1 - (a) sonda rotativa n°102 NKS BOYLES, (b) a sonda rotativa Geosol n°80.

Foram avaliadas 127 hastes TT, produzidas segundo parâmetros já descritos anteriormente, uma haste (NT) e uma haste comercial tratada termicamente, do tipo BSi, já descrita no capítulo 4.

Os testes de campo foram realizados na Mineração Fazenda Brasileiro, em Teofilândia, BA, no período entre 14/10/2002 e 19/09/2003. Toda a perfuração foi realizada com auxílio de água de circulação, injetada pelas hastes através da bomba de pistão sob pressão, que é função da profundidade do furo. A pressão aplicada deve ser suficiente para jogar para fora o material desagregado na perfuração.

A figura 7.2 mostra (a) o aspecto da rosca macho da haste TT, (b) o aspecto da rosca fêmea da haste TT, (c) o aspecto da haste NT e (d) o aspecto da haste comercial BSi, antes de iniciar-se os testes de campo.

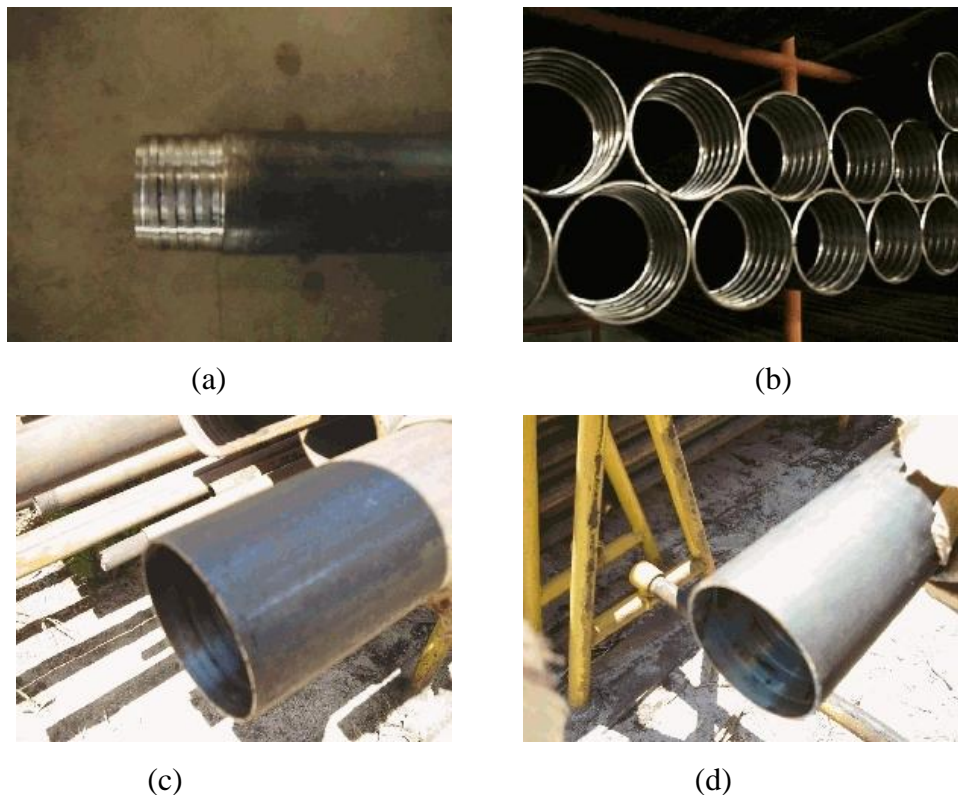


Figura 7.2. (a) Aspecto da rosca macho da haste TT, (b) aspecto da rosca fêmea da haste TT, (c) aspecto da haste NT, e (d) aspecto da haste comercial BSi, antes de se iniciar os testes de campo.

7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

O teste de sondagem com as hastes TT e NT e uma haste comercial tratada termicamente, do tipo BSi, foi feito no período de 15 a 19 de setembro de 2003 na Mineração Fazenda Brasileiro, furo FB 2090, de profundidade total 335,55m. Nesse furo foram realizadas 7 operações de manobras e as referidas hastes atingiram, respectivamente, as profundidades de 260, 270 e 331,55m.

A tabela 7.1 resume os valores das medidas da espessura externo inicial e final das paredes das hastes de perfuração, representando o desgaste durante operação em campo, em solo de carbonato-clorita-xisto.

Grandeza	Haste TT		%	Haste NT		%	Haste BSi		%
	$e_i = 5,000$	$e_f = 4,989$		$e_i = 5,000$	$e_f = 4,650$		$e_i = 5,000$	$e_f = 5,000$	
Espessura (mm)			0,22			7,00			0,000

Tabela 7.1. Valores das medidas iniciais e finais em milímetros da espessura das paredes das hastes testadas em campo, após 260m de perfuração.

Onde e_i é a espessura inicial, e, e_f é a espessura final.

A tabela 7.2 apresenta a profundidade perfurada, inclinações dos furos e composição mineralógica apresentada pelo subsolo sondado durante o teste comparativo. Observa-se que a haste TT perfurou em região com maior concentração de quartzo, o que pode justificar seu desgaste, ainda que pequeno.

TIPO DE HASTE	FURO	PROFUNDIDADE	COMPOSIÇÃO	INCLINAÇÃO
TT	FB 2043	260,00 m	Quartzo =0,97%, CAX =4,93, CCX = 94,10%	70°
Bsi	FB 2090	331,55 m	CCX =59,97%, CAX =35,98%, CLX =4,05%	81°
NT	FB 2090	270,00 m	CCX =59,97%, CAX =35,98%, CLX =4,05%.	81 °

Tabela 7.2. Dados referentes aos furos de sondagem onde foram testadas as hastes TT, NT e BSi.

Onde: CCX = carbonato clorita xisto.

CLX = clorita xisto.

CAX = carbonato xisto.

Os valores de desgaste das hastes TT, NT e BSi obtidos nos testes de campo estão lançados na figura 7.3.

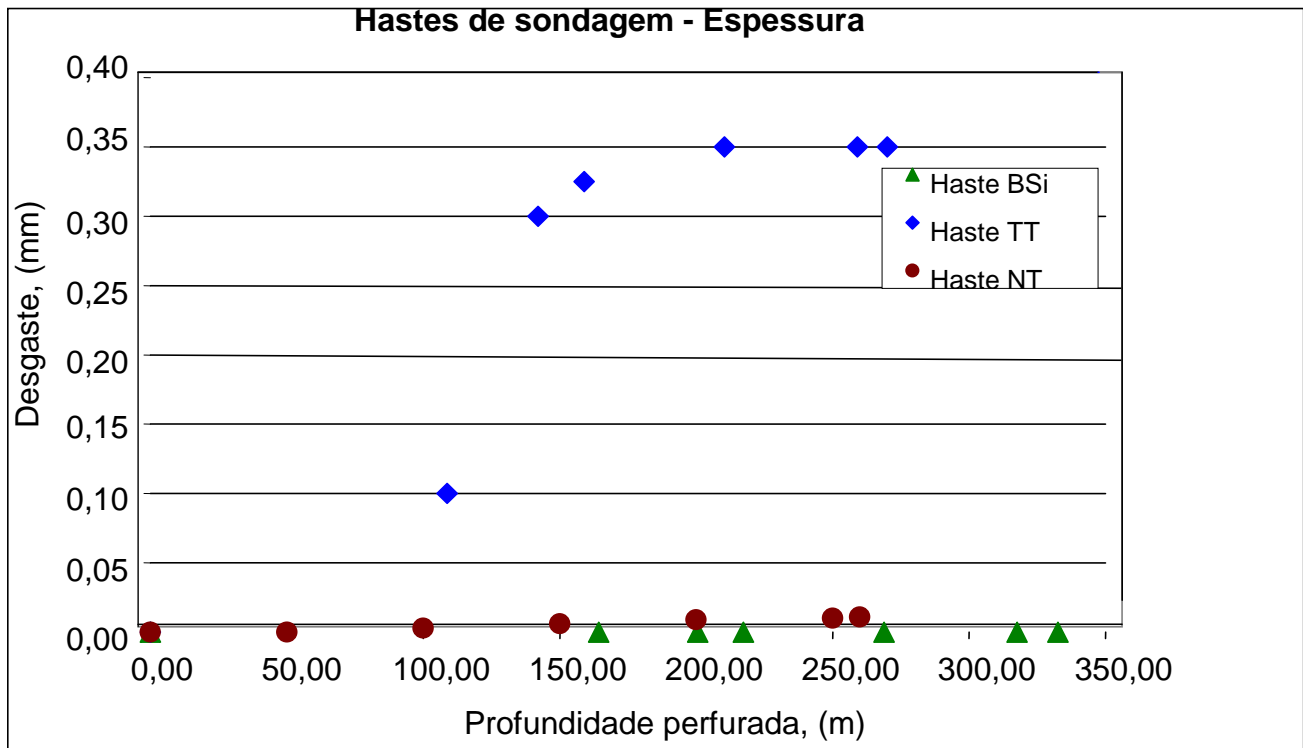


Figura 7.3. Desgaste apresentado pelas hastes TT, NT e BSi durante teste de campo.

As hastes TT desenvolvidas neste estudo perfuraram subsolo constituído por 0,97 % Quartzo, 4,93 % de carbonato xisto - CAX, 94,10% de carbonato clorita xisto -CCX. Foi utilizada uma inclinação com a vertical de 70°, velocidade de rotação de 1300RPM, pressão do mandril de 45kgf/cm², peso total da coluna de 1794kgf. Foram realizadas no furo - FB 2043, quatro operações “manobras” para troca de coroa. O desgaste do diâmetro externo foi 0,022 mm equivalente a (0,031%) diâmetro inicial medido, valor correspondente a 0,22% de perda de espessura da parede da haste.

A haste NT confeccionada em aço SAE 1045, não tratada termicamente, perfurou 270,00m de subsolo constituído por 59,97% CCX; 35,98% CAX; 4,05% CLX. O resultado final

de desgaste obtido e comparado à medida inicial diâmetro externo foi 0,70mm, equivalente a 1,00% do valor inicial, correspondendo a perda de 7,00% da espessura inicial da haste.

A haste comercial BSi perfurou 331,55m de subsolo constituído por 59,97% CCX; 35,98% CAX; 4,05% CLX. Essa haste não apresentou desgaste do diâmetro externo em relação ao valor inicial.

Observa-se, claramente, a melhora significativa do desempenho das hastes de aço SAE1045 quando são tratadas termicamente por indução eletromagnética, utilizando-se os parâmetros de tratamento desenvolvidos neste trabalho. A haste TT, teve desempenho equivalente à haste BSi, comercial, e, por sua vez, muito superior ao da haste NT.

Em teste de longa duração, com 127 hastes TT, foi possível perfurar, em 23 furos, a distância total foi de 6432,13 m. Destes, dezenove furos foram realizados com a sonda rotativa n°102 NKS BOYLES, totalizando 4867,75m e outros quatro furos realizados com a sonda rotativa Geosol n°80 totalizando 1424,05m. As inclinações dos furos com a horizontal apresentaram valores diversos entre 61° e 81 ° e o número médio de operações de manobras por furo foi igual a 4. O subsolo sondado apresentou 72,21% de carbonato clorita xisto (CCX); 2,05 % de CLX; 23,33 % de CAX; 0,14% de rocha grafitosa e 2,27 % de quartzo.

Foram usadas em média 63 hastes por furo, atingindo o desempenho 102,097m perfurados por haste. Em média, cada haste foi conectada e desconectada 4 vezes por furo, totalizando 92 conexões e desconexões por haste nos 23 furos executados, em 6432,13 m de perfurações. Considerando valores médios, as 127 hastes testadas apresentaram desempenho de 50,64m perfurados por haste.

A figura 7.4 mostra o aspecto físico das hastes após testes de sondagem. Nela, todas as hastes, inclusive as danificadas, continuam com os fios das roscas em bom estado de conservação.



Figura 7.4. Aspecto físico das hastes TT após teste de campo.

A tabela 7.3 apresenta dados referentes aos furos de sondagem realizados com as hastes

TT.

Nº furo	Profundidade (m)	Formação Mineralógica	Hastes danificadas
FB-2043	236,00	Quartzo =0,97%; CAX =4,93; CCX =94,10%	
FB-2044	309,80	Quartzo =0,95%; CAX =5,55; CCX = 93,50%	
FB-2051	259,55	Quartzo =0,83%; CAX =8,65%; CCX = 92,82%	
FB-2047	257,05	Quartzo =0,83%; CAX =17,11%; CCX =75,01%	
FB-2048	145,20	CAX =16,70%; CCX =83,30%	
FB-2055	187,80	CCX =100,00%	
FB-2057	269,80	CAX =4,28%; CCX =95,72%	01 Hastes
FB-2059	323,05	Quartzo =1,61%; CCX =98,39%	02 Hastes
FB-2060	316,00	Quartzo =0,95%; CAX =11,99%; CCX =87,06%	03 Hastes
FB-2062	233,40	Quartzo =5,78%; CAX =1,05%; CCX =93,17%	
FB-2066	245,10	Quartzo =2,34%; CAX =11,05%; CCX =86,61%	01 Haste
FB-2067	263,05	Quartzo =4,92%; CCX =95,08%	
FB-2068	222,65	CCX =100,00%	
FB-2073	306,85	Quartzo =7,82%; CAX =9,37%; CCX =82,81%; RG =0,39%	01 Haste
FB-2074	200,10	Quartzo =4,27%; CAX =44,65%; CCX =47,11%; RG =3,97%	
FB-2078	211,55	Quartzo =0,28%; CAX =18,79%; CLX =18,31; CCX =62,62%	
FB-2076	300,35	Quartzo =11,37%; CAX =11,35%; CLX =5,67%; CCX =71,61%	02 Hastes
FB-2084	350,35	Quartzo =2,77%; CAX =6,62%; CCX =90,61%	02 Hastes
FB-2083	230,10	Quartzo =1,32%; CAX =6,62%; CCX =92,6%	01 Haste
FB-2085	487,30	100% CAX	02 Hastes
FB-2090	335,55	CCX =59,97%; CAX =35,98%; CLX =4,05%	02 Hastes
FB-2092	300,55	100% CAX	
FB-2098	281,80	CCX =26,63%; CLX =13,88%; CAX =59,32%	
TOTAL	6.432,13		17 Hastes

Tabela 7.3 - Profundidade perfurada, Inclinações dos furos e composição mineralógica apresentada pelo subsolo sondado durante os testes realizados com as hastes TT.

Onde: CCX = carbonato clorita xisto.

CLX = clorita xisto.

CAX = carbonato xisto.

RG = rocha grafitosa.

Das 127 hastes testadas no campo, seis delas foram danificadas em decorrência de falhas operacionais (choque com a extremidade do revestimento). Quatro hastes apresentaram formação de trincas no sentido longitudinal do corpo da haste. Tais falhas deverão ser objeto de estudos posteriores, para identificar os fatores que as provocaram.

Após 4867,75 m de perfuração, sete hastes, durante a operações de manobra, apresentaram deformações plásticas externas e conseqüente redução do diâmetro interno, impedindo a passagem da peça em cujo interior fica o testemunho, durante a sondagem.

Após completar 6291,80m de perfurações, verificou-se que durante a execução do furo FB-2090, foram gastos 10,5 horas de serviços para remoção de hastes danificadas (apresentando redução do diâmetro), tempo equivalente a 6,62% do tempo total gasto para a execução do referido furo, reduzindo a produtividade operacional. Diante desse fato, os testes foram interrompidos para verificação dos fatores que ocasionaram tais avarias. O monitoramento do tempo de parada deve ser incluído, em projetos futuros, como parâmetro dos testes de campo, para comparação com os dados aqui produzidos.

A figura 7.5 mostra os valores de diâmetro médio apresentados pelas hastes TT, durante os testes de campo.

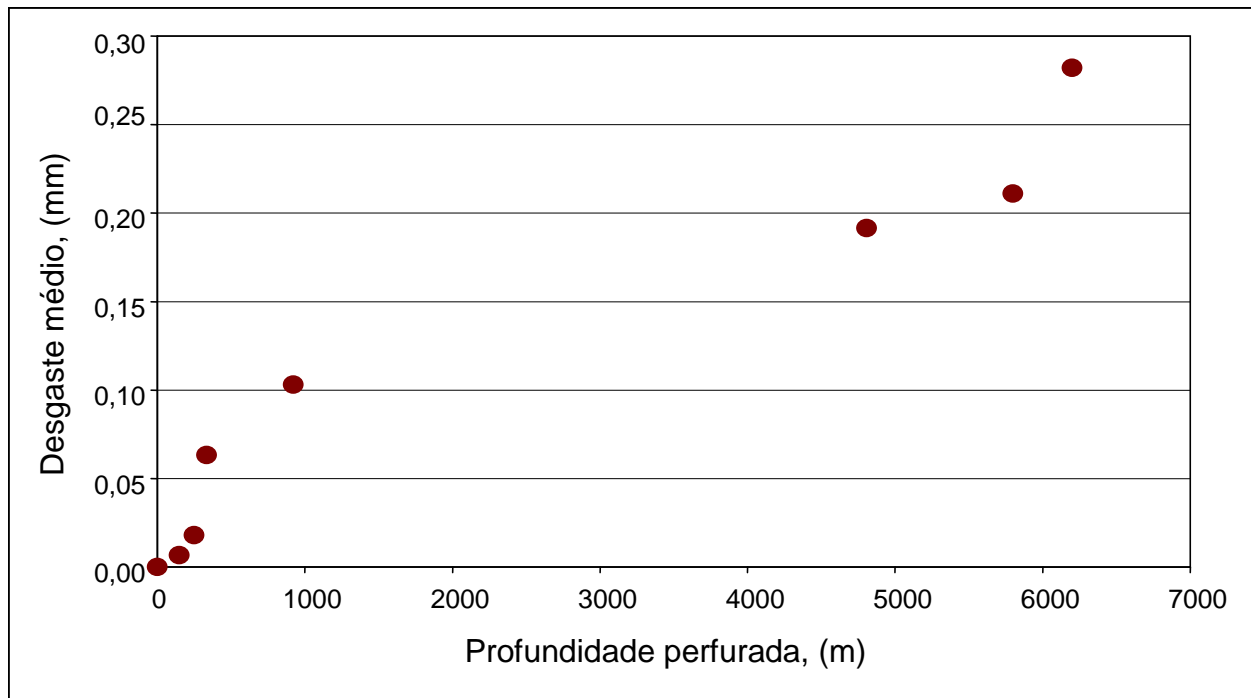


Figura 7.5. Desgaste apresentado no diâmetro externo das hastes TT, durante testes de campo de longa duração.

A tabela 7.4 apresenta os valores iniciais e finais do diâmetro das hastes TT, submetidas aos testes de campo de longa duração.

Grandeza	Haste TT		Desgaste Médio (%)
Espessura	$e_1 = 5,000\text{mm}$	$e_2 = 4,718\text{mm}$	5,64

Tabela 7.4 - Valores médios das medidas iniciais e finais em milímetros (mm), das diversas regiões das hastes TT utilizadas para teste de campo.

Onde e , é a espessura em milímetros.

As medidas realizadas após a conclusão dos testes de campo mostram que as a hastes TT de aço SAE 1045 apresentaram valores de desgastes no diâmetro externo da ordem de apenas 0,82 % (0,564mm) em relação ao diâmetro externo inicial, valor equivalente à perda de 5.64% (0,282mm) em relação à espessura inicial. Esse desgaste é decorrente do contato metal/formação geológica sondada. Foi também medido o desgaste apresentado pelas demais partes das hastes, decorrente das manobras de engate e desengate. O diâmetro externo da primeira crista da rosca macho apresentou desgaste médio de 0,478%, da última crista, 0,255%, do primeiro vale, 0,478%, do último vale, 0,286% e da distância entre as cristas, 11,00%. Estes desgastes devem-se ao contato metal/metal e a aplicação de esforços variáveis durante as operações para manobra da composição no processo de sondagem geológica. A redução do diâmetro interno (0,278 %) é decorrente do atrito provocado pela passagem do tubo protetor do testemunho “camisa“ durante a remoção deste do interior do furo efetuado. Tais desgastes não foram avaliados mais profundamente, por serem fortemente influenciados por flutuações no modo de operação.

O desgaste das paredes das hastes tratadas termicamente, principalmente na extremidade onde foi confeccionada a rosca fêmea, pode torná-la susceptível à formação de trincas e conseqüente ruptura em serviço.

Conforme tabela 7.1, os valores de desgaste apresentados pelas hastes NT, não tratadas termicamente, são maiores que aqueles gerados nas hastes tratadas termicamente.

Os valores de desgaste apresentados pelas hastes TT permitem constatar que hastes tratadas termicamente apresentam desempenho superior ao desempenho apresentado por hastes não tratadas. O desempenho dessas hastes, em serviço, foi equivalente ao apresentado pelas hastes comerciais BSi, que são confeccionadas em aço microligado, também com tratamento térmico nas extremidades.

Em hastes TT ocorreu formação de trincas e posterior ruptura da haste no seu sentido longitudinal. Este fato não causou danos ao desenvolvimento normal das operações de sondagem, pois não foi necessário interromper o trabalho de sondagem para efetuar a retirada da haste trincada. Conforme mostrado na figura 7.6, os fios da rosca, na região da fratura, continuam em bom estado de conservação. A figura 7.6 mostra (a) uma trinca forma na rosca fêmea de uma haste TT em teste e (b) o aspecto interno da haste na região onde foram confeccionadas as roscas.

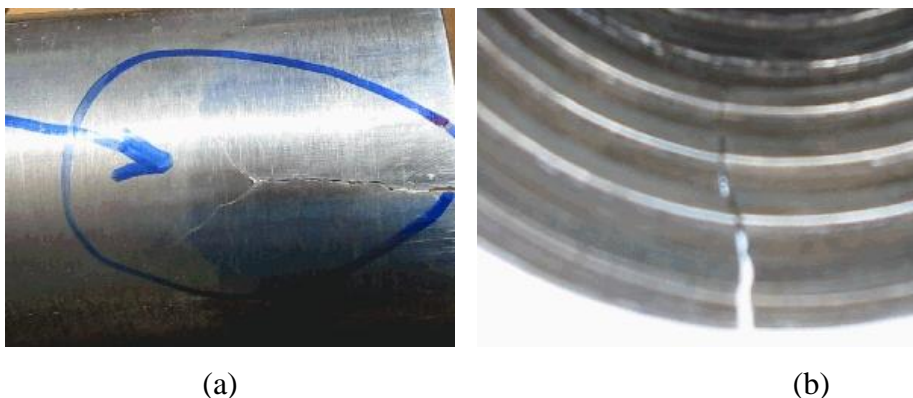


Figura 7.6. Haste TT trincada durante serviço (4456,80m). (a) parede externa da rosca fêmea (b) aspecto interno da rosca fêmea.

O sentido longitudinal de formação das trincas apresentado na figura 7.6 pelas hastes TT diferem das hastes comerciais LRi e BSi, que apresentam formação de trincas, com fratura subsequente, no sentido transversal do corpo da haste. Quando ocorre este tipo de fratura, ocorre ruptura total da coluna de haste, sendo necessário interromper a operação de sondagem para efetuar a remoção da haste danificada, com possibilidade de perda do furo. Assim, constatamos

que as hastes produzidas mediante parâmetros estabelecidos neste estudo apresentam, além de desempenho de desgaste equivalente ao das hastes comerciais, um excelente diferencial quanto à segurança operacional, pois reduz o risco de se perder ferramentas no interior do furo.

Uma vez que ficou demonstrada a viabilidade da confecção de hastes de sondagem, com o auxílio de tratamento térmico por indução eletromagnética, a partir de tubos sem costura de produção nacional, de aço SAE1045, e, outrossim, que tais hastes, neste trabalho designadas TT, apresentam desempenho equivalente ao das hastes comerciais, cabe uma consideração quanto à viabilidade econômica do processo. Em um lote de 1000 hastes, no qual se substitua o material disponível no mercado internacional pelas hastes TT, desenvolvidas neste trabalho, a redução de custos poderá ser da ordem de US\$50,000.00 (cinquenta mil dólares).

7.4. CONCLUSÕES.

- ✓ As paredes externas de hastes de aço SAE 1045 NT, sofreram maiores desgastes em relação às hastes TT e BSi nos testes de campo, devido ao atrito com o subsolo sondado.
- ✓ Os valores de desgaste apresentados pelas hastes TT, de aço SAE 1045 tratadas conforme parâmetros estabelecidos neste estudo, apresentaram-se da ordem de décimos de milímetros. As hastes não apresentaram falhas que inviabilizassem o seu uso destas no processo de sondagem geológica.
- ✓ Apenas um número reduzido de hastes (6,30%) apresentaram falhas em serviço, após 4867,75m perfurados.
- ✓ As hastes TT para sondagem geológica desenvolvidas neste estudo apresentaram alto desempenho, atingindo a média de 50,64m perfurados por haste, valor equivalente ao desempenho apresentado pelas hastes comerciais importadas confeccionadas em aço microligado.
- ✓ Hastes tratadas termicamente apresentam desempenho superior ao desempenho apresentado por hastes não tratadas.
- ✓ As hastes processadas apresentam um diferencial quanto à segurança da operação de sondagem, pois, em caso de falha em serviço, a fratura longitudinal reduz fortemente o risco de se perder ferramentas no interior dos furos.

- ✓ Todas as hastes TT, inclusive as danificadas, continuaram com os fios da rosca em bom estado de conservação.
- ✓ A tecnologia desenvolvida pelo projeto, do qual este estudo é parte integrante neste trabalho poderá possibilitar a redução de custos da ordem de US\$50,000.00, para cada 1000 hastes utilizadas.

8. CONCLUSÕES GERAIS.

- ✓ As hastes BSi são endurecidas ao longo de toda a parede pelo tratamento térmico por indução eletromagnética, sendo que as regiões de menor dureza, próximas às superfícies, são devidas a decarbonetação que ocorre no material, provavelmente em decorrência do processo de produção das hastes. Já as hastes LRi são mais pronunciadamente endurecidas na região próxima à superfície externa.
- ✓ Enquanto a têmpera e o revenimento são feitos com homogeneização da temperatura nas hastes BSi, as hastes LRi são submetidas à têmpera na superfície externa, talvez sequer chegando a austenitização na superfície interna do tubo. Isto revela, por sua vez, que o tratamento térmico por indução eletromagnética foi feito à baixa frequência – algo em torno de 10 a 20kHz – no caso das hastes BSi, enquanto foi feito a alta frequência nas hastes LRi, certamente acima de 100kHz. Deve-se ressaltar que os detalhes dos tratamentos térmicos, por indução eletromagnética, são mantidos sob sigilo pelos fabricantes, que não revelam temperaturas de austenitização, tempos de tratamento ou frequências de operação.
- ✓ Portanto, hastes de sondagem comerciais com performances em campo semelhantes, são produzidas tanto com baixas quanto com altas frequências no tratamento térmico por indução eletromagnética, resultando, respectivamente, em paredes dos tubos temperadas ao longo de toda sua espessura ou apenas próximo à superfície externa.
- ✓ 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 30RC.
- ✓ Tratamentos térmicos por indução eletromagnética, de tubos de aço SAE 1045 com 7cm de diâmetro externo e 0,5cm 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 estruturas com propriedades mecânicas adequadas à confecção de hastes de sondagem para prospecção geológica.

- ✓ Os parâmetros aplicados nas hastes nacionais produziram um perfil de dureza sem grandes flutuações de valor.
- ✓ O tratamento produziu uma dureza média de 40,7HRc, com um desvio padrão de apenas 2,9HRc.
- ✓ As hastes TT são endurecidas ao longo de toda a parede pelo tratamento térmico por indução eletromagnética.
- ✓ Hastes TT não apresentam amaciamento nas regiões próximas às superfícies interna e externa, o que revela que não houve descarbonetação considerável durante o tratamento.
- ✓ As paredes externas de hastes de aço SAE 1045 NT, sofreram maiores desgastes em relação às hastes TT e BSi nos testes de campo, devido ao atrito com o subsolo sondado.
- ✓ Os valores de desgaste apresentados pelas hastes TT, de aço SAE 1045 tratadas conforme parâmetros estabelecidos neste estudo, apresentaram-se da ordem de décimos de milímetros. As hastes não apresentaram falhas que inviabilizassem os seus usos nestas no processo de sondagem geológica.
- ✓ Apenas um número reduzido de hastes (6,30%) apresentou falhas em serviço, após 4867,75m perfurados.
- ✓ As hastes TT para sondagem geológica desenvolvidas neste estudo apresentaram alto desempenho, atingindo a média de 50,64m perfurados por haste, valor equivalente ao desempenho apresentado pelas hastes comerciais importadas confeccionadas em aço microligado.
- ✓ Hastes tratadas termicamente apresentam desempenho superior ao desempenho apresentado por hastes não tratadas.
- ✓ As hastes processadas apresentam um diferencial quanto à segurança da operação de sondagem, pois, em caso de falha em serviço, a fratura longitudinal reduz fortemente o risco de se perder ferramentas no interior dos furos.
- ✓ Todas as hastes TT, inclusive as danificadas, continuaram com os fios da rosca em bom estado de conservação.
- ✓ A tecnologia desenvolvida pelo projeto, do qual este estudo é parte integrante neste trabalho poderá possibilitar a redução de custos da ordem de US\$50,000.00, para cada 1000 hastes utilizadas.

9. RECOMENDAÇÕES.

- ✓ Realizar estudos para identificar os fatores que provocaram a formação de trincas no sentido longitudinal do corpo da haste.
- ✓ O monitoramento do tempo de parada deve ser incluído, em projetos futuros, como parâmetro dos testes de campo, para comparação com os dados aqui produzidos.
- ✓ Avaliar a aplicação de outras classes de aço para produção de hastes para sondagem geológica tratadas termicamente usando indução eletromagnética como fonte de aquecimento.