UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Marcelo Dalenogare Antocheves

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALURGICAS EM EIXOS ESTRIADOS AÇO SAE 1045 TRATADOS TERMICAMENTE PELO PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

Santa Maria, RS.
2019

Marcelo Dalenogare Antocheves

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALURGICAS EM EIXOS ESTRIADOS AÇO SAE 1045 TRATADOS TERMICAMENTE PELO PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Inácio da Fontoura Limberger

Santa Maria, RS.
2019

Marcelo Dalenogare Antocheves

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALURGICAS EM EIXOS ESTRIADOS AÇO SAE 1045 TRATADOS TÉRMICAMENTE PELO PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Aprovado em 09 de dezembro de 2019:

_____
Inácio da Fontoura Limberger, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

_____
Leandro Costa de Oliveira, Dr. (UFSM)

_____
Alexandre Aparecido Buenos, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS.
2019

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus por, dar-me luz e sabedoria no decorrer da longa caminhada acadêmica, amparo nos tempos difíceis e persistência para vencer todos os obstáculos, possibilitando-me chegar até esse momento com grandes conquistas pessoais e profissionais já realizadas.

Agradeço a minha família, por ser minha inspiração e base durante a graduação e em todos os momentos pregressos. Por terem me ensinado o valor e a importância do estudo, da responsabilidade e da dedicação.

Agradeço aos colegas por todo apoio e parceria nessa empreitada, que parecia ser árdua, mas através de vocês, tornou-se mais amena e interessante.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de inserção no meio acadêmico, suporte e estrutura fornecida durante todo o período de graduação.

Agradeço à empresa Cofelma que financiou o presente trabalho e foi fundamental para a realização do mesmo, inclusive, com a inspiração do tema.

Agradeço a todos os professores que, direta ou indiretamente, participaram de minha formação profissional. Se, dúvidas que a contribuição de cada um foi fundamental durante esta caminhada partilhando os seus conhecimentos.

Agradeço especialmente ao meu professor orientador Dr. Inácio da Fontoura Limberger, não somente pelos ensinamentos técnicos, enorme força dada na realização do trabalho, mas principalmente por todo o suporte fornecido durante momentos de anseios.

Agradeço de forma especial ao professor Dr. Alexandre Aparecido Buenos pelo auxílio durante o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso. Sem o apoio dos mesmos, a realização deste não seria possível.

Agradeço ao professor Dr. Leandro Costa de Oliveira pelos ensinamentos e apoio dado durante todo o período da graduação.

RESUMO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALURGICAS EM EIXOS ESTRIADOS AÇO SAE 1045 TRATADOS TÉRMICAMENTE PELO PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.

AUTOR: Marcelo Dalenogare Antocheves
ORIENTADOR: Inácio da Fontoura Limberger

Este trabalho apresenta um estudo sobre a adaptação de uma máquina de têmpera por indução eletromagnética, que é usada para temperar chapas finas helicoidais para ser usada na têmpera de ponteira de eixos estriado, utilizados na junção entre o motor e o eixo dos helicoides que compõem o chupim que transporta grãos para o interior dos silos graneleiros produzidos pela Metalúrgica COFELMA. O objetivo do trabalho é avaliar as propriedades metalúrgicas e mecânicas dos eixos estriados, usinados em aço SAE 1045. Após a realização do processo de têmpera por indução nos eixos estriados, estes foram submetidos a ensaios de dureza superficial no sentido longitudinal sobre as estrias, dureza radias em duas seções transversais e análise metalográfica das seções transversais. Realizados os ensaios de dureza superficiais no sentido longitudinal e avaliado os valores obtidos e a sua distribuição ao longo do comprimento, ficou claro que o conjunto de bobinas usados não propiciou uma têmpera eficiente. Apenas uma metade de um eixo teve têmpera superficial, que foi comprovada pelos valores de dureza radial na seção transversal e pela constatação da presença de martensita nas observações das metalografias feitas nestas seções. Desta forma pode-se constatar que as modificações feitas no equipamento não foram eficazes e devem ser feitas mudanças significativas para a adequação do processo. Para tanto são recomendadas mudanças tais como: aumentar o fluxo de fluido refrigerante, os eixos devem ficar na vertical, a velocidade de rotação deve ser maior e deve ser usado uma bobina com duas voltas e deve se deslocar de baixo para cima com o sistema de resfriamento ligado seguindo logo atrás da bobina.

Palavras chave: Têmpera por indução eletromagnética. Eixos estriados. Dureza. Aço SAE 1045.

ABSTRACT

EVALUATION OF INDUCTION QUENCHING PROCESS PARAMETERS AND MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES ON SPLINE SHAFTS

AUTHOR: Marcelo Dalenogare Antocheves
ADVISOR: Inácio da Fontoura Limberger

This paper presents a study on the adaptation of an electromagnetic induction quenching machine, which is used to temper thin helical plates to be used in the tempering of splined shaft tips, used in the junction between the engine and the axis of the helical components that make up the chupim that transports grain into the bulk silos produced by COFELMA Metallurgical Industry. The purpose of the paper is to be able to evaluate the metallurgical and mechanical properties of splined shafts, machined in SAE 1045 steel. After the induction hardening process on the splined axes, these were submitted to surface hardness tests longitudinally on the stretch marks, radial hardness in two cross sections and metallographic analysis of cross sections. After performing the surface hardness tests longitudinally and evaluating the values obtained and their distribution along the length, it was clear that the set of coils used did not provide an efficient tempering. Only one half of an axis had surface quenching, which was confirmed by the radial hardness values in the cross section and the presence of martensite in the observations of the metallographs made in these sections. Thus it can be seen that the modifications made to the equipment were not effective and significant changes should be made to the suitability of the process. Therefore, changes are recommended, such as: increase the flow of cooling fluid, the axes should be vertical, the speed of rotation should be higher and a two-turn coil should be used and should travel from the bottom up with the cooling system running right behind the coil.

Keywords: Electromagnetic induction quenching. Splined shafts. Hardness. SAE 1045 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bainita superior, aço 4150 transformado a uma temperatura de 460°C..... 15
Figura 2 – Célula unitária tetragonal de corpo centrado para aço martensítico. Para essa célula c>a..... 15
Figura 3 – Diagrama de transformação isotérmico..... 16
Figura 4 – Diagrama de transformação para recozimento pleno..... 20
Figura 5 – Transformação para recozimento isotérmico ou cíclico..... 20
Figura 6 – Diagrama de transformação para normalização..... 21
Figura 7 – Diagrama de transformação para têmpera e revenido..... 22
Figura 8 – Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e tenacidade do aço..... 23
Figura 9 – Influência do intervalo de tempo no revenido de um aço com 0,82% C. 23
Figura 10 – A parte superior da imagem corresponde ao método progressivo, a parte central corresponde ao método giratório e a figura da parte inferior corresponde ao método combinado. 25
Figura 11 – Esquema ilustrativo do processo de têmpera por indução..... 26
Figura 12 – Distribuição de temperatura em uma placa, figura a) aquecimento, figura b) resfriamento, t0 início da mudança de temperatura, Tu, temperatura ambiente; Q, fluxo de calor; s, espessura da placa. 26
Figura 13 – Gráfico condutividade térmica X temperatura. a) ferro puro; b) aços carbonos; c) aços de baixa liga; d) aços alta liga. 27
Figura 14 – Perdas por radiação e convecção no aquecimento por indução..... 28
Figura 15 – Ilustração de um campo eletromagnético induzido por uma corrente alternada passando através de uma bobina..... 30
Figura 16 – Variação do campo magnético de acordo com a posição radial. 30
Figura 17 – Variação da densidade de corrente e densidade de potência com a profundidade de penetração..... 31
Figura 18 – Gráfico da permeabilidade magnética para aço inoxidável e aço carbono conforme a temperatura aumenta. 32
Figura 19 – Efeito de proximidade, condutor cilíndrico, a) espira única, b) espiras com correntes opostas e c) espiras com correntes semelhante..... 33
Figura 20 – Distribuição de corrente em barras devido ao efeito de proximidade..... 33
Figura 21 – Efeito de anel em um condutor cilíndrico. 34
Figura 22 – Mudança dos parâmetros com o passar do tempo durante o aquecimento do aço.35
Figura 23 – a) Comportamento da permeabilidade de calor em direção ao centro da peça em um tempo de 0,4s, b) em 1,15s, c) em 6,5s. 36
Figura 24 – Desenho esquemático para o ensaio de dureza Brinell. 38
Figura 25 – Ensaio Rockwel..... 39
Figura 26 – Desenho esquemático da impressão deixada na peça pelo ensaio de dureza Vikers. 40
Figura 27 – Diagrama de revenimento aço SAE 1045..... 42
Figura 28 – Aquecedor indutivo Jamo, modelo utilizado par realizar têmpera por indução nos eixos estudados..... 44
Figura 29 – Eixos usados como amostras para os ensaios de tratamento térmico, dureza e metalografia..... 46
Figura 30 – (A) Eixo fixado na placa com castanhas do motor elétrico; (B) eixo ser inserido dentro da bobina; (C) eixo inserido na bobina, pronto para o aquecimento; (D)

sistema de aquecimento por indução ligado e (E) eixo aquecido pronto para ser resfriado..... 46
Figura 31 – Durômetro usado para os ensaios de Dureza Vickers.. 47
Figura 32 – Dispositivos feitos por manufatura aditiva para posicionar as amostras..... 48
Figura 33 – Perfis de dureza superficial longitudinal para o Eixo 1 50
Figura 34 – Perfis de dureza superficial longitudinal para o Eixo 2..... 51
Figura 35 – Perfis de dureza seção transversal 1 para o Eixo 1. 53
Figura 36 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 1 do Eixo1 para os pontos 1,3,5 e 7.. 54
Figura 37 – Perfis de dureza seção transversal 2 para o Eixo 1. 55
Figura 38 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 2 do Eixo1 para os pontos 1,3,5 e 7. 56
Figura 39 – Perfis de dureza seção transversal 1 para o Eixo 2. 57
Figura 40 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 1 do Eixo 2 para os pontos 1,3,5 e 7. 58
Figura 41 – Perfis de dureza seção transversal 2 para o Eixo 2 (40 mm da extremidade do eixo).. 59
Figura 42 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 2 do Eixo 2 para os pontos 1,3,5 e 7.. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Velocidade relativa de resfriamento de diversos meios..... 18
Tabela 2 – Especificações técnicas da máquina de aquecimento indutivo Jamo.. 45
Tabela 3 – Parâmetros utilizados na realização da têmpera nos eixos estudados 45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. OBJETIVOS 13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
3.1 FASES 14
3.1.1. Perlita 14
3.1.2. Bainita 14
3.1.3 Martensita 15
3.2. TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS 16
3.2.1 Fatores que influenciam no tratamento térmico 17
3.2.1.1) Aquecimento *17*
3.2.1.2) Tempo de permanência a temperatura desejada *17*
3.2.1.3) Resfriamento *18*
3.2.1.4) Atmosfera do forno *18*
3.2.2. Recozimento 19
3.2.2.1) Recozimento total ou pleno *19*
3.2.2.2) Recozimento isotérmico ou cíclico *20*
3.2.2.3) Recozimento para alívio de tensões *20*
3.2.3. Esferoidização 21
3.3. NORMALIZAÇÃO 21
3.4. TÊMPERA 22
3.5. REVENIDO 22
3.5.1. Fragilidade do revenido 23
3.6. TÊMPERA SUPERFICIAL 24
3.6.1. Têmpera por chama 24
3.7. TÊMPERA POR INDUÇÃO 25
3.7.1. Conceitos básicos de transferência de calor no tratamento térmico. 26
3.8. FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS NO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO 29
3.8.1. Efeitos eletromagnéticos na superfície da peça 30
3.8.2. Efeito eletromagnético de proximidade 32
3.8.3. Efeito de anel eletromagnético 33
3.9. PROCESSO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NA TÊMPERA POR INDUÇÃO 34
3.9.1. Processo de aquecimento 34
3.10. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS 36
3.10.1. Ensaio de tração 37
3.10.2. Ensaio de compressão 37
3.10.3. Ensaio de dureza 37
3.11. MICROSCOPIA 40
3.12. AÇO SAE 1045 PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA. 40
3.12.1. Tratamento Térmico aço SAE 1045 41
4. MATERIAIS E MÉTODOS 43
4.1. ETAPAS DO PROCESSO EXPERIMENTAL 43
4.2. TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA 44
4.3. ENSAIO DE DUREZA 47
4.4. METALOGRAFIA 48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 50
5.1. ENSAIO DE DUREZA 50

6. CONCLUSÕES 61
REFERÊNCIAS 63

1. INTRODUÇÃO

São muitas as empresas brasileiras que atuam no ramo metal mecânico, um número expressivo delas visam a produção de helicoides para diferentes áreas de serviço, como por exemplo, a agrícola, a perfuração, a alimentícia e a farmacêutica. Devido à grande demanda deste produto, tanto no mercado interno como externo, essas empresas devem estar sempre aprimorando seus projetos, visando a excelência, a fim de que possam ter um bom resultado em meio a um mercado altamente competitivo.

À vista disso, o presente trabalho utiliza tratamento térmico por indução eletromagnética em ponteiras de eixo estriado, usados na junção entre o motor e o eixo dos helicoides para transportar grãos. Possuindo, assim, o objetivo de avaliar os parâmetros desse processo, fazendo uma avaliação das propriedades metalúrgicas e mecânicas do material após a têmpera por indução.

Os eixo utilizado no estudo são fabricados em aço SAE 1045 e temperado pela empresa metalúrgica Cofelma, que possui máquina de indução eletromagnética. A empresa tem como principal produto os transportadores de grãos, helicoidais, sendo os eixos em questão uma parte importante do produto final, pois, eles são utilizado na junção motor-helicoides. Por esse motivo o processo de têmpera deve ser realizado de forma correta a fim de que se obtenha as propriedades mecânicas adequadas para o aço em pauta ser utilizado de forma eficaz.

O processo de têmpera é um processo muito usado nos dias atuais como meio de alterar as propriedades mecânicas dos materiais metálicos. A têmpera por indução é um processo no qual além do aumento da dureza e da resistência do material, com ele é possível de gerar nos componentes mecânicos níveis elevados de tensões residuais compressivas que melhoram sensivelmente a vida em fadiga.

No trabalho em questão, analisar-se-á, através da metalografia, as propriedades da microestrutura da ponteira do eixo, onde será realizado o processo de têmpera e avaliar-se-á por ensaios mecânicos a pela eficiência do processo. O processo de têmpera por indução é realizado nesses eixos por se tratar de um processo rápido e preciso, com capacidade de ser realizado apenas na extremidade desejada do eixo, sem a necessidade do aquecimento de toda a peça.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O trabalho tem por objetivo:

- Realizar ensaios de dureza para verificar a efetividade dos tratamentos térmico. Fazer uma aferição nos equipamentos de controle dos parâmetros do processo.
- Avaliar a partir da metalografia as propriedades metalúrgicas e mecânicas do metal, obtidas após a têmpera por indução.
- Fazer a comparação das propriedades obtidas nos dois eixos, tendo em vista uma avaliação do processo em cada eixo, visando-se observar a uniformidade da têmpera e sua eficácia nos eixos estudados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor melhorias, visando aumentar a eficiência do processo de têmpera utilizado pela empresa e minimizar os erros.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tratamento térmico resume-se a um conjunto de procedimentos, aquecimento e resfriamento a que os aços são submetidos, sob condições monitoradas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características específicas (CHIAVERINI, 2012).

Quando aquecemos o aço a uma temperatura superior a crítica, o carbono contido na cementita (Fe3 C) dissolve-se em austenita. No entanto, na temperatura ambiente, o carbono não se dissolve na ferrita. Assim os átomos de carbono se acomodam na estrutura CFC de austenita, e não conseguem entrar na estrutura justa - CCC - da ferrita (CHIAVERINI, 2012).

Normalmente o processo de têmpera é realizado de duas formas, total onde toda a peça é aquecida até uma temperatura acima da temperatura crítica e resfriada bruscamente, ou têmpera superficial que baseia-se no aquecimento e subsequente resfriamento da peça de forma localizada visando apenas o endurecimento da superfície, mantendo o centro com as propriedades originais. À duas formas para realização da têmpera superficial, têmpera por chama normalmente usando-se maçaricos ou por indução eletromagnética utilizando uma bobina de indução.

3.1 FASES

Quando o aço é temperado pode-se obter duas microestruturas diferentes da perlita, de acordo com a temperatura de resfriamento, pode-se obter a bainita ou a martensita.

3.1.1. Perlita

A perlita consiste em uma mistura eutetóide de duas fases, 88% ferrita e 12% cementita, esta microestrutura é resultado do resfriamento lento da austenita. Sua estrutura cristalina é formada por lâminas alternadas de ferrita e cementita, onde as lâminas de ferrita são mais espessas que as de cementita, com isso, a perlita apresenta características mecânicas intermediarias entre a ferrita e a sementita, sendo mais dura e resistente que a ferrita e mais macia que a cementita (CHIAVERINI, 2012).

3.1.2. Bainita

A microestrutura bainítica é resultante da decomposição eutetóide, na qual austenita se divide em ferrita e carbonetos (cementita). A decomposição que forma esse tipo de estrutura em aços, em um intervalo de temperatura que pode variar de 550°C a 250°C, dependendo da composição química da liga (GOLDENSTEIN, 2002).

A bainita é uma microestrutura intermediaria que é formada entre a perlita e a martensita. Quando resfriada de forma contínua, a velocidade de resfriamento é maior em relação a perlita e menor em relação a martensita. Quando adicionado elementos de liga, exemplo o carbono, o intervalo de formação da bainita pode ser alterado (GOLDENSTEIN, 2002).

Segundo Mehl (1939), de acordo com a morfologia da bainita formada, ela pode ser classificada em bainita superior e inferior.

A bainita superior é formada entre 400°C e 500°C, inicialmente forma-se feixes de agulhas que é formada por ferrita nos contornos de grãos da austenita, As partículas de cementita precipitam entre os cristais de ferrite e austenita. A Figura 1 mostra uma imagem de microscópio electrónico de transmissão (MET) da microestrutura de um aço 4360 resfriado a 495 °C. As partículas de carboneto, em comparação com aqueles que estão presentes na bainita inferior, são relativamente grosseiras e aparecem de forma escura e alongada. Em alguns aços, normalmente com alto teor de silício, a formação de cementita é retardada (KRAUSS, 1990).

Figura 1 – Bainita superior, aço 4360 transformado a uma temperatura de 460°C.

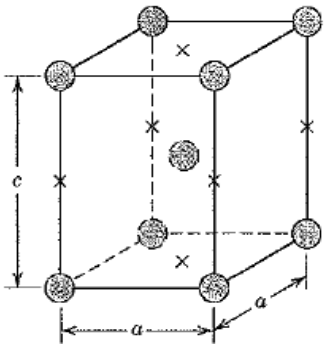
Fonte: Adaptado de Krauss, 2015, p 104.

3.1.3 Martensita

Quando o metal encontra-se na forma de austenítica e resfria-se rapidamente, forma-se a estrutura cristalina da martensita este processo é conhecido como têmpera. A brusca redução na temperatura aprisiona os átomos de carbono no interior do reticulado cristalino dos átomos de ferro, resultando uma distorção na estrutura atômica, elevando a dureza do aço. A martensita é uma fase metaestável e de não equilíbrio composta por ferro que está supersaturado com carbono e que é o produto de uma transformação atérmica da austenita (CALLISTER, 2002).

Na formação da martensita a austenita que possui uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), passa por uma transformação polimórfica em martensita com estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). Na Figura 2 observa-se uma célula unitária, que consiste em uma estrutura cubica de corpo centrado (CCC) alongada em duas dimensões, o que diferencia muito essa estrutura, da ferrita, que por sua vez também tem estrutura (CCC) (CALLISTER, 2002).

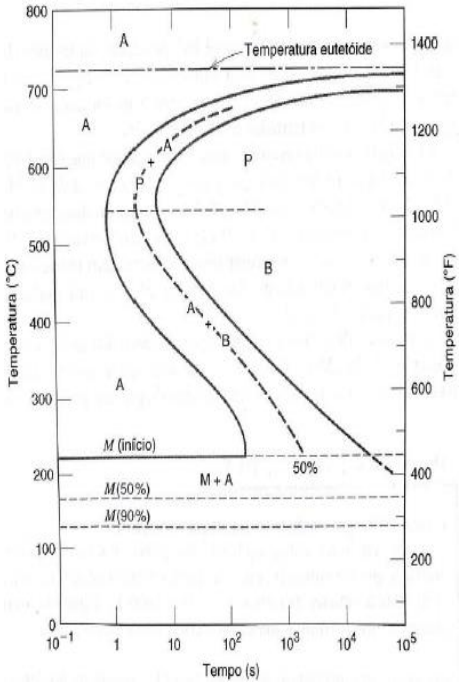
Figura 2 – Célula unitária tetragonal de corpo centrado para aço martensítico, para essa célula c > a.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002, p 210.

Por tratar-se de uma fase de não equilíbrio, a martensita não está representada no diagrama do ferro carbono. No entanto, sua transformação está apresentada no diagrama de transformação isotérmica mostrado na Figura 3, onde o início do processo está representado pela letra M (início) e as duas linhas tracejadas M (50%) e M (90%), indicam a porcentagem de transformação da austenita para martensita (CALLISTER, 2002), não é representada no diagrama ferro carbono, diferentemente da perlita e a austenita.

Figura 3 – Diagrama de transformação isotérmico.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002, p 211.

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS

O conjunto de operações que utilizam técnicas de aquecimento e resfriamento são denominadas “tratamento térmico”. Os aços de média e alta liga são submetidos a condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com intuito de poder-se alterar suas propriedades ou impor-lhes características específicas (CHIAVERINI, 2012).

Os principais objetivos para realizar–se tratamento térmico são:

- Remoção de tensões internas;
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhorar a ductibilidade;

- Melhorar a usinabilidade;
- Aumentar a resistência ao desgaste;
- Melhorar a resistência a corrosão;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

3.2.1 Fatores que influenciam no tratamento térmico

Segundo Chiaverini (2012), considerando o tratamento térmico como um ciclo tempo-temperatura, os fatores a serem considerados são:

- Aquecimento;
- Tempo de permanência à temperatura desejada;
- Resfriamento;
- Atmosfera de aquecimento.

3.2.1.1. Aquecimento

Como deseja-se modificar as propriedades mecânicas dos aços submetidos a um tratamento térmico, geralmente, eleva-se a temperatura do mesmo a uma temperatura acima da temperatura crítica para que se tenha a austenitização completa do aço. A austenitização é o ponto inicial para as transformações posteriores da estrutura do aço, as quais serão determinadas pela velocidade de resfriamento do aço.

A temperatura a qual o aço é submetido é um fator fixo, depende da natureza do processo e das propriedades da estrutura final desejada, assim como a composição química do aço, principalmente o seu teor de carbono. Quanto mais alta a temperatura de aquecimento acima da zona crítica, mais homogenia a dissolução do aço em austenita e maior serão seus grãos. Como um tamanho de grão excessivo é ruim, na prática admite-se 50°C acima da temperatura crítica (CHIAVERINI, 1934).

3.2.1.2. Tempo de permanência a temperatura desejada

O tempo de permanência do aço à temperatura desejada assemelha-se a da temperatura máxima de aquecimento, ou seja, quanto maior o tempo a essa temperatura, mais será a decomposição do carboneto de ferro em ferro gama, no entanto maior será o grão resultante.

Com isso, deseja-se evitar deixar o aço a essa temperatura além do necessário para que tenha-se uma temperatura uniforme em toda a seção do aço para que se consiga toda a dissolução ferro carbono em ferro gama. O tempo excessivo aumenta a oxidação ou descarbonetação da peça (CHIAVERINI, 1934).

3.2.1.3. Resfriamento

Este parâmetro é considerado de maior importância, tendo em vista que é através da velocidade de resfriamento que determina-se microestrutura final do aço. A estrutura final vai dês da perlita grosseira e pouca resistência mecânica até a martensita que por sua vez é a microestrutura mais dura gerada pelo tratamento térmico.

O resfriamento pode ser realizado por vários meios, ambiente do forno, ar e meios líquidos. Sendo o mais brando o resfriamento no ambiente do forno e conforme vai sendo resfriado no ar e em meios aquosos o resfriamento é mais severo. O meio é selecionado de acordo com a microestrutura desejada e o formato da peça, pois, a peça contendo cantos vivos se resfriada muito rapidamente pode romper-se devido as tensões internas que são geradas durante o resfriamento (CHIAVERINI, 1934). A Tabela 1 mostra a velocidade de resfriamento para diferentes diâmetros e meios de resfriamento.

Tabela 1 – Velocidade relativa de resfriamento de diversos meios.

Meio de resfriamento	**Velocidade Relativa (mm/s) de Resfriamento para Diâmetro de:**		
	1”	**2”**	**3”**
Água em agitação	1,00	0,27	0,13
Óleo em agitação	0,40	0,18	0,093
Corrente de ar	0,032	0,0157	0,0102
Ar tranquilo	0,0152	0,0075	0,0048

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, 1934, p 78.

3.2.1.4 Atmosfera do forno

Segundo Chiaverini (1934), quando realiza-se tratamento térmico em aços, tem-se que evitar dois efeitos que são comuns e indesejados, oxidação e a descarbonetação.

As principais reações de oxidação são:

$2Fe + O_2 = 2FeO$, provocada pelo oxigênio;

$Fe + CO_2 = FeO + CO$, provocada pelo anidrido carbônico;

$Fe + H_2O = FeO + H_2$, provocada pelo vapor de água.

A descarbonetação normalmente ocorre junto com a oxidação, onde o carbono é o elemento oxidado nas reações, ocorrendo com temperaturas inferiores à crítica quando está na forma Fe_3C ou à temperaturas acima da crítica com o carbono presente na austenita. Os agentes descarbonetantes usuais são o oxigênio, o anidrido carbônico e o hidrogênio, de acordo com as reações:

$2C + O_2 = 2CO$

$C + CO_2 = 2CO$

$C + 2H_2 = CH_4$

Estes fenômenos podem ser evitados com o uso de uma atmosfera protetora ou controlada no interior do forno, essa atmosfera evita a formação da casca de oxido, assim, evita que sejam empregados métodos posteriores de limpeza para remove-la e, ao eliminar a descarbonetação a superfície terá uma dureza uniforme e mais resistente ao desgaste.

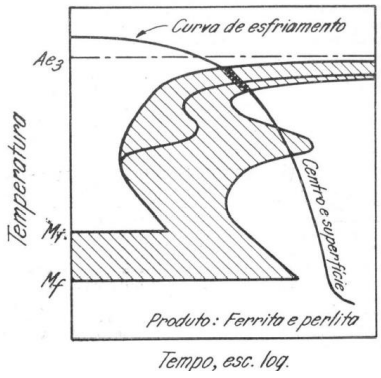
3.2.2 Recozimento

Tratamento térmico que vida remover tenções internas oriundas de tratamentos mecânicos a quente ou a frio, reduzir a dureza melhorando a usinabilidade do aço, alterar as propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, modificar as características elétricas e magnéticas, fazer o ajuste no tamanho do grão, remover gases, produzir uma microestrutura definida, enfim eliminar os efeitos de quaisquer tratamentos térmicos ou mecânicos que o aço tenha sido submetido (CHIAVERINI, 1934).

3.2.2.1. Recozimento total ou pleno

Consiste no aquecimento do aço acima da temperatura crítica, durante o tempo necessário e suficiente para que se tenha a solução do carbono ou dos elementos de liga em ferro gama, seguido de um resfriamento lento dentro do próprio forno controlando sua temperatura ou desligando-o e deixando o aço dentro para resfriar (CHIAVERINI, 1934). Esse processo é ilustrado na Figura 4:

Figura 4 – Diagrama de transformação para recozimento pleno.

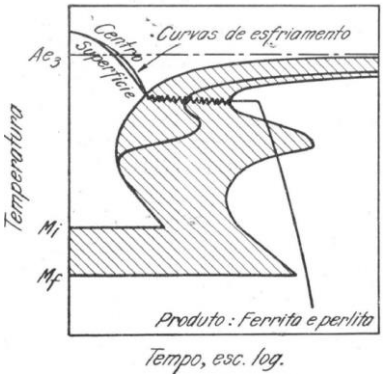


Fonte: CHIAVERINI, 1934, p 84.

3.2.2.2. Recozimento isotérmico ou cíclico

De acordo com Chiaverini (1934), nesse processo o aço é aquecido como no recozimento total, com um resfriamento rápido até uma temperatura localizada dentro da porção superior do diagrama de transformação isotérmico, o material é mantido nesse ponto até a sua transformação ser completada, em seguida é resfriado até a temperatura ambiente conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Transformação para recozimento isotérmico ou cíclico.



Fonte: CHIAVERINI, 1934, p 85.

3.2.2.3. Recozimento para alívio de tensões

O aço é aquecido a temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica. O objetivo é aliviar as tensões formadas durante a solidificação ou tensões formadas durante processos mecânicos a frio. As tensões começam a ser aliviadas a temperaturas logo acima da ambiente, para melhores resultados aquece-se o aço de forma lenta até cerca de 500°C (CHIAVERINI, 1987).

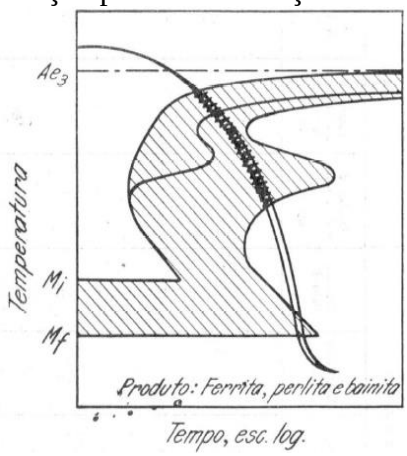
3.2.3 Esferoidização

Processo que baseia-se no aquecimento e subsequente resfriamento, em condições tais que produzam uma forma globular ou esferoidal de carboneto no aço. A esferoidização tem por objetivo melhorar a usinabilidade de aços de alto carbono.

3.3 NORMALIZAÇÃO

Nesse processo o aço é aquecido a uma temperatura acima da zona crítica, seguido de um resfriamento ao ar. A normalização visa reduzir o tamanho do grão principalmente em peças de aço fundido, com a mesma finalidade, também é aplicada em peças que passam por processos de laminação ou são forjadas. É ainda utilizada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, para que se se obtenha estrutura mais uniforme do que a obtida por laminação, facilitando a solução de carbonetos e elementos de liga. Na Figura 6 está esquematizado o processo de normalização (CHIAVERINI, 1934).

Figura 6 – Diagrama de transformação para normalização.

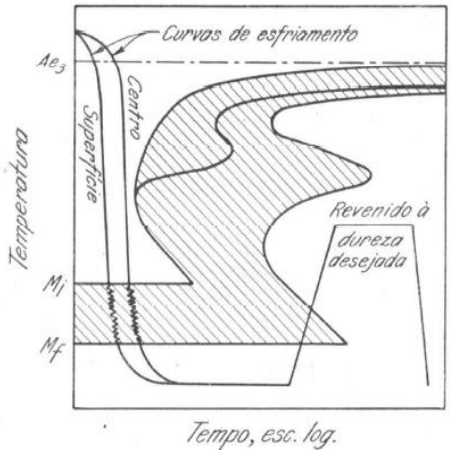


Fonte CHIAVERINI, 1934, pg. 88.

3.4 TÊMPERA

O processo de têmpera consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura aproximadamente 50°C superior a sua temperatura crítica, acima da linha A1 para aços hipereutetoides, em um fluido como óleo, água, salmoura ou ar. Como na têmpera o componente desejado é a martensita, a finalidade desse procedimento é a obtenção da melhora das propriedades mecânicas, aumentar a capacidade de resistência à tração do aço e também da sua dureza, contudo reduz a ductilidade, tenacidade e aparecimento de tensões residuais. No entanto, realizando o revenido elimina-se os inconvenientes. Na Figura 7 está esquematizado a transformação do aço para têmpera e revenido (CHIAVERINI, 2012).

Figura 7 – Diagrama de transformação para têmpera e revenido.



Fonte: CHIAVERINI, 1934, p 90.

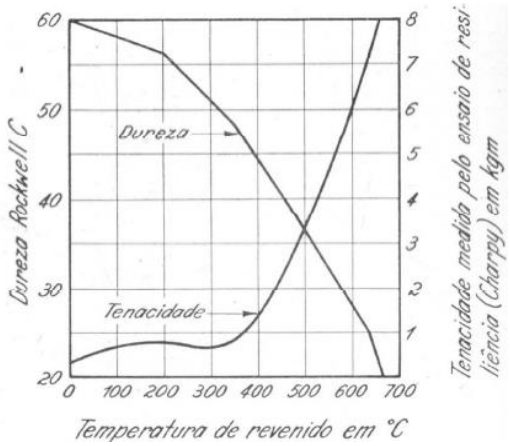
Para que se obtenha êxito na têmpera, alguns fatores devem ser levados em conta. Inicialmente, a velocidade de resfriamento deve ser tal que impeça a transformação da austenita nas temperaturas mais elevada. Pois, as transformações da austenita em altas temperaturas podem gerar estruturas mistas, as quais deixam o aço não uniforme com pontos mais macios que outros, conferindo ao aço baixos valores de escoamento e resistência ao choque. A seção da peça também é um ponto importante, pois pode determinar diferenças no resfriamento em diferentes pontos da peça.

3.5 REVENIDO

Segundo Chiaverini (2008), revenido é um processo de tratamento térmico que geralmente é utilizado após a têmpera, pois elimina os inconvenientes que são oriundo da

têmpera, alivia tensões, corrige a dureza e fragilidade excessiva, em contrapartida aumentando a ductilidade e resistência ao choque. A resistência ao choque pode ser visto na ilustração abaixo, Figura 8.

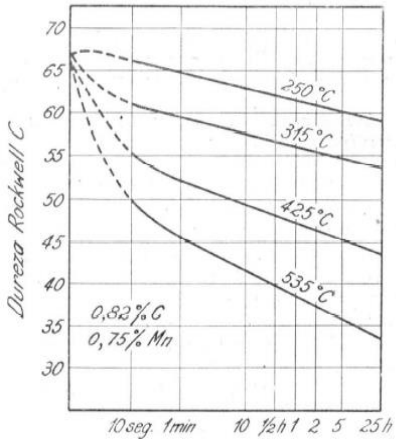
Figura 8 – Efeito da temperatura de revenido sobre a dureza e tenacidade do aço.



Fonte: CHIAVERINI, 1934, pg. 94.

No revenido não é apenas a temperatura que influencia, o tempo de permanência do aço na temperatura especificada também é um parâmetro extremamente importante, a influência da temperatura é maior no início do tratamento e vai diminuindo com o passar do tempo, como apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Influência do intervalo de tempo no revenido de um aço com 0,82% C.



Fonte: CHIAVERINI, 1934, pg. 96.

3.5.1 Fragilidade do revenido

Normalmente aços com baixo teor de carbono adquirem a fragilidade, quando aquecidos a temperaturas entre 375 – 537°C, ou quando são resfriados lentamente dentro dessa faixa. Os aços comuns que contêm uma concentração de manganês menor do que 0.30% não apresentam o fenômeno.

Os aços que se tornaram frágeis no processo de revenido podem voltar ao normal, restaurando sua tenacidade, pelo aquecimento em torno de 600°C ou acima, seguido de um rápido resfriamento, abaixo de 300°C (CHIAVERINI, 2008).

3.6 TÊMPERA SUPERFICIAL

De acordo com Chiaverini (2008), a têmpera superficial consiste no endurecimento localizado, visando obter uma estrutura semelhante a martensita na superfície da peça. Processo normalmente utilizado em peças de máquinas, com o intuito de obter uma superfície dura resistente ao desgaste, muito aplicada em engrenagens, eixos, etc. O endurecimento superficial pode ser realizado de várias maneiras, entre elas:

a) Tratamento mecânico da superfície, o qual obtêm-se uma superfície encruada, com resistência e dureza crescente.

b) Tratamentos químicos do aço, utilizando métodos como cromeação dura, siliconização e outros.

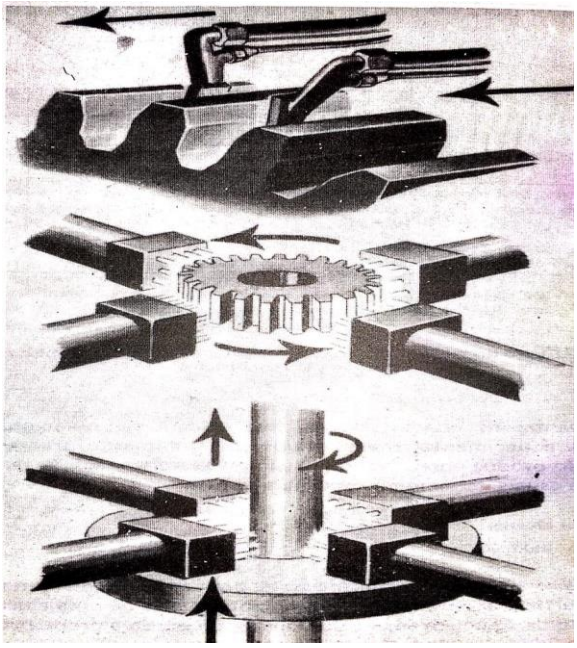
c) Tratamentos termo químicos, tais como cementação, nitretação e carbonitretação.

d) Têmpera superficial, realizada por chama e por indução eletromagnética.

3.6.1 Têmpera por chama

Na têmpera por chama o aço é aquecido de forma rápida, acima da sua temperatura crítica na superfície que deseja-se elevar a dureza, por meio de uma chama de oxiacetileno, seguido de um jato de água em forma de spray, formando uma camada endurecida com a espessura desejada. Este processo pode ser realizado de duas maneiras, método estacionário aquece de forma localizada o metal, apenas no local a ser endurecido, método progressivo é utilizado quando deseja-se aquecer seções grandes o que torna o método estacionário não aplicável. Figura 10 (CHIAVERINI, 2012).

Figura 10 – A parte superior a) da imagem corresponde ao método progressivo, a parte central b) corresponde ao método giratório e a figura da parte inferior c) corresponde ao método combinado.



Fonte: CHIAVERINI, 1934, p 102.

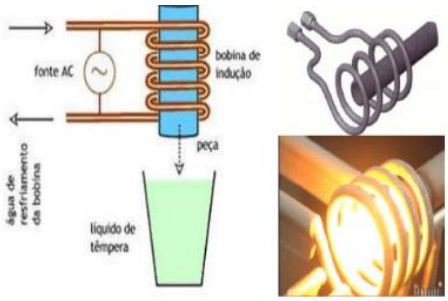
3.7 TÊMPERA POR INDUÇÃO

A têmpera por indução é um processo de fabricação mecânica utilizado com a finalidade de elevar a dureza superficial de um material, onde o calor do processo é fornecido através de uma indução elétrica na peça e subsequentemente é feito o resfriamento da mesma com um fluido, normalmente salmoura.

Em diversas aplicações, a têmpera por indução é usada em algumas partes selecionadas da peça, as que necessitam de maior dureza. O procedimento é feito de forma rápida e possui grande eficácia, pois a corrente elétrica é direcionada apenas para o local onde deseja-se realizar a têmpera. Por isso o processo é de alta produtividade, possui poucas alterações na geometria da peça, necessita de pouco espaços físicos para que se instale os equipamentos sendo benéfico para o ambiente empresarial (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Totten (1997) o processo de têmpera por indução pode ser realizado em todos materiais que conduzem corrente elétrica. No momento em que o material é exposto a um campo eletromagnético gerado por uma corrente alternada, surge no material uma força eletromotriz induzida (FEM), que acarreta o movimento de uma corrente elétrica, conhecida por corrente de Foucault. O movimento da corrente elétrica no condutor ocorre de preferência na superfície, que por sua vez aquece a mesma por efeito Joule.

Figura 11 – Esquema ilustrativo do processo de têmpera por indução.

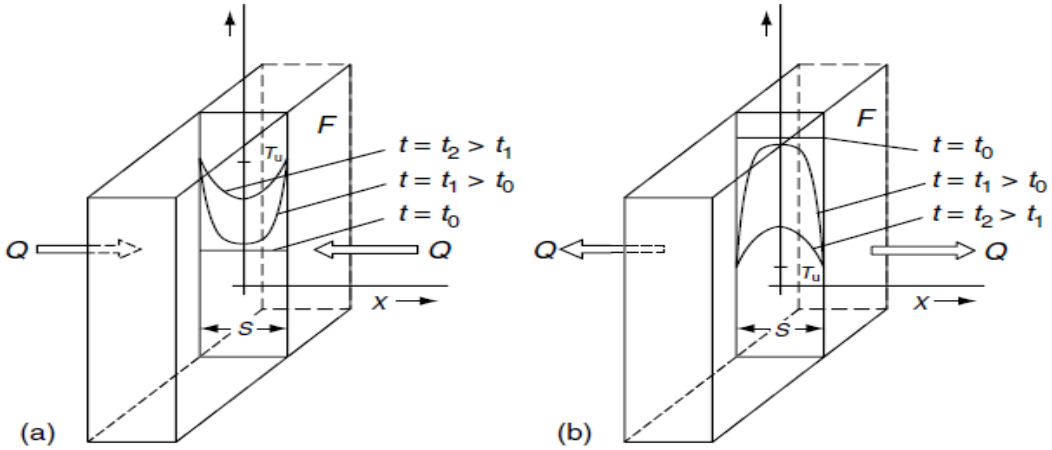


Fonte: Adaptado de RUDNEV et al, 1997.

3.7.1 Conceitos básicos de transferência de calor no tratamento térmico.

O processo de têmpera consiste em um fornecimento de energia (calor) e posteriormente sua remoção, para que ocorra o choque de temperatura e tempere a peça. Na operação de têmpera, ao aquecer ou resfriar a peça regiões distintas de temperatura se desenvolvem entre a superfície da peça e seu núcleo em que sua temperatura varia com o tempo. A Figura 12 mostra a distribuição da temperatura de acordo com a variação do tempo no processo de aquecimento e resfriamento da peça (TOTTEN E HOWES, 1997).

Figura 12 – Distribuição de temperatura em uma placa, figura a) aquecimento, figura b) resfriamento, t0 início da mudança de temperatura, Tu, temperatura ambiente; Q, fluxo de calor; s, espessura da placa.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, p 278.

No processo de têmpera convencional a transferência de calor ocorre de três formas, condução, convecção e radiação. A transferência de calor da superfície de um corpo em direção ao núcleo do sólido é feita por condução, e é regida pela Equação 3.1. Onde o fluxo de calor é proporcional a temperatura em direção ao núcleo da peça. Como mostrado na Figura 13 a

temperatura em direção ao centro da peça tem relação direta com a condutividade do material λ(TOTTEN E HOWES, 1997).

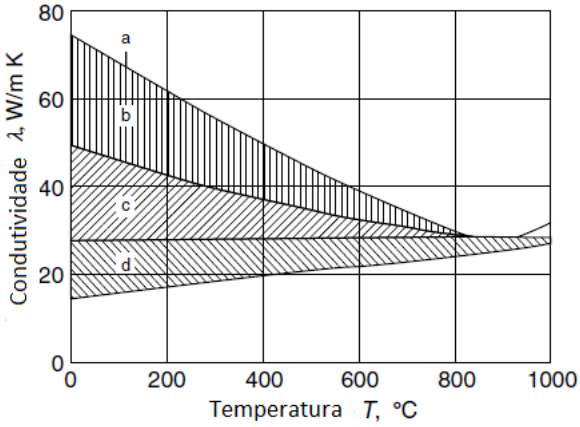
$$q_{condução} = -\lambda \, grad \, T \qquad (3.1)$$

Onde: $q_{condução}$ – Fluxo de calor por condução (W/m^2).

λ – Condutividade do material (W/m.K).

Grad T – Gradiente de temperatura (K/m).

Figura 13 – Gráfico condutividade térmica X temperatura. a) ferro puro; b) aços carbonos; c) aços de baixa liga; d) aços alta liga.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, p 280.

O calor transferido por convecção se dá com o movimento de fluidos, gases ou ar contidos na atmosfera de aquecimento. Na convecção não ocorre a troca de calor transferido de um corpo para outro, e sim com o movimento das partículas aquecidas que levam o calor de uma para a outra até que se chocam com o corpo a ser aquecido. O fluxo de calor por convecção pode ser calculado com a Equação 3.2.

$$q_{convec} = \alpha(T_s - T_a) \qquad (3.2)$$

Onde: q_{convec} – Fluxo de calor por convecção (w/m^2)

α – coeficiente de transferência de calor por convecção (w/m^2°C)

T_s – Temperatura da superfície (°C).

T_a – Temperatura ambiente (°C).

Outro mecanismo de transferência de calor é a radiação. Todos os corpos, sólidos, líquidos e gases perdem calor o constantemente por radiação, pois, esse tipo de transferência de

calor não precisa de um meio físico para ocorrer, ocorrendo até mesmo no vácuo. A radiação que é liberada pelo calor tem a forma de ondas eletromagnéticas com comprimento entre 0,3 a 500μm (TOTTEN E HOWES, 1997).

Todo corpo emite radiação, sua intensidade vai variar de acordo com a sua temperatura, porem nenhum corpo emitirá ou absorverá mais radiação do que o corpo negro. O fluxo de calor emitido por radiação de um corpo pode ser calculado usando a lei de Stefan-Boltzmann, Equação 3.3 (TOTTEN E HOWES,1997).

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma T^4 \qquad (3.3)$$

Onde: q_{rad} – Fluxo de calor por radiação (W/m²)

ε – Coeficiente de relaçãode emissão por radiação, $\varepsilon < 1{,}0$

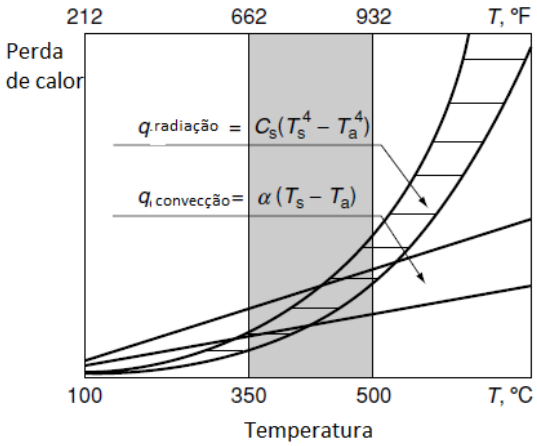
σ – Constante de Boltzmann, $\sigma = 5{,}67\ x\ 10^{-8}$W/$(m^2K^4)$

T – Temperatura absoluta (k)

A capacidade do calor percorrer o material está diretamente ligada a condutividade térmica (λ). Um material com alto valor de condutividade térmica transmite o calor ao longo do mesmo com mais velocidade do que um material com uma condutividade térmica menor. No caso de têmpera superficial, um auto valor de condutividade térmica pode ser prejudicial, pois, devido a facilidade do calor fluir ao longo da espessura da peça, todo material acaba sendo aquecido não apenas a superfície, o que acaba fazendo com que o processo necessite de mais potência para manter a temperatura da superfície (TOTTEN E HOWES, 1997).

A maioria dos problemas resultantes do aquecimento por indução combinam as perdas por convecção e radiação. Segundo a Figura 14, as perdar por convecção são maiores em baixas temperaturas, enquanto que para temperaturas de indução mais elevadas as perdas por radiação são muito mais significativas (TOTTEN E HOWES, 1997).

Figura 14 – Perdas por radiação e convecção no aquecimento por indução.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES,1997, p 291.

3.8. FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS NO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

O aquecimento por indução depende de dois mecânismos de dicipação de energia para fins de aquecimento. São elas, perdas de energia devido ao aquecimento e perdas associadas a histerese magnética, o primeiro é o único mecânismo de geração de calor em materiais não magnéticos, por exemplo, alumínio e cobre.

A perda po histerese é importante em metais condutores, por exemplo, aços carbonos, simplificadamente as perdas por histerese são causadas pelo atrito das moléculas devido ao momento magnético, pois o metal é magnetizado primeiramente em uma direção e depois na outra. Os momentos de dipolo magnéticos podem ser considerados pequenos imãs que giram em torno do indutor a cada reversão do campo magnético associado a uma corrente alternada (ZINN, 1988).

As perdas por correntes parasitas ou de Foucaut juntamente com a geração de O aquecimento por indução depende de dois mecânismos de dicipação de energia para fins de aquecimento. São elas, perdas de energia devido ao aquecimento e perdas associadas a histerese magnética, o primeiro é o único mecânismo de geração de calor em materiais não magnéticos, por exemplo, alumínio e cobre.

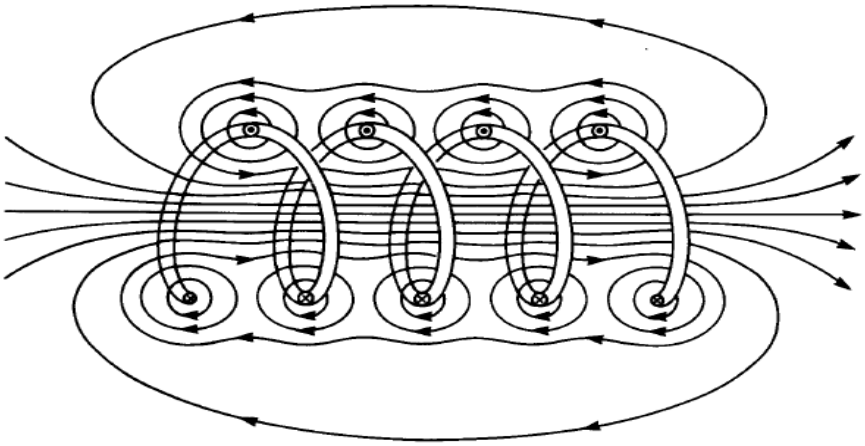
A perda po histerese é importante em metais condutores, por exemplo, aços carbonos, simplificadamente as perdas por histerese são causadas pelo atrito das moléculas devido ao momento magnético, pois o metal é magnetizado primeiramente em uma direção e depois na outra.

Os momentos de dipolo magnéticos podem ser considerados pequenos imãs que giram em torno do indutor a cada reversão do campo magnético associado a uma corrente alternada.calor por efeito Joule, são apresentadas pelas mesmas relações de outros circuítos de corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC).

Quando ocorre uma queda na tensão, a energia que está na forma de eletrecidade é convertida em calor. Essa queda de tensão é o próprio potencial, portanto a taxa de aquecimento é o produto da resistência pelo valor da corrente ao quadrado ($P = Ri^2$) (ZINN, 1988).

Quando um condutor é colocado dentro de uma bobina, e nele é induzida uma corrente alternada, correntes parasitas são induzidas também, gerando o aquecimento no condutor. Com a corrente alternada, um campo eletromagnético envolve o solenoide sua intensidade e direção variam com o tempo, Figura 15 (ZINN, 1988).

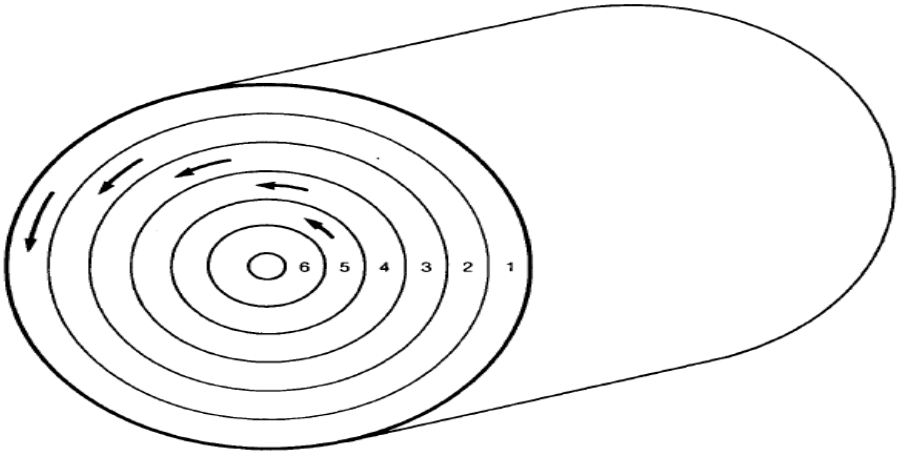
Figura 15 – Ilustração de um campo eletromagnético induzido por uma corrente alternada passando através de uma bobina.



Fonte: Adaptado de ZINN, 1988, p 12.

No momento em que o material no interior do campo magnético for uma barra sólida, o campo magnético induzido será mais forte. Como mostrado na Figura 16, o campo magnético tem maior intensidade quanto mais afastado do centro, onde os aros mais internos do campo terão uma corrente alternada (CA) mais fraca do que os aros externos, esse fenômeno causa um atraso na fase, porem mantem a frequência, esse fenômeno é chamado de “efeito pelicular” (ZINN, 1988).

Figura 16 – Variação do campo magnético de acordo com a posição radial.



Fonte: Adaptado de ZINN, 1988, p 14.

3.8.1 Efeitos eletromagnéticos na superfície da peça

Quando uma corrente alternada passa por um condutor a distribuição da corrente não é uniforme. A densidade máxima da corrente estará localizada na superfície do condutor e vai

diminuindo em direção do centro do condutor. Esse declínio de densidade e conhecido como efeito pelicular "*skin effect*". Este fenômeno é um dos principais motivos pelo qual há uma grande concentração de contracorrente na superfície da peça (TOTTEN E HOWES,1997).

O efeito pelicular é responsável por 86% da corrente concentrar-se na superfície da peça de trabalho, essa faixa onde a corrente está concentrada chama-se camada de referência ou de penetração.

A profundidade de penetração depende da frequência e das propriedades eletromagnéticas do material. Matematicamente falando a profundidade de penetração é dada pela equação 3.3.1 (TOTTEN E HOWES,1997).

$$\delta = (\rho / (\pi . \mu 0 . \mu . f))1/2 \quad (4)$$

Onde:

δ – Profundidade de penetração.

ρ – Resistividade da peça.

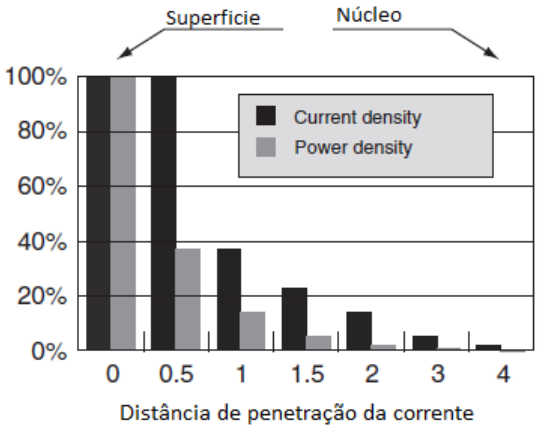
$\mu 0$ – Permeabilidade magnética no vácuo.

μ - Permeabilidade magnética da peça.

f – frequência do campo magnético alternado da bobina.

Como apresentado na Figura 17, a densidade de potência e corrente varia com a distância de penetração da corrente em direção ao núcleo da peça, quanto mais interna a camada menor à densidade de corrente e potência.

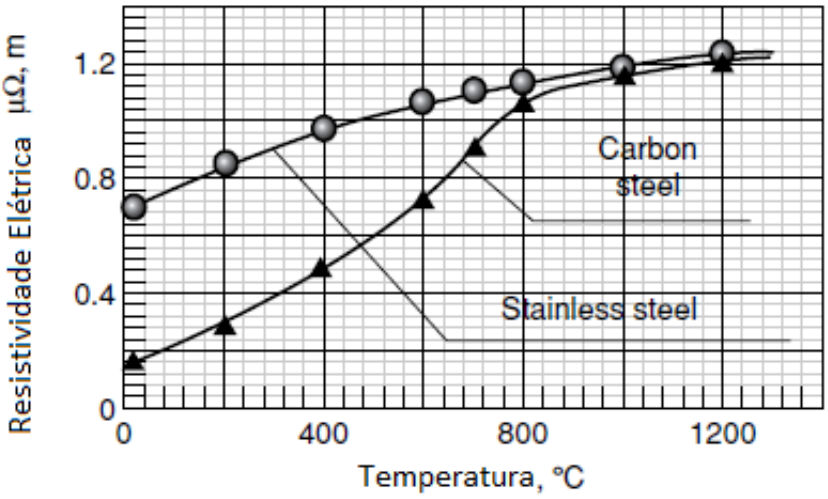
Figura 17 – Variação da densidade de corrente e densidade de potência com a profundidade de penetração.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, pg. 308.

Para metais não magnéticos a permeabilidade magnética é equivalente a do ar e o valor atribuído é 1. A resistividade elétrica dos metais ρ é uma função da temperatura como mostrado na figura 18.

Figura 18 – Gráfico da permeabilidade magnética para aço inoxidável e aço carbono conforme a temperatura aumenta.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, pg. 297.

3.8.2. Efeito eletromagnético de proximidade

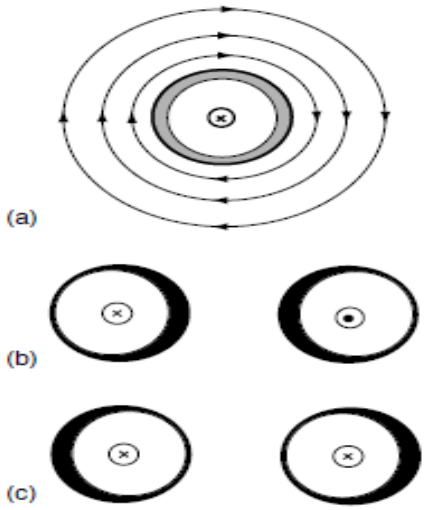
Quando uma peça é aquecida por indução eletromagnética normalmente existem dois condutores próximos um do outro, cada condutor têm seu próprio campo magnético. Os campos magnéticos acabam interagindo um com o outro gerando uma distorção na distribuição de energia.

Os efeitos de proximidade que geram a distorção na distribuição de corrente em um condutor cilíndrico pode ser visto na Figura 19.

Quando aproximam-se duas barras condutoras com correntes em sentido oposto Figura 20, estas correntes geram um campo magnético de grande intensidade. Como as correntes do campo magnético resultante estão concentradas na parte interna das barras, por esse motivo o campo magnético exterior as barras é mais fraco.

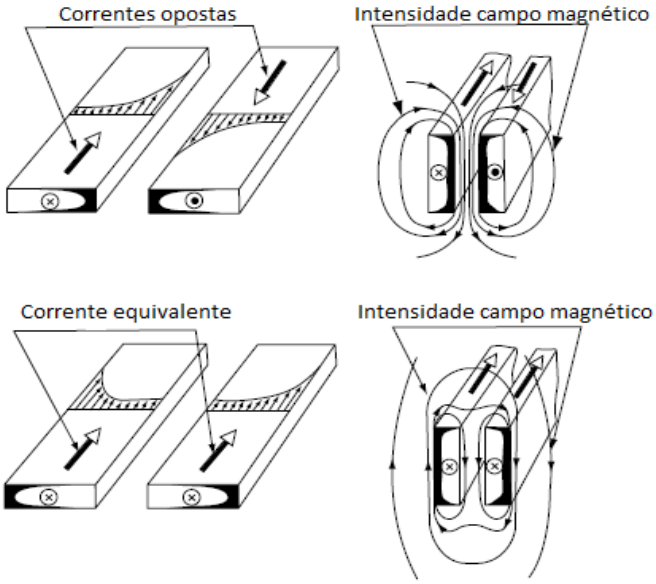
Como as linhas do campo magnético externo têm sentido opostos os condutores acabam atraindo um ao outro. Mas se as barras tiverem correntes na mesma direção, isso resultará em campos eletromagnéticos interno e externos com mesmo sentido o que fará as barras se afastarem, por fim cancelando um ao outro.

Figura 19 – Efeito de proximidade, condutor cilíndrico, a) espira única, b) espiras com correntes opostas e c) espiras com correntes semelhante.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWS, 1997, pg. 314.

Figura 20 – Distribuição de corrente em barras devido ao efeito de proximidade.

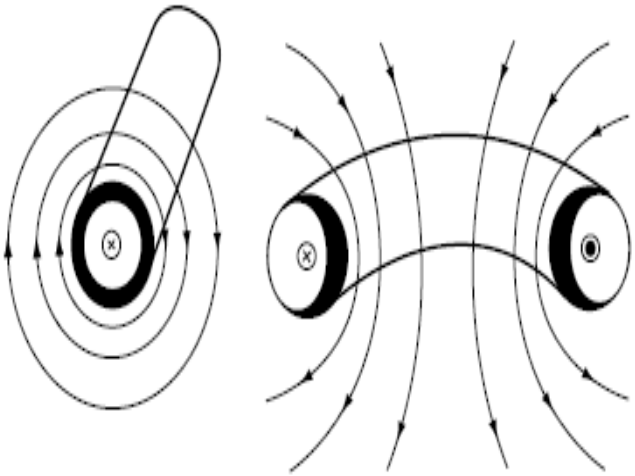


Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, pg 314.

3.8.3. Efeito de anel eletromagnético

O efeito do anel eletromagnético é característico de peças curvas, o campo magnético encontra-se dentro do anel, por isso a intensidade do campo magnético será maior dentro do anel sob a superfície interna da peça. Este efeito não ocorre apenas em indutores de volta simples, ocorre também em bobinas com várias voltas. O efeito criado nas barras curvas é muito semelhante ao efeito de proximidade, Figura 21.

Figura 21 – Efeito de anel em um condutor cilíndrico.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, pg. 317.

3.9. PROCESSO DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO NA TÊMPERA POR INDUÇÃO

3.9.1 Processo de aquecimento

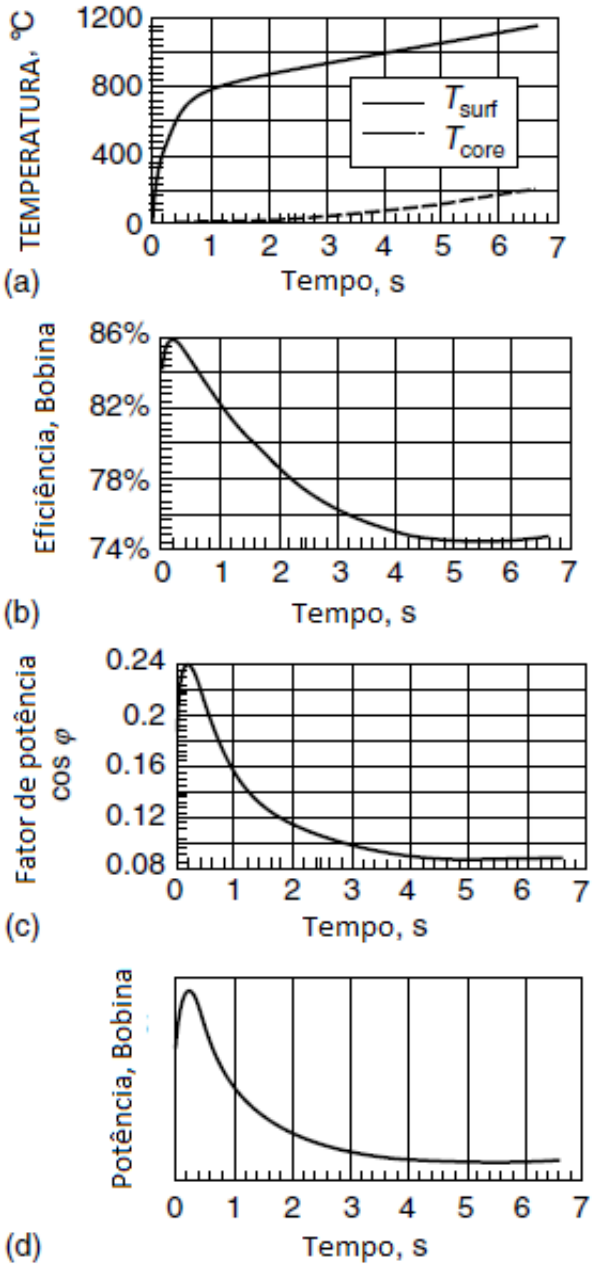
Como visto anteriormente, o aquecimento por indução eletromagnética ocorre por efeito Joule. Para que se tenha uma visão mais simplificada do aquecimento por indução e suas características em peças de aço, considera-se um cilindro de aço colocado dentro de uma bobina e sujeita a ação de um campo eletromagnético.

No aquecimento do cilindro, de uma temperatura abaixo da temperatura de curie a uma temperatura superior deve-se considerar vários aspectos para que seja feito o projeto das máquinas de indução.

A Figura 22 mostra como a mudança de temperatura ao passar do tempo influencia as propriedades eletromagnéticas da peça, calor especifico, resistência elétrica e a permeabilidade magnética (TOTTEN E HOWES, 1997).

Durante o processo de aquecimento ocorre um aumento da eficiência elétrica da bobina como mostrado na Figura 22 b), esse aumento ocorre devido ao aumento da resistividade do metal com o aumento da temperatura, contudo a permeabilidade magnética do metal continua alta.

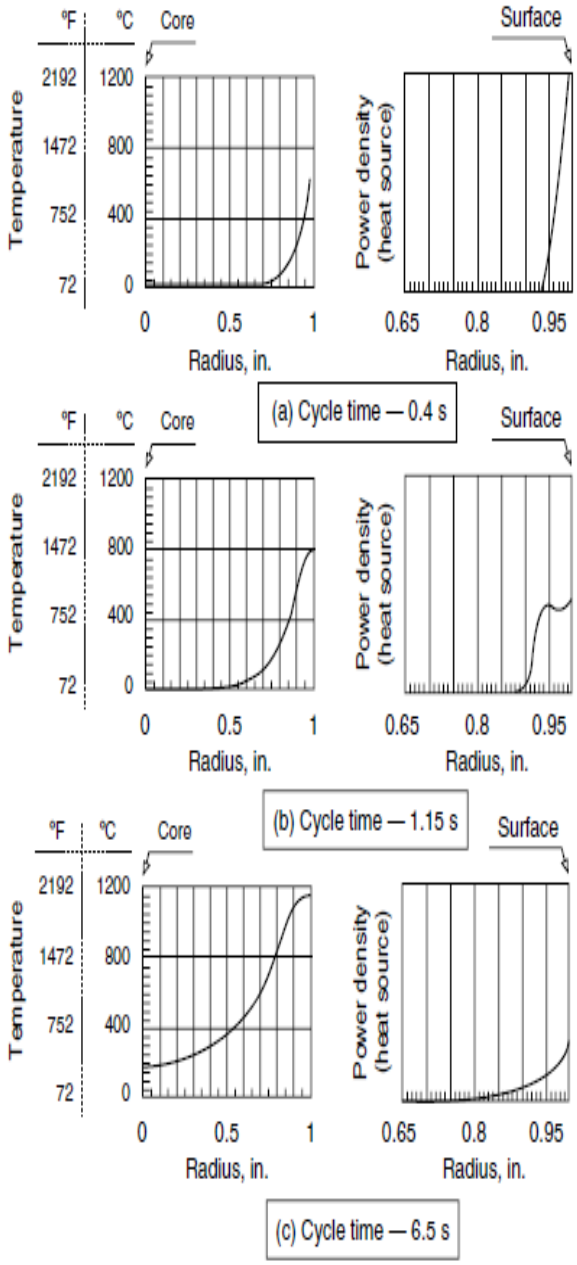
Figura 22 – Mudança dos parâmetros com o passar do tempo durante o aquecimento do aço.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, p 318.

A Figura 23 mostra perfis de temperatura e a densidade de potência em diferentes momentos do processo de indução em um cilindro de 50,8mm de diâmetro e a frequência utilizada foi de 25kHz, na figura observa-se que a eficiência elétrica máxima é alcançada em um curto período de tempo e logo em seguida começa a reduzir, a superfície atinge a temperaturas acima do ponto de curie e em seguida tem um redução acentuada na sua temperatura.

Figura 23 – a) Comportamento da permeabilidade de calor em direção ao centro da peça em um tempo de 0,4s, b) em 1,15s, c) em 6,5s.



Fonte: Adaptado de TOTTEN E HOWES, 1997, p 319.

3.10. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Em diversas ocasiões, quando em serviço, os aços estão submetidos a diferentes esforços. Por isso é de extrema importância conhecer as propriedades mecânicas do material empregado.

Segundo Callister (2012), para um projeto de engenharia, as propriedades à determinar são rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. Tais propriedades são obtidas através de ensaios de tração, dureza, compressão, cisalhamento e torção realizados em laboratório.

3.10.1. Ensaio de tração

Esse ensaio consiste em deformar uma amostra, normalmente até sua ruptura por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo do corpo de provas. O corpo de provas normalmente é cilíndrico e possui uma redução do seu diâmetro na parte central, essa redução se dá para que quando submetido ao ensaio o corpo de prova se rompa na porção central e não nas pontas. O diâmetro padrão do corpo de provas é de 12,8 mm, enquanto o comprimento da sessão reduzida deve ser de no mínimo quatro vezes esse valor, mas comumente usa-se 60mm.

A tensão de engenharia e a deformação de engenharia podem ser obtidas com as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad (5)$$

$$€ = \frac{\Delta l}{l_0} \qquad (6)$$

3.10.2. Ensaio de compressão

O ensaio de compressão é realizado de forma semelhante ao de tração e as formulas usadas para o cálculo da tenção e deformação são a 5 e 6, porem por convenção a força tem sinal negativo o que leva a tensão ser negativa. O mesmo ocorre para a deformação pois, o comprimento inicial será maior do que o final, o que por sua vez resultara em um valor negativo também (CALLISTER, 2012).

3.10.3. Ensaio de dureza

A definição de dureza é difícil de explicar, pois, segundo Souza (2014), o significado de dureza vai variar de acordo com área de experiência de cada um, para um metalurgista a dureza significa resistência a deformação plástica permanente, para um engenheiro mecânico, dureza é a capacidade de um metal duro penetrar em outro entre outros.

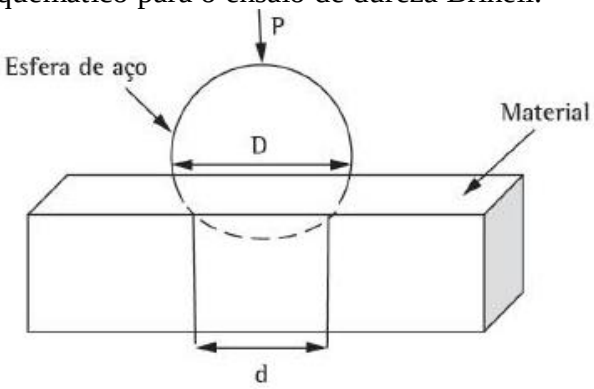
Porem na mecânica usa-se como definição a resistência à penetração como base, nesse caso temos a dureza Brinell, normalmente utilizada em peças fundidas e forjadas, a dureza Rockwell para peças usinadas acabadas (CHIAVERINI, 1986).

O ensaio de dureza Brinell consiste em pressionar lentamente uma esfera de aço de diâmetro D contra a superfície plana, polida e limpa da peça com uma carga Q, durante um intervalo de tempo. Essa pressão deixará marcada na peça uma calota esférica de diâmetro d, medido por um microscópio óptico. Depois de removida a carga o valor de d dever ser calculado como a média de duas medidas feitas a 90° uma da outra. A dureza Brinell é calculada pela Equação 7 (DE SOUZA, 2014).

$$HB = \frac{2Q}{\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2}} \quad (7)$$

A figura 24 mostra um desenho esquemático do ensaio da dureza Brinell.

Figura 24 – Desenho esquemático para o ensaio de dureza Brinell.

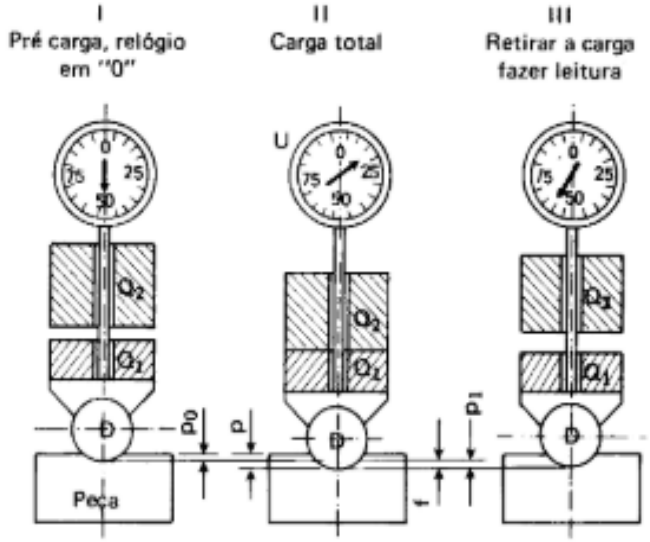


Fonte: DE SOUZA, 2014, p 106.

A dureza Rockwell, HR, elimina o tempo de medição, pois a leitura é feita diretamente na máquina, o que torna esse ensaio mais rápido e livres de erros pessoal. Outra vantagem é que utilizando-se penetradores pequenos a impressão pode não prejudicar a peça, não necessitando o descarte.

O ensaio baseia-se na profundidade de penetração de uma ponta, subtraída da recuperação elástica com o alívio da carga e a profundidade causada pela carga menor. Normalmente os penetradores usados são, uma esfera de aço temperado ou um cone de diamante também chamado de penetrador-bale com 120° de conicidade. Primeiramente aplica-se a carga menor para garantir um contato justo, então aplica-se a carga maior para que seja feita a medida. O número da dureza corresponde a um valor adimensional, diferente da Brinell. A Figura 25 mostra um desenho esquemático do ensaio de dureza Rockwell com penetrador de esfera.

Figura 25 – Ensaio Rockwel.



Fonte: SOUZA, 2014, p 117.

A dureza Vikers foi um método criado como alternativa ao método Brinell. Este método considera a relação padrão entre o diâmetro da esfera do penetrador Brinell e o diâmetro da calota esférica obtida, porém de forma mais precisa por usar um penetrador de diamante piramidal de base quadrada formando um ângulo de 136° entre as faces opostas, que possibilita medir todos valor de dureza, desde os materiais mais duros até os mais moles.

A forma das impressões deixadas na peça é de um losango regular, ou seja, quadrada, Figura 26, e pela medida L das suas diagonais, pode-se calcular a dureza Vikers pela Equação 8.

$$HV = \frac{1{,}8544Q}{L^2} \tag{8}$$

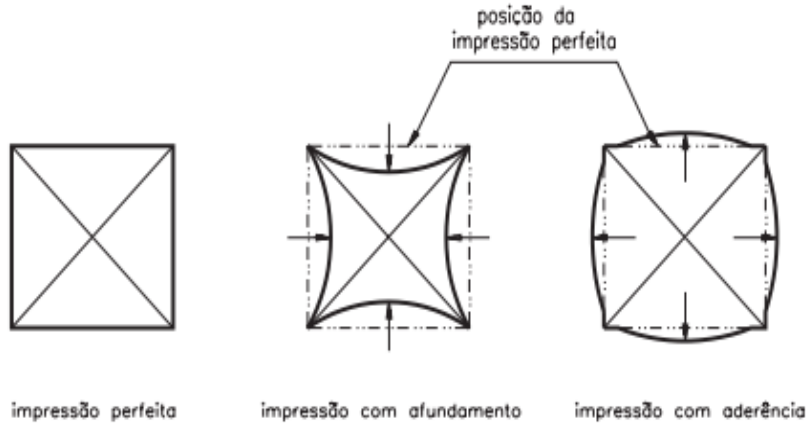
Q – É dado em kgf ou N.

L – É dado em milímetros.

A dimensão da dureza Vikers é dada em N/mm² ou kgf/mm², fornecendo assim uma escala contínua de dureza, variando de HV = 5 até HV = 1000 Kgf/mm², para cada carga usada.

Quando deseja-se ensaiar materiais de pequena espessura usa-se a técnica de microdureza, Knoop e Vikers, utilizam um penetrador de diamante muito pequeno e as cargas utilizadas nesses ensaios são muito menores do que as usadas nos ensaios Rockers e Brinell. O método knoop é utilizado para ensaiar materiais frágeis, tais como cerâmica (CALLISTER, 2012).

Figura 26 – Desenho esquemático da impressão deixada na peça pelo ensaio de dureza Vikers.



Fonte: SOUZA, 2014, pg 124.

3.11 MICROSCOPIA

Técnicas usadas quando deseja-se estudar a microestrutura dos materiais, os sistemas ópticos e de iluminação são elementos básicos. O estudo da microestrutura dos aços é denominado metalografia.

Comumente antes do estudo metalográfico ser realizado o material deve passar por algumas fases de preparação, corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico. Após esse processo de preparação da amostra a microestrutura do material é revelada (CALLISTER, 2012).

Os microscópios utilizados para realização da análise metalográfica são:

- Microscópio eletrônico;
- Microscópio eletrônico de transmissão;
- Microscópio eletrônico de varredura.

3.12. AÇO SAE 1045 PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA.

O aço SAE 1045 é um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal. O aço SAE 1045 possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. O aço SAE 1045 é utilizado, em geral, com durezas de 180 a 300 HB, é empregado em várias situações, desde a fabricação de eixos, laminados e forjados, peças mecânicas em geral. Onde é necessário que se empregue um aço com maior resistência do que os aços de baixo carbono (GERDAU, 2018).

.

O SAE 1045 tem composição química de; Carbono (0,43% - 0,50%), Silício (0,15% - 0,35%), Manganês (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx) e Enxofre (0,05% máx.) (GERDAU, 2018).

3.12.1 Tratamento Térmico aço SAE 1045

O aço SAE 1045 tem uma peculiaridade de, ao realizar-se a têmpera superficial a camada externa atinge valores de alta dureza, porem logo abaixo da mesma a dureza apresentada têm valores mais baixos, indicando uma baixa penetração da têmpera. A baixa temperabilidade do SAE 1045 se dá devido a sua pequena concentração de elementos de liga (GERDAU, 2018).

No tratamento térmico de tempera do aço SAE 1045 o aço é aquecido em uma faixa de temperatura entre 820 a 850 ºC (dependendo da composição química do aço, e sua temperatura de austenitização), mantendo-se neste intervalo de temperatura por 5 a 10 minutos por cada centímetro de espessura da peça e resfriar em água ou em outro meio refrigerante que retire calor rapidamente da peça provocando a transformação martensítica total, com o menor tensionamento possível .Exemplo, em meios como óleo ou ao ar, normalmente dependendo da espessura da peça, dos microligantes presentes e se a dureza do SAE 1045. Este tratamento térmico visa aumentar a dureza e resistência a tração do material (AÇO ESPECIAL, 2018).

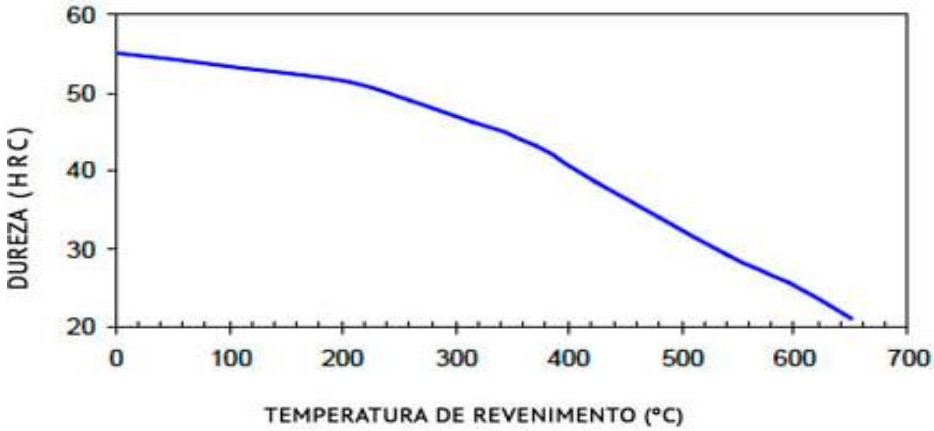
Segundo Chiaverini (2008) o tratamento térmico de têmpera do aço SAE 1045 deverá ser precedido de, ao menos, um revenimento, pois toda vez que o constituinte final do tratamento for a martensita é indispensável que o revenimento seja realizado.

Os objetivos de realizar revenimento do aço SAE 1045:

- Corrigir as tensões decorrentes da têmpera sem prejudicar os resultados desta;
- Ajustar o material para a dureza objetivada;
- Atenuar as tensões geradas na têmpera melhorando a ductilidade e tenacidade do material.

As mudanças nos valores de módulo de elasticidade, tensão de ruptura, tenacidade do aço SAE 1045, entre outros, têm uma grande mudança ao se comparar materiais em uma mesma faixa de dureza onde um tenha passado somente pelo processo de têmpera e o outro pelo processo correto de têmpera e revenimento. O gráfico da dureza x temperatura pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 – Diagrama de revenimento aço SAE 1045.



Fonte: http://www.acoespecial.com.br/aco-sae-1045.php.

No revenimento do aço SAE 1045, deve-se aquecer a peça à temperatura relacionada a dureza desejada e permanecer nesta temperatura por no mínimo 1 hora, o tempo varia de acordo com o tamanho da peça, sendo que para uma peças maiores o tempo é maior.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O aquecimento por indução eletromagnética, é um método de aquecimento muito utilizado em aços, por se tratar de um material condutor. Este processo é utilizado principalmente em materiais ferrosos em processamento térmico de metais, tratamento térmico, têmpera, solda por brasagem e fusão.

O aquecimento por indução utiliza indução eletromagnética para gerar correntes elétricas parasitas induzidas dentro do material aquecido, utilizando a energia dessas correntes parasitas para realizar o aquecimento. Os constituintes básicos de um sistema de aquecimento por indução incluem bobinas de indução, fontes de alimentação CA e peças de trabalho. De acordo com as diferentes geometrias de aquecimento, a bobina pode ser projetada de diferentes formas. A bobina é conectada à fonte de alimentação. A fonte de alimentação fornece uma corrente alternada para a bobina. A corrente alternada que flui através da bobina gera um campo magnético alternado que passa através da peça. O campo magnético faz com que a peça gere as correntes de Foucault para aquecer material por efeito Joule. As correntes desenvolvem-se preferencialmente na superfície da peça o que facilita um aquecimento superficial (ALBATHERM, 2018).

A velocidade com que a peça é aquecida depende da intensidade do campo eletromagnético induzido. A profundidade de penetração da têmpera depende da frequência utilizada, quanto maior a frequência menor penetração.

Os eixos estudados no presente trabalho são de suma importância nos equipamentos de transporte de grãos, pois, são fixados ao eixo dos helicoides que transportam os grãos, suportando o torque empregado pelo conjunto motor-eixo.

As ponteiras são temperadas por indução apenas na extremidade estriada, pois na montagem do equipamento ela vai conectada ao motor e é a região em que estão sujeitas a maior desgaste por contato.

Para a realização do presente trabalho, o material utilizado foi doado pela empresa Cofelma. Utilizou-se também as dependências do Laboratório de Metalurgia Física e o Laboratório de Soldagem ambos pertencentes ao departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Maria.

4.1.ETAPAS DO PROCESSO EXPERIMENTAL

Os dados a serem obtidos, dureza, metalografia e análise química serão utilizados para que seja feita uma análise micro estrutural para que se saiba os efeitos da têmpera superficial realizada pela empresa Cofelma nas ponteiras dos eixos estriados, doados pela própria empresa. Com os resultados obtidos nos ensaios deseja-se sugerir correção se necessário do processo de têmpera por indução eletromagnética realizados pela empresa.

1. Acompanhar o processo de têmpera por indução realizado na empresa cofelma, levantar os parâmetros utilizados pelo operador na máquina de indução para que se obtenha a têmpera superficial;
2. Ensaio de dureza superficial;
3. Cortes em duas amostras de ponteiras, ao longo da distância circunferencial, preparando as amostras para a metalografia;
4. Medição da dureza ao longo da distância diametral dos cortes, para que se avalie a profundidade da têmpera;
5. Realizar análise metalográfica, para obter com precisão o tipo de microestrutura obtida em cada seção cortada da ponteira de testes;
6. Analogia entre o tratamento térmico e o perfil de dureza ao longo do comprimento circunferencial e longitudinal do eixo;
7. Comparação entre os dois eixos cedidos pela empresa entre os dados obtidos com os ensaios no laboratório.

4.2.TÊMPERA POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Para o processo de tempera por indução eletromagnética em aços SAE 1045 tradicionalmente os valores da temperatura de austenitização está em torno de 850°C e para o revenido a temperatura do forno é ajustada em aproximadamente 300°C, o material deve ser mantido no forno a essa temperatura por mais ou menos 1h (uma hora). A máquina utilizada para aquecimento indutivo pela empresa Cofelma está apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Aquecedor indutivo Jamo, modelo utilizado par realizar têmpera por indução nos eixos estudados.

Fonte: Manual de manutenção aquecedor indutivo Jamo, 2013, pg. 3.

As especificações técnicas da máquina apresentada na Figura 28 estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas da máquina de aquecimento indutivo Jamo.

Especificações Técnicas		
Nº do Equipamento	**E-05644**	**Unidade**
Tensão do indutivo	380	V
Frequência	60	Hz
Potência do equipamento	60	kW
Temperatura de entrada da água	29	ºC
Temperatura de saída da água	33,4	ºC
Temperatura da água de resfriamento	< 29	ºC
PH água deionizada	7,0-9,0	pH
Vazão da água	20	m^3/h

Fonte: Próprio autor, 2019.

As configurações da máquina para a realização da têmpera estão apresentadas na Tabela 3 e foram as mesmas para as duas amostras de eixo estriado. As amostras usadas podem ser vistas na Figura 29 sendo que estas amostras foram usadas para os ensaios de tratamento térmico, dureza e metalografia.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na realização da têmpera nos eixos estudados.

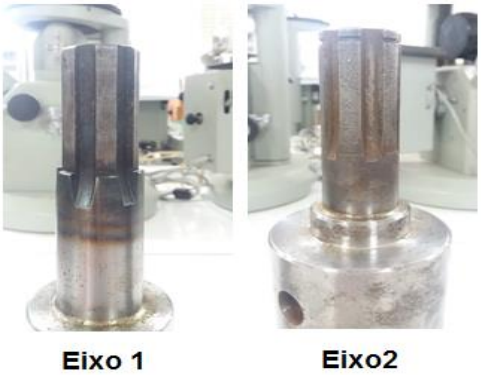
Amostra	**Potência (kW)**	**Frequência (Hz)**	**Temperatura (°C)**	**Tempo (s)**
Eixo 1				
	60	60	850	13
Eixo 2				

Fonte: Próprio autor, 2019.

Os eixos são fixados na máquina de aquecimento indutivo por meio de uma placa com castanhas semelhante à de um torno mecânico, após a fixação do eixo ele é introduzido no interior de uma bobina de indução e posto para girar com velocidade de aproximadamente 80

rpm, é acionado o sistema de aquecimento por indução, quando o eixo atingir a temperatura de austenitização o sistema de aquecimento é desligado, a bobina é removida e é acionado o sistema de resfriamento o eixo é refrigerado com água a temperatura ambiente. A Figura 30 mostra os passos do processo.

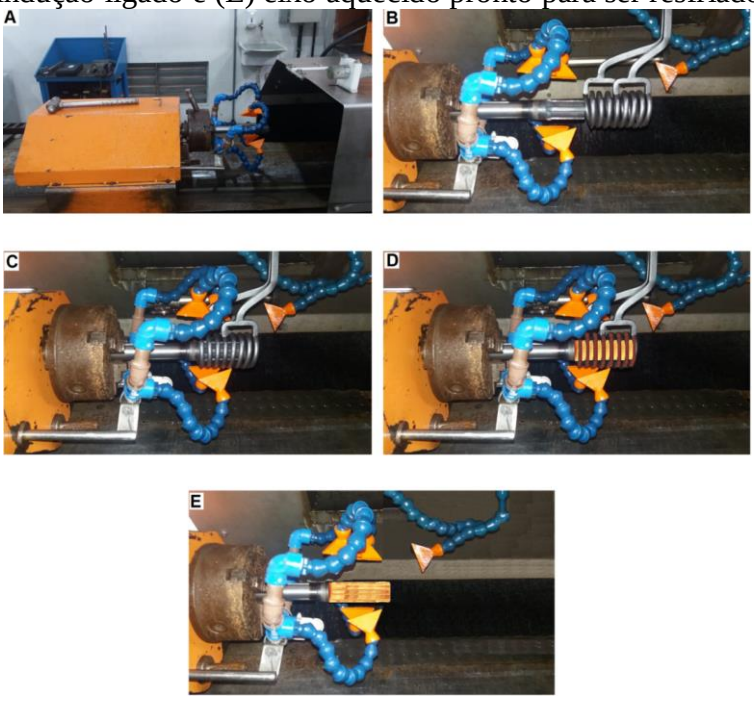
Figura 29 – Eixos usados como amostras para os ensaios de tratamento térmico, dureza e metalografia.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Os eixos passaram por um processo de revenimento para que fossem aliviadas as tensões. Para tal as peças foram levadas para um forno da empresa à 350 °C e mantidas lá por aproximadamente 1h (uma hora).

Figura 30 – (A) Eixo fixado na placa com castanhas do motor elétrico; (B) eixo ser inserido dentro da bobina; (C) eixo inserido na bobina, pronto para o aquecimento; (D) sistema de aquecimento por indução ligado e (E) eixo aquecido pronto para ser resfriado.



Fonte: Próprio autor, 2019.

4.3.ENSAIO DE DUREZA

Com a intenção de realizar um ensaio de dureza superficial com maior precisão será utilizado no presente trabalho o método Vickers (HV), os quais são apropriados para analisar as variações da dureza dos materiais, produzidas pelo tratamento térmico de indução. Os ensaios de dureza serão realizados no durômetro HPO-250 da VEB-WPM, Figura 31, com carga de 40kg, durante 15 segundos. As medições serão realizadas no sentido longitudinal do eixo na superfície das ranhuras, a cada 5 mm, a partir da ponta estriada do eixo. Serão realizados também testes de dureza pelo método Vickers para avaliar a dureza na região interna do material, na seção transversal do eixo realizando os ensaios a cada 2 mm, da borda em direção ao centro das amostras.

Figura 31 – Durômetro usado para os ensaios de Dureza Vickers.

Fonte: Próprio autor, 2019.

Para poder realizar os ensaios de dureza nas amostras foi preciso confeccionar dispositivos para acomodar a região estriada,

Com a dificuldade de realizar-se o ensaio devido a um ressalto na base lisa do eixo 1 e as ponteiras estriadas de ambos, fatores que tornavam difícil a fixação do eixo na base plana do durômetro o que tornaria o ensaio impreciso, desenvolveu-se dois suportes impressos em impressora 3D. Assim, pode-se realizar o ensaio com mais exatidão, facilitando a obtenção dos dados de tal forma que estes ficassem posicionadas imóveis durante a fase de aplicação da carga pelo indentador sobre a superfície a ser avaliada a dureza. A Figura 32 mostra os dispositivos feitos por manufatura aditiva, com impressora 3D.

Figura 32 – Dispositivos feitos por manufatura aditiva para posicionar as amostras.

Fonte: Próprio autor, 2019.

4.4. METALOGRAFIA

Será realizada a análise metalográfica dos eixos tratados termicamente para que se possa averiguar os efeitos da têmpera superficial nos eixos fabricados em aço SAE 1045, a formação de martensita, analisar a profundidade da têmpera na distância diametral para que se avalie a microestrutura no centro da peça.

Inicialmente, as amostras foram cortadas com o auxílio de uma máquina de corte com disco abrasivo com refrigeração a água para evitar alterações na microestrutura devido ao calor gerado no corte. O corte será feito de forma a separar amostras nas seções que desejasse analisar a estrutura dos materiais.

Após o processo de corte as amostras passaram por um lixamento com lixas d'água para que sua superfície fique lisa e uniforme, condições necessárias para análise no microscópio, utilizando-se granulometrias 80, 120, 220, 320, 420, 600 e 1200 realizando a rotação das amostras em 90º a cada troca de lixa. As lixas foram trocadas toda vez que não que não for possível ver as marcas deixada pela lixa anterior. Após o lixamento as amostras passaram por um processo de polimento em politriz (LP 9ª,Struers) com pano de polimento e pasta de diamante de granulometria 3µm e 1µm. Ao final do polimento as amostras devem apresentar uma superfície espelhada sem riscos ou manchas.

Depois de polida, as amostras passaram por um procedimento de ataque químico com Nital2% (2% de ácido nítrico – HNO3 em 98% de álcool etílico –C2H6O) durante 10 segundos. Após o procedimento de ataque químico as amostras foram limpas com água destilada e algodão umedecido com álcool etílico e foram secas com um jato de ar quente gerado por um secador.

Após esses procedimentos as amostras foram levadas ao microscópio onde foi possível analisar as microestruturas das mesmas.

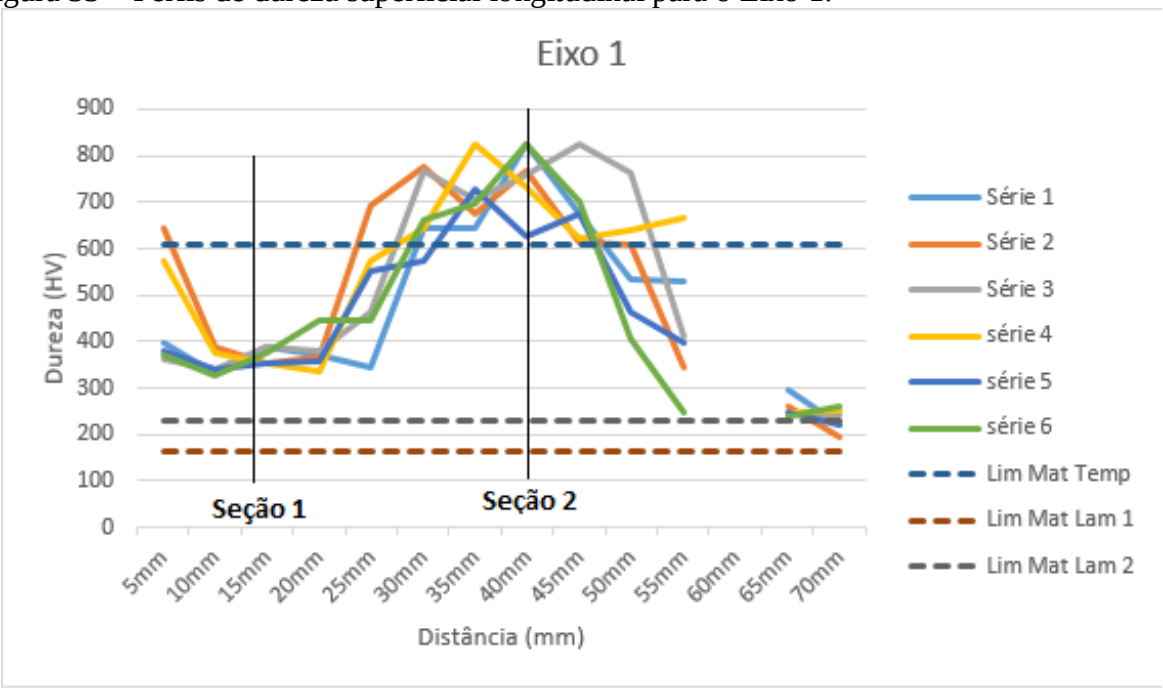
Para a análise microscópica utilizou-se um microscópio óptico OLYMPUS B221, o aumento médio usado para a análise das microestruturas dos materiais foi de 350 vezes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. ENSAIO DE DUREZA

Avaliou-se a dureza superficial das amostras tanto no sentido longitudinal com medições da dureza no sentido radial da seção transversal. O Eixo1 foi cortado em duas regiões, onde entendeu-se ser regiões críticas, entre 15 a 25mm, região com menor dureza e entre 40 a 45mm, região com dureza mais elevada. O resultado do ensaio de dureza superficial podem ser visualizado na Figura 33, juntamente com os gráficos do comportamento da dureza superficial no sentido longitudinal.

Figura 33 – Perfis de dureza superficial longitudinal para o Eixo 1.



Fonte: Próprio autor, 2019.

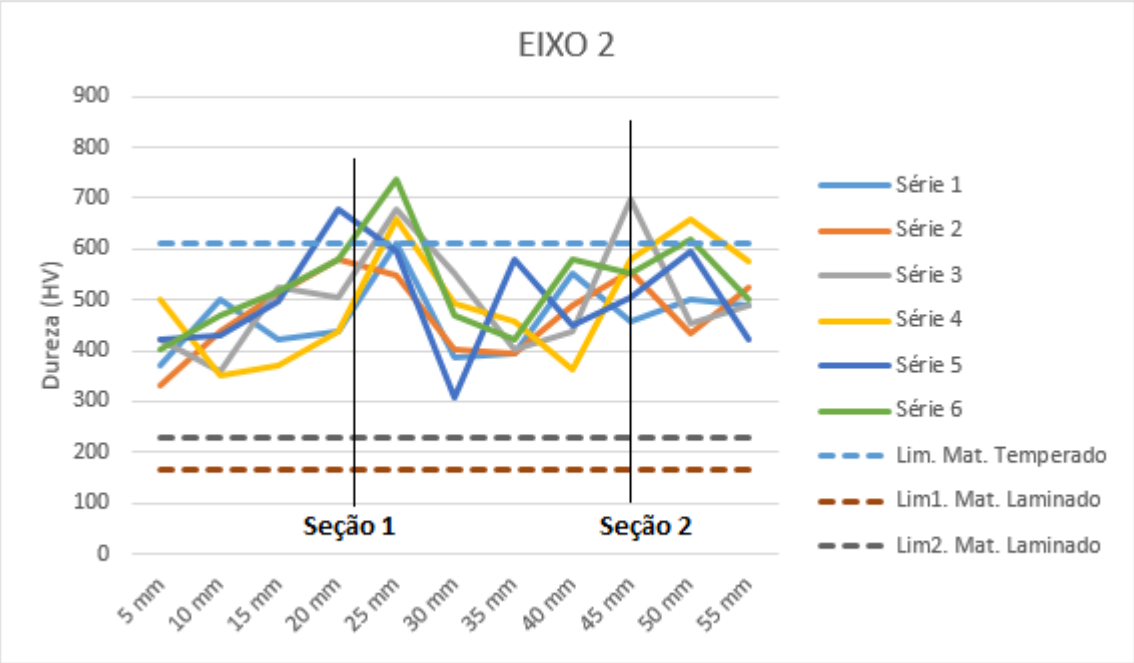
Analisando os perfis de dureza obtidos fica evidente que o processo de têmpera por indução não foi efetivo. Observa-se que na região da Seção 1, de influência da primeira Bobina (1), o aquecimento não foi suficiente para austenitizar a região da superfície e possibilitar a formação de martensita. Em virtude disso, um aquecimento abaixo de linha de transformação A_3 provoca um Recozimento ou Normalização parcial do material produzindo uma redução da dureza.

Na região de influência da segunda Bobina (2) o aquecimento foi efetivo e, pelos valores de dureza obtidos, percebe-se que os parâmetros e a velocidade de resfriamento foram capazes

de promover a formação de martensita com valores esperados para este material, aço SAE 1045. Na região de influência da Bobina (2) foram obtidos valores acima de 600HV valor mínimo esperado para este aço e num comprimento efetivo equivalente a região de abrangência da Bobina.

O Eixo 2 também foi analisado nos mesmos intervalos do Eixo 1 para comparar o comportamento nas mesmas regiões aquecidas pelas distintas bobinas existentes no equipamento de tempera por indução. A marcação dos pontos ensaiados e o ensaio de dureza superficial pode ser visualizado na Figura 34, juntamente com os gráficos das curvas de dureza.

Figura 34 – Perfis de dureza superficial longitudinal para o Eixo 2.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Analisando os perfis de dureza obtidos para este eixo fica evidente que o processo de têmpera por indução não foi efetivo. Observa se tanto para a região da Seção 1 como na região da Seção 2, regiões de influência das Bobinas (1) e (2) respectivamente, que o aquecimento só foi efetivo no ponto central do comprimento das bobinas e em alguns dos estriados o resfriamento não foi rápido o suficiente para formar martensita com dureza acima de 600 HV. O fato do aquecimento ter ocorrido apenas no centro do comprimento das bobinas mostra que o equipamento não está sendo corretamente regulado ou a configuração escolhida para as bobinas e o sistema de resfriamento não estão adequados.

Avaliando os dois procedimentos de ensaio observou-se que no Eixo 1, para a região da Seção 2 foi a única região onde pode-se considerar que a dureza nos vários pontos pré

determinados foi superior a 600 HV, mantendo uma uniformidade que se espera para um processo de tempera por indução em um eixo estriado.

O eixo 2 apresentou maior uniformidade na sua dureza ao longo de todo o eixo, porém em praticamente toda sua extensão apresentou dureza inferior a 600 HV esperada para o aço SAE 1045 temperado, fato ocorrido também devido a não uniformidade no resfriamento do eixo.

Os baixos valores de dureza superficial ao longo de várias espiras e a não uniformidade nos valores de dureza pode estar associada ao sistema de resfriamento que não é capaz de permitir a formação da martensita em materiais que tenham sido austenitisados. Esta falta de uniformidade no resfriamento deve estar atrelado a baixa velocidade de rotação do eixo a demora para iniciar o resfriamento devido a necessidade de remoção das bobinas e a posição do eixo, na horizontal associada a baixa temperabilidade do aço SAE 1045.

Os ensaios de dureza realizados na seção transversal dos eixos foi realizado com o intuito de comportamento da dureza da superfície externa para interior do eixo e determinar de penetração da têmpera na distância diametral.

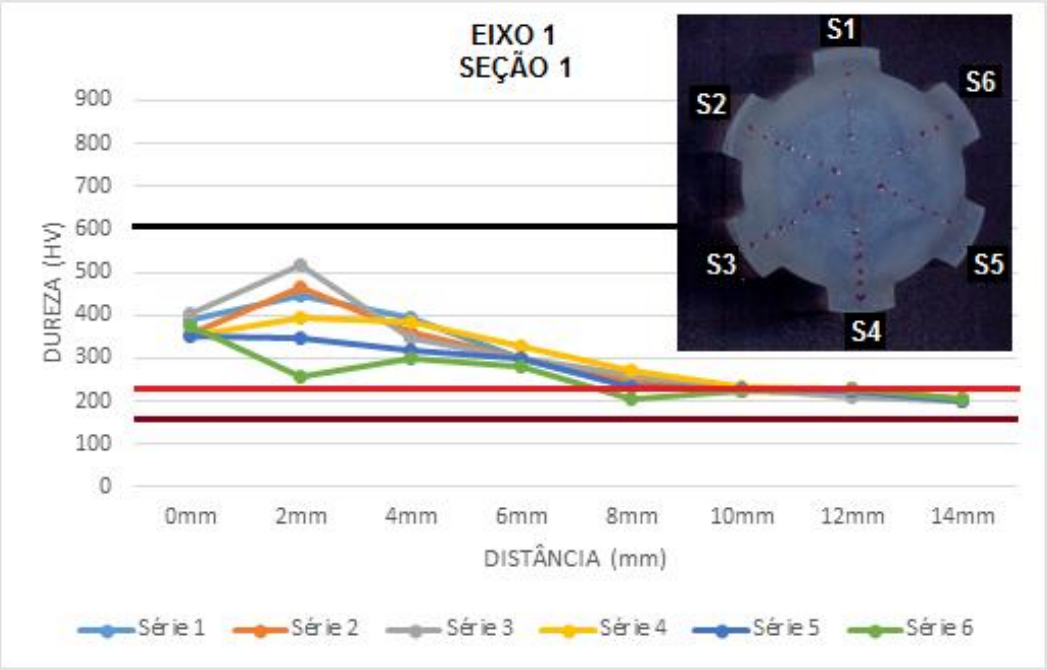
Os elevados valores de dureza medidos nas camadas mais externas das amostras são devido ao resfriamento rápido nas camadas mais superficiais, conforme mede-se a dureza no sentido do centro da amostra o material vai apresentando menor dureza até que por fim apresente uma dureza entre 165 e 232 HV, esperada para aços SAE 1045 laminado a quente. Essa variação de dureza ao longo da distância diametral da peça pode ser visualizada nas quatro amostras dos dois eixos, indo ao encontro da literatura.

Nas figuras 34 a 41 podem ser vistos os comportamento da dureza, da superfície para o centro das seções transversais escolhidas, Eixo 1, Seções 1 e 2 e Estrias 3 e 4 e Eixo 2, Seções 1 e 2 e Estrias 3 e 4 bem como a metalografia do material junto aos pontos de dureza para relacionar propriedade mecânica com a qualidade metalúrgica do material.

Analisando o comportamento da dureza para a seção transversal da Seção 1 do Eixo1, Figura 35, constata-se que, em função da não eficácia do aquecimento por indução os valores obtidos estão abaixo de 600 HV segundo Gerdau (2018) como sendo o valor da dureza da martensita para o aço com esse teor de carbono.

Os primeiros valores de dureza para cada perfil apresentam valores menores que os segundos pontos e isto ocorre porque após o resfriamento brusco o material ainda contém uma quantidade de calor que é conduzido para a superfície, provocando um abaixamento no valor da dureza da superfície da estria.

Figura 35 – Perfis de dureza seção transversal 1 para o Eixo 1.

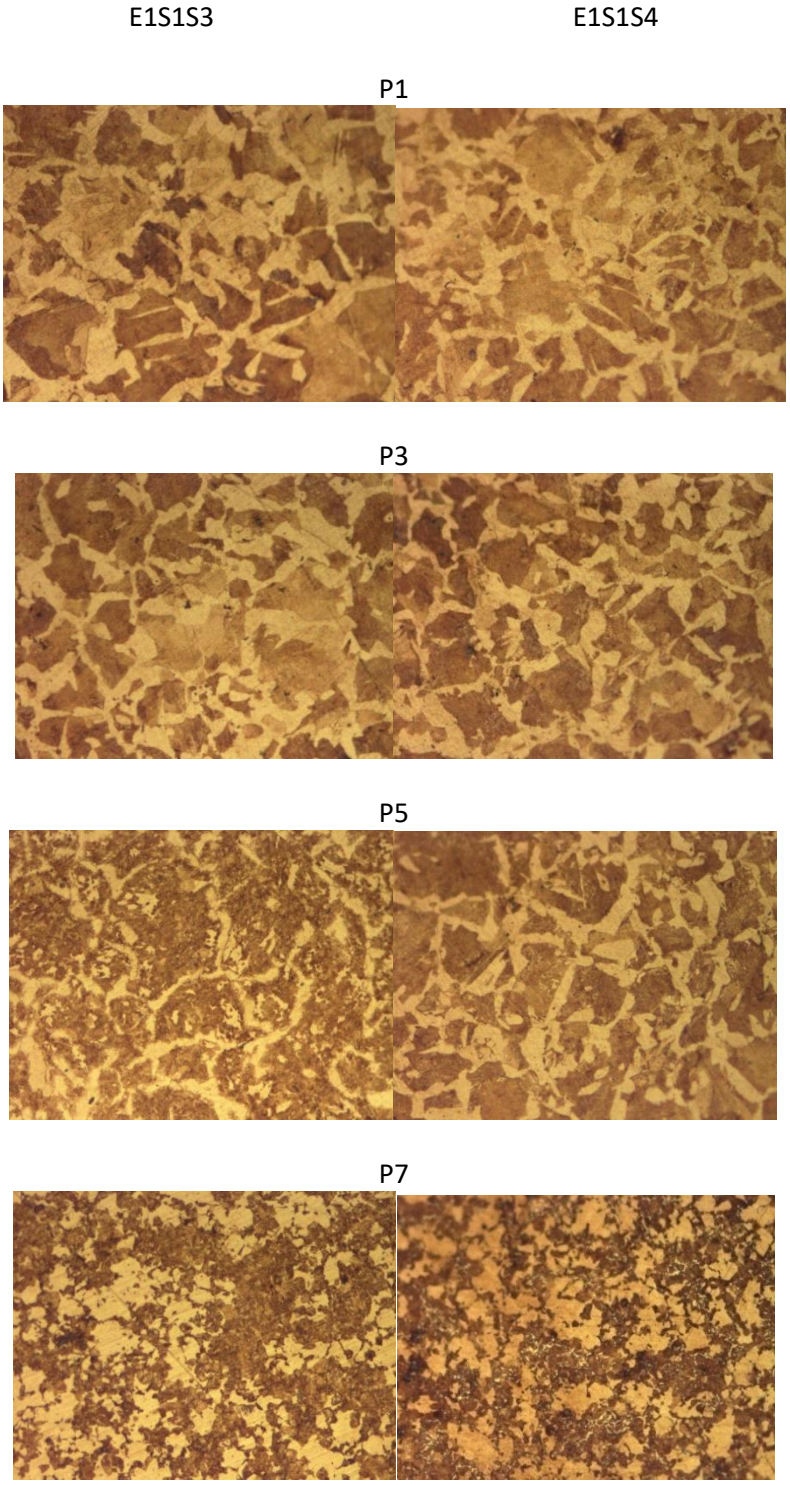


Fonte: Próprio autor, 2019.

A Figura 36 mostra as metalografias do material do eixo junto aos pontos de indentação de dureza. Foram escolhidas duas estrias, a 3 e a 4 e para estas estrias foram representados os pontos 1,3,5 e 7. Para esta seção, em todos os pontos, foi encontrada uma microestrutura composta de ferrita e perlita condizente com o aço em questão e com a não efetivação do tratamento de têmpera por indução.

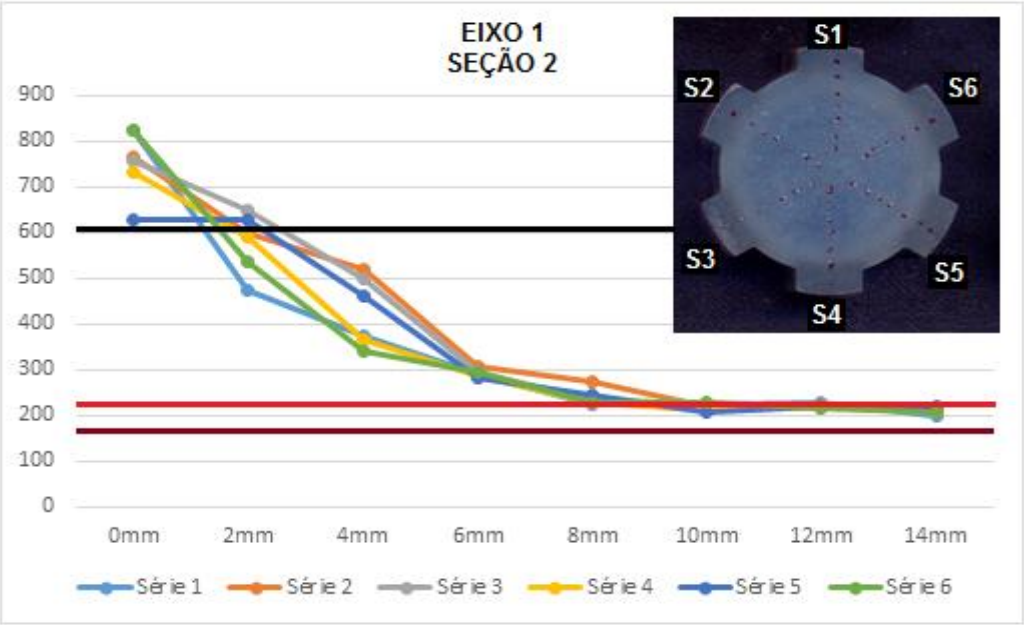
Analisando o comportamento da dureza para a seção transversal da Seção 2 do Eixo1, Figura 37, constata-se que, em função da eficácia do aquecimento por indução os valores obtidos estão acima de 600 HV valor este de acordo com Gerdau (2018) como sendo o valor da dureza da martensita para o aço com este teor de carbono. Os primeiros valores de dureza, da superfície das estrias, para cada perfil apresentam os maiores valores de dureza e isto ocorre porque o resfriamento brusco provoca o surgimento da estrutura martensítica, da superfície para o interior do material, numa profundidade proporcional a temperabilidade deste aço.

Figura 36 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 1 do Eixo1 para os pontos 1,3,5 e 7.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 37 – Perfis de dureza seção transversal 2 para o Eixo 1.

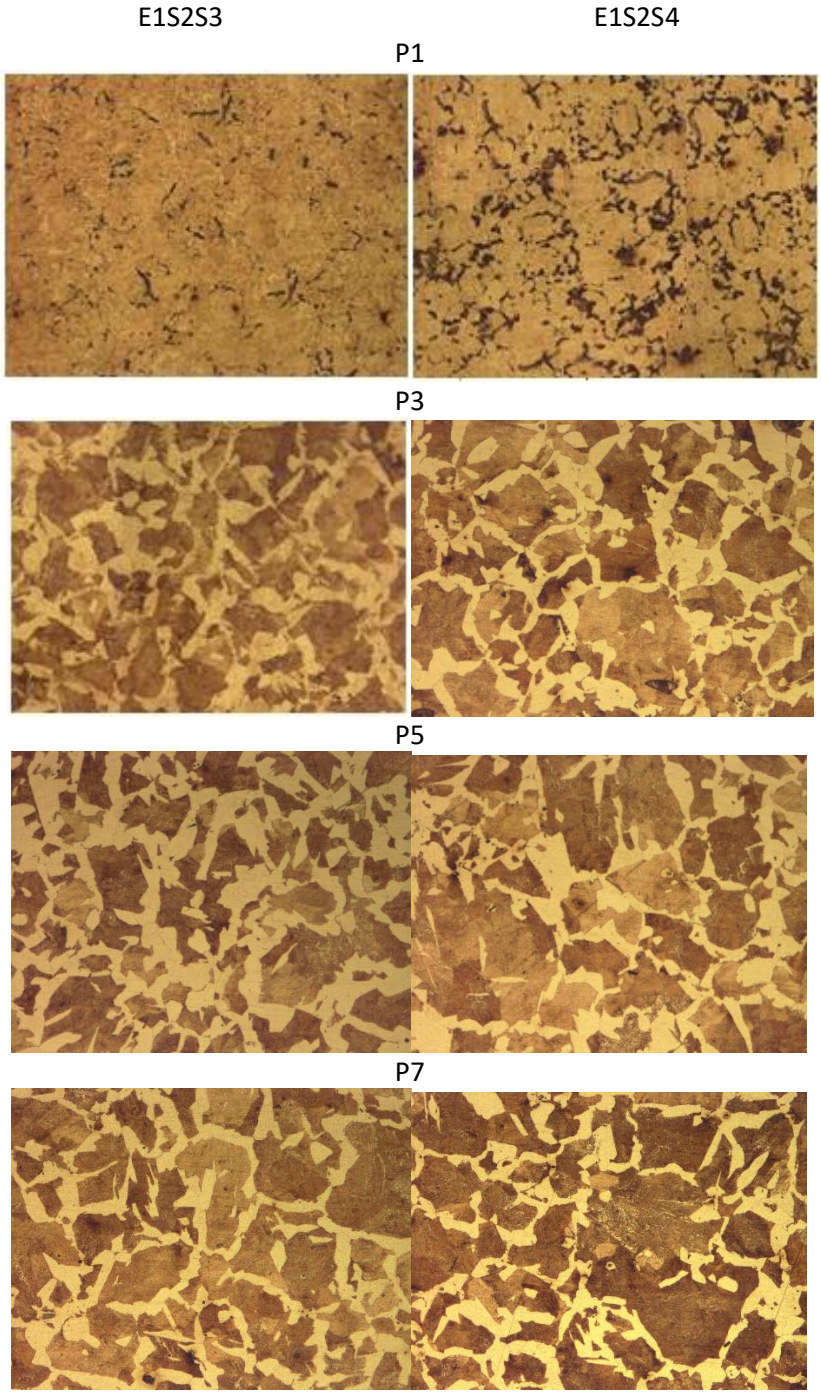


Fonte: Próprio autor, 2019.

A Figura 38 mostra as metalografias do material do eixo junto aos pontos de indentação de dureza. Foram escolhidas duas estrias, a 3 e a 4 e para estas estrias foram representados os pontos 1,3,5 e 7. Para esta seção foi encontrada uma microestrutura martensitica para o material junto ao primeiro ponto e nos demais pontos, a medida que aumenta a profundidade, a microestrutura passa a ser composta de ferrita e perlita condizente com o aço em questão e porque devido à baixa temperabilidade do aço a camada temperada atinge uma pequena profundidade.

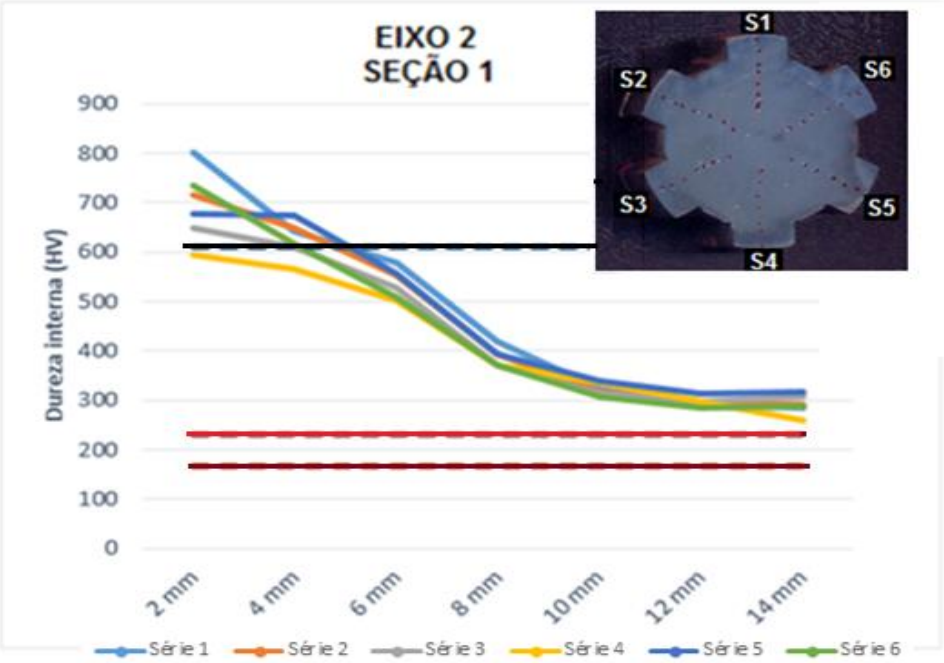
Analisando o comportamento da dureza para a seção transversal da Seção 1 do Eixo 2, Figura 39, constata-se que, em função da escolha da posição da seção no comprimento do eixo, coincidindo com uma região central da primeira bobina onde foi comprovada a eficácia do aquecimento por indução os valores obtidos estão acima de 600 HV valor este encontrado na literatura como sendo o valor da dureza da martensita para o aço com teor de carbono. Os primeiros valores de dureza, da superfície das estrias, para cada perfil apresentam os maiores valores de dureza e isto ocorre porque o resfriamento brusco provoca o surgimento da estrutura martensítica, da superfície para o interior do material, numa profundidade proporcional a temperabilidade deste aço.

Figura 38 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 2 do Eixo1 para os pontos 1,3,5 e 7.



Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 39 – Perfis de dureza seção transversal 1 para o Eixo 2.

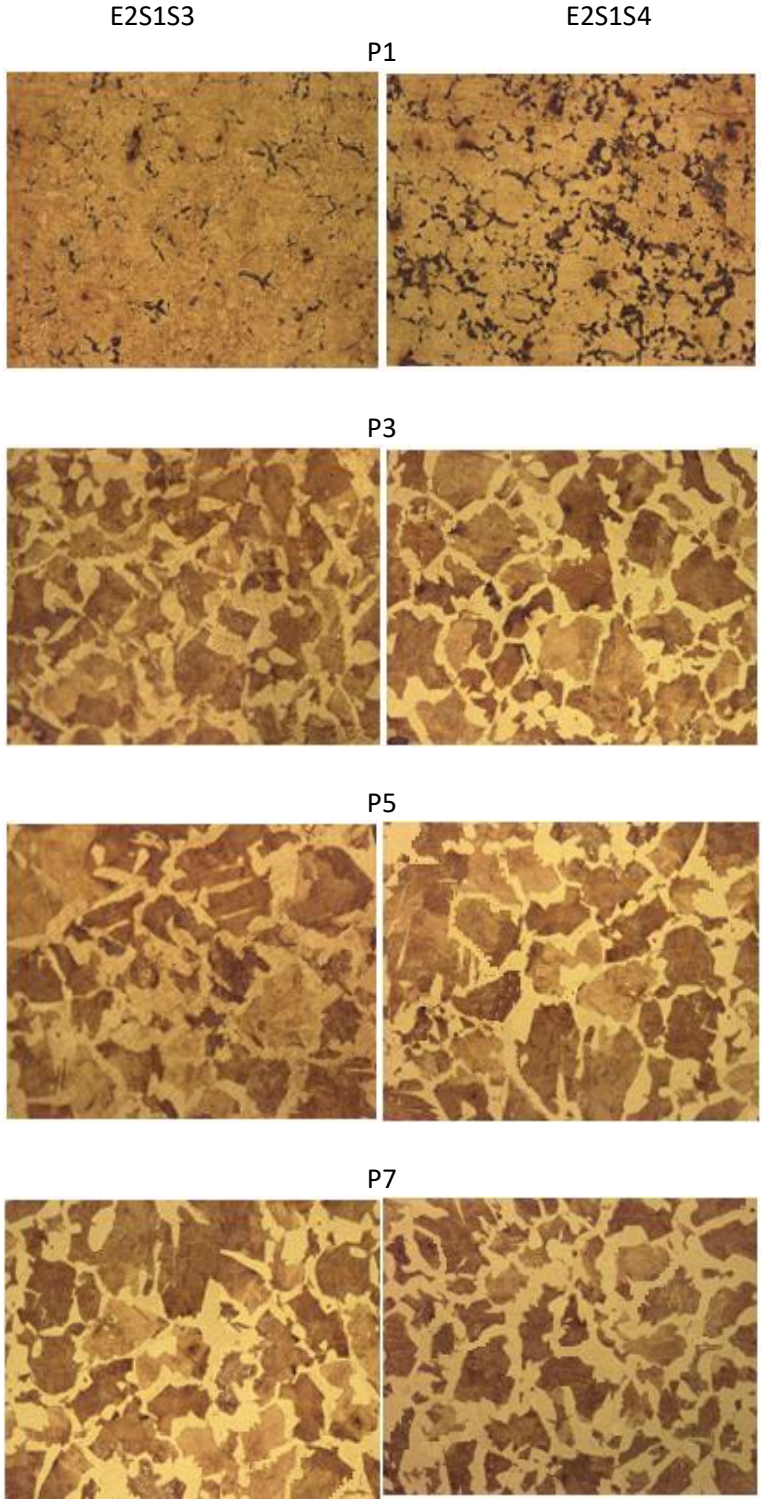


Fonte: Próprio autor, 2019.

A Figura 40 mostra as metalografias do material do eixo junto aos pontos de indentação de dureza. Foram escolhidas duas estrias, a 3 e a 4 e para estas estrias foram representados os pontos 1,3,5 e 7. Para esta seção foi encontrada uma microestrutura martensítica para o material junto ao primeiro ponto e nos demais pontos, a medida que aumenta a profundidade, a microestrutura passa a ser composta de ferrita e perlita condizente com o aço em questão e porque, devido à baixa temperabilidade do aço, a camada temperada atinge uma pequena profundidade.

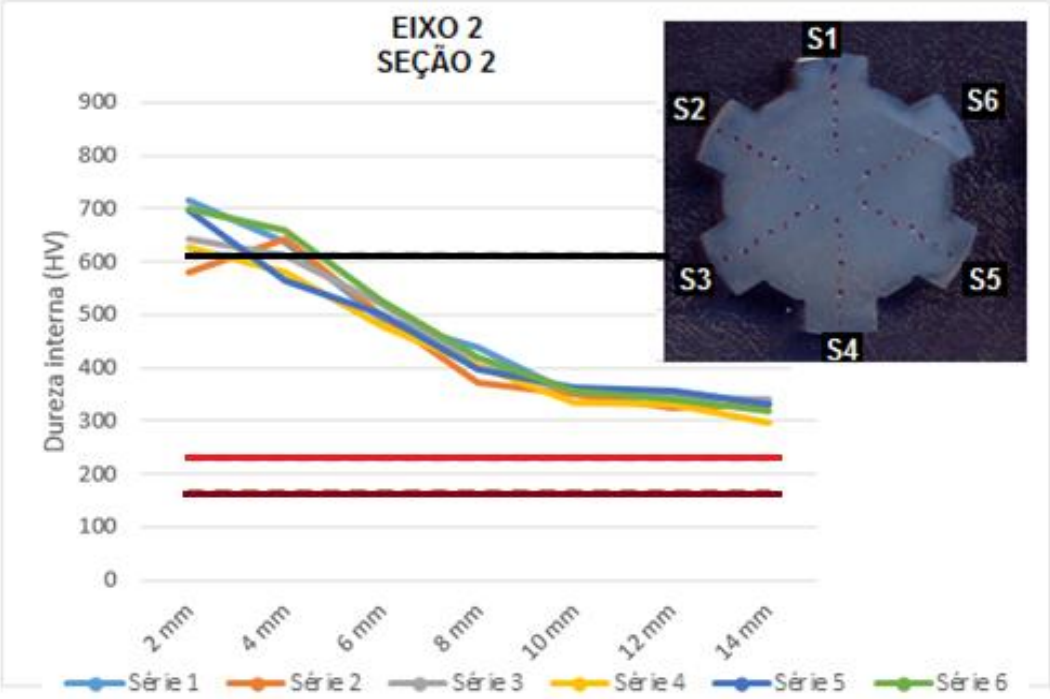
Analisando o comportamento da dureza para a seção transversal da Seção 2 do Eixo 2, Figura 41, constata-se que, em função da escolha da posição da seção no comprimento do eixo, coincidindo com uma região central da segunda bobina onde foi comprovada a eficácia do aquecimento por indução os valores obtidos estão acima de 600 HV. Os primeiros valores de dureza, da superfície das estrias, para cada perfil apresentam os maiores valores de dureza e isto ocorre porque o resfriamento brusco provoca o surgimento da estrutura martensítica, da superfície para o interior do material, numa profundidade proporcional a temperabilidade deste aço.

Figura 40 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 1 do Eixo 2 para os pontos 1,3,5 e 7.



Fonte: Próprio autor, 2019.

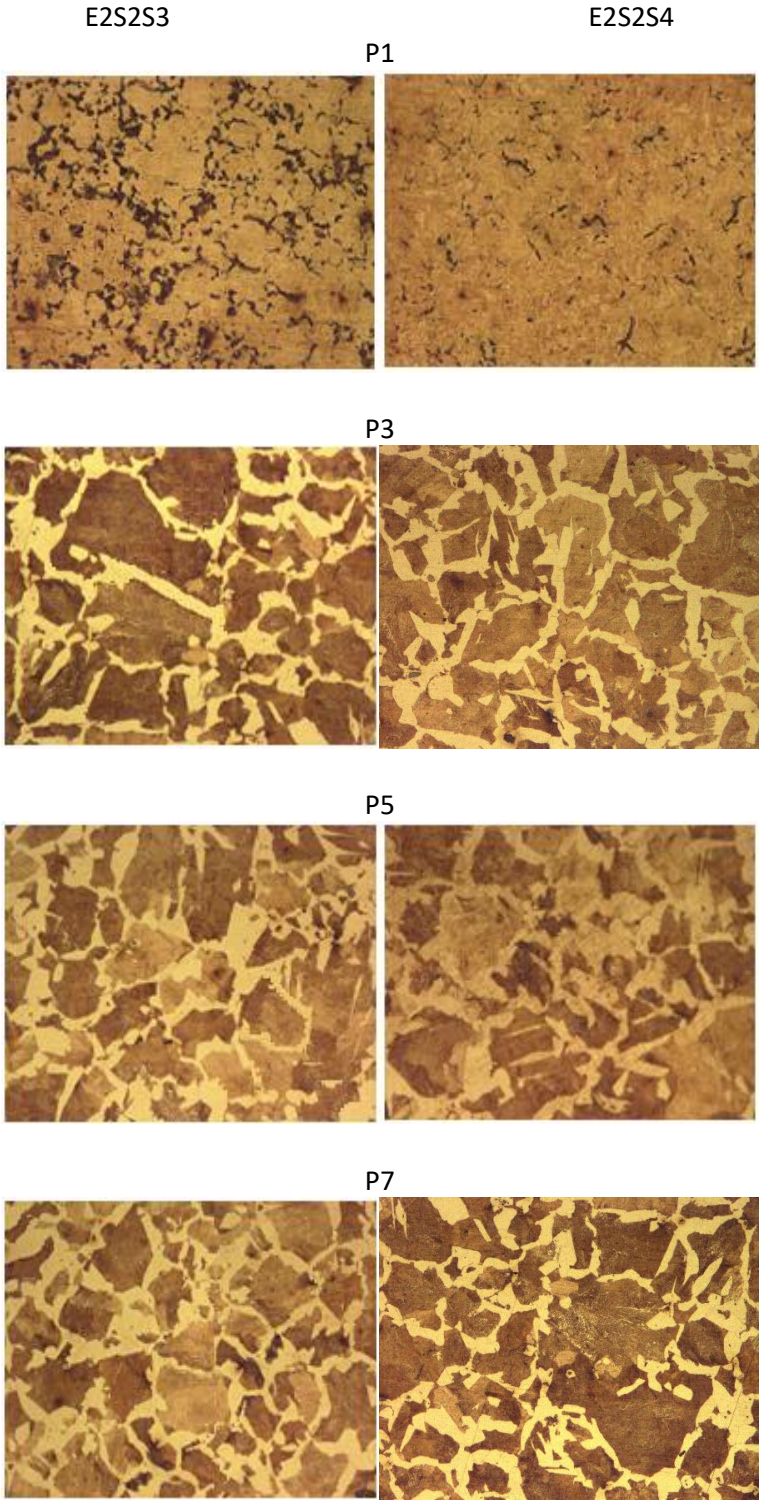
Figura 41 – Perfis de dureza seção transversal 2 para o Eixo 2 (40 mm da extremidade do eixo).



Fonte: Próprio autor, 2019.

A Figura 42, por fim, mostra as metalografias do material do eixo junto aos pontos de indentação de dureza. Foram escolhidas duas estrias, a 3 e a 4 e para estas estrias foram representados os pontos 1,3,5 e 7. Para esta seção foi encontrada uma microestrutura martensítica para o material junto ao primeiro ponto e nos demais pontos, a medida que aumenta a profundidade, a microestrutura passa a ser composta de ferrita e perlita condizente com o aço em questão e porque, devido à baixa temperabilidade do aço, a camada temperada atinge uma pequena profundidade.

Figura 42 – Metalografias das regiões das indentações de dureza para as Estrias 3 e 4 da Seção transversal 2 do Eixo 2 para os pontos 1,3,5 e 7.



Fonte: Próprio autor, 2019.

6. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios realizados nas amostras dos Eixos 1 e 2 fornecidos pela Metalúrgica Cofelma, foi possível avaliar através de perfiis de dureza superficial longitudinal e perfis radial em seções transversais e de avaliações das microestruturas do material estas regiõe pode-se constatar que:

Baseado nos perfis de dureza superficial longitudinais constatou-se que o uso de bobinas de indução associadas em série não se mostraram eficientes para o tratamento térmico por indução visto que para os parâmetros usados somente o segundo segmento do Eixo 1 foi obtido uma camada temperada por indução. Nos outros três segmentos a camada temperada não efetiva sendo que para o Eixo 2 só ocorreu a têmpera sobre as linhas avaliadas como Seção1 e 2.

Devido a baixa temperabilidade do aço SAE 1045 o sistema de resfriamento empregado no equipamento não se tornou eficiente pois o fluido de resfriamento só deve ser ligado após a remoção das bobinas que envolvem o eixo, tempo demasiado para que se obtenha a formação de martensita.

Analisando os diferentes valores de durezas para distintas estrias de um mesmo eixo fica evidente que que a velocidade de rotação dos eixos durante o processo de resfriamento é muito baixo propiciando as estrias que primeiro tem contato com o líquido refrigerante tenham valores mais elevados de dureza.

Constata-se que a posição horizontal adotada para os eixos dificulta o resfriamento homogêneo da seção circular do eixos, propiciando que as estrias do eixo possam ter valores distintos de dureza, reforçando o comportamento encontrado pelo uso de baixa velocidade de rotação.

Assim constata-se que alterações profundas devem ser feitas no equipamento para que se tenha a possibilidade de obter o controle e a repetitividade do processo de tempera por indução.

Dentre as recomendações estão: o posicionamento dos eixos na vertical, o sistema de refrigeração ser feito por um anel que se desloca junto com a bobina de aquecimento de baixo para cima; uma velocidade de rotação acima dos 70 rpm utilizados pela empresa para que se possa garantir uniformidade no resfriamento, deve ser usado apenas uma bobina com duas ou três espiras alterações recomendadas pelas fabricantes de máquinas de têmpera por indução Jammo, Emag do Brasil Ltda e EDF Induction Ltda.

Como susgestão para trabalhos futuros indica-se realizar as alterações sugeridas, baseada nas fabricantes de máquinas de indução eletromagnética. Realizar o processo de

têmpera nos eixos após as alterações efetuar novos ensaios de durezas e análise metalográfica para avaliar as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos eixos. Comprovando assim a eficácia das alterações sugeridas.

REFERÊNCIAS

ALBATHERM. **Princípios físicos do aquecimento indutivo**. Disponível em: <http://www.albatherm.com.br/informativo_principios-fisicos-do-aquecimento-indutivo.php>. Acesso em: 5 de set. 2018.

AÇOESPECIAL. **Aço SAE 1045 e suas propriedades**. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-sae-1045-propriedades.php>. Acesso em: 15 de set. 2018.

AÇOSROMAN. **SAE 1045 – Aço para construção mecânica**. Disponível em: <https://aco.com.br/aco/sae-1045-aco-carbono-especial/>. Acesso em 4 de out. 2018.

AMBRELL. **Funcionamento da bobina de indução**. Disponível em: <http://cdn2.hubspot.net/hubfs/508263/Ambrell_PDFs/411-0169-18.pdf>. Acessado em: 7 de out. 2018.

CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. 2ª ed. ABM, São Paulo, 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. Vol. 3. 2ª ed. McGraw Hill, 1986.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª ed. Ampliada e revisada. Associação Brasileira de Metais, ABM, São Paulo, 1990.

DE SOUZA, S. A. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. Edgard Blucher, 2014.

EMAG DO BRASIL. **Sistemas de endurecimento por indução**. Dieponível em: < https://www.emag.com/machines/hardening-systems.html>. Acesso em: 12 de set. 2018.

EDF INDUCTION. **Sistema para todos trabalhos de têmpera**. Disponível em: < https://www.efd-induction.com/pt-br/induction-heating-equipment/hardline-heattreatment-machine>. Acessado em: 10 de set. 2018.

GERDAU. **Aço para construção mecânica – 1045**. Disponível em: <https://www.gerdau.com/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/Gerdau%20-%201045.pdf>. Acesso em 1 de out. 2018.

GOLDENSTEIN, Hélio (2002). «**Bainita nos aços**». In: Bott, Ivani; Rios, Paulo; Paranhos, Ronaldo. Aços : perspectivas para os próximos 10 anos. Rio de Janeiro: s.n. ISBN 8590296512. OCLC 55937690.

JAMO, **Têmpera em eixos**. Disponível em: < https://www.jamo.ind.br/tempera-em-eixos-pinos-e-buchas-flanges-engrenagens-etc-eixo-duplo-150kw>. Acessado em: 10 de Set. 2018.

KRAUSS, G. (1990). **Steels: Heat Treatment and Processing principles**. Colorado: ASM International, 2ª ed. 1990.

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.

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.

SEMIATIN, S. L.; ZINN, S. **Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications**. 1ª ed. ASM International, 1988.

S. Zinn, **Elements of Induction Heating**: Design, Control, and Applications, ASM International, Metals Park, OH, 1988.

TOTTEN, G. **Steel Heat Treatment**. 2ª edição, Portland State University, 2006.