

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**AVALIAÇÃO DE CURVAS DE DUREZA DE AÇOS  
TEMPERADOS POR INDUÇÃO**

**Kenneth Roger Rodrigues da Silva**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2022**

# **AVALIAÇÃO DE CURVAS DE DUREZA DE AÇOS TEMPERADOS POR INDUÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Francisco Gil Coury

São Carlos-SP  
2022



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Kenneth Roger Rodrigues da Silva

**RA:** 744397

**TÍTULO:** Comparativo das curvas de dureza de aços carbono tratados termicamente pelo método de aquecimento por indução

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Francisco Gil Coury

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 22/04/2022, 14h

### BANCA – NOTAS:

|                                 | Monografia | Defesa |
|---------------------------------|------------|--------|
| Prof. Dr. Francisco Gil Coury   | 5.0        | 8.0    |
| Prof. Dr. José Eduardo Spinelli | 5.0        | 8.0    |
| <b>Média</b>                    | 6.5        |        |

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Francisco Gil Coury e Prof. Dr. José Eduardo Spinelli e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

  
Prof. Dr. Francisco Gil Coury

## **AGRADECIMENTO**

À minha mãe Valderez Aparecida Caurim que me apoiou em todos os momentos, me dando forças e torcendo pelas minhas conquistas ao longo da minha vida.

A todos os meus familiares que acreditaram e me apoiaram em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Gil Coury por ter dedicado parte de seu tempo livre dividindo comigo sua experiência e conhecimento, agregando uma excelente orientação no meu projeto.

À Universidade Federal de São Carlos / UFSCar, pela oportunidade de realização do curso de Engenharia de Materiais.

A todos os professores que contribuíram para o meu desenvolvimento técnico e profissional.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## RESUMO

De acordo com a necessidade das melhorias nas propriedades mecânicas, principalmente superficiais, devido ao processo de desgaste de peças em contato, a utilização do processo de tratamento térmico superficial via aquecimento por indução, vem sendo amplamente utilizado nas indústrias. Este processo abordado no presente trabalho, teve como intuito empregar elevada dureza superficial de peças metálicas, sendo os materiais de estudo os aços. Algumas variáveis do processo definem a camada de dureza a ser atingida na peça, dentre estas, a frequência utilizada na bobina eletroímã e a composição do aço. O objetivo do trabalho foi desenvolver uma metodologia simples para estimar o perfil esperado para curvas de dureza de aços endurecidos por têmpera superficial por indução processados de forma semelhante. Será abordada a definição dos parâmetros de processo, como no caso da densidade de potência, onde verificam-se valores tabelados com concordância a frequência e profundidade de penetração, sendo utilizado estes dados para cálculo de potência de entrada e de saída na bobina. Através do auxílio do software online “Heat Treatment Guide” e materiais encontrados na literatura, foram realizadas análises das curvas de resfriamento, da temperatura de têmpera, e do comportamento das curvas de dureza ao longo das espessuras das peças. Com isso, mostrou-se que o aço SAE 1020 que apresentaria dureza superficial após tratamento térmico de aproximadamente 350 Hv, é muito ineficiente ao processo de têmpera superficial devido ao seu baixo teor de elementos de liga. Verificou-se que o processo é muito mais eficiente para o aço SAE 1045 que devido a uma maior concentração de elementos de liga (principalmente carbono) favoreceram a formação da camada superficial endurecida, com dureza de aproximadamente 750 Hv, apresentando o núcleo mais dúctil (aproximadamente 230 Hv) do que os demais aços. O aço SAE 4340 possui alta temperabilidade, com a camada superficial atingindo dureza de aproximadamente 680 Hv. Os aços AISI S1 e AISI O1 apresentariam durezas superficiais de 780 Hv e 880 Hv, e seus núcleos com durezas aproximadas ao do aço SAE 4340 (455 Hv e 335 Hv, respectivamente), e a temperabilidade entre ambos é diferente, devido aos elementos de liga presentes nas suas composições, que ocasionam numa melhor capacidade do aço em formar a fase martensítica.

**Palavras-chave:** Aquecimento por indução. Temperabilidade. Curvas de dureza. Têmpera superficial. Revenimento.

## ABSTRACT

Surface heat treatment processes via induction heating has been widely used in industries when wear resistance is needed. This process is analyzed in the present work. Some process variables define the hardness layer to be reached in the part such as the frequency used in the electromagnet coil and the steel composition. The objective of this work was to develop a simple methodology to estimate the expected profile for hardness curves of induction hardened steels processed in a similar way. The definition of process parameters will be discussed, as in the case of power density, where tabulated values are verified according to frequency and penetration depth, using these data to calculate input and output power in the coil. Using the online software "Heat Treatment Guide" and materials found in the literature, analyzes of the cooling curves, the tempering temperature, and the behavior of the hardness curves along the thickness of the pieces were performed. Thus, it was shown that the SAE 1020 steel, which would present a surface hardness after heat treatment of approximately 350 Hv, is very inefficient in the surface quenching process due to its low content of alloying elements. It was found that the process is much more efficient for SAE 1045 steel, which due to a higher concentration of alloying elements (mainly carbon) favored the formation of a hardened surface layer, with a hardness of approximately 750 Hv, presenting a more ductile core (approximately 230 Hv) than other steels. SAE 4340 steel has high hardenability, with the surface layer reaching a hardness of approximately 680 Hv. The AISI S1 and AISI O1 steels would present surface hardness of 780 Hv and 880 Hv, and their cores with hardness close to that of the SAE 4340 steel (455 Hv and 335 Hv, respectively), and the hardenability between the two is different, due to the elements of alloy present in their compositions, which result in a better ability of the steel to form the martensitic phase.

**Keyword:** Induction heating. Hardenability. Hardness curves. Surface temper. Tempering

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de uma bobina de indução.....  | 04 |
| Figura 2 - Perdas de calor pelo método de convecção e radiação no processo de aquecimento por indução.....              | 06 |
| Figura 3 - Condutividade térmica e calor específico de um aço carbono 1042 e um aço inox, em função da temperatura..... | 07 |
| Figura 4 - Frequência e profundidade de penetração.....   | 09 |
| Figura 5 - Curva típica de dureza de um material que sofreu o processo de aquecimento por indução.....                  | 14 |
| Figura 6 - Curva de dureza x temperatura de revenimento.....  | 18 |
| Figura 7 - Curva de dureza X tempo de resfriamento.....   | 19 |
| Figura 8 - Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 1020.....   | 20 |
| Figura 9 - Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 1045.....   | 20 |
| Figura 10 - Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 4340.....  | 21 |
| Figura 11 - Curva de dureza ao longo da espessura da peça de um aço SAE 1045.....                                       | 23 |
| Figura 12 - Curva de dureza ao longo da espessura da peça de um aço SAE 4340.....                                       | 23 |
| Figura 13 - Estimativa e comparativo das curvas de durezas dos aços pela profundidade de penetração.....                | 24 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Definição da frequência de acordo com a profundidade de penetração da camada a ser endurecida.....                  | 10 |
| Tabela 2 - Estimativa de densidade de potência requerida para o aquecimento superficial da peça de trabalho.....               | 11 |
| Tabela 3 - Fontes de energia com suas respectivas perdas no sistema.....   | 11 |
| Tabela 4 - Valores de profundidade de penetração, frequência, potência e velocidade “scan” para o aquecimento por indução..... | 12 |
| Tabela 5 - Aços e suas respectivas composições químicas.....   | 16 |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</b>   | <b>01</b> |
| 1.1 INTRODUÇÃO.....   | 01        |
| 1.2 OBJETIVOS.....  | 02        |
| <b>2. ABORDAGEM TEÓRICA.....</b>  | <b>03</b> |
| 2.1 CONCEITOS SOBRE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO.....                                | 03        |
| 2.2 RELAÇÃO DO FENÔMENO DE TRANSPORTE DE CALOR COM O<br>TRATAMENTO TÉRMICO..... | 05        |
| 2.3 EFEITO SUPERFICIAL E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE<br>CORRENTE.....         | 07        |
| 2.4 POTÊNCIA REQUERIDA.....   | 10        |
| 2.5 CONCEITOS SOBRE TÊMPERA E REVENIMENTO.....                                  | 13        |
| 2.6 COMPORTAMENTO DA CURVA DE DUREZA AO LONGO DA ESPESSURA<br>DA PEÇA.....      | 13        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>  | <b>17</b> |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ANÁLISES GRÁFICAS.....                             | 17        |
| 4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DO COMPORTAMENTO DA CURVA DE<br>DUREZA.....          | 22        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>27</b> |

# 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1 INTRODUÇÃO

O crescente uso tecnológico de materiais capazes de apresentar elevadas propriedades mecânicas, principalmente superficiais, devido ao atrito produzido entre peças metálicas, acarretou no desenvolvimento de técnicas que melhorassem essas características dos materiais metálicos já utilizados no mercado. A técnica abordada neste trabalho é referente ao tratamento térmico superficial de aços pelo método de aquecimento por indução magnética, que tem como característica, em muitos casos, ocorrer a elevação da dureza de determinado material em regiões e profundidades específicas, sendo dificultoso para o método convencional de aquecimento (por fornos). A velocidade, precisão e controle do método empregado também se destacam como benefícios pela escolha do processo, visando em muitos casos uma maior produtividade e controle de qualidade da peça final. <sup>[1,2]</sup>

O tratamento térmico tem por finalidade modificar as propriedades físicas e mecânicas do material metálico, modificando sua estrutura ao alterar algumas das variáveis do processo, como reaquecimento e resfriamento da peça de forma controlada, gerando assim no aumento acentuado de algumas das propriedades mecânicas requeridas, como a dureza superficial aqui citado. Porém, as modificações estruturais também geram na perda de outras propriedades, como a ductilidade do material, por isso é necessário um balanço e estudo sobre o comportamento final do material submetido ao processo. <sup>[3]</sup>

Neste trabalho foram abordados comportamentos, estimativas e comparativos das curvas de dureza de alguns aços, verificando a influência exercida pelas diferentes composições químicas no processo de aquecimento por indução, assim como abordagens teóricas do funcionamento do processo aplicado, sendo verificado a profundidade de penetração do campo magnético do material em estudo, a curva da taxa de resfriamento, temperabilidade, densidade de potência, potência da bobina, frequência de operação e equacionamento relativo a transferência de calor. Verificou-se que a baixa concentração de carbono no aço SAE 1020 impacta diretamente na ineficiência do método aplicado, e que os outros tipos de aços apresentam melhor temperabilidade devido às concentrações maiores de elementos de liga em suas composições.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente trabalho demonstrou um comparativo do perfil de dureza entre diferentes tipos de aços, tratados termicamente por têmpera por indução, onde a interferência da concentração de carbono (C) e outros elementos de liga, acarretaram numa maior temperabilidade do aço.

## 2 ABORDAGEM TEÓRICA

### 2.1 CONCEITOS SOBRE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

O processo de aquecimento por indução é utilizado em materiais metálicos ou materiais condutores como processo de tratamento térmico, aquecimento anterior a usinagem, soldagem, fusão, dentre outros processos, sendo este método muito eficaz devido a combinação de velocidade, precisão, consistência, controle e eficiência energética. [2]

Este método físico de indução eletromagnética é conhecido desde 1831, onde Michael Faraday através de um experimento com duas bobinas de fio e um anel de ferro, teve a percepção do campo magnético gerado pela passagem de corrente através das bobinas. Mas foi no período da Segunda Guerra Mundial que ganhou grande destaque, devido a necessidade do avanço tecnológico na época, para endurecimento rápido e confiável de componentes metálicos dos motores e tanques, tratamentos térmicos em componentes de armaduras e munições. Porém, atualmente, este método tem ganhado novamente espaço no desenvolvimento da tecnologia, devido sua precisão e controle, garantindo assim melhorias no controle de qualidade no processo de peças metálicas. [2]

Existem dois métodos de aquecimento por indução, o aquecimento com corrente turbilhonar, que ocorre a partir das perdas de  $I^2R$  da resistividade do material analisado e o aquecimento por histerese, onde ocorre a produção de energia no interior do material devido a mudança de polaridade magnética da peça, sendo gerada através do campo magnético imposto pela bobina. [1,2,3,4]

O sistema de aquecimento por indução recebe a energia da rede em sua fonte de alimentação e a converte em corrente alternada de alta frequência, transmitindo assim para a bobina eletroímã. A corrente alternada transmitida na bobina, cria um campo eletromagnético em seu interior, onde ao ser introduzida a peça de trabalho, geralmente metálica, gera o aquecimento deste material. Este processo de aquecimento do metal, é promovido devido as correntes de Foucault gerada no interior do metal, onde a resistência provoca o aquecimento. As correntes de Foucault, são correntes elétricas induzidas no interior de materiais condutores pela mudança do campo magnético devido à lei de indução de Faraday, sendo este campo magnético proporcional a corrente elétrica do condutor, onde quanto mais alterações geradas no

campo magnético e sua velocidade, impactam diretamente nas correntes desenvolvidas e maiores os campos produzidos. [1,2,3]

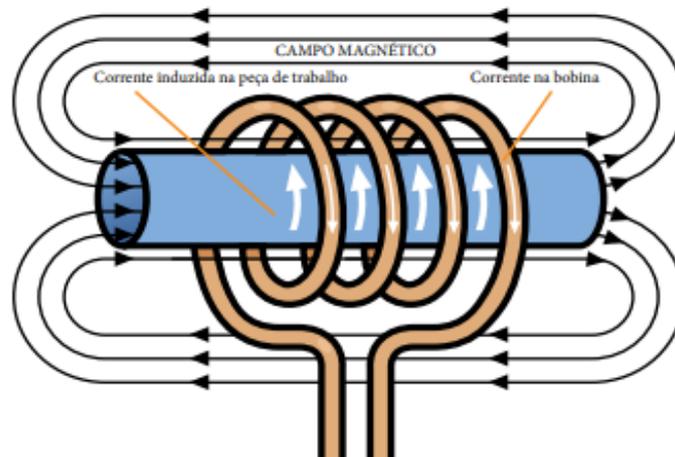


Figura 1: Esquema de uma bobina de indução. [11]

A figura 1 demonstra um exemplo típico de sistema de aquecimento por indução, onde pode-se verificar a bobina eletroímã, geralmente feita de cobre, ao redor de uma peça cilíndrica (caso apenas da figura). As correntes de Foucault circulam contra a resistividade elétrica do material, gerando assim o aquecimento localizado. O aquecimento gerado é referido como “efeito Joule”, subjugando a primeira lei de Joule, onde a peça submetida a tal efeito pode ser magnética e não magnética. [1,3,4] Como pode-se analisar, a bobina aquece o material condutor sem a necessidade de estar em contato físico com o mesmo, gerando o aquecimento apenas pelo campo magnético desenvolvido em seu interior. Caso seja necessário aquecer um material não condutor, como o plástico, se faz necessário a utilização do aquecimento de um suscepter condutor que irá transferir posteriormente o calor para o material de interesse.

As principais vantagens da utilização deste método de aquecimento, são: a capacidade de aquecer determinada região de interesse sem atingir outras áreas de uma peça, como engrenagens e rolamentos; a superioridade da velocidade de aumento de calor comparado ao método comum utilizando fornos e o controle dos parâmetros do processo, tomando-se como exemplo a temperatura; entre outros. [10]

## 2.2 RELAÇÃO DO FENÔMENO DE TRANSPORTE DE CALOR COM O TRATAMENTO TÉRMICO

Através dos meios comuns de aquecimento, pode-se definir a propagação de calor de três modos: o método condutivo, o convectivo e por radiação.

O método condutivo ocorre por transferência de calor, de uma região de maior temperatura para outra de menor temperatura, como no caso de uma barra metálica, a transferência ocorre através da agitação das partículas que transfere energia para as partículas vizinhas, e assim sendo transferido o calor ao longo da barra. Relacionando a esse fato, define-se então que quanto maior a condutividade térmica de um material, a propagação de energia se dá de forma mais intensa para todo o corpo do material. Sendo assim, tem-se uma relação do fluxo de calor condutivo com a queda de temperatura ao longo da distância percorrida no material. Através da relação, tem-se que:

$$q_{\text{cond}} = - \lambda \Delta T$$

onde,  $\lambda$  é a constante de proporcionalidade que multiplica o gradiente de temperatura, sendo essa relação diretamente proporcional a condutividade do material. <sup>[1]</sup>

O método convectivo, ocorre através de fluidos, ou seja, em gases, líquidos e vapores. Neste sistema, verificamos a diferença de densidades dos fluidos, realizando assim a transferência de temperatura. Verifica-se através da equação abaixo:

$$q_{\text{conv}} = \alpha (T_s - T_a);$$

onde:

$q_{\text{conv}}$  - Fluxo de calor por convecção, ( $\text{w}/\text{m}^2$ );

$\alpha$  - Coeficiente de transferência de calor por convecção, ( $\text{w}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );

$T_s$  - Temperatura da superfície ( $^\circ\text{C}$ );

$T_a$  - Temperatura do ambiente ( $^\circ\text{C}$ ).

E por fim, o método por radiação térmica, que ocorre através de ondas eletromagnéticas, sendo possível sua propagação até mesmo no vácuo, ou seja, diferente dos casos anteriores este método não precisa de um meio material para se propagar. A relação matemática é definida através da lei de Stefan-Boltzmann, onde afirma que a taxa de transferência de calor promovido pela radiação, é proporcional ao coeficiente de perda de radiação  $C_s$ . Pode-se observar nas equações abaixo:

$$C_s = \sigma_s \cdot \epsilon_1$$

Onde:

$\sigma_s$  - constante de Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ .

$\epsilon_1$  – emissividade do metal.

$$q_{\text{rad.}} = C_s(T_s^4 - T_a^4)$$

onde:

$q_{\text{rad.}}$  - fluxo de calor por radiação.

$C_s$  - coeficiente de perda de radiação;

$T_s$  - temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_a$  - temperatura do ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ). [1]

No processo de aquecimento por indução, os métodos de transferência de calor por convecção e radiação, são os responsáveis pela perda de calor da peça de trabalho com o ambiente, diminuindo a eficiência da bobina eletroímã. [1]

A figura 2 apresenta as perdas pelo método de transferência de calor por convecção e radiação da peça de trabalho, com o aumento da temperatura. [1]

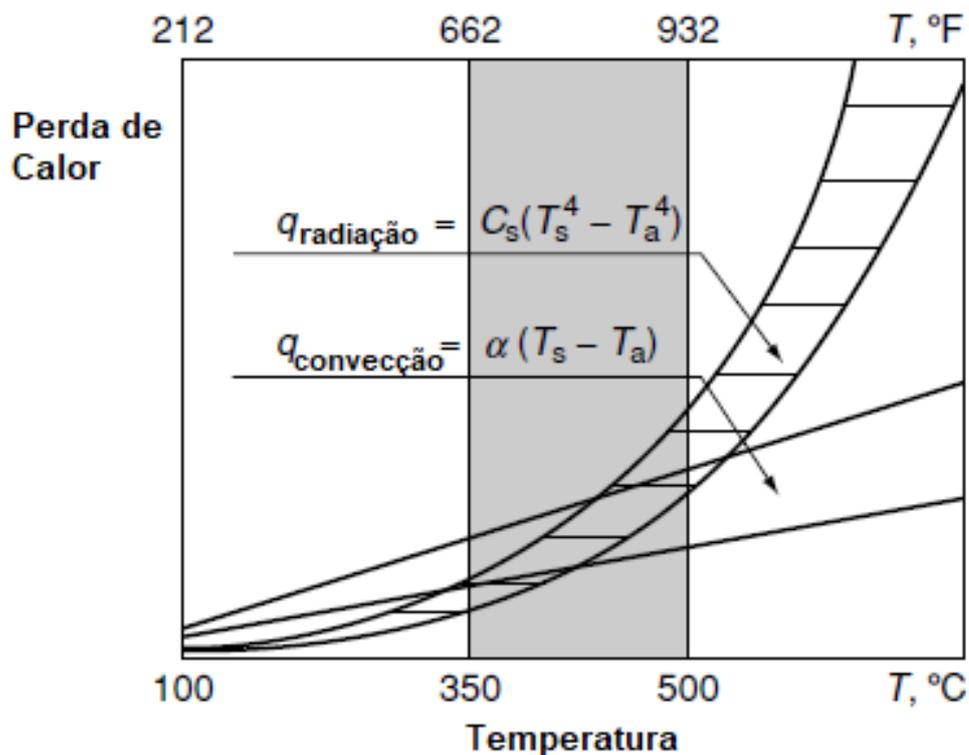


Figura 2: Perdas de calor pelo método de convecção e radiação no processo de aquecimento por indução. [1]

Pode-se verificar que com o aumento significativo da temperatura, resulta numa

intensa diminuição da eficiência da bobina eletroímã, devido a intensa transferência de calor pelos métodos mencionados, gerando a perda de calor da peça de trabalho. O calor específico (C) de um dado material, relaciona a quantidade necessária de energia que o material deve absorver para atingir uma dada temperatura requerida, e com isso, verifica-se que quanto maior seu valor, maior a potência requerida para se atingir determinada temperatura.

Observa-se, na figura 3, alguns valores típicos relacionados a condutividade térmica e calor específico de um aço 1042 e de um aço inox, sendo ambos em função da temperatura.

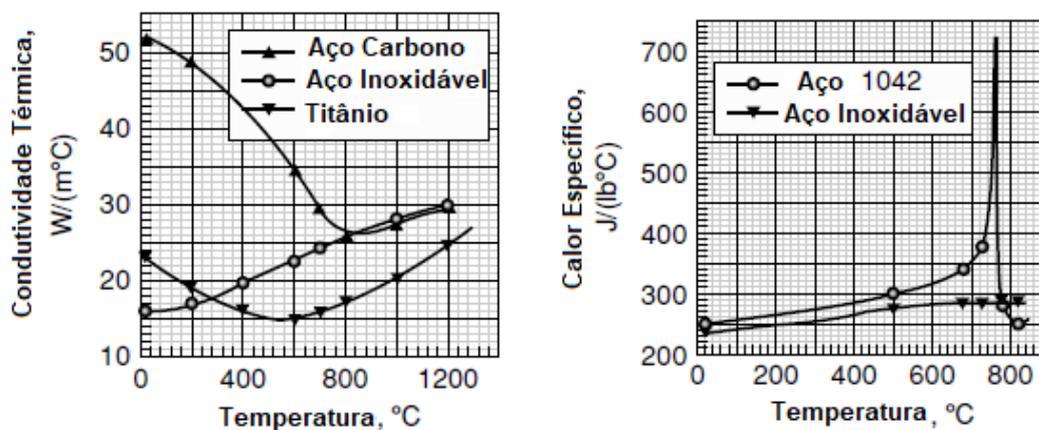


Figura 3: Condutividade térmica e calor específico de um aço carbono 1042 e um aço inox, em função da temperatura.<sup>[1]</sup>

### 2.3 EFEITO SUPERFICIAL E PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DE CORRENTE

Ao passo que a corrente alternada tem sua passagem pelo condutor, o efeito da sua distribuição não ocorre de forma uniforme. A corrente terá seu pico máximo de atuação na superfície do condutor (concentrações de correntes de Foucault na camada superficial da peça), o que gera o “efeito pelicular”, ocasionando na queda das correntes induzidas ao longo do centro da peça.

Através desse “efeito pelicular”, tem-se uma variação de atuação das correntes na peça de trabalho, onde cerca de 86% da corrente induzida concentra-se na superfície do condutor, sendo determinada essa região como profundidade de penetração ( $\delta$ ). A profundidade de penetração da corrente na peça está diretamente associada à frequência utilizada no sistema de corrente alternada, sendo de forma inversamente

proporcional, ou seja, quanto maior a frequência utilizada menor a profundidade de penetração. Há também outros fatores que influenciam na profundidade de penetração, como a permeabilidade magnética relativa e a resistividade elétrica do material. [1,4]

A relação apresentada a seguir da profundidade de penetração da corrente numa determinada peça sob tratamento, é estipulada através do limite ao qual a densidade de corrente atinge 37% do valor atribuído na superfície [5]. Verifica-se através da equação abaixo. [4]

Sendo:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu r \cdot f}}$$

onde:

$\delta$  - profundidade de penetração, (m);

$\rho$  - resistividade elétrica do material metálico, ( $\Omega \cdot m$ );

$f$  - frequência do campo magnético alternado da bobina, (Hz);

$\mu_r$  - permeabilidade magnética relativa do material ( $\mu = \mu_r \mu_0$ , onde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m no vácuo).

Para os aços em específico, acima do ponto Curie pode-se considerar que a profundidade de penetração da corrente, dada em milímetro é estabelecida pela equação a seguir [5].

Sendo:

$$\delta = \sqrt{\frac{500}{f}}$$

Com isso, nessa espessura de atuação da corrente é estabelecido uma relação da profundidade de penetração com a frequência, onde é despendido 87% de toda energia térmica na região, e como já mencionada, a profundidade de penetração diminui com o aumento da frequência. Verificamos essa representação na figura 4.[5]

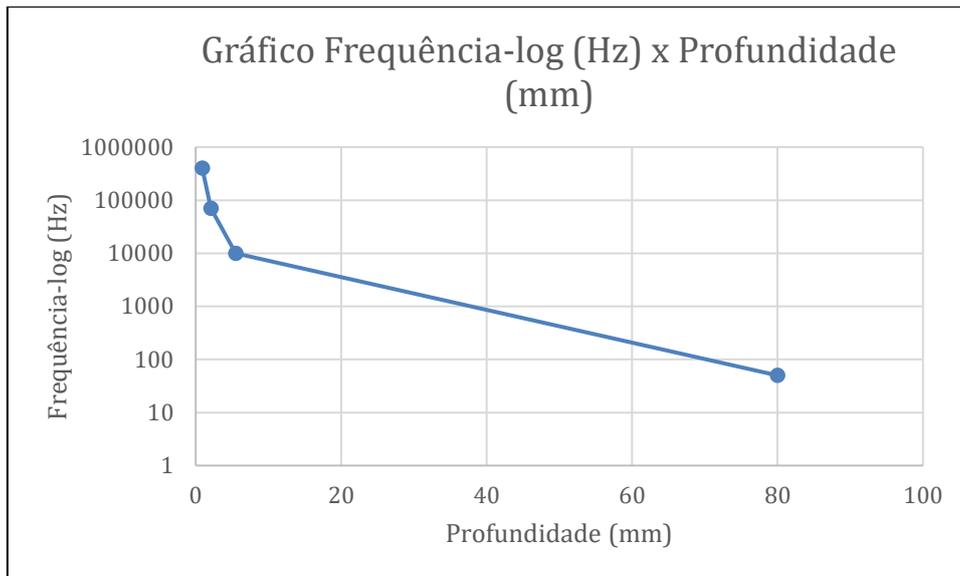


Figura 4: Frequência e profundidade de penetração.<sup>[5]</sup>

É necessário que se conheça a geometria e dimensões da peça a ser submetida a esse aquecimento, pois em uma dada peça com dimensões pequenas e frequência de operação baixa, pode-se obter como resultado a anulação da corrente induzida na peça de trabalho, pois a corrente também fluirá na camada interna da peça gerando o cancelamento do efeito da corrente no material. Sendo assim, se faz necessário a escolha da frequência de operação evitando tal efeito, podendo ser parametrizado que a frequência utilizada em função da profundidade de penetração não exceda  $\frac{1}{4}$  da espessura da peça de trabalho. <sup>[1,10]</sup>

Na tabela 1, observa-se alguns exemplos sugeridos de frequência de operação relacionada com a profundidade de penetração requerida da peça de trabalho. Onde encontra-se sugerido como “Bom”, é definido como a frequência de maior eficiência, “Razoável” sendo a frequência com menor eficiência, e “Pobre” a frequência inadequada para o processo de aquecimento da peça de trabalho.

Tabela 1 – Definição da frequência de acordo com a profundidade de penetração da camada a ser endurecida. [10]

| Profundidade da Camada |               | Diâmetro      |            | Frequência |          |          |        |         |
|------------------------|---------------|---------------|------------|------------|----------|----------|--------|---------|
| mm                     | in.           | mm            | in.        | 1 kHz      | 3 kHz    | 10 kHz   | 50 kHz | 450 kHz |
| 0,38-1,27              | 0,015 - 0,050 | 6,35 - 25,4   | 1/4 - 1    | ...        | ...      | ...      | ...    | Bom     |
| 1,29-2,54              | 0,051 - 0,100 | 11,11 - 15,88 | 7/16 - 5/8 | ...        | ...      | Razoável | Bom    | Bom     |
|                        |               | 15,88 - 25,4  | 5/8 - 1    | ...        | ...      | Bom      | Bom    | Bom     |
|                        |               | 25,4 - 50,8   | 1 - 2      | ...        | Razoável | Bom      | Bom    | Bom     |
|                        |               | >50,8         | >2         | Razoável   | Bom      | Bom      | Bom    | Pobre   |
| 2,56 - 5,08            | 0,101 - 0,200 | 19,05 - 50,8  | 1 - 2      | ...        | Razoável | Bom      | Bom    | Pobre   |
|                        |               | 50,8 - 101,6  | 2 - 4      | Razoável   | ...      | Bom      | Bom    | Pobre   |
|                        |               | >101,6        | >4         | Bom        | Bom      | Razoável | Bom    | Pobre   |
| 5,08 - 10,0            | 0,200 - 0,400 | >8            | >2         | Bom        | Bom      | Razoável | Pobre  | Pobre   |

Estipulando uma frequência de operação entre 10 kHz a 2,0 MHz, observa-se uma profundidade de endurecimento entre 0,25mm a 1,5mm, conduzindo a peça numa melhor resistência superficial tanto ao desgaste quanto a fadiga. Para exigências maiores de profundidade de penetração, pode-se trabalhar com frequências menores entre 10 kHz a 1,0 kHz, conferindo até 6,4mm de profundidade. A relação da distribuição de dureza superficial da peça está associada a temperabilidade do aço que, por sua vez, está relacionada à sua capacidade de endurecimento durante o processo de resfriamento brusco, ou seja, é a capacidade de formação da estrutura martensita numa dada profundidade da peça de trabalho. [8,9]

## 2.4 POTÊNCIA REQUERIDA

Após analisar e entender a relação da frequência com a profundidade de penetração da corrente no material de trabalho, deve-se verificar a importância conjunta na seleção da potência utilizada no sistema de aquecimento, para o processo de endurecimento superficial da peça.

Para selecionar a potência adequada no processo de austenitização da peça, inicialmente, deve-se ter em mente a relação do calor específico do material e dos fenômenos de transporte de calor envolvido no sistema, onde, ao se verificar que o aquecimento da peça será apenas superficial, haverá troca simultânea de calor da peça com sua massa interna no processo de condução de calor, como também a troca térmica da peça com o ambiente, ocasionando na dissipação de energia térmica. Ou seja, a energia fornecida deve suprir as perdas ocorridas durante o

processo de aquecimento, levando a superfície do material a temperatura de austenitização. Sendo assim, há anos têm-se utilizado tabelas com estimativas de densidades de potência, relacionados com a profundidade de corrente e frequência de operação, conforme descrito na tabela 2.

Tabela 2 – Estimativa de densidade de potência requerida para o aquecimento superficial da peça de trabalho. [10]

| Frequência<br>kHz | Camada endurecida<br>mm                  in. |             | Entrada           |              |             | Entrada                 |              |             |
|-------------------|--|-------------|-------------------|--------------|-------------|-------------------------|--------------|-------------|
|                   |  |             | W/mm <sup>2</sup> |              |             | kW/in. <sup>2</sup> (e) |              |             |
|                   |  |             | Baixa<br>(b)      | Ótima<br>(c) | Alta<br>(d) | Baixa<br>(b)            | Ótima<br>(c) | Alta<br>(d) |
| 500               | 0.38–1.14                                    | 0.015–0.045 | 10.9              | 15.5         | 18.6        | 7                       | 10           | 12          |
|                   | 1.14–2.29                                    | 0.045–0.090 | 4.7               | 7.8          | 12.4        | 3                       | 5            | 8           |
| 10                | 1.52–2.29                                    | 0.060–0.090 | 12.4              | 15.5         | 24.8        | 8                       | 10           | 16          |
|                   | 2.29–3.05                                    | 0.090–0.120 | 7.8               | 15.5         | 23.3        | 5                       | 10           | 15          |
|                   | 3.05–4.06                                    | 0.120–0.160 | 7.8               | 15.5         | 21.7        | 5                       | 10           | 14          |
| 3                 | 2.29–3.05                                    | 0.090–0.120 | 15.5              | 23.3         | 26.35       | 10                      | 15           | 17          |
|                   | 3.05–4.06                                    | 0.120–0.160 | 7.8               | 21.7         | 24.8        | 5                       | 14           | 16          |
|                   | 4.06–5.08                                    | 0.160–0.200 | 7.8               | 15.5         | 21.7        | 5                       | 10           | 14          |
| 1                 | 5.08–7.11                                    | 0.200–0.280 | 7.8               | 15.5         | 18.6        | 5                       | 10           | 12          |
|                   | 7.11–9.14                                    | 0.280–0.360 | 7.8               | 15.5         | 18.6        | 5                       | 10           | 12          |

Partindo do pressuposto da densidade de potência estimada fornecida, deve-se ter conhecimento do tipo de fonte de energia utilizada e sua eficiência, para a verificação de perdas para o processo de aquecimento. Na tabela 3, é possível verificar dois tipos de fontes de energia usuais, via “solid state” e por rádio frequência, com seus respectivos valores de eficiência. [10]

Tabela 3 – Fontes de energia com suas respectivas perdas no sistema. [10]

| Fonte de Energia | Frequência | Eficiência Terminal, % | Eficiência do Transformador de saída, % | Eficiência da bobina indutora, % | Eficiência do sistema, % |
|------------------|------------|------------------------|---|----------------------------------|--------------------------|
| Solid state      | 10 kHz     | 90                     | 75                                      | 75                               | 51                       |
| Radio frequency  | 450 kHz    | 65                     | 60                                      | 85                               | 33                       |

Source: Ref 7

Para um melhor entendimento das variáveis aplicadas na determinação da potência fornecida pelo sistema, para exemplificar, foi utilizado como parâmetro a profundidade de penetração de 1mm, e utilizando a tabela 1 fornecida, define-se a frequência utilizada em 450 kHz. Ao passo que a profundidade de penetração e frequência foram pré-estabelecidas, utilizando a tabela 2, verifica-se que a densidade de potência equivale a 15,5 W.mm<sup>-2</sup>.

Para definir a potência necessária de saída da bobina, deve-se utilizar a relação da

densidade de potência da bobina com a área na qual a bobina abrange, como representado pela equação:

$P_{\text{saída bobina}} = \text{densidade de potência} \times \text{área abrangida pela bobina.}$

Portanto, definindo uma possível área de abrangência de 1000 mm<sup>2</sup>, tem-se:

$P_{\text{saída bobina}} = 15,5 \text{ W.mm}^{-2} \times 1000 \text{ mm}^2 = 15,5\text{kW.}$

Partindo do valor calculado da potência de saída da bobina, deve-se estipular o valor da potência de entrada, tendo conhecimento do equipamento e tipo de fonte utilizada e sua eficiência. Ao simular que o equipamento utilizado seja via rádio frequência, com eficiência de 33%, a potência de entrada calculada é de aproximadamente 46,97 kW.

Determinados os valores de profundidade de penetração, frequência e potência da bobina, deve-se ter conhecimento da velocidade em que a bobina percorrerá pela região de aquecimento do material. Essa velocidade é designada como “scan”, e os valores correspondentes de acordo com as outras variáveis, também se encontram definidos em tabelas, como no caso da tabela 4:

Tabela 4 – Valores de profundidade de penetração, frequência, potência e velocidade “scan” para o aquecimento por indução. [10]

|           | Profundidade de penetração |       | Densidade de potência |                     | Tempo de aquec. de disparo único, s | Taxa de varredura, progressiva |       |
|-----------|----------------------------|-------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------|
|           | mm                         | in.   | kW/cm <sup>2</sup>    | kW/in. <sup>2</sup> |                                     | mm/s                           | in./s |
| 3 kHz     | 3.80                       | 0.150 | 1.55                  | 10                  | 4.0                                 | 0.60                           | 0.25  |
|           |                            |       | 3.10                  | 20                  | 2.0                                 | 1.25                           | 0.50  |
| 10/25 kHz | 2.50                       | 0.100 | 1.55                  | 10                  | 2.5                                 | 1.00                           | 0.40  |
|           |                            | 0.100 | 3.10                  | 20                  | 1.0                                 | 2.50                           | 1.00  |
| 450 kHz   | 1.25                       | 0.050 | 3.10                  | 5                   | 4.0                                 | 0.50                           | 0.20  |
|           |                            |       | 1.55                  | 10                  | 2.0                                 | 1.25                           | 0.50  |

Verificando os valores de velocidade “scan”, e de acordo com o exemplo citado anteriormente, utilizando a tabela 4, determina-se que a velocidade em que a bobina percorrerá ao longo da peça de trabalho, é em torno de 1,25 mm/s. [10]

## **2.5 CONCEITOS SOBRE TÊMPERA E REVENIMENTO**

O processo de têmpera é um tipo de tratamento térmico, onde sua finalidade é aumentar a dureza e resistência mecânica dos aços. O processo consiste em aquecer o material até que ocorra a etapa de austenitização, e logo na sequência este material sofre um resfriamento brusco, numa velocidade suficiente evitando as transformações perlíticas e bainíticas na peça tratada e, com isso, obtém-se uma estrutura metaestável martensítica. Os meios de resfriamento para o processo incluem, água (pura, com adição de sal ou polímero), óleo e ar, podendo também ser utilizados meios gasosos como, nitrogênio, hélio, argônio, entre outros.

A influência de elementos de liga nos materiais, podem gerar deslocamentos nas curvas de resfriamento, afetando a formação da martensita. Isso implica na temperabilidade do aço, que é a capacidade de uma liga ser endurecida devido a formação de martensita. Elementos de liga como o carbono, cromo, molibdênio e manganês são elementos que provocam elevado efeito na temperabilidade do aço. Relacionando o método de tratamento térmico com as análises futuras dos aços neste trabalho, pode-se afirmar que o teor de carbono influencia na temperatura de início e fim da formação da martensita.

Ao se utilizar uma alta taxa de resfriamento, visando a formação da martensita, pode-se ocasionar em tensões internas associadas a contrações sofridas durante o resfriamento, expansões pela formação de martensita e também mudanças acentuadas de secção e outros concentradores de tensão. Por isso, requer-se o processo de revenimento da peça, onde ocorre o reaquecimento do material numa temperatura abaixo da zona crítica, levando a difusão e precipitação do carbono que está em excesso, formando carbonetos. Posterior ao reaquecimento, a peça é resfriada novamente numa taxa menor.<sup>[8]</sup>

## **2.6 COMPORTAMENTO DA CURVA DE DUREZA AO LONGO DA ESPESSURA DA PEÇA**

Antes de dar início as discussões, deve-se ter conhecimento sobre o comportamento da curva de dureza ao longo de toda espessura da peça, a qual sofreu o processo de têmpera superficial através da técnica de aquecimento por indução. Este tipo de processo garante um aquecimento superficial em determinado material condutor, com as especificações de profundidade de penetração conforme mencionado

anteriormente. Devido ao aquecimento local e superficial, a peça de trabalho, terá sua superfície com dureza significativamente superior ao do centro, pois a região mais interna não sofrerá aquecimento à devidas taxas que garantam sua transformação de fase austenítica.

Na figura 5, é apresentada uma curva típica de dureza promovida pelo método em estudo, onde, na zona 1, pode-se observar a eficiência do processo ao elevar significativamente a dureza do material na região superficial, sendo a dureza máxima obtida e representado por  $H_s$  (*Surface hardness*). Logo em seguida, ocorreu a região de transição, na zona 2, onde houve uma queda acentuada na dureza até atingir o valor de dureza inicial, definida como  $H_L$  (*Loss of hardness*). Isso ocorreu, devido a região sofrer alteração de temperatura, mas não haver a transformação completa de fase martensítica, contendo assim, uma mistura de martensita dura e superrevenida (*overtempered martensite*). A zona 3 foi temperada devido ao fluxo de calor gerado, porém, não ocorreu transformação de fase martensítica. E por fim, a zona 4 foi a região onde não houve efeito gerado pelo fluxo térmico, determinada como  $H_c$  (*Hardness core*), sendo a região mais interna, ou seja, o núcleo da peça.<sup>[12]</sup>

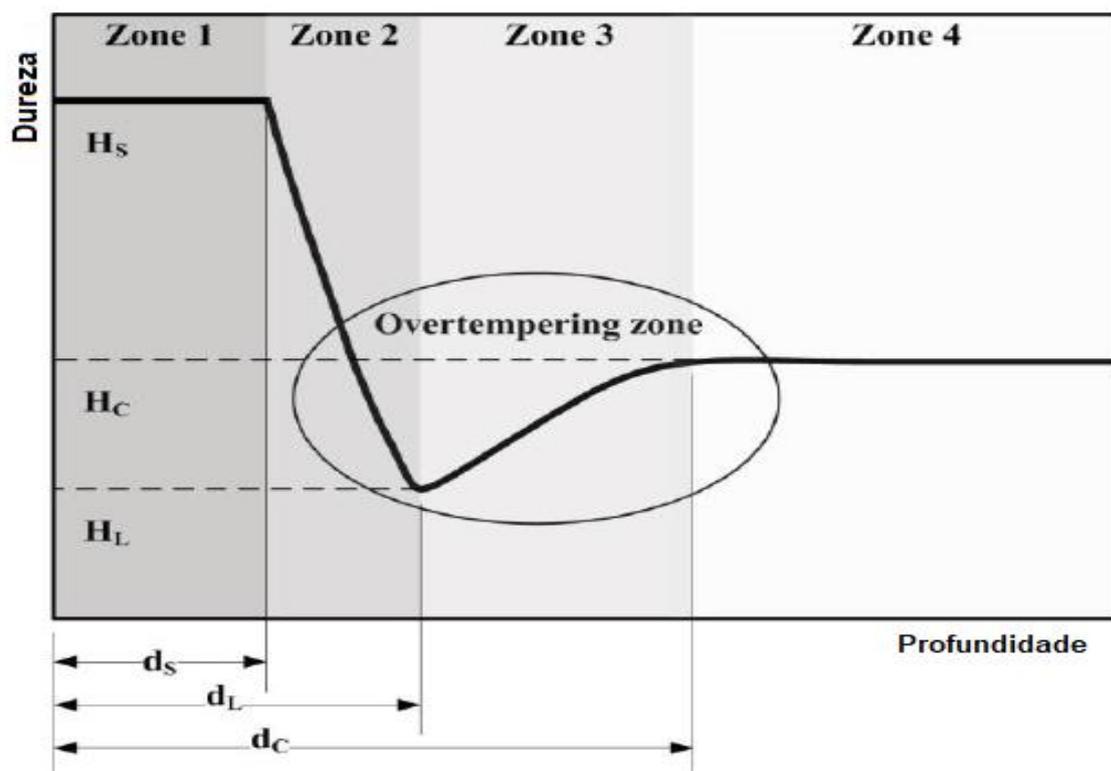


Figura 5: Curva típica de dureza de um material que sofreu o processo de aquecimento por indução. <sup>[12]</sup>

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em verificar uma relação sobre o tratamento térmico de peças metálicas de aço, utilizando o método de aquecimento via indução e correlacionando os materiais metálicos devido a sua composição química e a dureza superficial atingida, assim como sua profundidade de penetração pelo mecanismo de aquecimento por indução e a temperabilidade destes aços.

Os aços escolhidos para essa relação de temperabilidade e dureza superficial, foram determinados pelo fato da concentração de carbono e outros elementos de liga em cada material, impactar diretamente no tratamento térmico utilizado e a dureza superficial atingida. Os aços escolhidos foram: SAE 1020, SAE 4340, SAE 1045, AISI S1 e AISI O1.

O aço carbono SAE 1020, que possui temperatura de austenitização em 925°C, foi escolhido devido a seu baixo teor de carbono e elementos de liga na composição, conferindo assim baixa temperabilidade, onde foi possível a verificação desse efeito em sua curva de dureza após tratamento térmico. Suas principais aplicações são: engrenagens, virabrequins, eixos, pinos guia, colunas, catracas, capas, entre outros. O aço SAE 4340, que possui temperatura de austenitização em 845°C, conferindo alto nível de temperabilidade, possuindo em sua composição os elementos cromo-níquel-molibdênio, foi escolhido por possuir teor de carbono considerado moderado, porém o efeito dos demais elementos de liga, favorecem a formação de martensita em sua estrutura. Suas principais aplicações são: sistemas mecânicos estruturais, eixos, engrenagens, colunas, entre outros.

O aço carbono SAE 1045, que possui temperatura de austenitização em 845°C, possui temperabilidade determinada baixa, onde verifica-se baixa profundidade de penetração no tratamento térmico, foi escolhido devido seu teor de carbono ser aproximado ao do aço SAE 4340, porém, devido à baixas concentrações de outros elementos de liga, observou-se a diferença no comportamento das curvas de dureza. Suas principais aplicações são: eixos, cilindros, grampos, pinças, entre outros.

O aço AISI S1, que possui temperatura de austenitização em 815°C, é um aço ferramenta que possui alta resistência e dureza superficial, o que lhe promove boa resistência a fadiga e ao desgaste. O teor de carbono em sua composição é determinado moderado, porém, altas concentrações de elementos de liga favorecem sua temperabilidade, sendo expresso esse comportamento nas curvas de dureza.

Suas principais aplicações são: matriz de ferramenta para estampagem a frio, matrizes para cunhagem, facas para cortes de chapas de aço, entre outros.

E por fim, o aço AISI O1, que possui temperatura de austenitização em 955°C, sendo também um aço ferramenta que apesar de possuir elevado teor de carbono, os baixos teores de elementos de liga na sua composição o torna temperável em óleo, atingindo dureza entre 633-746 Hv, após o revenimento. Suas principais aplicações são: ferramenta de corte, instrumento de medição, brocas, fresas, entre outros.<sup>[7]</sup>

Como pode ser observado, os aços escolhidos se diferem de acordo com sua composição de carbono e outros elementos de liga, sendo visualizado o comportamento dessa diferença nas composições das curvas de dureza.

Na tabela 5, verifica-se os aços utilizados neste trabalho com suas respectivas composições químicas.<sup>[6]</sup>

Tabela 5: Aços e suas respectivas composições químicas. <sup>[6]</sup>

| Aço      | Composição Química |      |     |     |     |      |     |      |     |     |
|----------|--------------------|------|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|
|          | C                  | Si   | Mn  | Cr  | Ni  | Mo   | V   | Al   | W   | Cu  |
| SAE 1020 | 0,2                | 0,2  | 0,4 | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,02 | 0   | 0,1 |
| SAE 4340 | 0,4                | 0,2  | 0,7 | 0,8 | 1,8 | 0,25 | 0   | 0,02 | 0   | 0,1 |
| SAE 1045 | 0,45               | 0,2  | 0,7 | 0   | 0   | 0    | 0   | 0,02 | 0   | 0,1 |
| AISI S1  | 0,5                | 0,35 | 0,3 | 1,5 | 0   | 0    | 0,2 | 0,02 | 2,5 | 0,1 |
| AISI O1  | 0,9                | 0,25 | 1,2 | 0,5 | 0   | 0    | 0   | 0,02 | 0,5 | 0,1 |

Os perfis de durezas apresentados neste trabalho foram retirados da própria literatura, juntamente com o auxílio do software online “Heat Treatment Guide”<sup>[6]</sup>, onde foi possível uma análise comparativa desses perfis ao longo da espessura da peça, verificando também, a interferência das composições químicas dos aços e o perfil de resfriamento no resultado final obtido.

No desenvolvimento do comparativo das curvas de durezas, as curvas dos aços que não foram encontradas na literatura, foram estipuladas através de uma relação, obtida pelo levantamento da equação da curva dos aços que estavam disponíveis e foram mencionados nas figuras 11 e 12. Com o auxílio do software online “WebPlotDigitizer 4.5” <sup>[16]</sup>, foi possível a determinação dos pontos de durezas relacionados com a profundidade de penetração, e assim, através do auxílio do software Excel, definiu-se a equação da curva padrão. Tendo disponível a equação da curva e, relacionando

com a dureza máxima superficial dos aços apresentados nas figuras 6 e 7, determinou-se o comportamento da curva dos aços até o momento do início da região de transição, região onde o aço perde significativamente sua dureza.

As regiões após a queda acentuada da curva, definidas como zonas 3 e 4 (núcleo da peça), são regiões que apresentam durezas iniciais do aço, ou seja, essas regiões não foram atingidas com temperaturas de transformações de fases, e com isso, não há alterações dos valores de durezas. Tendo isso em vista, foi possível determinar os valores estimados de durezas nessas regiões analisando conjuntamente a figura 7, pois após um processo de resfriamento de aproximadamente 30 minutos, o aço obtém transformações de fases perlíticas e bainíticas, não sendo verificada a presença de martensita, e com isso, não apresenta elevação na dureza. [6,8,12]

É importante notar que este método está, portanto, assumindo que todos os aços irão resfriar de forma similar, o que assumiria uma igual condutividade térmica e capacidade calorífica entre todos os aços. Sabe-se que em especial a condutividade térmica pode variar entre diferentes tipos de aços, impactos disto serão discutidos no trabalho.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E ANÁLISES GRÁFICAS**

Para iniciar as discussões, deve-se ter conhecimento que as curvas de dureza aqui abordadas, segue o princípio da metodologia que as condições de resfriamento são semelhantes para todos os aços, não verificando o efeito da difusividade térmica específica de cada material em estudo.

Na figura 6 é possível observar o gráfico gerado pelo software online “Heat Treatment Guide”<sup>[6]</sup>, relacionando a dureza superficial dos devidos aços com a temperatura de revenimento, demonstrando assim o decaimento da dureza superficial do aço tratado termicamente ao longo do aumento da temperatura no processo. Este processo gera a decomposição da martensita e conseqüentemente na formação da martensita revenida. Ao se elevar a temperatura de revenimento entre 350-600°C, o decaimento da curva de dureza torna-se de forma mais acentuada, pois em altas temperaturas ocorre o processo de recuperação (redistribuição das discordâncias / diminuição da densidade), atingindo o processo de recristalização aos 700°C, ocasionando na perda

de dureza do material promovida pelo processo de têmpera.

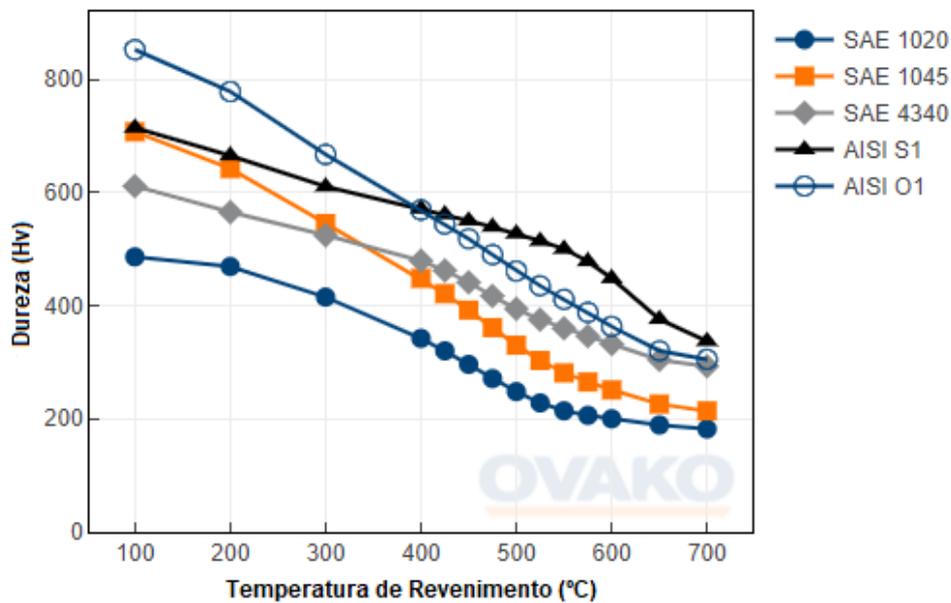


Figura 6: Curva de dureza x temperatura de revenimento. [6]

Na figura 7 pode-se verificar a importância da taxa de resfriamento dos aços, de acordo com a dureza superficial atingida. Ao passo que o tempo de resfriamento aumenta, a dureza decai de forma acentuada de acordo com cada tipo de aço, isso ocorre porque cada aço possui uma determinada taxa limite de resfriamento para a formação de martensita, e ao superar esse limite de tempo de resfriamento, ocorre a transformação de fase perlítica e bainítica em sua estrutura, não sendo verificado o processo de têmpera e no aumento da dureza do material.

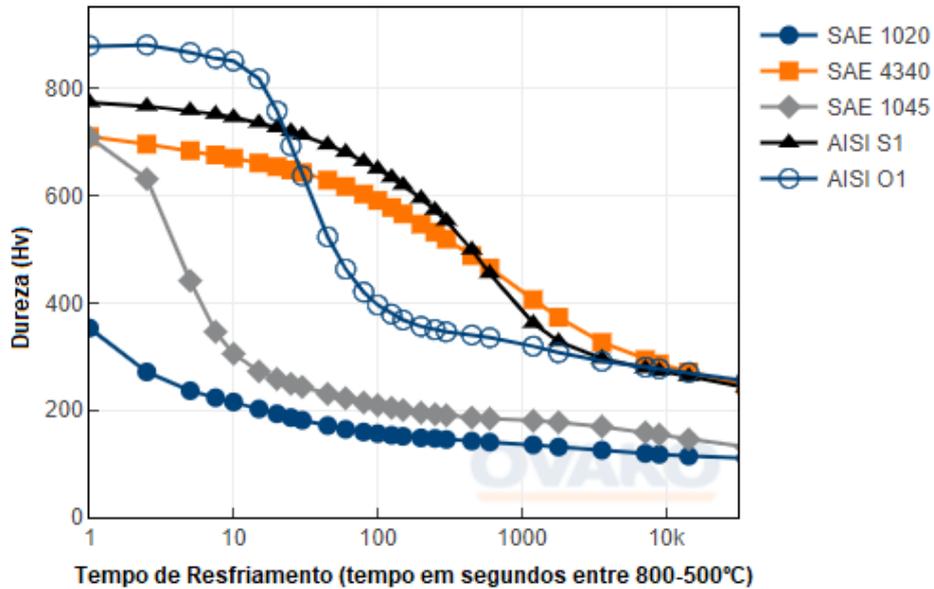


Figura 7: Curva de dureza X tempo de resfriamento para diferentes aços. [6]

Para um melhor entendimento, pode-se verificar como exemplo as curvas TTT (Temperatura X Tempo x Transformação) dos aços SAE 1020, SAE 1045 e SAE 4340, de acordo com as figuras 8, 9 e 10, respectivamente. As curvas marcadas com setas vermelhas são regiões de início de transformações de fases dos aços, e para que ocorra a formação da fase martensítica no aço, é necessário que ao se resfriar o material, a curva de resfriamento não cruze essas curvas de transformações de fases, ou seja, é necessário que se realize um resfriamento numa velocidade superior ao instante dos picos (cotovelos) das curvas de transformações. [13,15]

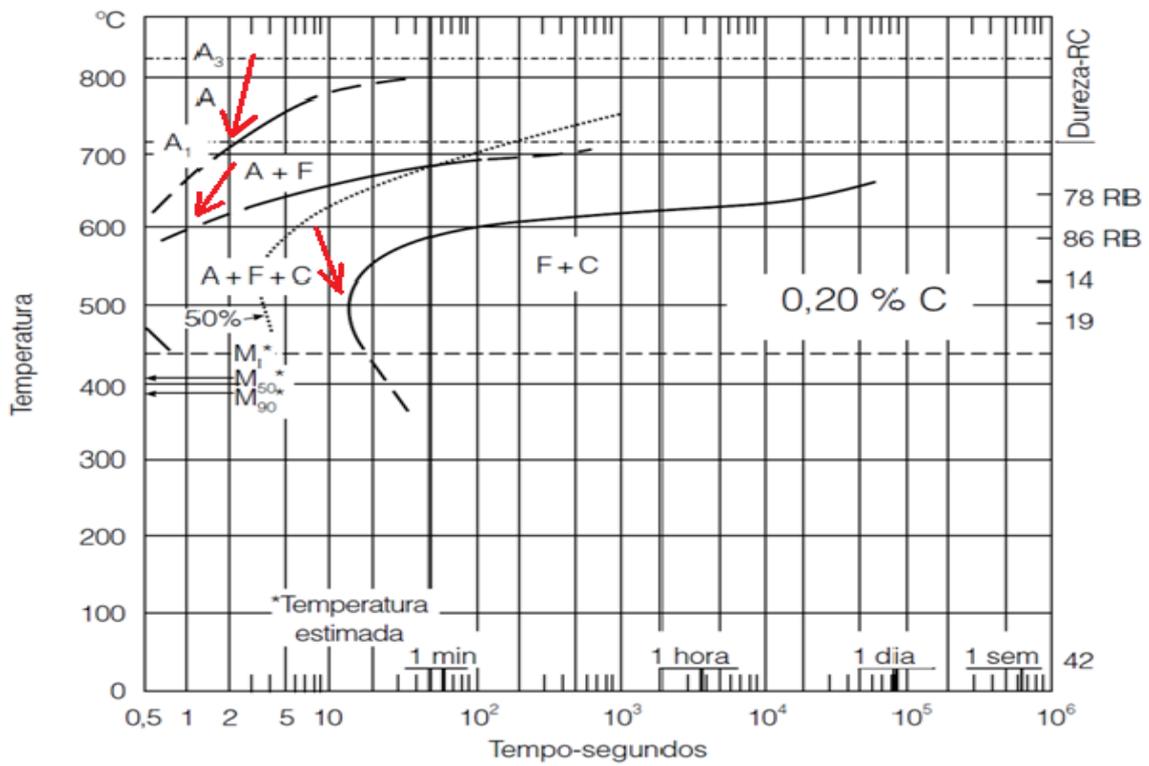


Figura 8: Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 1020. [15]

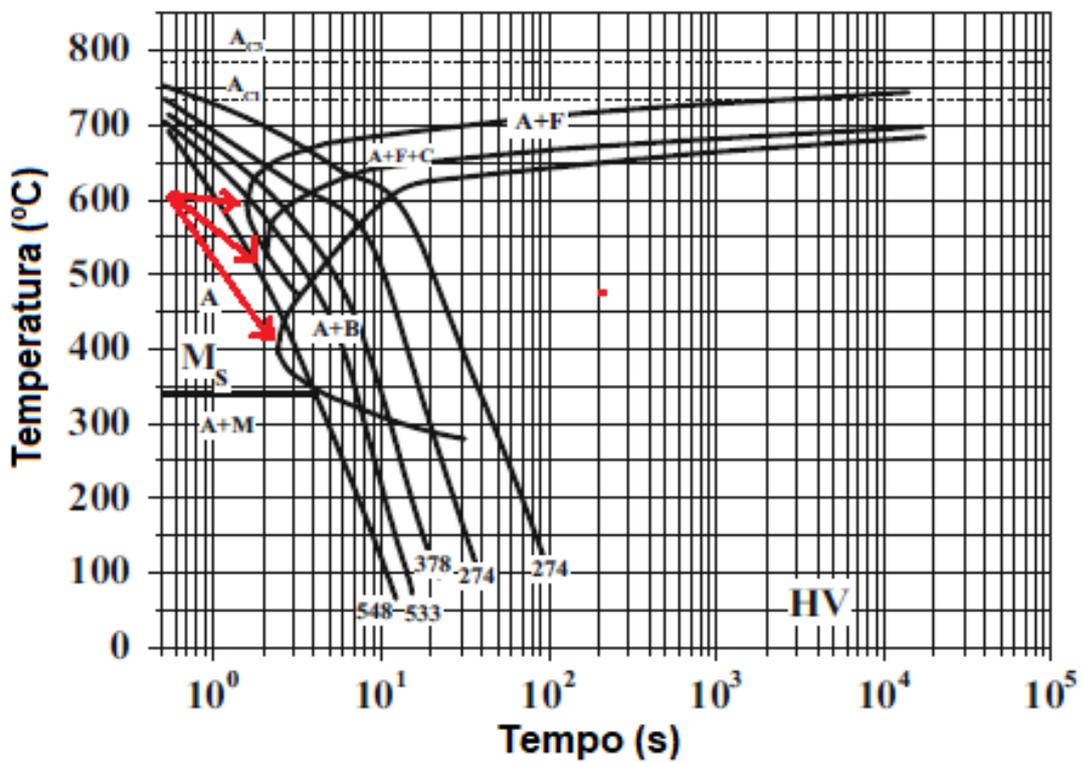


Figura 9: Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 1045. [13]

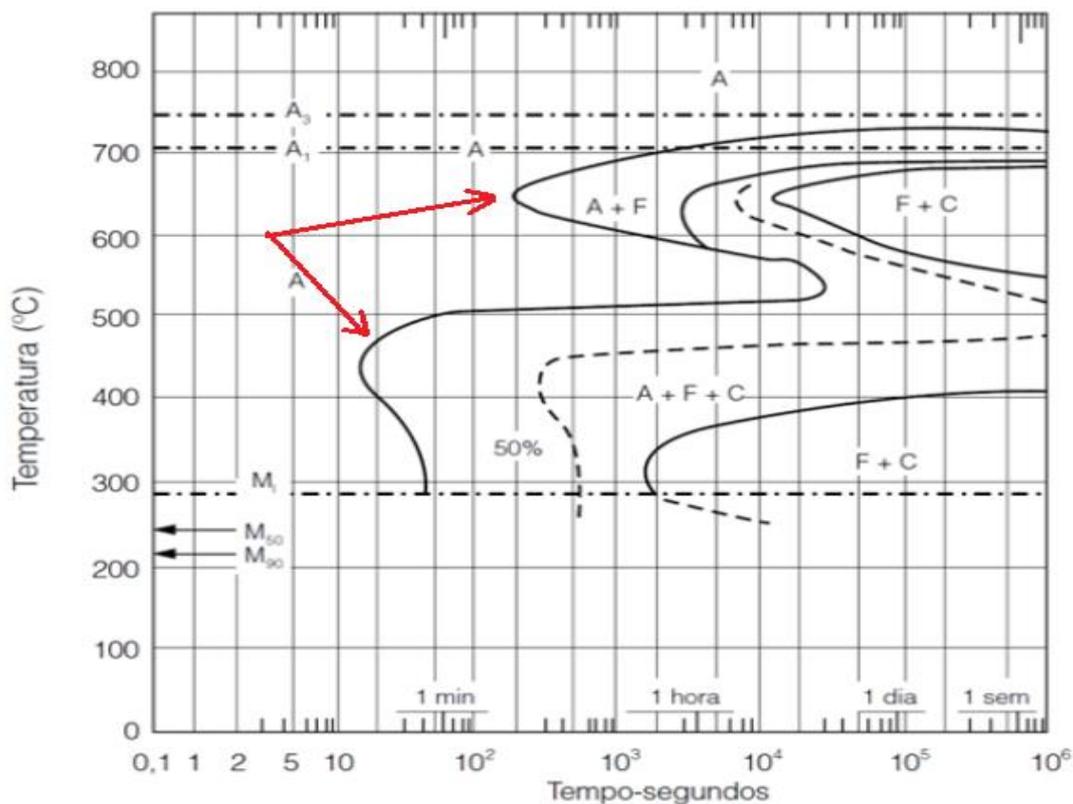


Figura 10: Curva Temperatura x Tempo x Transformação do aço SAE 4340. [15]

Ao analisar as curvas de resfriamento conjunta as curvas TTT dos aços, verifica-se uma relação do desempenho do processo de têmpera nos devidos materiais de estudo.

Através da figura 8, pode ser observado que as curvas de transformações de fases do aço SAE 1020, estão bastante deslocadas para a esquerda em relação aos demais aços estudados, isso nos permite afirmar que o processo de têmpera para tal material é ineficaz, pois a quantidade de carbono disponível no aço não é suficiente para o processo. O efeito endurecedor é desprezível, sendo geradas segregações de carbono sem precipitação neste tipo de tratamento. Pode-se verificar na figura 7 que a curva deste aço obtém uma queda acentuada desde iniciais tempos de resfriamento.

Na figura 9, verifica-se uma melhor temperabilidade do aço SAE 1045, pois a curva está mais deslocada para a direita comparado a figura 8, permitindo uma variação maior de tempo de resfriamento, e comparando com a curva da figura 7, vê-se uma variação maior de dureza antes de sua queda acentuada pela ineficiência do processo para maiores tempos de resfriamento.

Já para o caso da figura 10, é possível verificar uma temperabilidade ainda maior do aço SAE 4340, pois suas curvas de transformações de fases estão mais deslocadas para a direita no gráfico, permitindo uma maior variação da taxa de resfriamento. Condizente a isso, comparando com a curva da figura 7, observa-se um deslocamento maior na variação da taxa de resfriamento, mantendo valores de dureza significativamente elevados antes da ocorrência na queda da curva. Tendo em vista que a concentração de carbono dos aços SAE 4340 e SAE 1045 variam pouco, pode-se afirmar que o comportamento de temperabilidade superior no primeiro aço é devido a maior concentração de elementos de liga presentes, favorecendo o deslocamento das curvas de transformações de fases. [5,6,13]

## **4.2 COMPARATIVO E ESTIMATIVA DAS CURVAS DE DUREZA DOS AÇOS**

Tendo em vista o comportamento da curva de dureza superficial de uma peça de aço tratada termicamente, através das curvas experimentais apresentadas nas figuras 11 e 12 disponíveis na literatura [13,14], é possível formular um comparativo e estimativas comportamentais dos aços que não possuem estas curvas definidas na literatura. De acordo com as curvas, os aços abordados de formas experimentais foram o SAE 1045 e o SAE 4340, respectivamente, apresentaram as mesmas regiões de interesse mencionadas anteriormente na figura 5. Pode-se observar que há uma camada superficial endurecida com capacidades de durezas superiores, com durezas aproximadas de 750Hv e 680Hv, para os respectivos aços e, posteriormente, houve o decréscimo das curvas de forma acentuada, passando pelas regiões de transições e chegando até os índices iniciais de dureza, onde definiu-se como a região não afetada termicamente.

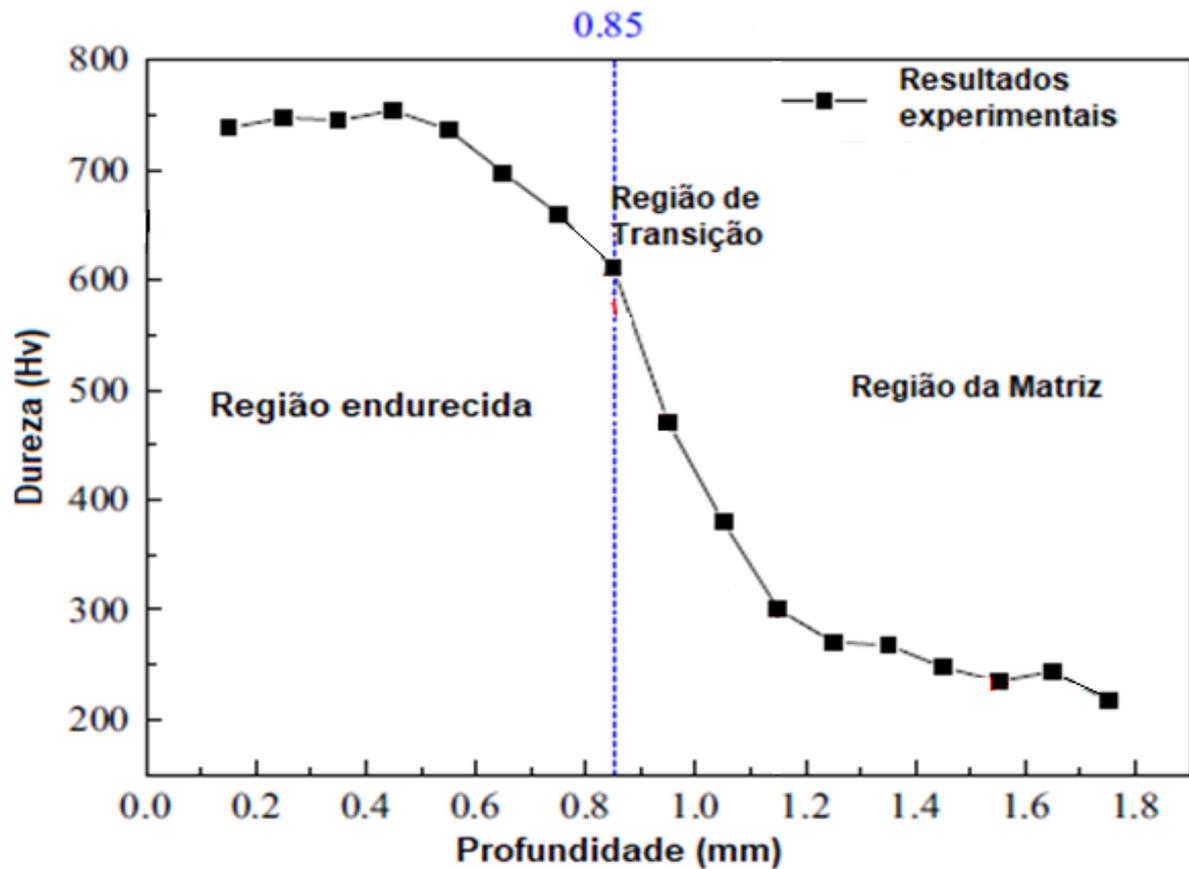


Figura 11: Curva de dureza ao longo da espessura da peça de um aço SAE 1045.<sup>[13]</sup>

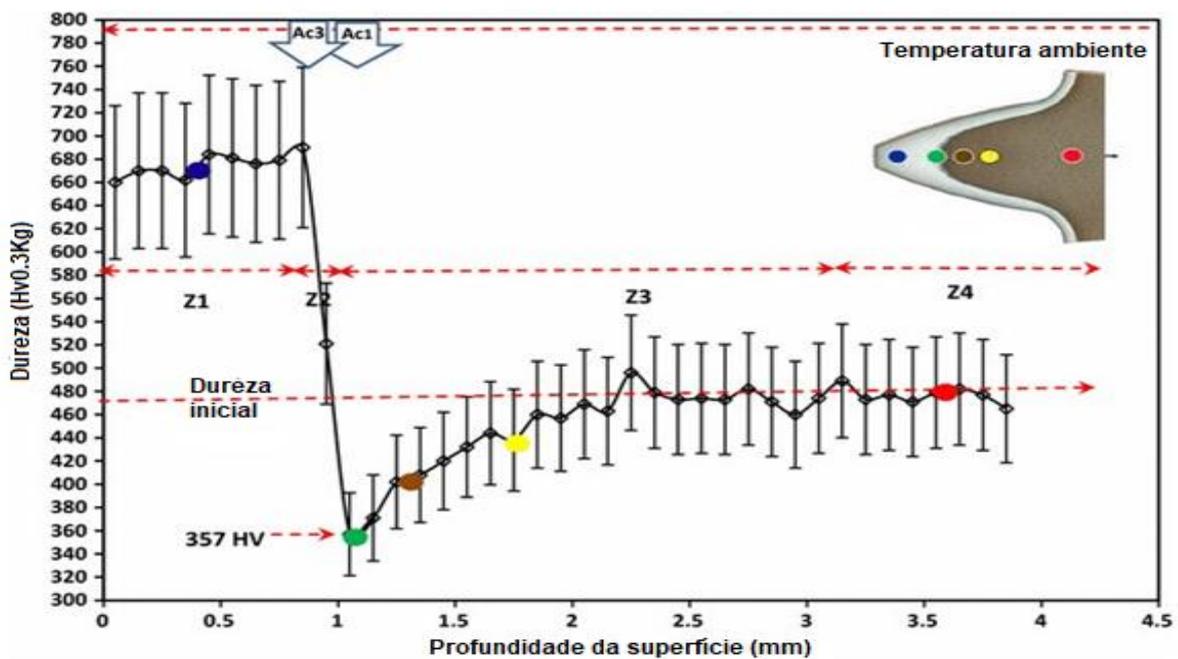


Figura 12: Curva de dureza ao longo da espessura da peça de um aço SAE 4340.<sup>[14]</sup>

Após análise do comportamento das curvas de durezas e correlacionando com a

figura 7, foi possível estimar as durezas dos demais aços e plotar o gráfico com as curvas típicas de cada aço em estudo, como pode ser observado na figura 13.

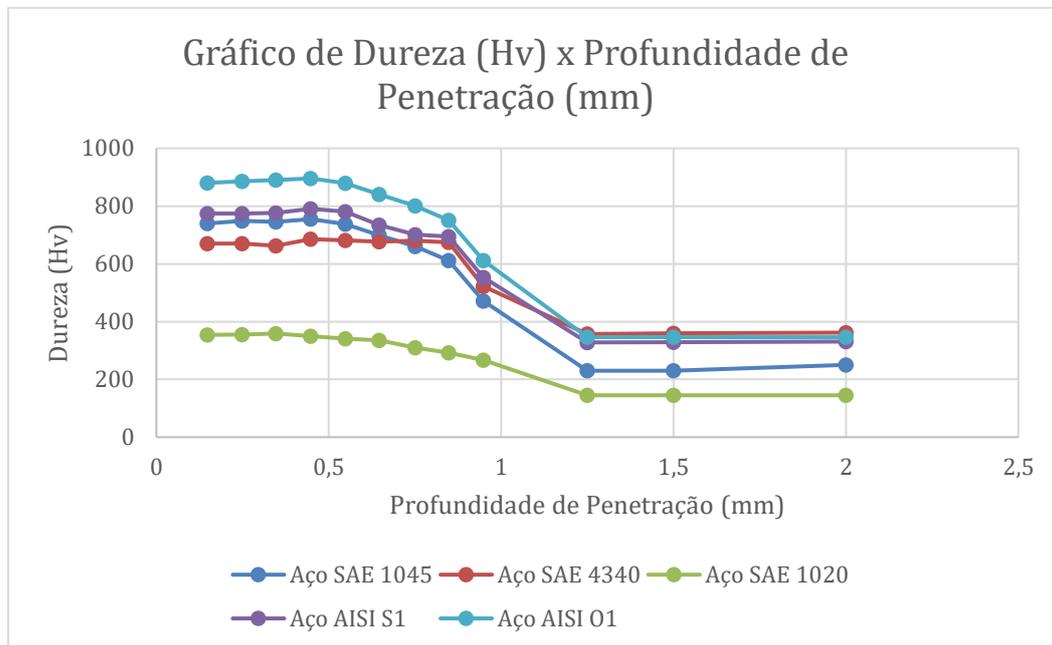


Figura 13: Estimativa e comparativo das curvas de durezas dos aços pela profundidade de penetração.

Como pode ser observado, os aços ferramentas possuem a camada superficial pós tratamento térmico, mais dura do que os demais aços, decorrente de suas composições químicas que melhoram suas características de temperabilidade, inclusive o alto teor de carbono. Uma peculiaridade verificada em cada material, foi sua dureza na região não afetada termicamente, pois, devido a essas diferenças nas composições, o decaimento da curva na região de transição variou para cada aço. Com isso, observou-se que as regiões mais internas das peças de trabalho, possuíam durezas sem alterações do tratamento térmico.

Após análise da figura 13, pôde-se determinar então que o aço SAE 1020 apresentou um comportamento da curva de dureza ineficiente, devido sua característica de baixa temperabilidade ao possuir em sua composição baixo teor de carbono e outros elementos de liga.

Pôde-se estimar que o aço AISI S1 e o aço AISI O1, possuem durezas superficiais em aproximadamente 780 e 880 Hv, respectivamente, com seus núcleos não afetados termicamente apresentando durezas elevadas, entre 320 e 350 Hv, devido ao alto teor de elementos de ligas.

Os valores de durezas dos núcleos destes aços estão próximos ao valor de dureza interna do aço SAE 4340, que por sua vez possui ótima característica de temperabilidade com dureza superficial de aproximadamente 680 Hv.

Já o aço SAE 1045, possui elevada dureza superficial, em torno de 750 Hv, com o núcleo mais dúctil do que os apresentados anteriormente (exceto ao aço SAE 1020), com dureza aproximada de 230 Hv. [12]

Conforme mencionado na seção de materiais e métodos, a condutividade térmica tende a não ser igual para diferentes materiais. Em especial sabe-se que materiais mais puros tendem a exibir maiores condutividades térmicas. Isto poderá levar a erros nesta análise, em especial espera-se que isso acentue ainda mais os resultados observados – por exemplo, espera-se que o aço 1020 tenha maior condutividade térmica que o 1045 por conta do seu menor teor de elementos de liga. Isto deverá levar a este aço a apresentar dureza ainda menor do que o estimado na Figura 13. Um cenário contrário seria observado para os aços mais ligados, como os S1 e O1, se mantendo ainda mais duros.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O aço SAE 1020 possui baixa adição de carbono na sua composição, e isso impacta diretamente na formação da estrutura martensítica e também em sua dureza máxima atingível, gerando na dificuldade ao se elevar a dureza superficial através da têmpera por indução. Através dessas características, é possível a verificação da dureza superficial atingida de aproximadamente 350 Hv, e dureza interna de aproximadamente 150 Hv, ou seja, a elevação da dureza superficial não atingiu ganhos significativos.

Já o aço SAE 1045 permite o processo de têmpera e no aumento significativo da dureza superficial. Os valores de dureza superficial estimados para as condições de processamento analisadas e do núcleo seriam de aproximadamente 750 Hv e 230 Hv, respectivamente.

O aço SAE 4340 possui melhor temperabilidade devido ao teor de carbono e elementos de liga na sua composição, garantindo-lhe boas propriedades de tratamento térmico e dureza superficial. Os valores verificados de dureza superficial e interna seriam de aproximadamente 680 Hv e 360 Hv, respectivamente.

O aço AISI S1 possui boa temperabilidade devido ao teor de carbono e elementos de liga na composição, obtendo significativos valores esperados de dureza superficial após tratamento superficial, obtendo valores de 780 Hv para dureza superficial e de 320 Hv para dureza nas regiões internas (zonas 3 e 4). O comportamento de temperabilidade deste material assemelha-se ao aço SAE 4340.

O aço AISI O1 possui boa temperabilidade, mas inferior ao aço SAE 4340 e AISI S1, pois a sua taxa de resfriamento possui uma queda acentuada após 10s. Apresenta elevada dureza superficial após tratamento térmico de 880 Hv e sua dureza no núcleo assemelha-se ao aço AISI S1 com valor de aproximadamente 350 Hv. Pode ser verificado o maior valor de dureza superficial para este aço, devido a elevada concentração de carbono em sua composição que favorece o endurecimento da camada da superfície da peça.

Os aços ferramentas apresentaram maiores durezas superficiais devido aos elementos de liga e o alto teor de carbono em suas composições, que favorecem o endurecimento da camada superficial, e seus núcleos apresentaram durezas iniciais sem efeito de têmpera. Sendo assim, foi possível realizar uma estimativa do comportamento da curva de dureza para estes aços que não eram encontradas na literatura.

O desenvolvimento das curvas de dureza para o método comparativo, assumiu que os cinco tipos de aços apresentavam as mesmas condições e taxas de resfriamento, assumindo que a difusividade térmica apresentaria pouca ou quase nenhuma diferença entre os tipos de materiais. Sendo assim, é possível ampliar as pesquisas sobre as curvas de dureza e adotar este método, considerando a difusividade térmica de acordo com cada tipo de aço, sendo sugerido para trabalhos futuros.

Desta forma, apesar das limitações do método proposto, ele é de simples implementação e apresenta resultados gerais condizentes com a literatura.

## REFERÊNCIAS

- [1] RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; COOK, R. L. e BLACK, M. R. Induction Heat Treatment: Basics Principles, Computation, Coil Construction, and Design Considerations, In: TOTTEN, G. E. e HOWES, M. A. H. Steel Heat Treatment Handbook, M. Dekker, NY, p 765- 874, 1997.
- [2] ZINN, S. e SEMIATIN, S. L. Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications, 1st Editio. ASM International, 1988.
- [3] WEISS, K. In-Line Tempering on Induction Heat Treatment Equipment Relieves Stresses Advantageously, Industrial Heating, 1995.
- [4] SEGURA, M G. Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating. Ano: 2012. 262pg. Doctoral Thesis - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Jun/2012.
- [5] NOVIKOV, I. Teoria dos tratamentos térmicos dos metais. Editora UFRJ, 1994. p.337-340.
- [6] OVAKO. Stell Navigator. Disponível em:<<https://steelnavigator.ovako.com/heat-treatment-guide/calculate>>, [s.d.]. Acesso em: 22 de fev. de 2022.
- [7] GGD METALS. Disponível em: <<https://www.ggdmetals.com.br/>>, [s.d.]. Acesso em: 15 de mar. de 2022.
- [8] SILVA, A.L.C; MEI, P.R. Aços e ligas especiais. Editora Blucher, 2010. p 97- 145.
- [9] RUDNEV, V. I.; LOVELESS, D. L.; MILLER, P. J. e BLACK, M. R. Progress in Study of Induction Surface Hardening of Carbon Steels, Gray Irons and Ductile Irons, Industrial Heating, 1996.
- [10] Haimbaugh, R. E. *Practical Heat Induction Heat Treating*, 1st Editio. ASM International, 2001.
- [11] AZO MATERIALS. Disponível em:<<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11659>>, [27 de jan. de 2015]. Acesso em: 18 de fev. de 2022.
- [12] BARKA, N; OUAFI, E. A; BOCHER, P e BROUSSEAU, J. Explorative Study and Prediction of Overtempering Region of Disc Heated by Induction Process Using 2D Axisymmetric Model and Experimental Tests. **Materials and Manufacturing Research**, Montréal (Québec), Canada, vol. 658. p. 259-265, JAN./2013.

- [13] ZHU, S; WANG, Z.; QIN, X; MAO, H e GAO, K. Prediction of Phase Transformation and Hardness Distribution of AISI 1045 Steel After Spot Continual Induction Hardening. *Journal of Materials Engineering and Performance*, CHINA, vol. 24:3919–3932, OUT./2015.
- [14] NAZEMI, F; HAMEL-AKRÉ, J e BOCHER, P. Modeling of cementite coarsening during tempering of low-alloyed-medium carbon steel. *J Mater Sci*, Montréal (Québec), Canada, vol. 53:6198–6218, JAN./2018.
- [15] KRELLING, A. Tratamentos térmicos e termoquímicos. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/T%C3%A9cnico%20em%20Mec%C3%A2nica%20Integrado/TTT/2%20%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos%20e%20Termoqu%C3%ADmicos.pdf>>. Acesso em: 03 de abr. de 2022.
- [16] WEBPLOTDIGITIZER 4.5. Disponível em: <<https://apps.automeris.io/wpd/>>, [s.d.]. Acesso em: 07 de abr. de 2022.