

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

MANOEL LEANDRO RIBEIRO CORREA

REDUÇÃO DAS DISTORÇÕES DIMENSIONAIS EM JUNTAS  
HOMOCINÉTICAS FABRICADAS EM AÇO SAE 1050 APÓS O TRATAMENTO  
TÉRMICO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO

Porto Alegre

2023

MANOEL LEANDRO RIBEIRO CORREA

REDUÇÃO DAS DISTORÇÕES DIMENSIONAIS EM JUNTAS HOMOCINÉTICAS  
FABRICADAS EM AÇO SAE 1050 APÓS O TRATAMENTO TÉRMICO DE  
TÊMPERA POR INDUÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider

Porto Alegre  
2023

Correa, Manoel Leandro  
REDUÇÃO DAS DISTORÇÕES DIMENSIONAIS EM JUNTAS  
HOMOCINÉTICAS FABRICADAS EM AÇO SAE 1050 APÓS O  
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO / Manoel  
Leandro Correa. -- 2023.  
89 f.  
Orientador: Eduardo Schneider.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Redução das distorções dimensionais. I.  
Schneider, Eduardo, orient. II. Título.

MANOEL LEANDRO RIBEIRO CORREA

Redução das distorções dimensionais em componentes automotivos de aço SAE  
1050 após o tratamento térmico de têmpera por indução

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

---

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider

Aprovado: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Jorge Luis Braz Medeiros (FURG)\_\_\_\_\_

Afonso Reguly (UFRGS)\_\_\_\_\_

Claudia Trindade Oliveira (Universidade Feevale)\_\_\_\_\_

Halston José Mozetic (UFRGS)\_\_\_\_\_

Porto Alegre  
2023

Dedico aos meus familiares, amigos e colegas que sempre acreditaram em mim e me ofereceram todo o apoio, dedicação e estímulo de que precisei durante essa longa jornada em busca dos meus objetivos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter sido fonte de motivação e superação em momentos difíceis, pois sem ele nada seria possível.

Ao meu filho Antony, pelos seus questionamentos, discussões e argumentos os quais me fizeram refletir por diversas vezes o quão o esforço vale a pena, e se de fato vale a pena, assuntos abordados que me deixaram mais motivado para em busca de meus objetivos.

À minha namorada Cíntia, por me ajudar, e estender a mão com alguma palavra de força e otimismo nos momentos o qual eu mais precisava.

À minha família por entender a escassez do meu tempo e acreditar que todo esse esforço será recompensado.

Aos amigos e colegas de trabalho que acreditam em mim e me deram suporte, e de alguma forma me ajudaram para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider que com sua experiência me apoiou de forma contundente a realizar este trabalho.

À empresa GKN do Brasil, por ter dado esta oportunidade e incentivo para que a conclusão deste curso se tornasse realidade.

"Obstáculos são aqueles perigos que você vê, quando tira os olhos de seu objetivo."

Henry Ford



## RESUMO

A junta homocinética é um componente automotivo que participa da transmissão de potência do motor para as rodas do veículo, necessitando de um projeto que garanta seu adequado desempenho com um menor custo de produção. Uma das alternativas para redução de custos adotada pela indústria automotiva é o uso de aços carbono com o SAE 1050 para a fabricação da junta após passar pelo tratamento térmico de têmpera por indução, o que melhora as propriedades mecânicas da junta, mas a torna sujeita a distorções dimensionais que prejudicam seu encaixe e a sua funcionalidade. Contudo, é possível controlar certos parâmetros do processo de têmpera por indução, como potência, tempo de aquecimento e taxa de resfriamento, a fim de minimizar tais distorções e, ao mesmo tempo, promover alterações nas propriedades mecânicas da superfície do metal, mantendo suas propriedades no núcleo. A potência de aquecimento pode ser controlada e soluções contendo polialquilenoglicol (PAG) podem ser empregadas como meio de resfriamento de peças no processo de têmpera, permitindo controlar a severidade do resfriamento em função da quantidade de PAG presente na solução. O presente estudo tem como objetivo avaliar as distorções dimensionais após a têmpera por indução de um componente automotivo, fabricado em aço SAE 1050, que possui tolerâncias dimensionais de montagem muito justas. Neste trabalho, foi avaliada a microestrutura, a dureza, a espessura da camada temperada e variação dimensional de amostras de ponta de eixo submetidas ao tratamento térmico de têmpera por indução realizado em diferentes potências de aquecimento (95%, 87% e 78%) e resfriamento sob diferentes concentrações de PAG (5%, 10% e 15% de PAG). O aquecimento a uma potência de 78% garantiu as melhores propriedades mecânicas à peça, enquanto apresentou o menor nível de distorções dimensionais e um tamanho de grão 37% menor em comparação com a maior potência. O resfriamento em solução de 15% de PAG produziu uma camada temperada de menor dureza (703 HV) e menor profundidade (2,75 mm), porém as distorções se mostraram menos severas nas três regiões analisadas, cumprindo os requisitos geométricos da peça, cujas dimensões estão dentro dos limites de tolerância dimensional.

**Palavras-chave:** Aço SAE 1050. Tratamento térmico. Têmpera por indução. Potência. Distorções Dimensionais. PAG.

## ABSTRACT

The half shaft constant velocity joint is an automotive component that participates in the transmission of engine power to the vehicle's wheels, requiring a design that guarantees adequate performance with lower production costs. One cost-saving alternative adopted by the automotive industry is the use of carbon steels with SAE 1050 to manufacture the joint after being processed by induction hardening heat treatment, which improves the mechanical properties of the joint, but makes it subject to dimensional distortions that impair its fit and functionality. Nevertheless, it is possible to control certain parameters of the induction hardening process, such as power, heating time, and cooling rate, to minimize these distortions and simultaneously induce changes in the metal surface's mechanical properties while preserving its core properties. Heating power can be controlled, and solutions containing polyalkylene glycol (PAG) can be employed as a cooling medium, allowing for the control of cooling severity based on the PAG concentration in the solution. This study aims to evaluate dimensional distortions after the induction hardening of an automotive component manufactured with SAE 1050 steel, which has very fair dimensional assembly tolerances. In this work, the microstructure, hardness, effective case depth, and dimensional variation of Fixed Outer Race samples subjected to induction hardening heat treatment at different heating powers (95%, 87%, and 78%) and cooling under various PAG concentrations (5%, 10%, and 15% PAG) were evaluated. Heating at 78% power ensured the best mechanical properties for the piece, exhibiting the least dimensional distortions and a grain size 37% smaller than the highest power. Cooling in a 15% PAG solution produced an effective case depth with lower hardness (703 HV) and shallower depth (2.75 mm), but the distortions appeared less severe in the three regions analyzed, complying the geometric requirements of the part, whose dimensions are within the limits of dimensional tolerance.

**Keywords:** SAE 1050 steel. Heat treatment. Induction hardening. Power. Dimensional distortions. PAG.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Juntas Universais.....	21
Figura 2 - Semi-eixo homocinético.....	22
Figura 3 - Junta fixa.....	23
Figura 4 - Junta deslizante tripóide do tipo Glanzer Internieur.....	24
Figura 5 - Eixo interconector.....	25
Figura 6 - Classificação dos aços.....	26
Figura 7 - Estrutura tetragonal de corpo centrado.....	30
Figura 8 - Martensita: a) em ripas e b) em placas.....	31
Figura 9 - Comparativo da dureza entre microestruturas dos aços de acordo com a variação do teor de Carbono.....	31
Figura 10 - Tratamentos térmicos de têmpera e revenido em diagrama TTT.....	32
Figura 11 - Diferentes dispositivos para a têmpera por chama: a) Aquecedor e jatos de água estacionários b) Aquecedor estacionário c) Aquecedor rotatório.....	35
Figura 12 - Exemplo de campos magnéticos gerados por bobina e indutor: a) bobina de indução b) indutor.....	37
Figura 13 - Montagens para têmpera por indução: a) mergulho em líquido b) spray proveniente da espira c) spray movimentando com a espira.....	37
Figura 14 - Ponta de eixo automotivo tratado por têmpera por indução: a) vista frontal b) em corte.....	39
Figura 15 - Relação entre a densidade de potência e a espessura da camada temperada para diferentes frequências de corrente adotadas em um aço hipoeutetóide.....	41
Figura 16 - Influência da frequência, densidade de potência e tempo de aquecimento na profundidade da camada endurecida.....	42
Figura 17 - Indutor para haste da Ponta de Eixo.....	44
Figura 18 - Estágios de resfriamento em meio líquido.....	46
Figura 19 - Estágios da curva de resfriamento em um processo de têmpera: A – Vapor, B – Ebulição e C - Convecção.....	47
Figura 20 - Duchas de placa.....	48

Figura 21 - Taxa de resfriamento em função das concentrações de PAG. ....	50
Figura 22 - Tensões residuais na camada superficial temperada a) camadas da peça temperada b) tensões residuais nas camadas da peça temperada. ....	51
Figura 23 - Tensões na camada superficial temperada sob tensão a) carregamento externo na peça temperada b) tensões residuais nas camadas da peça temperada. ....	52
Figura 24 - Fluxograma da pesquisa.....	55
Figura 25 – Aquecimento da Peça: a) peça durante o aquecimento b) medição de temperatura da peça. ....	56
Figura 26 - Amostras após têmpera por indução, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95% de potência.....	57
Figura 27 - Perfil de têmpera da haste Ponta de Eixo.....	58
Figura 28 - Amostras em corte transversal diferenciadas pelo percentual de potência, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95%. ....	59
Figura 29 - Amostras em corte transversal diferenciadas pelo percentual de PAG, sendo: (a) com 5%, (b) 10% e (c) 15%. ....	59
Figura 30 - Corte seção transversal exibindo os três pontos de medição (a) e corte longitudinal (b).....	61
Figura 31 - Corte seção longitudinal exibindo os pontos de topo, meio e base. ....	62
Figura 32- Amostras mantendo o tempo de 3 segundos e variando a potência, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95% de potência.....	64
Figura 33 - Microestruturas obtidas: em a) camada temperada 500X, em b) zona de transição 500X, em c) núcleo 500X.....	65
Figura 34 - Perfil de microdureza para as amostras tratadas com 78% (210 KW), 87% (242 KW) e 95% (275 KW) de potência de aquecimento e tempo constante.....	66
Figura 35 - Amostra aquecida a potência de 95% por 2,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x. ....	67
Figura 36 - Amostra aquecida a potência de 87% por 3,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x. ....	67
Figura 37 - Amostra aquecida a potência de 78% por 4,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x. ....	67
Figura 38 - Microdureza Vickers das amostras para 3 diferentes potências de aquecimento a uma profundidade de 0,1 mm. ....	69
Figura 39 - Profundidade da camada (mm) temperada das amostras. ....	69

Figura 40 - Diâmetro das amostras 95% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.....	71
Figura 41 - Diâmetro das amostras 95% após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	71
Figura 42 - Diâmetro das amostras 87% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.....	72
Figura 43 - Diâmetro das amostras 87% após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	72
Figura 44 - Diâmetro das amostras 78% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.....	73
Figura 45 - Diâmetro das amostras 78% após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	73
Figura 46 - Peça durante o resfriamento.....	75
Figura 47 - Metalografias das amostras de identificação cinza (5% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x.....	75
Figura 48 - Metalografia das amostras de identificação azul (10% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x. ....	76
Figura 49 - Metalografia das amostras de identificação azul (15% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x. ....	76
Figura 50 - Microdureza Vickers das amostras a uma profundidade de 0,1 mm.....	77
Figura 51 - Profundidade da camada (mm) temperada das amostras. ....	77
Figura 52 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG5 antes do tratamento térmico de têmpera por indução. ....	79
Figura 53 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG5 após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	79
Figura 54 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG10 antes do tratamento térmico de têmpera por indução. ....	80
Figura 55 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG10 após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	80
Figura 56 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG15 antes do tratamento térmico de têmpera por indução. ....	81
Figura 57 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG15 após o tratamento térmico de têmpera por indução.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência empregada na têmpera por indução e sua relação com a potência e a profundidade da camada temperada. ....	40
Tabela 2 - Propriedades do PAG de acordo com o fabricante. ....	49
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1050. ....	53
Tabela 4 - Composição química do aço SAE 1050 com base na espectrometria de emissão ótica. ....	53
Tabela 5 - Especificações de projeto, dureza e profundidade de camada. ....	58
Tabela 6 - Identificação das amostras avaliadas quanto à variação da taxa de aquecimento. ....	58
Tabela 7- Identificação das amostras avaliadas quanto à variação da taxa de resfriamento. ....	59
Tabela 8 - Parâmetros de resfriamento das diferentes amostras. ....	60
Tabela 9 – Microdureza e profundidade de camada temperada para as amostras temperadas com tempo constante. ....	63
Tabela 10 - Método comparativo da microestrutura martensita para as três potências de aquecimento. ....	70
Tabela 11 - Média aritmética e desvio padrão da microdureza e da profundidade da camada temperada para as três potências de aquecimento. ....	71
Tabela 12 - Média aritmética e desvio padrão da dimensão da peça no topo, no meio e na base para os % de potência citados. ....	74
Tabela 13 - Média aritmética e desvio padrão da microdureza e da profundidade da camada temperada para as três concentrações de PAG nas soluções utilizadas como meios de resfriamento. ....	78
Tabela 14 - Média aritmética e desvio padrão da dimensão da peça no topo, no meio e na base para os três meios de resfriamento citados. ....	82

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
AISI	<i>American Iron And Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society For Testing Materials</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
FeSi	Ferro Silício
GI	<i>Glanzer Internieur</i>
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
PAG	Polialquileno Glicol
SAE	<i>Society Of Automotive Engineers</i>
TCC	Tetragonal De Corpo Centrado
TTT	Diagrama Transformação Tempo Temperatura
KW	Quilowatt
KHZ	Quilohertz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	Objetivo Geral.....	20
1.2	Objetivos Específicos .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>21</b>
2.1	Sistema de transmissão por semi-eixo homocinético.....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Junta Fixa</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Junta Deslizante</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Eixo interconector</b> .....	<b>24</b>
2.2	AÇOS .....	26
<b>2.2.1</b>	<b>Aços carbono</b> .....	<b>27</b>
2.2.1.1	Aços SAE 1050 .....	28
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Têmpera</b> .....	<b>30</b>
2.4	TRATAMENTOS TÉRMICOS SUPERFICIAIS .....	33
<b>2.4.1</b>	<b>Têmpera Superficial</b> .....	<b>34</b>
2.4.1.1	Têmpera por chama .....	34
2.4.1.2	Têmpera a laser .....	35
2.5	Têmpera por Indução .....	36
<b>2.5.1</b>	<b>Parâmetros de Aquecimento</b> .....	<b>39</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Parâmetros de Frequência</b> .....	<b>40</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Parâmetros de Potência</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Parâmetros de Aquecimento</b> .....	<b>43</b>
2.5.4.1	Indutores.....	43
<b>2.5.5</b>	<b>Parâmetros de Resfriamento</b> .....	<b>44</b>
2.5.5.1	Duchas .....	47
2.5.5.2	Polialquileno Glicol (PAG) .....	48
<b>2.5.6</b>	<b>Influência dos parâmetros da têmpera por indução nas distorções e tensões residuais</b> .....	<b>50</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>53</b>



3.1	EXPERIMENTOS ALTERANDO OS PARÂMETROS DE AQUECIMENTO .....	56
<b>3.1.1</b>	<b>Experimentos com tempo de aquecimento constante.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Experimentos com tempo de aquecimento variável .....</b>	<b>57</b>
3.2	EXPERIMENTOS ALTERANDO A TAXA DE RESFRIAMENTO .....	59
3.3	Análise Metalográfica .....	60
3.4	Análise De Microdureza .....	61
3.5	Análise Dimensional .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1	EXPERIMENTOS ALTERANDO PARÂMETROS DE AQUECIMENTO.....	63
<b>4.1.1</b>	<b>Experimentos com tempo de aquecimento constante.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Experimentos com tempo de aquecimento variável .....</b>	<b>66</b>
4.1.2.1	Análise Metalográfica .....	66
4.1.2.2	Análise de Microdureza .....	68
4.1.2.3	Análise Dimensional .....	70
4.2	EXPERIMENTOS ALTERANDO A TAXA DE RESFRIAMENTO .....	74
<b>4.2.1</b>	<b>Análise Metalográfica.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise de Microdureza.....</b>	<b>76</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Análise Dimensional .....</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>84</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a acirrada concorrência do mercado automotivo, critérios como eficiência, redução de custo e de peso, qualidade e tecnologia são de suma importância dentro da cadeia produtiva. Desta forma, cresce o desenvolvimento de novos materiais, tecnologias e até mesmo otimizações no processo de fabricação. De acordo com Nakagawa (1994), para que as empresas sejam mais competitivas, elas devem eliminar desperdícios, se comprometer com a qualidade total e incorporar tecnologias avançadas de manufatura. Em busca dessa maior competitividade, as empresas acabam sofrendo mudanças em sua estrutura de custos e despesas.

Uma das principais variáveis para a geração de valor em uma empresa é o custo produtivo, o qual caracteriza o gasto relativo na obtenção de matéria-prima ou serviço para a produção de seus bens ou serviços (MARTINS, 2010). Desta forma, é importante que haja controle constante sobre essa variável, com o objetivo de aumentar a competitividade da empresa. Ao adotar a estratégia de redução de custos, é necessário gerenciar a evolução desses custos em todas as etapas produtivas do produto. Mesmo que seja adotada a estratégia de diferenciação de produto, como é o caso dos modelos mais caros dos produtos de uma indústria automotiva, a adoção de custos competitivos se faz necessária para a indústria (SILVA, 1999).

Em um mercado tão agressivo como é o automotivo, muitas vezes, a estratégia de redução de custos se encontra em explorar as alternativas de matérias primas de menor custo, perante as inúmeras alternativas de materiais tecnológicos existentes no mercado atualmente.

Além dos custos, a indústria metalmecânica, em especial a automotiva, enfrenta sérios problemas devido às distorções e variações dimensionais durante a fabricação de componentes. Estas distorções podem ocorrer durante o tratamento térmico das peças, já que estas operações envolvem dilatação, e transformações de fase que acarretam alterações localizadas no volume da peça.

Tensões residuais, geometria da peça, microestrutura e elementos de liga contribuem diretamente para estas distorções (FRERICHS *et al.*, 2008 apud LEMOS, 2012). Além disso, parâmetros de tratamentos térmicos, soldagem ou usinagem devem ser rigorosamente analisados e controlados, com o intuito de evitar distorções indesejadas (GRUM, 2001).

A têmpera por indução envolve uma combinação de eletromagnetismo, transferência de calor e outros fenômenos metalúrgicos, com o objetivo de criar uma camada martensítica em áreas específicas da peça e conseqüentemente, aumentar a resistência ao desgaste e melhorar a vida em fadiga do componente (RUDNEV; LOVELESS; COOK, 2003).

O componente em questão (Ponta de eixo da junta homocinética) possui elevada capacidade de torque, e é bastante resistente a esforços axiais, os quais são muito frequentes em aplicações com suspensão independente. Os materiais utilizados para a fabricação da Ponta de Eixo geralmente são aços carbono como o SAE 1050, o qual posteriormente é tratado termicamente no processo de têmpera por indução para aumentar a sua resistência mecânica. Esse processo (têmpera por indução) também permite diminuir o surgimento de fissuras originadas no resfriamento, possibilita também, a utilização de aços carbono, os quais são mais econômicos, ao invés de aços ligas (CHIAVERINI, 2008).

Neste contexto, o presente trabalho tem por desafio minimizar as distorções dimensionais da junta homocinética após o tratamento térmico de têmpera por indução, de modo a evitar o aumento do custo em matéria-prima mais nobre que o utilizado atualmente (aço SAE 1050), além de eliminar a possibilidade de agregar mais material (eivar o peso) ao componente e reduzir paradas de processo devido à baixa qualidade do produto.

Como os parâmetros de aquecimento e de resfriamento da têmpera por indução exercem significativa influência nas propriedades e nas distorções dimensionais das peças tratadas, se faz necessário buscar as condições de tratamento que otimizem as propriedades mecânicas da peça mantendo suas dimensões dentro dos limites de tolerância.

Considerando que cada tipo de aço possui características singulares e tendo em vista a relativa escassez de trabalhos publicados sobre como a variação da potência de aquecimento e do grau de resfriamento influenciam as distorções na têmpera por indução de um aço específico como o aço SAE 1050, se faz necessário executar este tipo de análise paramétrica em cada material para verificar a influência destes parâmetros no grau de suas distorções.

Cabe então, um estudo comparativo entre os principais parâmetros de aquecimento do tratamento térmico de têmpera por indução (potência vs tempo de

aquecimento), e de resfriamento (concentração do líquido de têmpera) sobre a região do *spline* da junta homocinética, com o intuito de reduzir as distorções dimensionais (dureza, profundidade de camada e microestrutura), permanecer com as propriedades mecânicas e estabilizar o processo produtivo.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é avaliar as propriedades mecânicas e as distorções dimensionais de um componente da junta homocinética automotiva após o tratamento térmico de têmpera por indução, variando os parâmetros de potência e tempo de aquecimento e variando também a taxa de resfriamento por meio da concentração do fluido de resfriamento polimérico polialquileno glicol (PAG).

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) caracterizar (composição química) as amostras de aço SAE 1050, obtidas do componente automotivo ponta de eixo;
- b) avaliar o efeito da variação entre potência, mantendo um tempo constante de aquecimento no processo de têmpera por indução em amostras com 10% de PAG;
- c) avaliar o efeito da variação da potência e do tempo de aquecimento do processo de têmpera por indução em amostras com 10% de PAG;
- d) avaliar o efeito de diferentes concentrações de PAG na etapa de resfriamento durante o processo de têmpera por indução;
- e) analisar as microestruturas das amostras após o processo de têmpera por indução com diferentes parâmetros (potência/tempo de aquecimento e taxa de resfriamento);
- f) avaliar a dureza, bem como a espessura da camada temperada das amostras obtidas após o processo de têmpera por indução com diferentes parâmetros (resfriamento/potência/tempo de aquecimento);
- g) determinar a variação dimensional das amostras obtidas após o processo de têmpera por indução com diferentes parâmetros (potência/tempo de aquecimento e taxa de resfriamento).

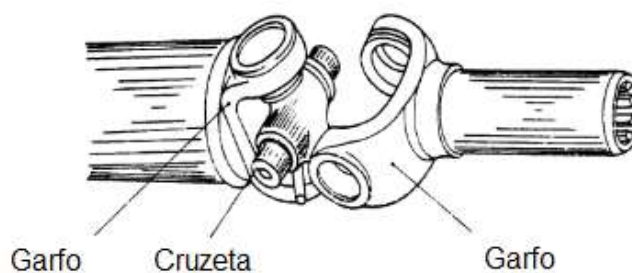
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos relacionados ao sistema de transmissão por semi-eixo homocinético, bem como suas propriedades e aplicações. Os tratamentos térmicos utilizados com o intuito de otimizar as propriedades mecânicas do aço são abordados de forma detalhada, evidenciando os parâmetros de processos necessários para o desenvolvimento do componente estudado. Por fim, é analisada a influência dos parâmetros da têmpera por indução nas distorções e tensões residuais.

### 2.1 SISTEMA DE TRANSMISSÃO POR SEMI-EIXO HOMOCINÉTICO

Até meados do século XX, as chamadas juntas universais (Figura 1) eram amplamente utilizadas como mecanismo para transmitir força entre dois eixos em planos inclinados, sendo utilizadas em máquinas estacionárias e nos primeiros veículos com tração motora. Tendo em vista que nesta época a tração traseira era muito popular devido às dificuldades de combinar a rotação com o esterçamento das rodas, as juntas universais operavam sem dificuldades nos baixos ângulos necessários aos eixos longitudinais que transmitiam a potência dos motores situados na dianteira dos carros até o eixo traseiro. No entanto, apresentavam limitações quando utilizadas em ângulos superiores à  $7^\circ$ . Assim, foram criadas as primeiras juntas homocinéticas, as quais, rapidamente, passaram a ser utilizadas como padrão para o desenvolvimento de veículos com tração dianteira, especialmente em modelos de passeio ou de tração nas 4 rodas (SEHERR-THOSS; SCHMELZ; AUCTION, 2006).

Figura 1 - Juntas Universais.



Fonte: GKN Automotive Limited ([2023])

O semi-eixo homocinético é um elemento rotativo que transmite a potência do motor transversalmente, a partir da caixa de câmbio para as quatro rodas, em aplicações de tração dianteira ou traseira (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]). No projeto mecânico do semi-eixo homocinético deve-se levar em consideração quatro parâmetros básicos (torque/rotação/ângulos/comprimento), os quais podem variar de uma aplicação para a outra. A transmissão do torque por meio de um ângulo entre a fonte e o elemento conduzido caracteriza a função primária de um semi-eixo homocinético, o qual deve, também, ser capaz de atender determinada faixa de rotação de acordo com a sua aplicação. As juntas do semi-eixo homocinético devem ser capazes de operar a um certo ângulo (até 52°), formado pela interseção dos eixos, sendo que este ângulo pode ser fixo ou variável. Além disto, a maior parte das aplicações exige algum meio de compensar os efeitos causados pela variação do comprimento do eixo, sendo que esta variação pode ser contemplada por meio de um eixo de comprimento variável ou com uma junta que permita um certo deslocamento axial.

Para o atendimento de todos os requisitos necessários, o semi-eixo homocinético de um veículo com tração dianteira é composto por um eixo interconector fixo a duas juntas homocinéticas (fixa/deslizante), estando cada uma presente em suas extremidades (Figura 2). Este conceito permite que o semi-eixo homocinético acompanhe a variação de ângulo causada pelo esterçamento das rodas e pelo deslocamento da suspensão enquanto o veículo está em movimento.

Figura 2 - Semi-eixo homocinético.



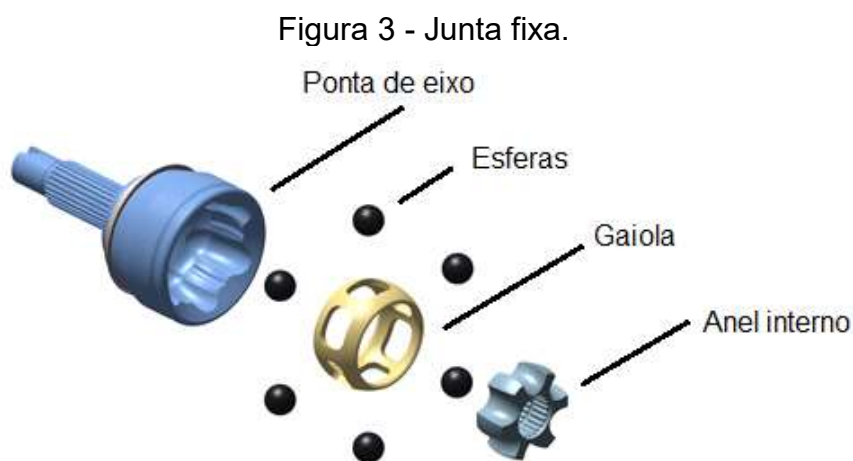
Fonte: GKN Automotive Limited ([2023])

### 2.1.1 Junta Fixa

A junta fixa é responsável por não permitir o deslocamento axial, ou seja, possui o comprimento fixo e, geralmente, é utilizada na conexão com a roda (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]). O tipo mais comum de junta fixa é a do tipo *Rzeppa*,

cujos registros de patente ocorreram na metade dos anos 1920 até início dos anos 1930. A junta fixa consiste basicamente por um anel externo forjado e usinado, que é fixo ao cubo de roda e um anel interno (também forjado e usinado) conectado ao eixo. Ambos os anéis são ligados entre si por 6 esferas posicionadas e mantidas em um plano por meio de uma gaiola.

A principal vantagem da junta fixa (Figura 3) é a habilidade de transmitir potência de forma constante e em ângulos relativamente elevados, podendo chegar a mais de 50°. Além disso, possui elevada capacidade de torque e é bastante resistente a esforços axiais, os quais são muito frequentes em aplicações com suspensão independente, sendo que a distância entre a roda e o diferencial muda constantemente (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]).



Fonte: GKN Automotive Limited ([2023])

### 2.1.2 Junta Deslizante

Em aplicações que exigem elevados cursos, costuma-se utilizar eixos bipartidos conectados por um entalhado. No entanto, para a maioria das aplicações, a variação de comprimento é absorvida pela junta deslizante, que diferentemente da junta fixa, possui maior grau de liberdade, permitindo o deslocamento axial (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]).

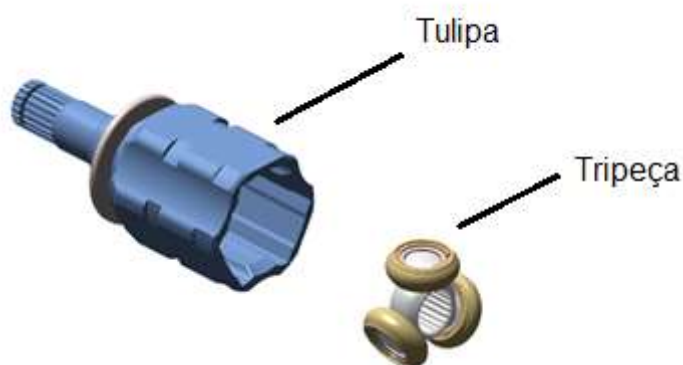
A junta deslizante promove a variação do comprimento do semi-eixo homocinético desde a posição da suspensão completamente comprimida até totalmente distendida, a fim de compensar a variação da distância entre o diferencial e o cubo de rodas provocada pelo deslocamento da suspensão. Além disto, é

responsável por compensar as variações de comprimento causadas pelo processo de manufatura, já que tanto o motor quanto os braços da suspensão são fixos à carroceria por coxins de borracha, os quais apresentam elevadas tolerâncias dimensionais.

As juntas deslizantes são montadas no lado da transmissão, bem como utilizadas no eixo cardam, pois apresentam elevada capacidade de ângulo de trabalho. Ao montá-las nas rodas, as juntas deslizantes acabariam por limitar o ângulo de esterçamento do veículo.

A classificação das juntas deslizantes compreende dois grupos distintos (juntas de esferas/juntas tripóides), sendo possível identificar na Figura 4 a junta deslizante tripóide do tipo Glanzer Internieur (GI), a qual é formada por um anel interno com 3 hastes, sendo que em cada haste é fixo um rolamento de agulhas (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]). Além disto, o anel externo forjado presente na junta tripóide, conhecido por Tulipa, possui 3 canais onde são encaixados cada um dos 3 rolamentos do anel interno.

Figura 4 - Junta deslizante tripóide do tipo Glanzer Internieur.



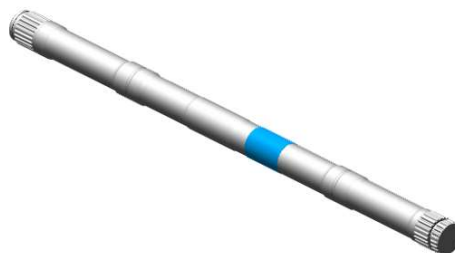
Fonte: GKN Automotive Limited ([2023])

### 2.1.3 Eixo interconector

O eixo interconector (Figura 5) representa o principal elemento do semi-eixo homocinético, pois é responsável pela transmissão do torque, além de unir ambas as juntas homocinéticas (fixa/deslizante) e completar a conexão entre o diferencial e as rodas. Normalmente, o eixo é fabricado a partir de uma barra de aço usinado, a fim de atender às necessidades de resistência estrutural, fadiga e vibração.



Figura 5 - Eixo interconector.



Fonte: GKN Automotive Limited ([2023])

O projeto do eixo interconector é essencial para o bom desempenho em relação a vibração, pois dependendo do comprimento e seção transversal do eixo interconector, o primeiro modo de vibração de flexão pode coincidir com a segunda ordem de rotação do eixo virabrequim do motor, fazendo com que sua frequência de ressonância seja excitada.

Em muitos projetos veiculares, o motor é montado longitudinalmente ao eixo do carro. Nestes casos, a transmissão fica localizada no centro das duas rodas dianteiras de tal forma que os dois semi-eixos homocinéticos possuam o mesmo comprimento. No entanto, nos projetos mais modernos, o motor é disposto transversalmente, fazendo com que o diferencial fique deslocado para um dos lados do veículo. Nestes casos, os semi-eixos do lado esquerdo e direito apresentam comprimentos diferentes e a frequência do primeiro modo de flexão do eixo interconector maior permanece na faixa de rotação do motor (GKN AUTOMOTIVE LIMITED, [2023]).

O eixo interconector do semi-eixo homocinético pode ser maciço, tubular soldado ou monobloco tubular, dependendo do sistema projetado. Para os eixos do tipo monobloco tubular são empregados materiais como o aço SAE 4130H (aço SAE 4130 na condição temperado) com uma camada cementada na parte externa e na parte interna. Este eixo é fabricado por processos de conformação como o martelamento e extrusão inversa e em seguida tratado por processos de cementação e têmpera (STEYER, 2006).

Os eixos maciços ou tubulares soldados são constituídos de aços carbono, como o aço SAE 1045 ou SAE 1050, que são submetidos ao tratamento térmico de têmpera por indução para melhora das suas propriedades mecânicas. Os eixos tubulares soldados são produzidos por um tubo sem costura soldado por fricção e a têmpera é realizada somente em suas extremidades (STEYER, 2006).

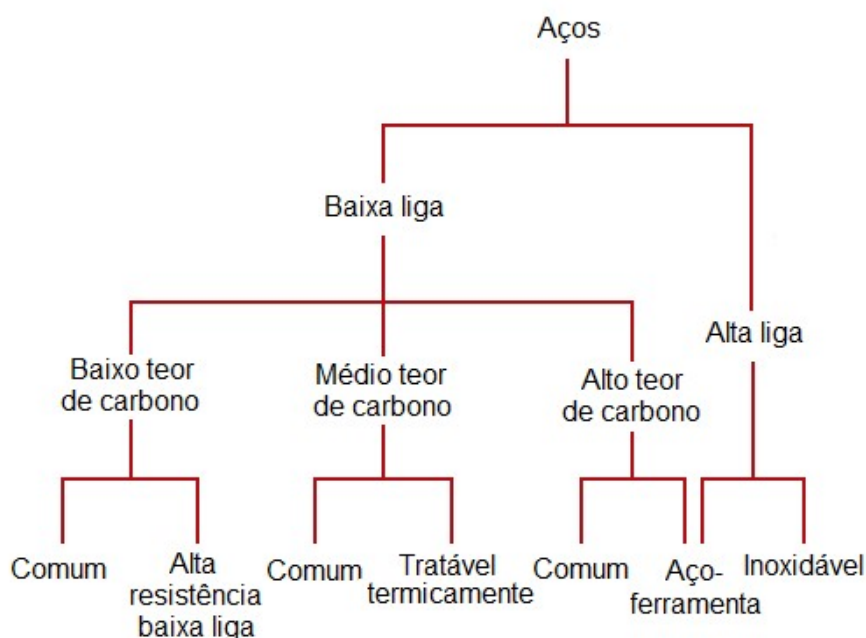
## 2.2 AÇOS

Os aços são materiais metálicos de extensa aplicação em diversas áreas da engenharia, podendo ser definidos como uma liga metálica ferro-carbono que possui de 0,008% a 2,11% de carbono e outros elementos residuais oriundos da sua fabricação, tais como manganês (Mn), magnésio (Mg), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S) (CHIAVERINI, 2008).

Há três fatores que justificam a grande aplicação do aço e de outras ligas ferrosas. De acordo com Callister Júnior e Rethwisch (2012), um destes fatores é a abundância do ferro na crosta terrestre o que o torna um produto de baixo custo, outro fator é relativo aos processos de extração e processamento relativamente econômicos para essas ligas e, finalmente, a grande versatilidade das propriedades físicas e mecânicas dos aços e ligas ferrosas, podendo assumir propriedades diversas de acordo com sua composição e tratamentos térmicos.

A forma mais tradicional de se classificar os aços e outras ligas ferrosas é por meio da sua composição química, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Classificação dos aços.



Fonte: Callister Júnior e Rethwisch (2012).

Os aços carbono possuem carbono como elemento de liga principal no ferro, havendo uma porção inerente de quantidade baixa de outros elementos de liga. Por

outro lado, nos aços liga, diversos elementos de liga estão presentes. Um exemplo de aço liga é o aço inoxidável, o qual possui elevado teor de elementos como o cromo (Cr) e como no caso dos inoxidáveis austeníticos, o níquel (Ni) também. Além das ligas exibidas na figura, há inúmeros aços de alta liga sofisticados os quais vem cada vez mais pesquisados e disseminados para aplicações de ponta, como os aços *maraging*, que são endurecidos por uma reação que não envolve carbono (SILVA; MEI, 1988).

### 2.2.1 Aços carbono

Apesar dos aços carbono possuírem o carbono como principal elemento de liga, é possível classificar os aços pela quantidade de carbono que eles possuem, uma vez que o teor de carbono influencia diretamente as propriedades mecânicas e o processamento do aço. Desta forma, é possível classificar os aços carbono em aços baixo, médio e alto carbono (CHIAVERINI, 2008).

Os aços de baixo carbono geralmente possuem percentual de carbono abaixo de 0,25% e, pela nomenclatura *Society of Automotive Engineers* (SAE), corresponde aos aços 1010 e 1020, por exemplo. Estes aços possuem maior ductilidade e menor resistência mecânica em comparação aos aços de médio e alto carbono. Sendo que devido ao baixo teor de carbono, o aumento da resistência destes aços ocorre, na maioria das vezes, por meio do trabalho a frio e não pelo processo de têmpera. Os aços de baixo carbono são aplicados, geralmente, em carcaças de automóveis, elementos estruturais e chapas para tubulações (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012).

Aços de médio carbono possuem teor de carbono entre 0,25% e 0,60%, dentre os quais se destacam os aços SAE 1040, 1050 e 1060. Possuem baixa temperabilidade, mas podem ser termicamente tratados em seções muito finas e em elevadas taxas de resfriamento. Os aços de médio carbono apresentam maior resistência mecânica e dureza do que os aços de baixo carbono, especialmente, após tratamentos de têmpera e revenimento. Os aços de médio carbono são aplicados em engrenagens, virabrequins, trilhos de trens, dentre outras aplicações (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012).

Teores de carbono entre 0,6% e 1,4% são obtidos nos aços de alto carbono, sendo que aços com teor acima de 1,4% não possuem muita aplicabilidade comercial.

Aços de alto carbono, tais como os aços SAE 1080 e 1100, são aplicados geralmente após processo de têmpera e revenimento, devido sua maior temperabilidade, elevada resistência mecânica e dureza. Aços de alto carbono são empregados na fabricação de molas e arames.

#### 2.2.1.1 Aços SAE 1050

De acordo com a norma SAE J-404 (1994), o aço SAE 1050 possui teor de carbono entre 0,48% e 0,55%, teor de manganês de até 0,90% e teor desprezível de outros elementos de liga, pertencendo assim à família dos aços carbono.

Da mesma forma que os demais aços carbono, a microestrutura, em condições de equilíbrio, do aço SAE 1050 é composta pelas fases ferrita Cúbica de Corpo Centrado (CCC) e cementita em lamelas, formando o microconstituente perlita. Tendo em vista que o teor de carbono do aço SAE 1050 é abaixo da composição eutetóide, é formada uma fase ferrita proeutetóide em seu resfriamento, localizada preferencialmente nos contornos dos grãos perlíticos.

O aço 1050 apresenta uma boa relação custo-benefício, pois suas propriedades mecânicas alinhadas ao seu baixo custo o tornam atrativo para a fabricação de diversos produtos. A indústria automotiva usa amplamente este material na fabricação de bielas, pratos de mola, braço de direção, anéis de juntas, ferramentas manuais, comando de válvulas, semi-eixos, eixos, motor, motor de partida, alternador, juntas homocinéticas, dentre outros componentes.

Dependendo da aplicação, o aço 1050 não é utilizado em sua forma convencional com microestrutura perlítica. Desta forma, faz-se necessário recorrer a processos térmicos para obter aumento na dureza e resistência mecânica.

### 2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos dos aços podem ser caracterizados pelo conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as propriedades dos aços. No entanto, quando as operações de aquecimento e resfriamento são conjugadas às etapas de

conformação mecânica, o tratamento é chamado termomecânico (CHIAVERINI, 2008).

Por meio dos tratamentos térmicos é possível alterar propriedades mecânicas dos aços, sem alterar a sua composição química, pois os tratamentos térmicos alteram, em maior ou menor escala, apenas a estrutura dos aços e ligas. Os tratamentos térmicos podem ser empregados para provocar alívio de tensões internas (oriundas de esfriamento desigual ou trabalho mecânico), para elevar a dureza, resistência mecânica, térmica e à corrosão, para modificar as propriedades elétricas e magnéticas, bem como para aumentar a ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste e propriedades de corte (SILVA; MEI, 1988).

Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízos de outra. Por exemplo, o aumento de ductibilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário, pois, que os diferentes tipos de tratamento térmico sejam escolhidos e aplicados criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo (CHIAVERINI, 2008).

Os fatores que influenciam os tratamentos térmicos são o aquecimento, o tempo de permanência em elevadas temperaturas (rampa de aquecimento) e o resfriamento. Uma elevada velocidade de aquecimento pode provocar fissuras ou empenamentos, um tempo de permanência excessivo pode causar descarbonetação e a velocidade de resfriamento irá definir efetivamente a microestrutura e as propriedades finais do aço (CHIAVERINI, 2008).

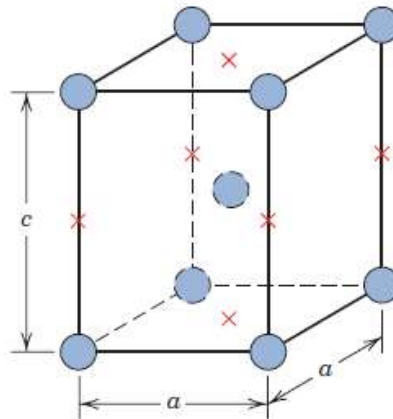
Os principais tratamentos térmicos são recozimento, normalização, têmpera, revenimento, solubilização e envelhecimento. O recozimento, a normalização e a têmpera se aplicam aos aços transformáveis, o revenimento é aplicado em aços temperados, a solubilização e o envelhecimento são aplicados em aços e ligas especiais. O recozimento é aplicado com o intuito de proporcionar melhoria na ductilidade e na usinabilidade. A normalização é empregada para refinar os grãos e produzir uma distribuição de tamanho mais uniforme ou, ainda, para ajustar a microestrutura para tratamento posterior, já quando se deseja aumentar a dureza, a resistência mecânica e à abrasão é empregado o tratamento térmico de têmpera (SILVA; MEI, 1988).

### 2.3.1 Têmpera

De acordo com Silva e Mei (1988), a têmpera consiste no resfriamento de um aço na forma de austenita a uma velocidade de resfriamento suficientemente rápida, para que não haja a formação das microestruturas perlíticas e bainíticas e sendo assim, formada a fase martensita.

A martensita representa uma fase metaestável composta por ferro que está supersaturada com carbono, o qual é resultante de uma transformação sem difusão (atérmica) da austenita (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012). Esta fase possui estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC) como mostra a Figura 7.

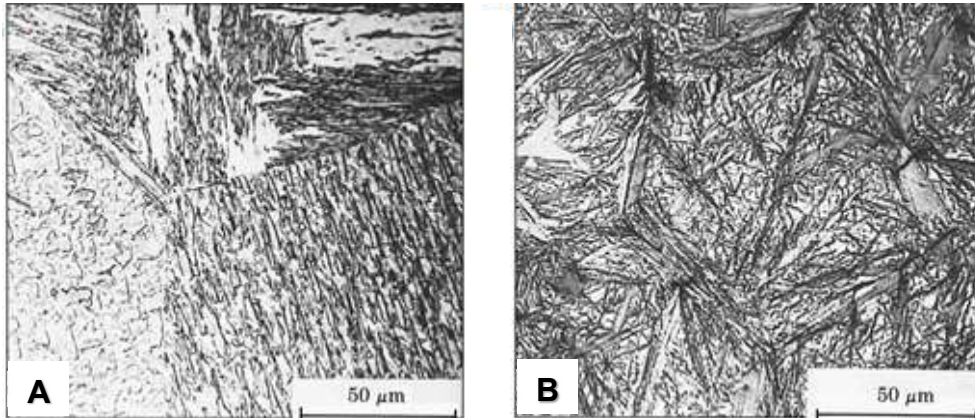
Figura 7 - Estrutura tetragonal de corpo centrado.



Fonte: Callister Júnior e Rethwisch (2012).

A micrografia da fase martensita varia de acordo com o teor de carbono. Podendo se assemelhar a ripas, em aços com menos de 0,60%p C, ou em placas, quando os aços tiverem percentual de carbono acima de 1,0%p C, como é possível evidenciar na Figura 8.

Figura 8 - Martensita: a) em ripas e b) em placas.

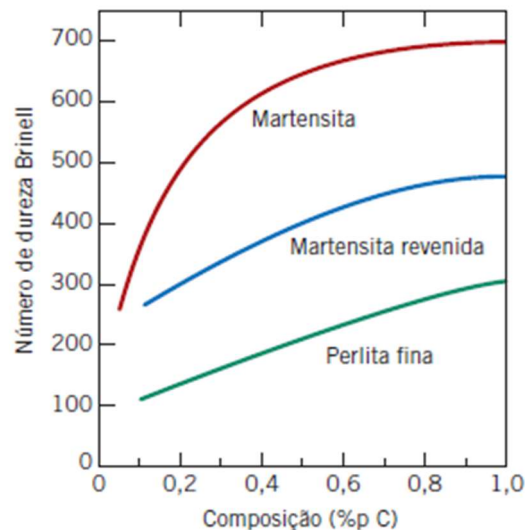


Fonte: Adaptado de Smith e Hashemi (2012).

Esta fase é marcada pela sua elevada dureza e resistência mecânica, propriedades estas que dependem do teor de carbono e dos elementos de liga do aço, sendo que um maior teor de carbono resultará diretamente em uma martensita de maior dureza (CALLISTER JÚNIOR; RETHWISCH, 2012).

Resultam do processo de têmpera o aumento da dureza (profunda ou superficialmente), a redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição) e da tenacidade, bem como o surgimento de tensões internas. Na Figura 9 é possível avaliar a variação da dureza da martensita revenida em comparação à martensita sem revenido e à perlita fina de acordo com o percentual de carbono em aços carbono e aços de baixa liga.

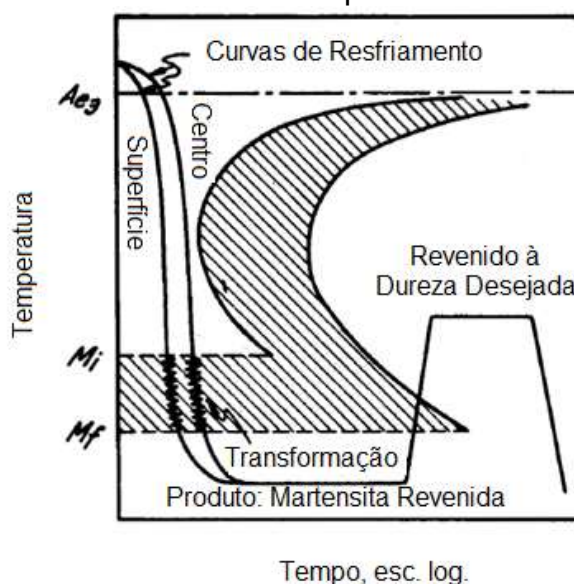
Figura 9 - Comparativo da dureza entre microestruturas dos aços de acordo com a variação do teor de Carbono.



Fonte: Callister Júnior e Rethwisch (2012).

A temperatura e velocidade de resfriamento são parâmetros essenciais para o tratamento térmico de têmpera, e depende diretamente da composição do aço, da forma e das dimensões das peças, bem como do meio de resfriamento (CHIAVERINI, 2008). Na Figura 10 é possível observar o tratamento térmico de têmpera no Diagrama Transformação Tempo Temperatura (TTT) de um determinado aço, seguido do reaquecimento do material no tratamento de revenido.

Figura 10 - Tratamentos térmicos de têmpera e revenido em diagrama TTT.



Fonte: CHIAVERINI (2008, p. 96).

Pode ser observado no diagrama TTT que há uma diferença entre a taxa de resfriamento entre o centro e a superfície da peça, a qual pode ser considerada desprezível em peças de pequena espessura, porém, pode ser considerada problemática em peças de grandes dimensões (CHIAVERINI, 2008).

O tratamento térmico de têmpera é amplamente utilizado em aços de médio carbono, para a obtenção de ferramentas cortantes e componentes mecânicos com elevada resistência mecânica, como por exemplo, as engrenagens (COLPAERT, 2008).

Tendo em vista os efeitos adversos do processo de têmpera, o tratamento de revenimento é, comumente, realizado logo após o tratamento térmico de têmpera, visando a recuperação da ductilidade do material (CHIAVERINI, 2008).

O revenimento, ou revenido, é um tratamento térmico que acompanha a têmpera, já que ele elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por ela, alivia ou



remove tensões internas, corrige a dureza e a fragilidade excessivas e aumenta a ductilidade e resistência ao choque do material (CHIAVERINI, 2008).

O processo de revenimento consiste no aquecimento do material uniformemente até uma temperatura abaixo da austenitização e manutenção do aço nesta temperatura até que se obtenham as propriedades desejadas (SILVA; MEI, 1988).

A mudança nas propriedades do aço depende da temperatura de revenido e do tempo de permanência, porém é mais conveniente alterar a temperatura do que aumentar o tempo de permanência, já que a queda na dureza é acentuada nos primeiros minutos (SILVA; MEI, 1988).

Entre as temperaturas de 25 °C e 100 °C há uma pequena precipitação de carbono que não exerce muita influência na dureza. O chamado primeiro estágio do revenido ocorre entre 100 °C e 250 °C, no qual começa a se formar o carboneto do tipo épsilon e há diminuição da dureza. O segundo estágio do revenido ocorre entre 200 °C e 300 °C e é marcado pela transformação da martensita em bainita, diminuindo ainda mais a dureza. Entre 250 °C e 350 °C a dureza diminui ainda mais, com a presença de uma microestrutura chamada troostita. Os aglomerados de cementita assumem uma forma esferoidal entre 400 °C e 600 °C, com queda ainda maior na dureza e entre 600 °C e 700 °C há uma recristalização e crescimento de grão (CHIAVERINI, 2008).

Alguns aços de alta temperabilidade passam por duas operações de revenimento, sendo o primeiro com a peça ainda morna. Estes dois revenimentos garantem uma maior estabilidade dimensional em alguns produtos que podem passar por mais de dois revenimentos (SILVA; MEI, 1988).

## 2.4 TRATAMENTOS TÉRMICOS SUPERFICIAIS

Tratamento térmico superficial caracteriza um processo aplicado de forma exclusiva na superfície do material, priorizando certa região da peça, com o intuito de melhorar a resistência ao desgaste e à abrasão desta região, e mantendo a ductilidade do núcleo (CHIAVERINI, 2008; CRYDERMANA; SHAMSAEI; FATEMI, 2011; SILVA; MOTTA, 2020).

### 2.4.1 Têmpera Superficial

Para a obtenção de um aço com elevada dureza superficial, porém com o núcleo tenaz, tais são os casos de muitos componentes de máquinas como engrenagens e eixos, faz-se necessário realizar o processo de têmpera superficial (CHIAVERINI, 2008).

A dificuldade de tratamento de peças de grandes dimensões em fornos, a possibilidade de endurecer apenas regiões críticas, evitar as grandes distorções da têmpera convencional melhorando a precisão dimensional, o controle da profundidade de endurecimento, baixo investimento e diminuição do aparecimento de fissuras. Estas são as principais razões que justificam a preferência pela têmpera superficial ao invés da têmpera convencional (CHIAVERINI, 2008).

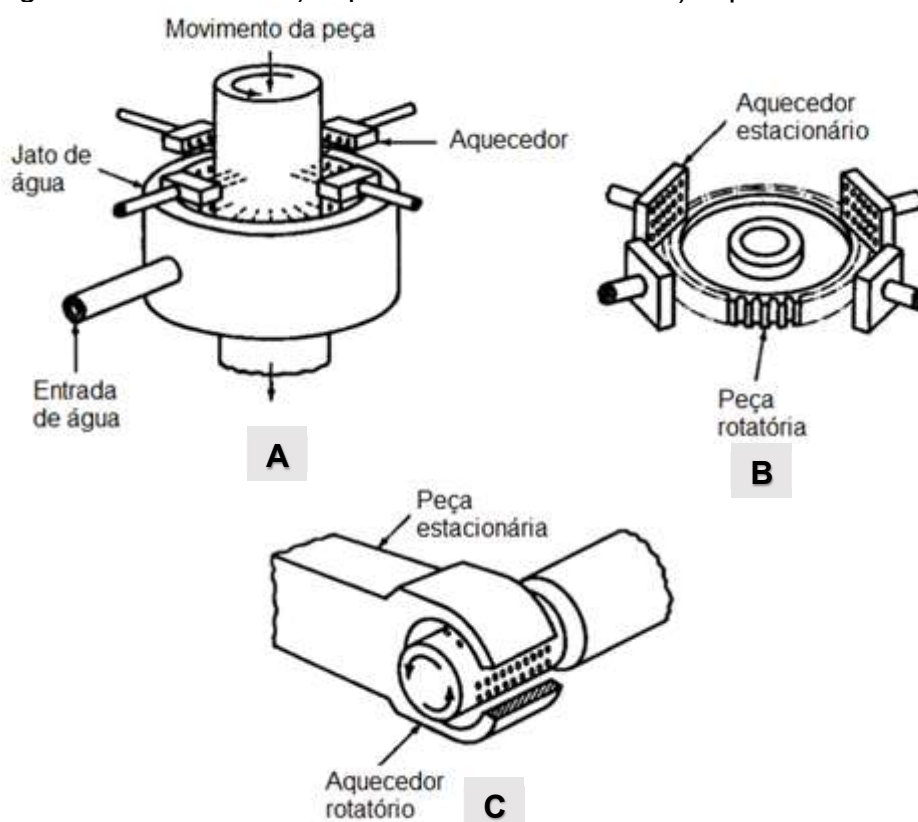
Os principais processos de têmpera superficial são a têmpera por chama, a têmpera a laser e a têmpera por indução, que diferem principalmente pela fonte de calor usada para o aquecimento da peça (CHIAVERINI, 2008).

#### 2.4.1.1 Têmpera por chama

No processo de têmpera superficial por chama, o aquecimento resulta da queima de gases (propano/acetileno/gás natural) e pode ser empregado em peças grandes, as quais não poderiam ser tratadas nos fornos convencionais. Da mesma forma, é possível realizar a têmpera em regiões concentradas, além de ser um processo mais viável economicamente para pequenos lotes de peça em comparação à têmpera por indução (SILVA; MEI, 1988).

O resfriamento pode se dar por imersão ou por ducha, mas os equipamentos usados para resfriamento por ducha variam de acordo com a geometria das peças, como por exemplo, nas peças cilíndricas, onde se utiliza um dispositivo semelhante a um torno, no qual a peça é fixada e rotacionada, enquanto a tocha de gás em combustão se desloca junto do jato de água, proporcionando resfriamento brusco (CHIAVERINI, 2008). Outros dispositivos para este processo de têmpera podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 - Diferentes dispositivos para a têmpera por chama: a) Aquecedor e jatos de água estacionários b) Aquecedor estacionário c) Aquecedor rotatório.



Fonte: Adaptado de Silva e Mei (1988).

Este tratamento térmico pode ser aplicado em aços carbono e em alguns aços ligados, mas é um processo lento, e apesar de possuir um equipamento mais barato, requer maior manutenção.

#### 2.4.1.2 Têmpera a laser

Outra forma de se realizar a têmpera na superfície de peças é por meio do laser, que além dos seus diversos usos na engenharia como no corte e na soldagem, também encontra um campo da aplicação nos tratamentos térmicos.

Segundo Totten (2006), uma das vantagens dos tratamentos térmicos que utilizam o laser é um alto-resfriamento da superfície por meio da condução de calor para o material frio, o que elimina a necessidade de agentes de resfriamento e procedimentos de limpeza posteriores. Além disto, o controle computadorizado do raio

laser sobre a peça, permite tratar peças pequenas ou complexas, e reduzir as distorções ou alterações dimensionais após o tratamento térmico.

Algumas limitações dos tratamentos térmicos com laser incluem a distribuição não-homogênea de energia no raio laser, um campo de temperaturas muito estreito para provocar as mudanças microestruturais desejadas e a baixa absorção da luz laser na interação com a superfície do material. A capacidade de o material absorver a luz irradiada depende do comprimento de onda, a qual influencia a profundidade da camada superficial endurecida da mesma forma que a potência do raio laser (TOTTEN, 2006).

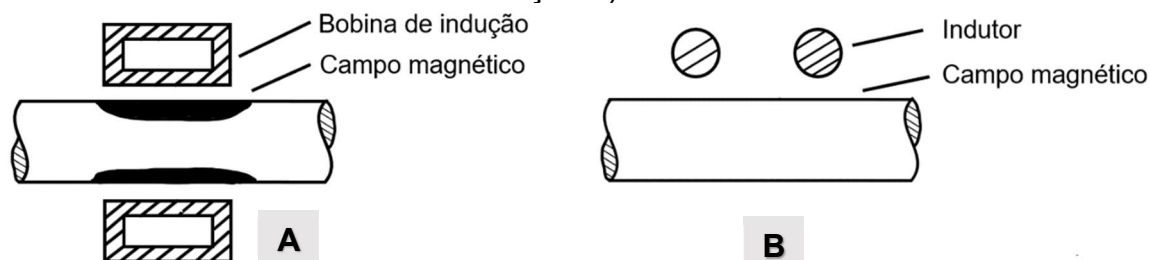
## 2.5 TÊMPERA POR INDUÇÃO

O tratamento térmico por indução é muito utilizado quando se deseja obter alteração das propriedades mecânicas na superfície do metal, preservando as propriedades do núcleo, contribuindo diretamente para o aumento da vida útil em fadiga. Este processo é bastante empregado na indústria automotiva para melhorar o desempenho sob fadiga de aços carbono, especialmente aços de baixo carbono (COUPARD *et al.* 2008).

O processo de têmpera por indução é uma combinação de fenômenos eletromagnéticos, de transferência de calor e metalúrgicos que ocorrem quando a peça é aquecida até a temperatura requerida para a transformação de fase (austenitização), e então, rapidamente resfriada (TOTTEN, 2006).

O calor superficial obtido no processo de têmpera por indução é produzido por indução eletromagnética, por meio de bobinas de cobre ou indutores envolvendo a peça. A passagem de uma corrente alternada pelo indutor ou pela bobina de indução produz um campo magnético altamente concentrado. Cria-se assim um circuito fechado, onde o calor provém da resistência da própria peça à passagem da corrente induzida, conforme é possível verificar na Figura 12.

Figura 12 - Exemplo de campos magnéticos gerados por bobina e indutor: a) bobina de indução b) indutor.



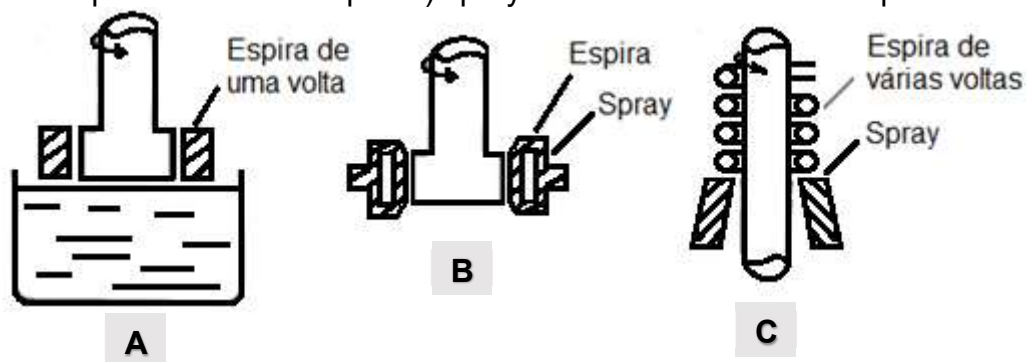
Fonte: Adaptado de Chiaverini (2008).

O campo magnético induz um potencial elétrico na peça, provocando um fluxo de corrente originador de aquecimento da peça por efeito Joule, sem necessidade de contato entre a bobina e a peça. As principais vantagens deste tratamento térmico são a taxa de aquecimento extremamente rápida, boa reprodutibilidade e baixo consumo de energia (RUDNEV *et al.*, 2000 apud LEMOS, 2012; RUDNEV; LOVELESS; COOK, 2003).

Quando o material recebe um campo magnético variável, cria-se uma força eletromotriz induzida, a qual provoca a circulação de uma corrente elétrica, chamada corrente de Foucault. A circulação de corrente nos materiais dá-se preferencialmente na superfície, provocando o aquecimento da região por perdas, via efeito Joule (OLIVEIRA; ARAUJO, 2002).

O resfriamento da peça pode ocorrer por mergulho em um tanque com água ou óleo, processo semelhante aos demais tratamentos térmicos de têmpera, ou pode ser realizado por meio de um spray refrigerante, que pode ser proveniente da própria bobina de indução ou em paralelo à mesma, como é exemplificado na Figura 13.

Figura 13 - Montagens para têmpera por indução: a) mergulho em líquido b) spray proveniente da espira c) spray movimentando com a espira.



Fonte: Adaptado de Silva e Mei (1988).

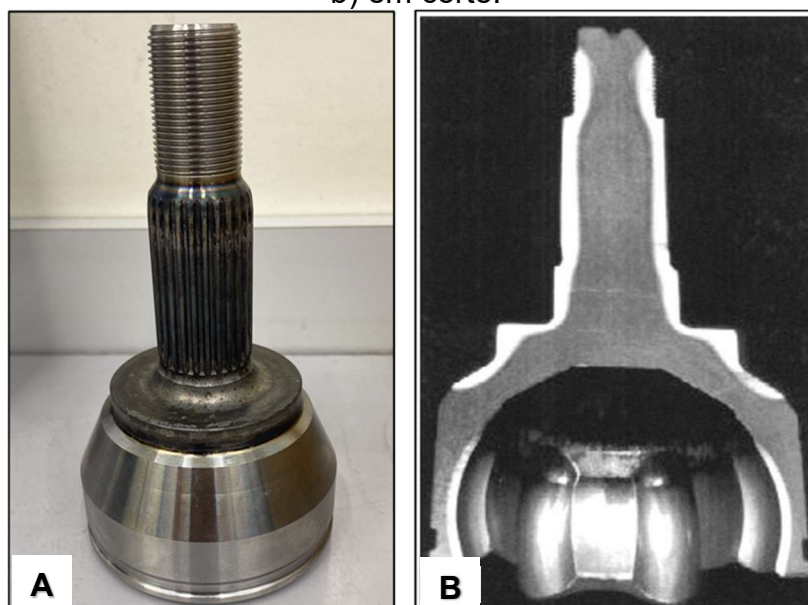
Tensões residuais compressivas são induzidas pela transformação de fase superficial durante o tratamento térmico de têmpera por indução e mesmo que na maioria dos casos elas sejam benéficas, elas podem ser eliminadas ou minimizadas por meio de tratamentos (posteriores) de alívio de tensões (TOTTEN, 2006).

O super-endurecimento também é um fenômeno inconveniente nas peças temperadas por indução, já que é formada uma camada de dureza e fragilidade maior do que a designada em projeto. Este cenário é mais comum de ocorrer nos aços de 0,35-0,60% de carbono (TOTTEN, 2006) devido ao grão mais refinado do aço decorrente do curto espaço de tempo de austenitização e pelas elevadas tensões residuais (LEMOS, 2012).

Tendo em vista a necessidade de elevada resistência ao desgaste, como por exemplo em rolamentos, uma camada endurecida de 0,25 mm a 1,00 mm é satisfatória. Já, quando se necessita de elevada resistência ao desgaste e à carregamentos moderados, como em virabrequins, uma camada de 1,00 mm a 2,50 mm é recomendada (TOTTEN, 2006).

No caso de uma peça automotiva que necessita de elevada resistência à torção e ao desgaste, o processo de têmpera por indução caracteriza como método ideal, pois garante uma camada endurecida na superfície da peça, enquanto o núcleo permanece dúctil para suportar o choque mecânico. Este fenômeno pode ser evidenciado no corte transversal da ponta de eixo de comando automotivo, conforme é representado na Figura 14b (TOTTEN, 2006).

Figura 14 - Ponta de eixo automotivo tratado por têmpera por indução: a) vista frontal b) em corte.



Fonte: a) Autor. b) Totten (2006).

### 2.5.1 Parâmetros de Aquecimento

A habilidade de fornecer energia para uma parte específica da peça no aquecimento por indução, bem como de obter o desejado tratamento térmico, depende de muitos fatores, cujos mais importantes são as propriedades térmica e eletromagnética dos materiais, a potência aplicada, a frequência selecionada, a velocidade de aquecimento, o processo e a velocidade de resfriamento, a susceptibilidade do material ao tratamento térmico (temperabilidade) e a forma e dimensões da peça a ser tratada (NOVIKOV, 1994; RUDNEV; LOVELESS; COOK, 2003).

A velocidade de aquecimento e a profundidade da camada temperada dependem diretamente das propriedades do campo magnético gerado, tais como a frequência da corrente elétrica e a densidade de potência. Ao manter a frequência e a potência da corrente elétrica constantes, a velocidade de avanço da bobina ou do indutor irá influenciar na camada temperada, uma vez que altera a distribuição de temperaturas na peça (COELHO, 2022).

Entende-se que uma maior velocidade de avanço diminui a profundidade de endurecimento, e desta forma, sendo necessário corrigir este efeito aumentando a potência ou diminuindo a frequência da corrente elétrica (BOSSLE *et al.*, 2021). Para

a têmpera de longos eixos, a velocidade de avanço chega a ser da ordem de 1 cm/s (SILVA; MEI, 1988).

O aumento na intensidade da corrente elétrica do indutor influencia diretamente no aumento da dureza, conforme concluído no trabalho de Bossle *et al.* (2021) em pinos articulados de aço SAE 1045. Esta influência ocorre devido à dissolução e distribuição uniforme do carbono na austenita, além de que as elevadas temperaturas decorrentes da corrente elétrica promovem uma taxa de resfriamento maior, formando uma estrutura martensítica refinada.

### 2.5.2 Parâmetros de Frequência

Correntes elétricas de frequência elevada produzem uma menor região aquecida para a mesma densidade de potência (SILVA; MEI, 1988). Camadas endurecidas da ordem de 0,25 mm são produzidas por altas frequências, da ordem de 100 kHz a 1 MHz. Enquanto camadas de mais de 12 mm são produzidas por correntes de frequência de 3 a 25 kHz por maiores períodos (CHIAVERINI, 2008). A Tabela 1 apresenta a relação entre a frequência, a densidade de potência e a profundidade de penetração na têmpera por indução.

Tabela 1 - Frequência empregada na têmpera por indução e sua relação com a potência e a profundidade da camada temperada.

Frequência (Hz)	Profundidade de Penetração (mm)	Densidade de Potência recomendada (W/cm <sup>2</sup> )
500.000	0,4 a 1,1	1.500
	1,1 a 2,3	800
10.000	1,5 a 2,3	1.500
	2,3 a 3,0	1.500
	3,0 a 4,0	1.500
3.000	2,3 a 3,0	2.300
	3,0 a 4,0	2.200
	4,0 a 5,0	1.500
1.000	4,0 a 7,0	1.500
	7,0 a 9,0	1.500

Fonte: Silva e Mei (1988).

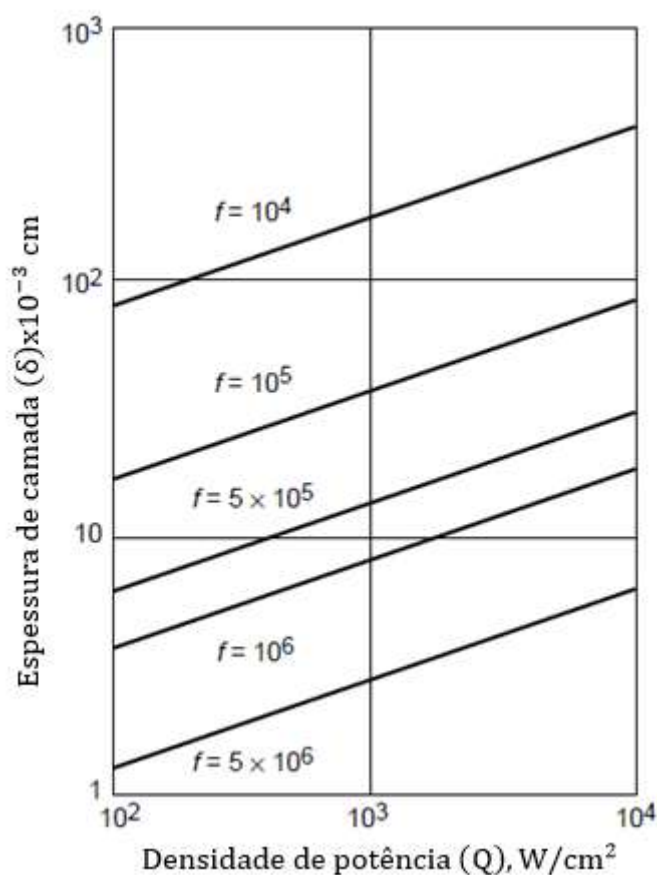


### 2.5.3 Parâmetros de Potência

Assim como a frequência, a densidade de potência é um dos fatores mais importantes que afetam a profundidade da camada temperada (RUDNEV, 2004). Sendo esta grandeza definida como a razão entre a potência do gerador de alta frequência e a camada superficial do componente (TOTTEN, 2002).

Na Figura 15 é possível observar que o aumento na densidade de potência reflete diretamente no acréscimo da profundidade da camada temperada para diversas frequências adotadas em um aço hipoeutetóide (TOTTEN, 2002).

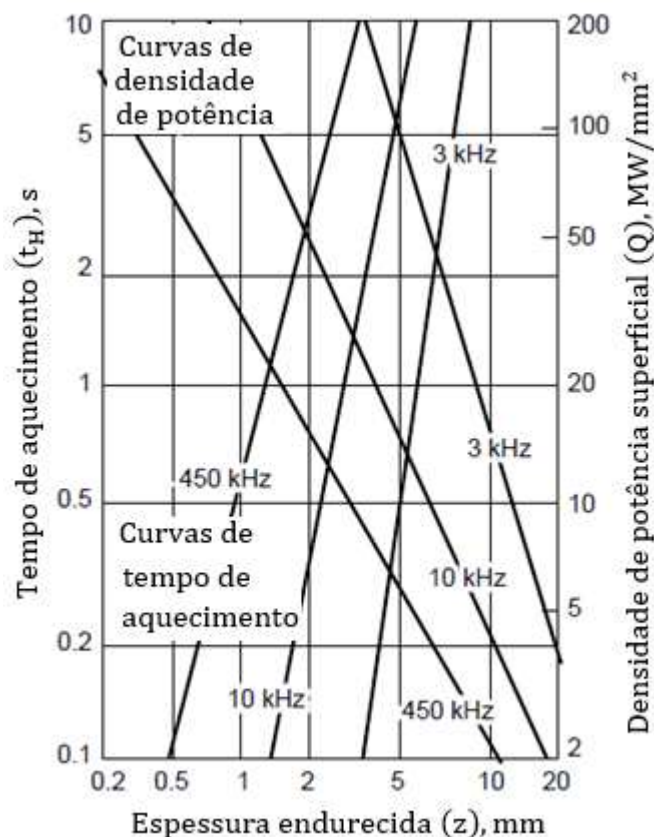
Figura 15 - Relação entre a densidade de potência e a espessura da camada temperada para diferentes frequências de corrente adotadas em um aço hipoeutetóide.



Fonte: Totten (2002).

Além disto, é possível verificar na Figura 16 a interdependência entre a densidade de potência e a frequência, vistos como uma função da profundidade da camada endurecida e do tempo de aquecimento para o mesmo material.

Figura 16 - Influência da frequência, densidade de potência e tempo de aquecimento na profundidade da camada endurecida.



Fonte: Totten (2002).

No trabalho de Metage e Sidhu (2017), foi investigada a influência de alguns parâmetros da têmpera por indução nas propriedades de uma peça de aço DIN-41Cr4, estes parâmetros foram a potência, a taxa de alimentação, o tempo de permanência e a taxa de fluxo de resfriamento. O aço desta pesquisa se assemelha aos aços de médio carbono por conta do seu teor de carbono (0,40%), mas com a presença de cromo (1,11%) e manganês (0,82%), que influenciam no tratamento térmico aumentando a temperabilidade do material.

Este experimento foi conduzido variando a potência entre 10 e 15 kW, a taxa de alimentação entre 200 e 400 mm/s, o tempo de permanência entre 0,1 e 0,3 s e a taxa de fluxo de resfriamento entre 10 e 14 l/min. Após medições de microdureza e análise microestrutural, foi concluído que a potência exerce mais influência na dureza da peça do que os outros parâmetros estudados.

## 2.5.4 Parâmetros de Aquecimento

O tempo de aquecimento pode ser da ordem de 1 a 10 segundos para peças pequenas, evitando o tempo de aquecimento elevado que pode levar ao fenômeno de superaquecimento e trincas (SILVA; MEI, 1988).

O pré-aquecimento pode exercer influência nas propriedades de uma peça temperada por indução, já que o pré-aquecimento aumenta as tensões compressivas na superfície e, respectivamente, a resistência à fadiga da peça temperada (LI; FREBORG; FERGUSON, 2016).

### 2.5.4.1 Indutores

As bobinas de indução ou indutores são ferramentas, dispositivos, utilizados em máquinas de têmpera por indução, para efetuar o aquecimento da peça, em uma determinada região desta peça. Tendo em vista que são usualmente projetadas para aplicações específicas, bem como para atender especificações únicas de têmpera, são encontradas de diferentes formatos e tamanhos (RUDNEV; LOVELESS; COOK, 2003).

O projeto de um indutor (Figura 17) envolve basicamente dois fatores, os quais caracterizam a ciência e a arte. Sendo que a parte da ciência está baseada no princípio da lei de ohm do magnetismo e a parte da arte está baseada na experiência de quem já trabalhou antes em situações similares, uma vez que os indutores geralmente são construídos artesanalmente.

Figura 17 - Indutor para haste da Ponta de Eixo.



Fonte: Autor.

Os indutores são construídos de cobre eletrolítico com 99,99 % de pureza, sendo possível agregar concentradores de fluxo magnético (fluxtrol / chapas de Ferro silício (FeSi) / Ferrotron) com objetivo de melhorar a eficiência do indutor, ou orientar o campo magnético para uma determinada região da peça.

Devido à elevada corrente que circula através do indutor, é necessário que ele seja refrigerado por meio de circulação de água em volume necessário para evitar o seu rompimento quando aplicado potência, e para também assegurar uma vida útil razoável ao indutor. Normalmente, as máquinas de têmpera por indução possuem alarmes ou dispositivos de segurança que impedem o seu funcionamento em caso de falta de refrigeração, evitando o rompimento do indutor e possíveis danos ao conversor. Pois, quando a máquina habilita o aquecimento sem que haja refrigeração do indutor, o mesmo estoura pela alta corrente, provocando um curto-circuito que pode comprometer alguns componentes do conversor.

### 2.5.5 Parâmetros de Resfriamento

O resfriamento é o fator mais importante, pois é ele que determinará efetivamente a estrutura e, por consequência, as propriedades finais do componente tratado termicamente. Como pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro resultante dos tratamentos térmicos (CANALE; TOTTEN; CANALE, 2006).

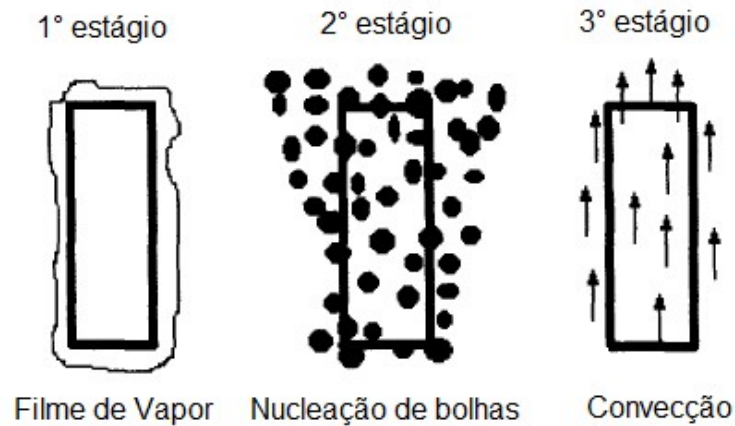
São mais comumente empregados como meio de resfriamento a água, salmoura ou óleo mineral, porém os meios de resfriamento poliméricos apresentam vantagens sobre eles por serem biodegradáveis, não serem tóxicos ou inflamáveis e por proporcionarem um resfriamento uniforme com menor potencial para o surgimento de trincas e distorções (CANALE; TOTTEN; CANALE, 2006).

Um resfriamento mais severo, como em salmoura ou água, pode provocar consequências inesperadas e resultados indesejáveis, tais como empenamento e até ruptura da peça. Um meio de resfriamento menos drástico (como em óleo) é indicado sob o ponto de vista de empenamento ou ruptura, pois reduz o gradiente de temperatura apreciavelmente durante o resfriamento, porém não satisfazem sob o ponto de vista de profundidade de endurecimento. Desta forma, é preciso conciliar o resfriamento adequado para a obtenção da estrutura, propriedades e profundidade desejadas e, ao mesmo tempo, evitar empenamento distorção ou mesmo ruptura da peça (CANALE; TOTTEN; CANALE, 2006). Há outros meios de resfriamento como o nitrogênio e ar forçado, mas suas características fogem do escopo proposto no presente trabalho.

Durante o resfriamento, se faz importante a uniformidade do meio refrigerante no processo de transferência de calor na superfície do metal, pois aumentando a uniformidade, o gradiente de temperatura na superfície será reduzido, minimizando as tensões térmicas (TOTTEN, 2006).

Alguns fatores importantes devem ser conhecidos para a escolha de um meio refrigerante adequado a cada processo de têmpera. Em um processo de resfriamento existem pelo menos três estágios a considerar (Vapor / Ebulição (nucleação de bolhas) / Convecção), conforme é possível verificar na Figura 18.

Figura 18 - Estágios de resfriamento em meio líquido.

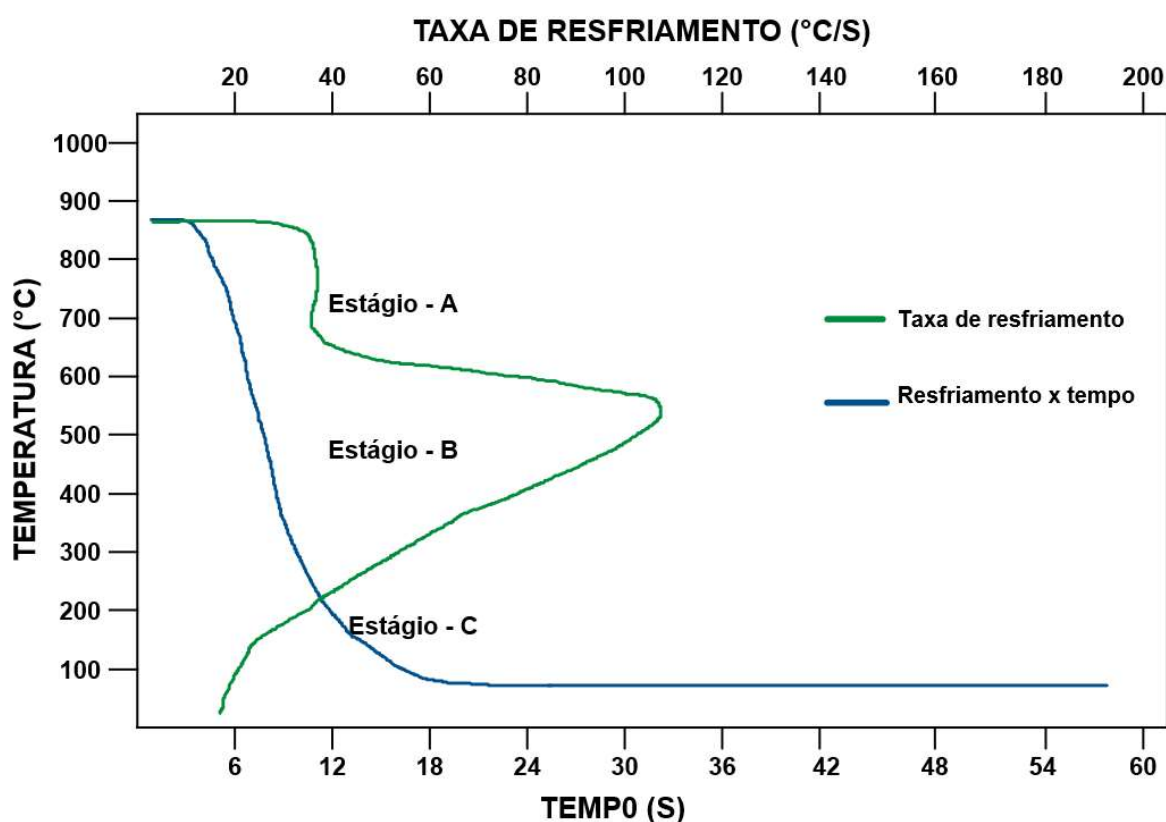


Fonte: Segerberg e Bodin (1991).

No primeiro estágio ocorre o contato do metal aquecido com o líquido, gerando um filme de vapor contínuo que envolve rapidamente a peça. Durante este estágio o resfriamento é lento, pois o filme de vapor isola o contato entre o metal e o líquido. Quando a temperatura da peça diminui, e o filme de vapor se quebra, inicia-se o segundo estágio, caracterizado pela maior taxa de transferência de calor. Isto ocorre por uma formação de bolhas fazendo o calor ser removido rapidamente do metal (SEGERBERG; BODIN, 1991).

O terceiro e último estágio inicia-se quando a temperatura da peça cai abaixo da faixa de nucleação de bolhas do líquido. A diferença entre a temperatura do banho e o ponto de formação de bolhas é importante na taxa de transferência de calor ou resfriamento neste estágio. A curva de taxa de resfriamento em relação à temperatura é obtida a partir da primeira derivada da curva de resfriamento contínuo. Sendo possível identificar os três estágios na curva de resfriamento, conforme é representado na Figura 19.

Figura 19 - Estágios da curva de resfriamento em um processo de têmpera:  
A – Vapor, B – Ebulição e C - Convecção.



Fonte: Adaptado de Totten *et al.* (1998).

De acordo com Bates (1987) e Tensi *et al.* (1995), são determinados pelo meio e condições de uso, tais como temperatura do banho agitação, concentração, superfície de molhamento e durante o resfriamento.

Totten e Canale (2006) enfatizam a importância da uniformidade da transferência de calor para reduzir os gradientes térmicos superficiais, pois as taxas de resfriamentos são controladas durante o resfriamento, pela formação de um filme de vapor ao redor da peça imersa no fluido. Se houver descontinuidade ou variação excessiva na formação deste filme pode ser produzida uma variação sensível das taxas de transferência de calor, podendo resultar em aumento ou surgimento de distorções e/ou trincas.

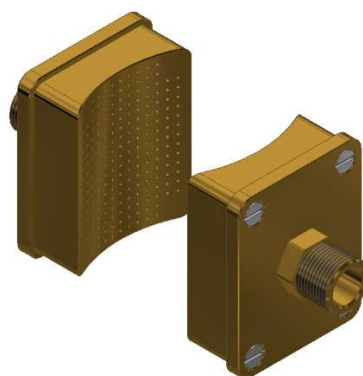
#### 2.5.5.1 Duchas

A ducha (Figura 20) é um elemento importante no processo de resfriamento, pois pode proporcionar uma rápida taxa de resfriamento na peça temperada, dada

sua intensidade. Sendo assim, a intensidade do resfriamento da ducha depende da velocidade do fluido, de seu ângulo incidente na superfície da peça, da temperatura, da composição do fluido e do tipo de resfriamento. Uma ducha não intensa resulta na formação de perlita e bainita no metal, o que é indesejado nos tratamentos de têmpera, já uma ducha intensa produz a fase martensita, conforme esperado (TOTTEN, 2006).

O tratamento térmico aplicado, estilo do indutor e geometria da peça são as principais variáveis para o dimensionamento do sistema de ducha. Para obter um melhor desempenho da ducha é desejável a rotação da peça durante sua aplicação, bem como a regularidade do formato da ducha, proporcionando a uniformidade do resfriamento (TOTTEN, 2006).

Figura 20 - Duchas de placa.



Fonte: Autor.

#### 2.5.5.2 Polialquileno Glicol (PAG)

É de conhecimento da indústria os potenciais problemas associados ao uso de óleos minerais no tratamento térmico, incluindo o potencial risco de incêndio e a necessidade de equipamentos mais onerosos. Desta forma, as soluções em polímeros são isentas desses perigos e se tornam estrategicamente promissoras (TOTTEN *et al.*, 1993a).

A adoção de uma porcentagem de polímero no resfriamento de peças temperadas proporciona um resfriamento mais rápido do que a água pura, além de eliminar a barreira de vapor formada no resfriamento em água (TOTTEN, 2006).

Um dos meios de resfriamento poliméricos mais difundidos é o polialquileno glicol (PAG), um copolímero de óxido de etileno e óxido de propileno, que é



empregado no arrefecimento de peças de aço carbono e aços liga nos mais diversos tratamentos térmicos e termoquímicos (CANALE; TOTTEN; CANALE, 2006).

Polímeros PAG foram patenteados por Blackwood (BLACKWOOD; CHEESMAN, 1965) e, a partir dele, muitas formulações foram desenvolvidas e patenteadas (TOTTEN *et al.*, 1993a).

O PAG garante uma alta homogeneização na distribuição da fase martensita formada na têmpera e pequena queda no perfil de dureza (VIEIRA *et al.*, 2021). Porém, a concentração de polímero na solução é um parâmetro que pode ser alterado buscando uma maior ou menor retirada de calor das peças. Uma baixa concentração de PAG na solução permite trocas térmicas comparáveis às obtidas com água, e elevadíssimas concentrações de PAG dificultam a formação de martensita no tratamento (VIEIRA *et al.*, 2019).

A relação entre a concentração de PAG na solução e sua influência na taxa de resfriamento pode ser vista na Tabela 2, a qual apresenta as temperaturas de início de ebulição e convecção e as taxas de resfriamento para diferentes concentrações de PAG.

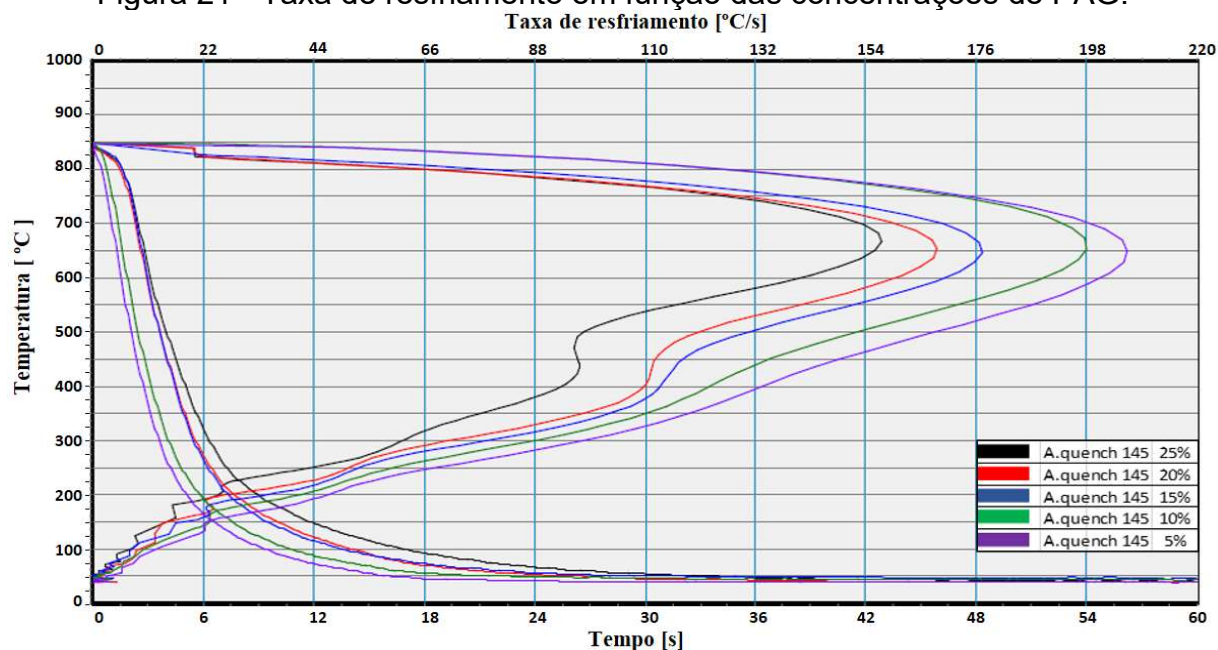
Tabela 2 – Propriedades do PAG de acordo com o fabricante.

Concentração de PAG no fluido	Taxa máxima de resfriamento (°C/s)	Temperatura de início de ebulição (°C)	Temperatura de início de convecção (°C)	Taxa de resfriamento a 300 °C (°C/s)
5%	205,92	846,49	144,09	97,82
10%	198,04	847,75	160,61	87,61
15%	177,02	833,24	175,98	78,18
20%	168,32	829,93	189,04	71,01
25%	156,99	828,36	204,36	61,62

Fonte: Quaker Houghton (2021).

Na Figura 21 é possível visualizar a variação da taxa de resfriamento em função da concentração de PAG, de forma que quanto maior a concentração de PAG, mais brando é o meio de resfriamento, já que a curva da taxa de resfriamento (em forma de joelho) se torna mais fechada com o aumento desta concentração.

Figura 21 - Taxa de resfriamento em função das concentrações de PAG.



### 2.5.6 Influência dos parâmetros da têmpera por indução nas distorções e tensões residuais

Tensões residuais ocorrem em todos os componentes e dispositivos fabricados. As propriedades de engenharia de materiais e componentes estruturais, como a vida em fadiga, distorção, estabilidade dimensional, resistência à corrosão e fragilidade à fratura frágil podem ser consideravelmente influenciadas por tensões residuais (ROSSINI *et al.*, 2012).

Tais efeitos usualmente trazem despesas consideráveis em reparos e restauração de peças, equipamentos e estruturas. Assim, a análise de tensões residuais é uma etapa obrigatória no design das peças e dos elementos estruturais, bem como na estimativa da sua confiabilidade sob condições reais de serviço (NUNES, 2008; ROCHA *et al.*, 2013; ROSSINI *et al.*, 2012; ZOCH, 2006).

Tensões residuais são geradas durante os processos de fabricação envolvendo deformação plástica do material, tratamentos térmicos, usinagem ou operações de processamento que transformam a forma ou alteram as propriedades dos materiais (ROSSINI *et al.*, 2012).

Todos os processos mecânicos de fabricação que envolvem deformação plástica não uniforme, gradientes térmicos e/ou transformações de fase, produzirão

tensões residuais, sejam elas elevadas ou não. Dependendo do grau, as tensões residuais podem ser a causa principal da instabilidade dimensional (ZOCH, 2006).

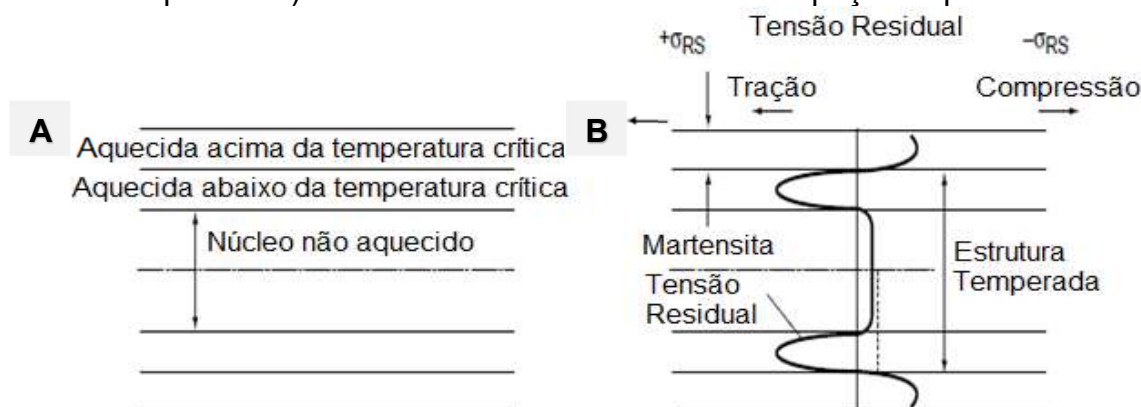
Os gradientes de temperatura e as transformações de fase resultam em diferenças volumétricas entre o núcleo e a superfície que produzem tensões internas. Estas tensões residuais podem ser analisadas por algumas técnicas como a difração de raios X (COUPARD *et al.* 2008). Quando estas tensões internas forem menores do que o limite de escoamento do material, não haverá risco de distorções, trincas ou falhas. Porém, quando ultrapassar este limite de escoamento, haverá distorções e baixa tensão residual na peça (TOTTEN, 2002).

Diversos estudos têm sido realizados com a alteração de parâmetros do processo de têmpera por indução e verificação das distorções e tensões residuais em diferentes aços carbono e aços liga.

A severidade da taxa de resfriamento de uma peça por *spray* exerce influência nas tensões residuais e nas distorções da mesma forma que os parâmetros de aquecimento, conforme apresentado por Li *et al.* (2014). A taxa de resfriamento é um parâmetro que pode ser controlado pelo bocal do *spray*, pela razão da solução polimérica e pelo fluxo de fluido refrigerante, o que proporciona diferentes coeficientes de transferência de calor da peça para o meio de resfriamento.

Uma elevada taxa de resfriamento induz a uma compressão superficial e maiores tensões no núcleo, o que influencia significativamente no nível de tensões residuais e distorções (LI *et al.*, 2014). O resfriamento resulta em tensões residuais compressivas na camada superficial da peça e em tensões trativas na região logo abaixo da superfície, conforme é possível analisar na Figura 22.

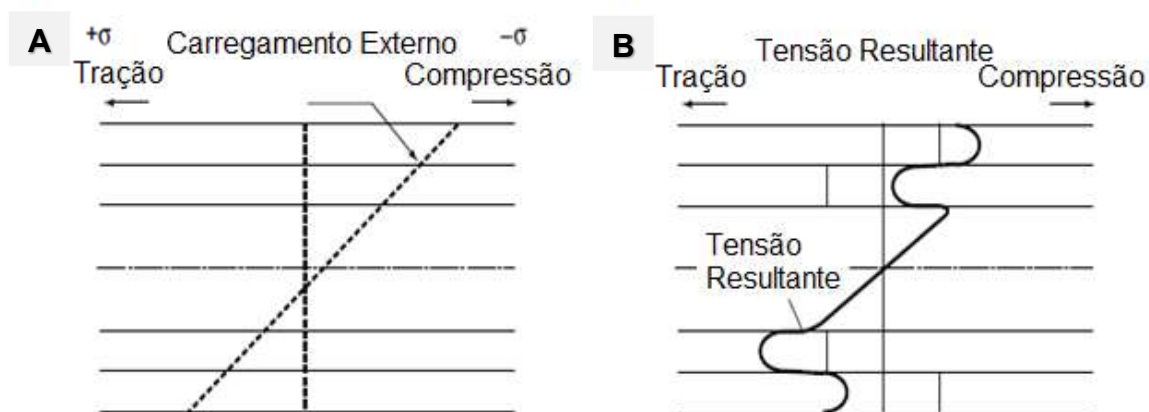
Figura 22 - Tensões residuais na camada superficial temperada a) camadas da peça temperada b) tensões residuais nas camadas da peça temperada.



Fonte: Adaptado de Totten (2002).

Em situações em que um componente endurecido por indução é submetido à uma carga externa (tensão/compressão), conforme apresentado na Figura 23a, tensões internas residuais podem ser vistas em ambas as camadas (Figura 23b).

Figura 23 - Tensões na camada superficial temperada sob tensão a) carregamento externo na peça temperada b) tensões residuais nas camadas da peça temperada.



Fonte: Adaptado de Totten (2002).

A densidade de potência é um fator que influencia na extensão e na distribuição das tensões residuais e, conseqüentemente, nas possíveis distorções da peça. Devido a esta influência, muitos estudos têm sido realizados em busca das condições que otimizam este parâmetro no processo de têmpera por indução. Totten (2002) verificou que uma baixa densidade de potência resulta em uma elevada tensão residual compressiva, com uma moderada transição para uma tensão trativa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As especificações técnicas do aço SAE 1050 estudado neste trabalho são garantidas pelo controle de qualidade do fornecedor do mesmo, de forma que atendem à composição química deste aço conforme os teores dos elementos listados na Tabela 3. Esta composição está de acordo com a norma SAE J-404.

Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1050.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
(%)	0,53	0,74	0,22	0,13	0,012	0,17	0,11

Fonte: GERDAU (2022).

A fim de avaliar a composição química e comprovar a especificação técnica definida pelo fornecedor, foi realizada uma análise com espectrômetro de emissão ótica marca Spectro modelo Spectrolab.

O valor médio de três medições da composição química do aço SAE 1050 obtido por meio da espectrometria de emissão ótica é representado na Tabela 4, confirmando o atendimento à especificação da norma SAE e a composição informada pelo fornecedor no respectivo certificado de qualidade.

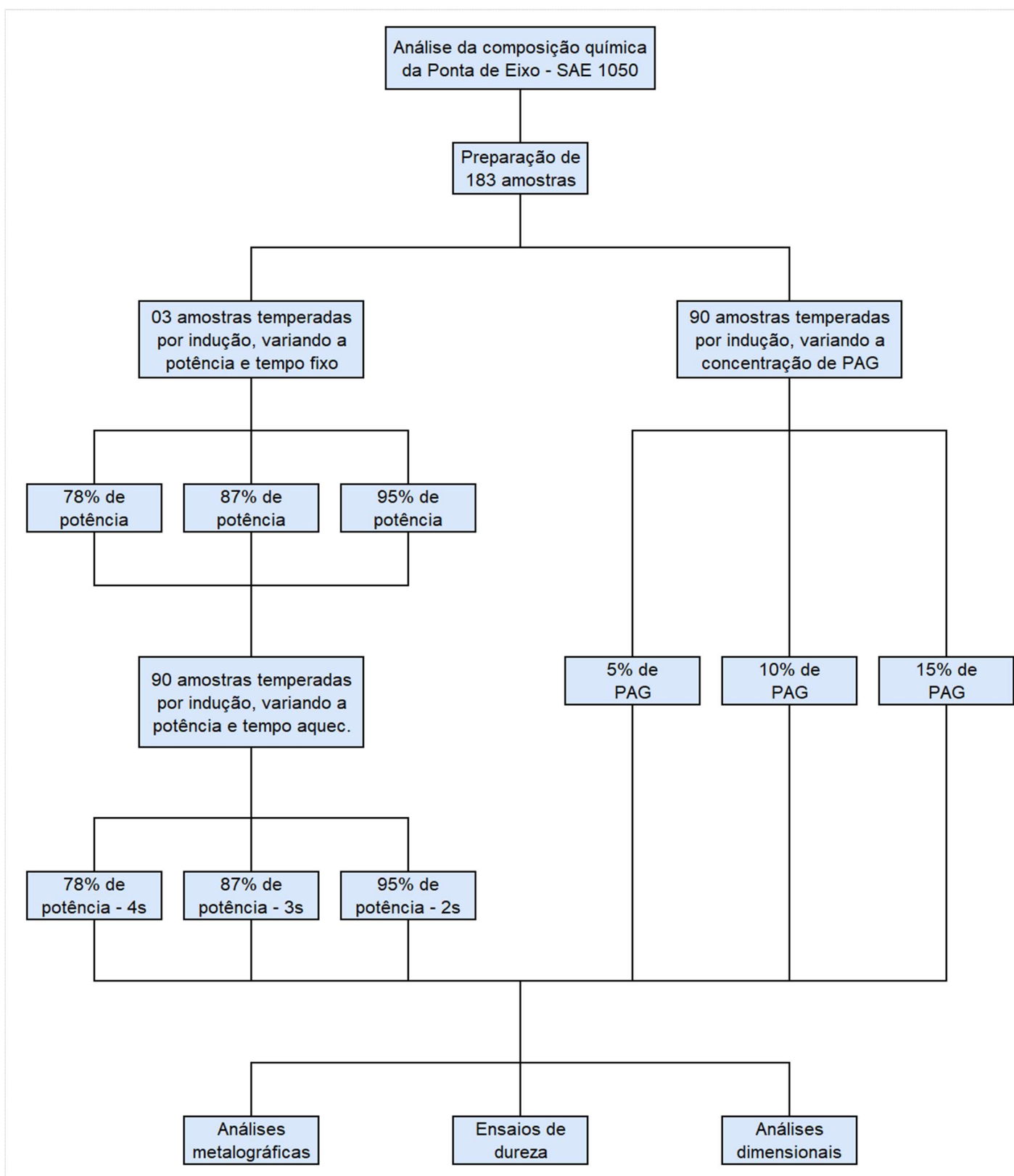
Tabela 4 - Composição química do aço SAE 1050 com base na espectrometria de emissão ótica.

	Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
Amostra 1	(%)	0,53	0,73	0,21	0,013	0,013	0,17	0,1
Amostra 2	(%)	0,52	0,75	0,2	0,015	0,016	0,16	0,12
Amostra 3	(%)	0,52	0,76	0,23	0,013	0,014	0,19	0,11
<b>Médias</b>	<b>(%)</b>	<b>0,5233</b>	<b>0,7467</b>	<b>0,2133</b>	<b>0,0137</b>	<b>0,0143</b>	<b>0,1733</b>	<b>0,1100</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,0058</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,0015</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0100</b>

Fonte: Autor.

Em seguida foram preparadas 183 amostras de aço SAE 1050, que foram divididas em três experimentos: um deles com 03 amostras, alterando a potência e mantendo o tempo de aquecimento constante, o outro alterando a potência e o tempo de aquecimento do tratamento de têmpera por indução de 90 amostras e no terceiro e último experimento alterou-se a velocidade de resfriamento na têmpera por indução das outras 90 amostras. Os experimentos são melhor descritos no fluxograma da Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor.

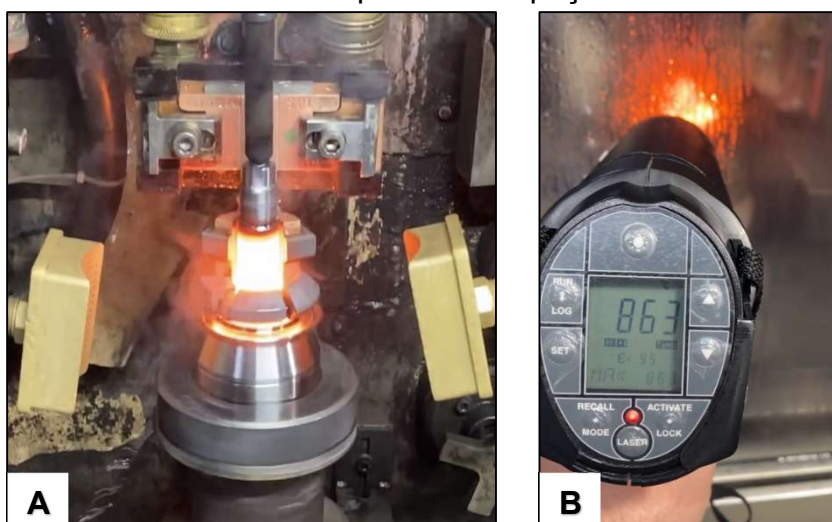
### 3.1 EXPERIMENTOS ALTERANDO OS PARÂMETROS DE AQUECIMENTO

#### 3.1.1 Experimentos com tempo de aquecimento constante

Foram preparadas 3 amostras, aquecidas sob potências de 95%, 87% e 78% em uma concentração de 10% de PAG e com um tempo de permanência de 3,0 s para todas. Após a realização da têmpera por indução, foi quantificada a dureza, a profundidade da camada temperada bem como o perfil de dureza destas amostras.

A Figura 25 mostra um dos momentos em que o componente em questão (ponta de eixo) está em início de ciclo, ou seja, no estágio de aquecimento, com a região de interesse sendo austenitizada. Para esta medição de temperatura foi utilizado um termômetro infravermelho portátil de alta temperatura marca Raytek modelo Raynger 3i Plus.

Figura 25 – Aquecimento da Peça: a) peça durante o aquecimento b) medição de temperatura da peça.



Fonte: Autor.

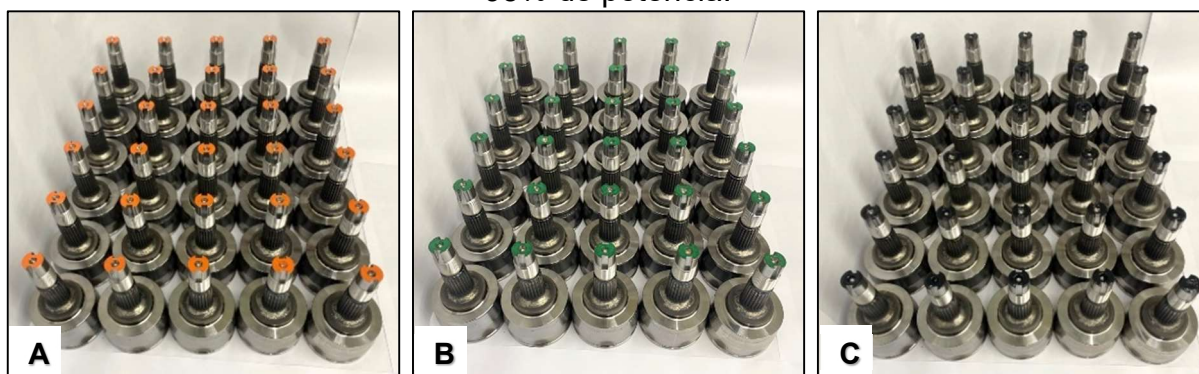


### 3.1.2 Experimentos com tempo de aquecimento variável

Para este experimento foram utilizadas 90 peças, sendo 30 em cada condição (potência vs tempo de aquecimento), conforme mostra a Figura 26 (amostras na cor laranja, potência com 78%; na cor verde, potência com 87%; e na cor preta, potência de 95%). As amostras são constituídas de aço SAE 1050, e as mesmas foram submetidas à têmpera por indução e resfriamento com o fluido da empresa Quaker Houghton, mantendo a concentração de polialquileno glicol (PAG) constante de 10%, variando apenas a potência e o tempo de aquecimento.

Para a realização deste experimento foi utilizado um equipamento de têmpera por indução eletromagnética, fabricado pela empresa GH Induction. Este equipamento possui um conversor de 400 KW para estação de têmpera e 200 KW na estação de revenido.

Figura 26 - Amostras após têmpera por indução, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95% de potência.

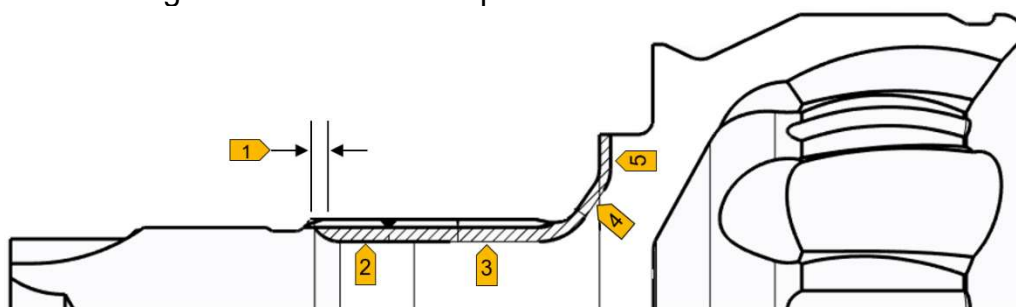


Fonte: Autor.

O tratamento térmico da Ponta de Eixo utilizada neste trabalho é realizado em duas etapas de têmpera por indução, uma etapa para tratar o sino e a outra para tratar a haste, o qual é o foco da análise.

A Figura 27 mostra o perfil de têmpera exigido para a região da haste, enquanto a Tabela 5 mostra as especificações de projeto para a mesma região citada. Por motivos de sigilo industrial a imagem em questão foi editada a partir do desenho de projeto, para impedir o reconhecimento de informações e desenho de Produto.

Figura 27 - Perfil de têmpera da haste Ponta de Eixo.



Fonte: Desenho de projeto editado pelo autor.

Tabela 5 - Especificações de projeto, dureza e profundidade de camada.

Cotas	Especificações (mm)	Dureza superficial (HRC)	Limite de camada (HV)
01 -Livre têmpera	1,00 - 4,00	58 - 60	550
02 -Profundidade de camada	2,20 - 3,60	58 - 60	550
03 -Profundidade de camada	2,20 - 3,60	58 - 60	550
04 -Profundidade de camada	1,80 - 3,60	58 - 60	550
05 -Profundidade de camada	1,80 - 3,60	58 - 60	550

Fonte: Autor.

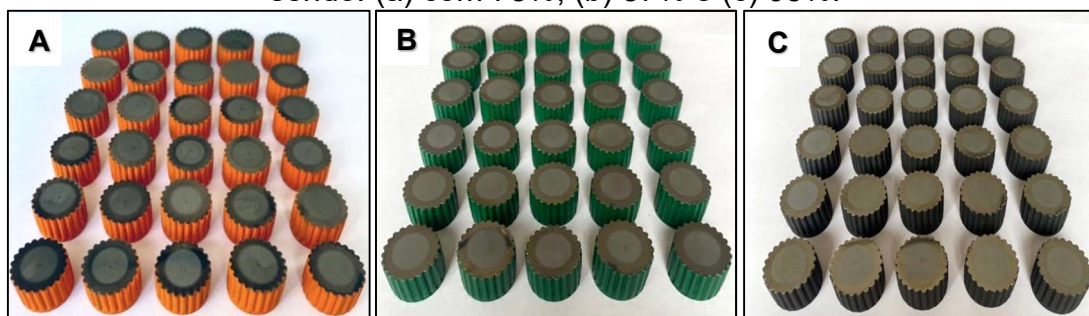
Foram produzidas 30 amostras para cada condição de aquecimento, que estão em conformidade com as orientações da norma ASTM E3 2011 - *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (Norma para preparação de amostras metalográficas), e são exibidas na Figura 28.

Tabela 6 - Identificação das amostras avaliadas quanto à variação da taxa de aquecimento.

Amostras	Identificação	Potência (%)	Tempo de aquecimento (s)
Laranja	SAE1050 PAG10	78	4,0
Verde	SAE1050 PAG10	87	3,0
Preto	SAE1050 PAG10	95	2,0

Fonte: Autor.

Figura 28 - Amostras em corte transversal diferenciadas pelo percentual de potência, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95%.



Fonte: Autor (2023).

### 3.2 EXPERIMENTOS ALTERANDO A TAXA DE RESFRIAMENTO

As amostras utilizadas neste experimento foram de aço SAE 1050 submetidos ao tratamento térmico de têmpera por indução e resfriamento com fluidos da empresa Quaker Houghton contendo diferentes concentrações de polialquileno glicol (PAG), conforme valores listados na Tabela 7.

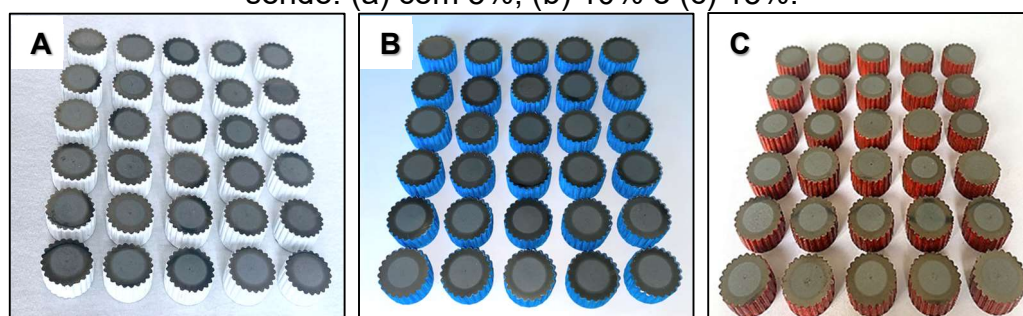
Foram produzidas 30 amostras com cada concentração, totalizando 90 amostras. As amostras foram obtidas por meio das orientações da norma ASTM E3 2011, conforme é possível verificar na Figura 29.

Tabela 7- Identificação das amostras avaliadas quanto à variação da taxa de resfriamento.

Amostras	Identificação	Concentração de PAG (%)
Cinza	SAE1050 PAG5	5
Azul	SAE1050 PAG10	10
Vermelha	SAE1050 PAG15	15

Fonte: Autor.

Figura 29 - Amostras em corte transversal diferenciadas pelo percentual de PAG, sendo: (a) com 5%, (b) 10% e (c) 15%.



Fonte: Autor.

Todas as amostras foram submetidas à tempera por indução sob as mesmas condições de ferramental (ducha e indutor), ou seja, com potência de 87% e tempo de aquecimento de 3,0 s, diferenciando apenas as condições de resfriamento, as quais são evidenciadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de resfriamento das diferentes amostras.

Amostras	Taxa máxima de resfriamento (°C/s)	Temperatura de início de ebulição (°C)	Temperatura de início de convecção (°C)	Taxa de resfriamento a 300°C (°C/s)
SAE1050 PAG5	205,92	846,49	144,09	97,82
SAE1050 PAG10	198,04	847,75	160,61	87,61
SAE1050 PAG15	177,02	833,24	175,98	78,18

Fonte: Adaptado de Quaker Houghton (2021).

O volume do reservatório é de 4.000 litros, e o meio de resfriamento é realizado com agitação através de duchas com formato de placas e vazão de 120 l/min.

O resfriamento com fluido que contém 5% de PAG caracteriza o meio mais severo, em comparação com o fluido refrigerante que contém 15% de PAG (mais brando).

### 3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

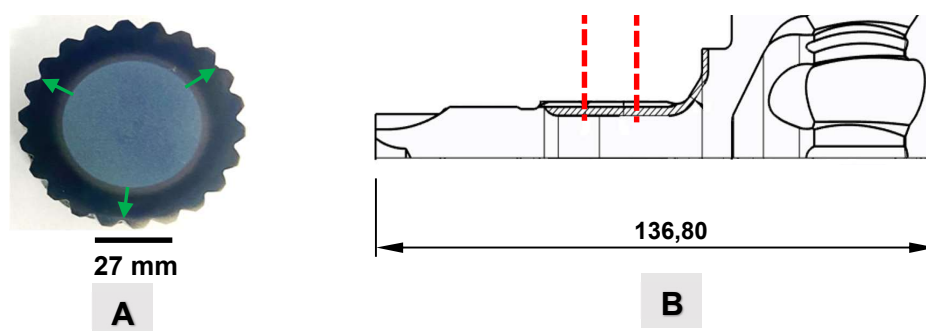
Após a têmpera por indução foram preparadas amostras para análises metalográficas sob ampliações de 100x e 500x de todas as amostras temperadas por indução. A preparação metalográfica foi realizada utilizando técnicas convencionais de lixamento com lixas de SiC na sequência de 240, 320 400, 600 e 1200 mesh, e polimento com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm. As observações metalográficas por microscopia óptica foram realizadas utilizando um microscópio de marca Olympus GX 51F, após ataque químico por imersão em solução aquosa de Nital na concentração de 3% de ácido nítrico e 97% de álcool etílico.

O tamanho de grão austenítico foi determinado por meio de norma interna da empresa, o qual por motivos de sigilo industrial a mesma foi editada, para impedir o reconhecimento de informações e procedimentos.

### 3.4 ANÁLISE DE MICRODUREZA

Foram realizadas medições de microdureza Vickers em três regiões da seção transversal da peça, conforme apresentado na Figura 30, a uma profundidade de 0,1 mm. O procedimento foi realizado por meio de um microdurômetro da marca Buehler modelo Micromet, conforme a norma ASTM E92-82 (2003), o qual foi possível obter a microdureza média, bem como a espessura da camada temperada que cumpre os requisitos de microdureza estabelecidos em cada ponto, sendo usados nos resultados a média aritmética das três medições.

Figura 30 - Corte seção transversal exibindo os três pontos de medição (a) e corte longitudinal (b).



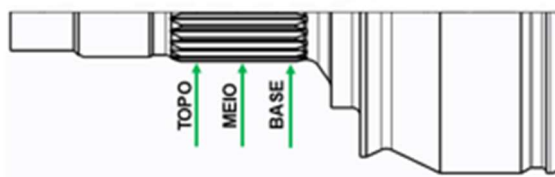
Fonte: Autor.

### 3.5 ANÁLISE DIMENSIONAL

As distorções foram quantificadas por meio de medições do diâmetro da peça em três pontos alinhados no sentido longitudinal, arbitrariamente chamadas de topo, meio e base (Figura 31). As medições foram realizadas utilizando um micrômetro milesimal digital da marca Mitutoyo com faixa de medição de 25-50 mm.

O diâmetro da peça nos pontos mencionados deve estar dentro da tolerância de projeto, que é entre 26,611 mm e 26,653 mm. Além disso, o topo e o meio não podem possuir diâmetro maior do que a base.

Figura 31 - Corte seção longitudinal exibindo os pontos de topo, meio e base.



Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos experimentos de variação da potência de aquecimento e a taxa de resfriamento na têmpera por indução do aço SAE 1050. Vale ressaltar que em todos os experimentos a frequência da corrente alternada foi de 10 kHz e após a têmpera as amostras passaram por revenimento. Dentre os resultados exibidos para cada experimento estão as micrografias, os valores de dureza média, a profundidade da camada temperada e as dimensões da região do entalhado após a têmpera.

### 4.1 EXPERIMENTOS ALTERANDO PARÂMETROS DE AQUECIMENTO

Foram realizados experimentos nas potências de 95%, 87% e 78%, conforme já mencionado e os resultados coletados para estas três condições de têmpera por indução são apresentadas a seguir.

#### 4.1.1 Experimentos com tempo de aquecimento constante

Para as três amostras submetidas com tempo de aquecimento constante, foram obtidos os valores exibidos na Tabela 9 para a profundidade da camada temperada e a microdureza Vickers, também está na tabela temperatura da peça medida por meio do pirômetro.

Tabela 9 – Microdureza e profundidade de camada temperada para as amostras temperadas com tempo constante.

Potências de Aquecimento	Tempo de Aquecimento (s)	Temperatura (°C)	Profundidade de Camada (mm)	Microdureza (Vickers)
95%	3,0	1194	4,00	698
87%	3,0	1080	2,94	715
78%	3,0	863	2,03	727

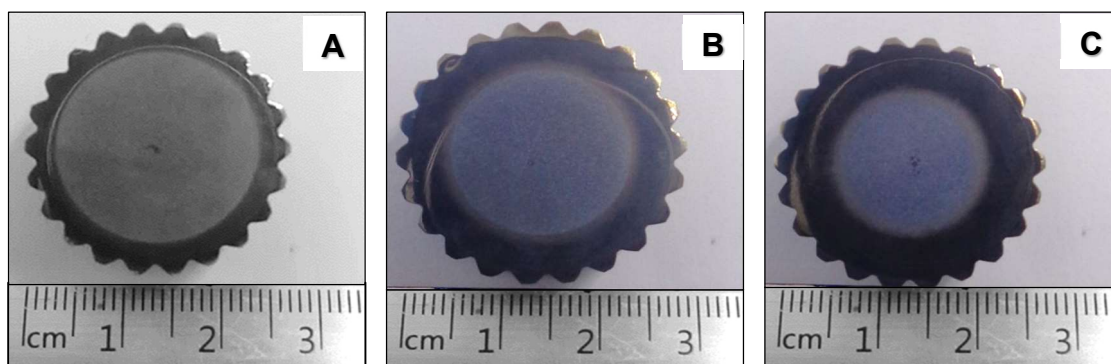
Fonte: Autor.

A profundidade da camada temperada aumentou com a potência de aquecimento, da mesma forma que no trabalho de Coelho (2022) para o aço 1045 e

no trabalho de Metage e Sidhu (2017) para o aço ligado, porém o valor de microdureza caiu com este aumento, o que também foi obtido na pesquisa de Coelho (2022), estando dentro do esperado.

É possível observar a extensão da camada temperada (de cor mais escura) para cada uma das potências de aquecimento na Figura 32, sendo perceptível uma maior espessura da camada para uma maior potência de aquecimento, como foi visto na Tabela 9.

Figura 32- Amostras mantendo o tempo de 3 segundos e variando a potência, sendo: (a) com 78%, (b) 87% e (c) 95% de potência.

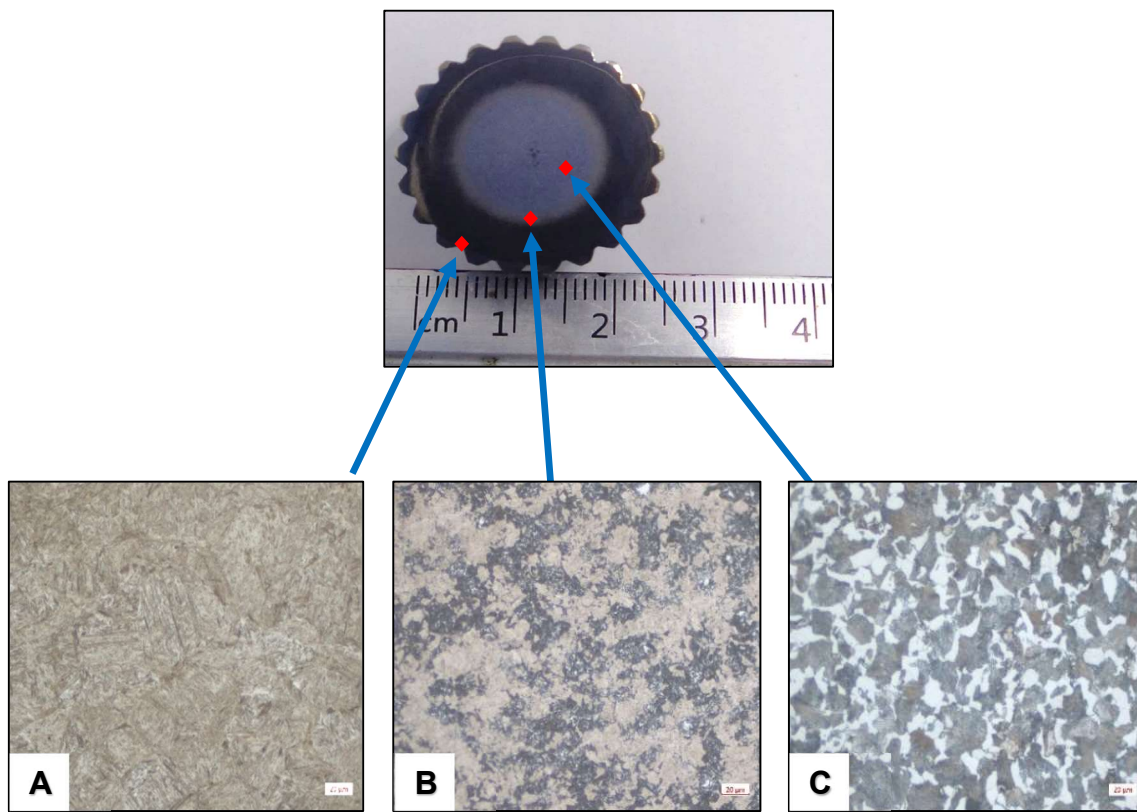


Fonte: Autor.

As microestruturas que estão presentes na camada temperada, na zona de transição e no núcleo da peça após a têmpera por indução podem ser vistas na Figura 33, onde é possível notar o domínio da fase martensita na camada temperada e, perlita e ferrita proeutetóide no núcleo e uma microestrutura que mescla ambas na zona de transição.



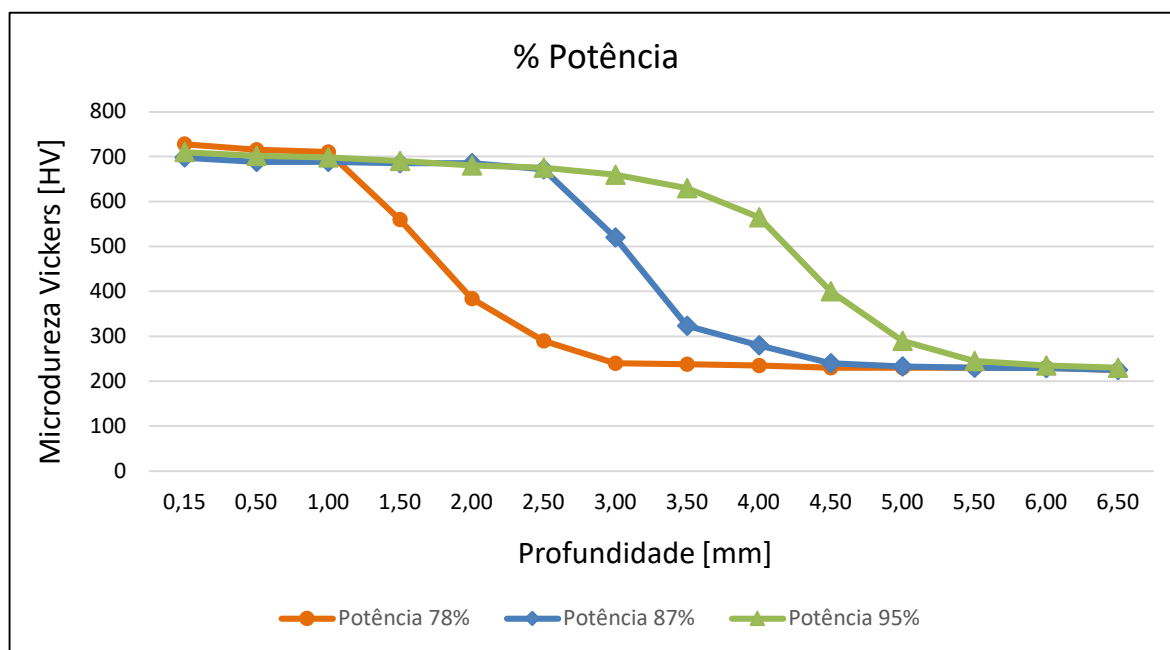
Figura 33 - Microestruturas obtidas: em a) camada temperada 500X, em b) zona de transição 500X, em c) núcleo 500X.



Fonte: Autor.

As variações da microdureza Vickers com a profundidade de camada da peça para cada uma das três potências de aquecimento são vistas na Figura 34, onde foi realizado o perfil de microdureza em vários pontos de medição, são evidenciadas as mesmas três regiões distintas: a camada temperada, a zona de transição e o núcleo, com valores de microdureza decrescente.

Figura 34 - Perfil de microdureza para as amostras tratadas com 78% (210 KW), 87% (242 KW) e 95% (275 KW) de potência de aquecimento e tempo constante.



Fonte: Autor.

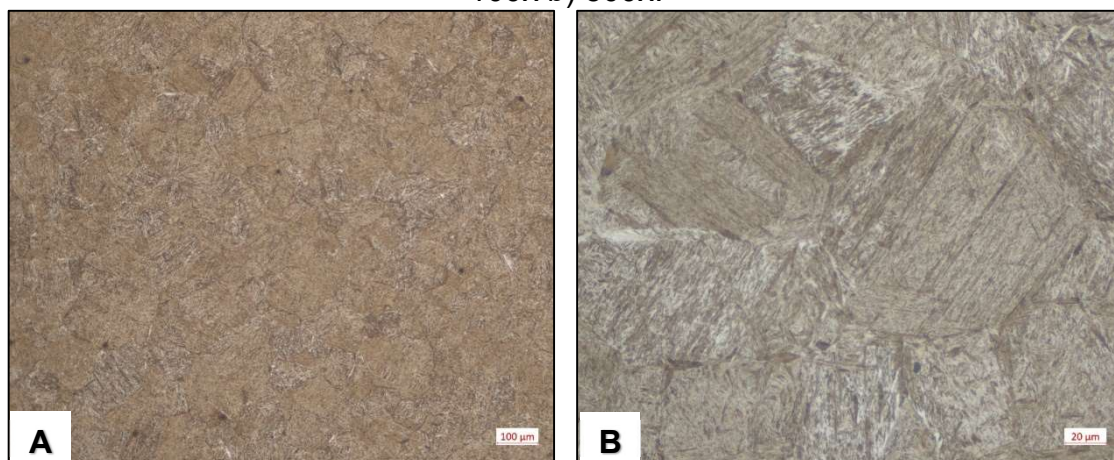
É possível observar que na potência de 95% há uma queda acentuada na microdureza com a profundidade, mas sob as potências menores esta queda se torna muito mais brusca, um comportamento diferente do apresentado pelo aço 1045 no trabalho de Coelho (2022).

#### 4.1.2 Experimentos com tempo de aquecimento variável

##### 4.1.2.1 Análise Metalográfica

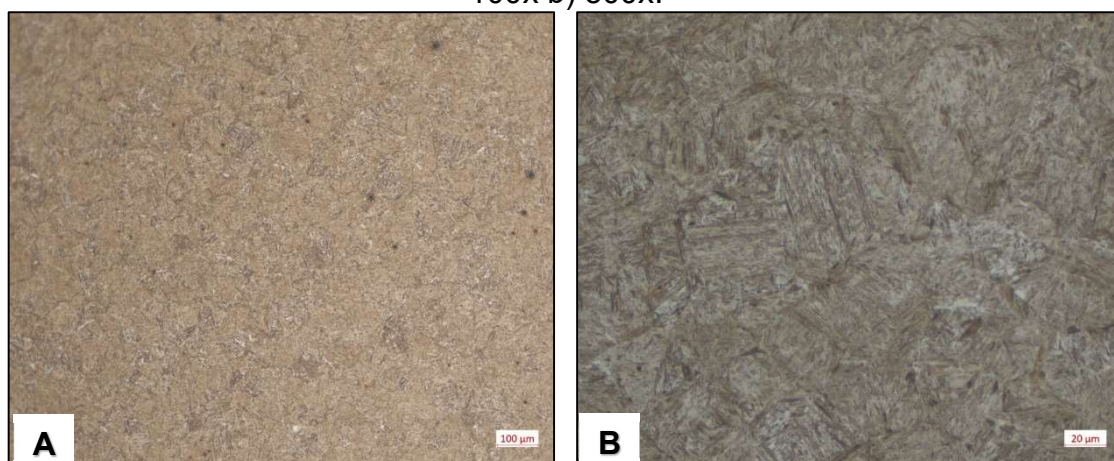
As metalografias da seção transversal das amostras após a têmpera por indução são mostradas na Figura 35 até a Figura 37, onde é possível ver a microestrutura martensítica com morfologia em ripas que é típica para o teor de carbono dos aços SAE 1050, cujos detalhes microestruturais, tais como as agulhas de martensita, podem ser melhor visualizados nas ampliações de 500x.

Figura 35 - Amostra aquecida a potência de 95% por 2,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x.



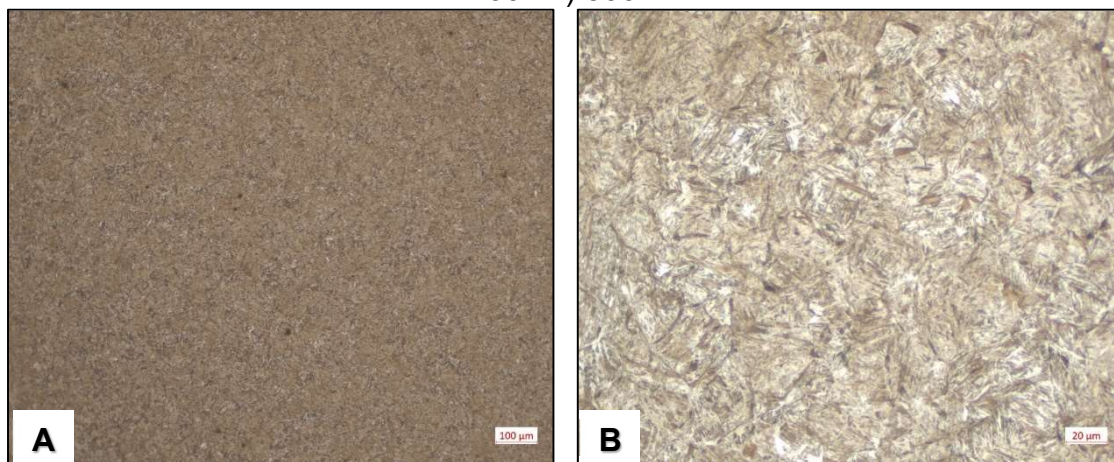
Fonte: Autor.

Figura 36 - Amostra aquecida a potência de 87% por 3,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x.



Fonte: Autor.

Figura 37 - Amostra aquecida a potência de 78% por 4,0 s com ampliação de a) 100x b) 500x.



Fonte: Autor.

De acordo com as análises realizadas no Laboratório Metalúrgico da empresa, foi possível definir a classe da Martensita conforme o procedimento interno (método comparativo), e então correlacionar o tamanho de grão austenítico, conforme *standard* GKN. O tamanho de grão austenítico segue conforme tabela 10, onde quanto maior o número do tamanho de grão ASTM, menor é o diâmetro médio dos grãos (mais refinada a microestrutura).

Tabela 10 – Método comparativo da microestrutura martensita para as três potências de aquecimento.

Potências de Aquecimento	Tempos de aquecimento (s)	Classe Martensita	Tamanho de grão austenítico (ASTM)
95%	2	3	<5
87%	3	2	>5
78%	4	1	>7

Fonte: Autor.

Conforme mostra a tabela 10, quanto maior a potência de aquecimento, maior é o tamanho de grão austenítico, ou seja, tende a uma morfologia mais grosseira. Esta variação no tamanho de grão austenítico se justifica pela maior temperatura alcançada nestas situações, conforme foi constatado pelas medições do pirômetro. Estas maiores temperaturas proporcionam um maior crescimento do grão austenítico (CHIAVERINI, 2008) e, conseqüentemente, um maior tamanho dos pacotes de martensita após a têmpera por indução.

#### 4.1.2.2 Análise de Microdureza

Na Figura 38 são apresentados os valores médios de microdureza Vickers em uma camada de 0,1 mm de profundidade para cada amostra submetida a diferentes potências de aquecimento (95%, 87% e 78%). Na Figura 39 é apresentada a profundidade da camada temperada para estas mesmas amostras.

Figura 38 - Microdureza Vickers das amostras para 3 diferentes potências de aquecimento a uma profundidade de 0,1 mm.

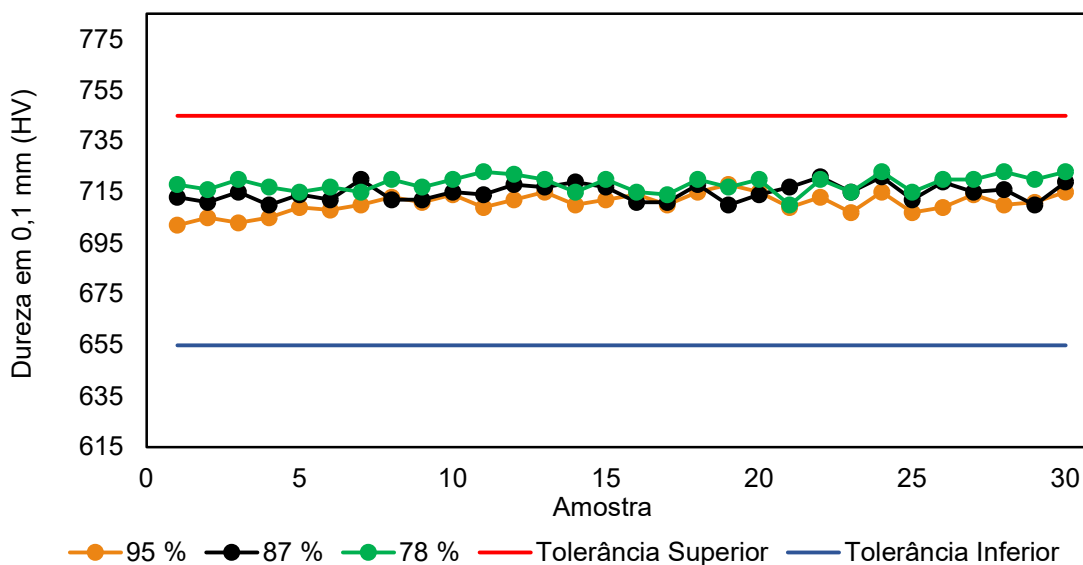
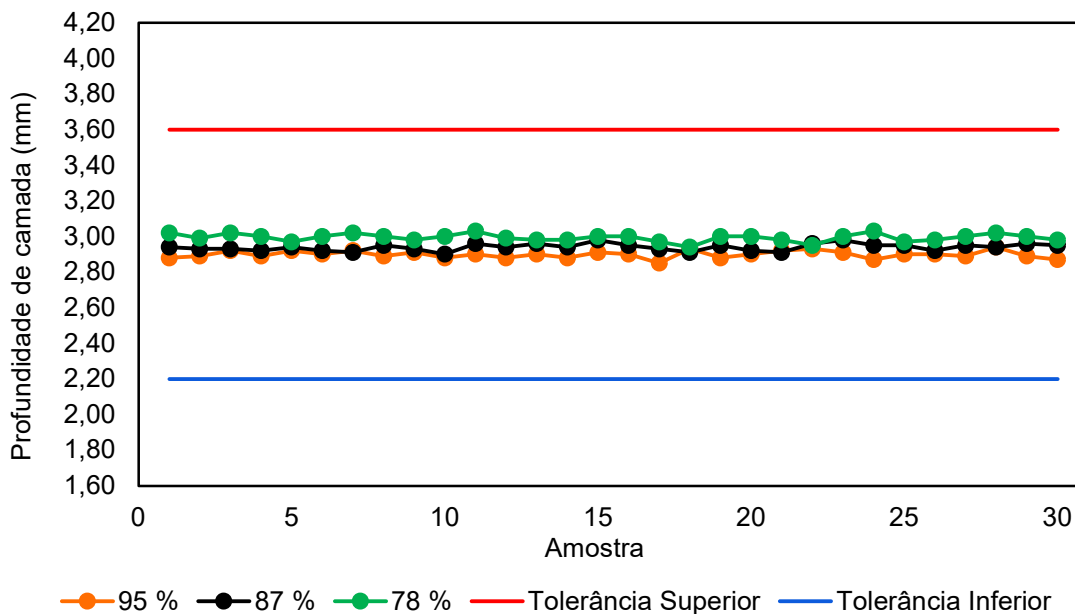


Figura 39 - Profundidade da camada (mm) temperada das amostras.



A média aritmética e o desvio padrão dos valores de microdureza e profundidade da camada para as amostras temperadas em cada uma das três potências de aquecimento são listados na Tabela 11.

Tabela 11 - Média aritmética e desvio padrão da microdureza e da profundidade da camada temperada para as três potências de aquecimento.

Potências de Aquecimento	Microdureza Vickers Média (HV)	Desvio padrão (HV)	Profundidade da Camada Média (mm)	Desvio padrão (mm)
95%	711	3,90	2,90	0,0204
87%	715	3,43	2,94	0,0202
78%	720	3,21	3,00	0,0215

Fonte: Autor.

Assim como no experimento com o tempo de permanência constante, o aumento do valor de microdureza com a diminuição da potência de aquecimento se repetiu, da mesma forma que foi observado no trabalho de Metage e Sidhu (2017) e no aço SAE 1045 temperado por indução no trabalho de Coelho (2022).

Já com relação à profundidade da camada temperada, no aço SAE 1045 foi observado que quanto maior a potência de aquecimento mantendo o tempo de permanência constante, maior a profundidade da camada temperada. Já no experimento realizado no aço SAE 1050 não houve uma diferença significativa na profundidade, já que houve compensação nos parâmetros, ou seja, para uma taxa de potência mais elevada, utilizou-se um menor tempo de aquecimento.

#### 4.1.2.3 Análise Dimensional

Os diâmetros medidos no topo, no meio e na base das diferentes amostras antes do tratamento térmico de têmpera por indução são apresentados nas Figuras 40, 42 e 44, e após o tratamento térmico de têmpera por indução são apresentados nas Figuras 41, 43 e 45. É possível correlacionar os diâmetros com a potência de aquecimento empregada e exibir as tolerâncias dimensionais das peças antes e depois do tratamento térmico de têmpera por indução.



Figura 40 - Diâmetro das amostras 95% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.

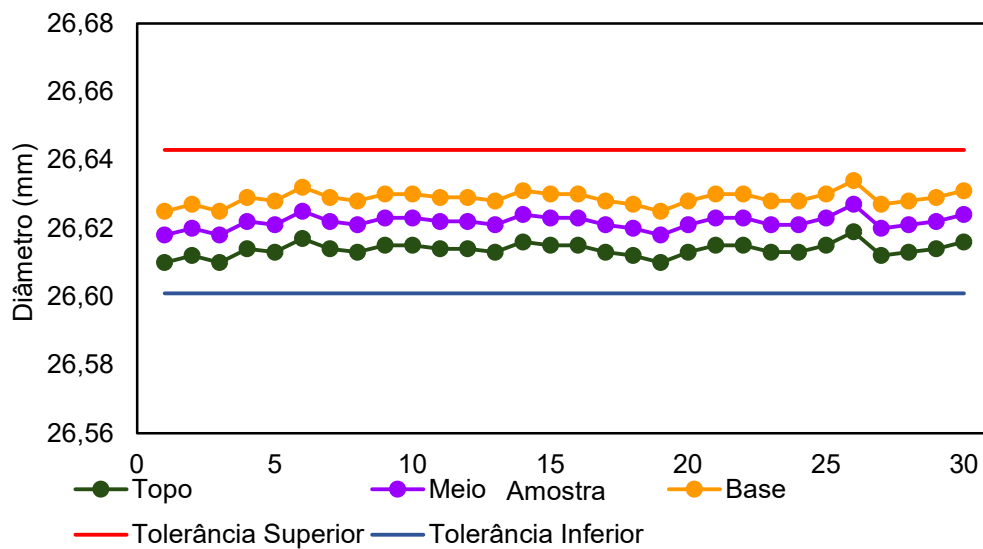


Figura 41 - Diâmetro das amostras 95% após o tratamento térmico de têmpera por indução.

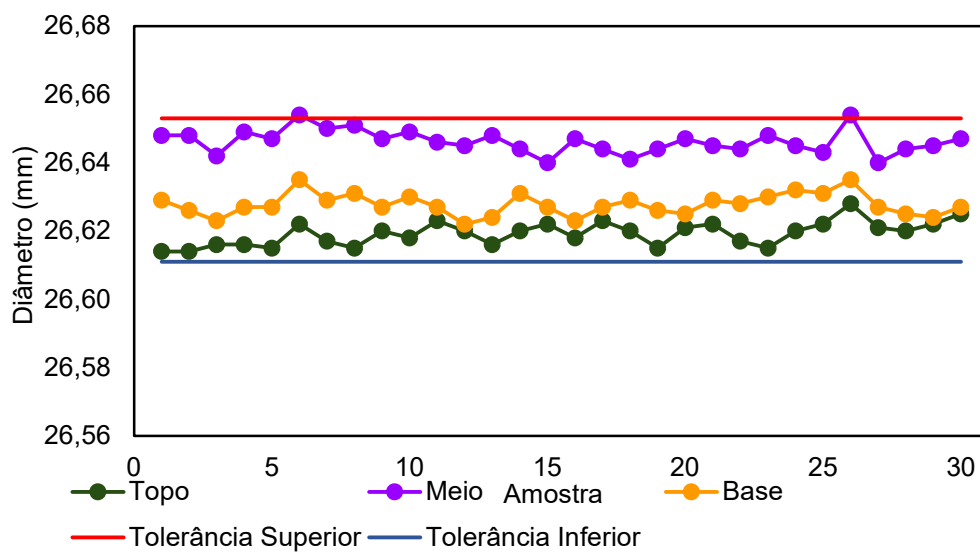


Figura 42 - Diâmetro das amostras 87% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.

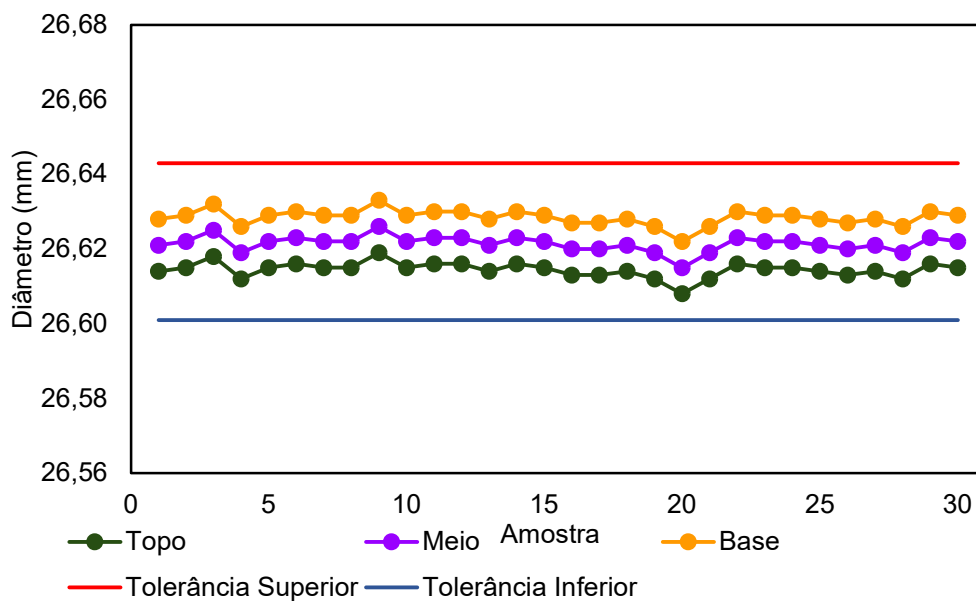


Figura 43 - Diâmetro das amostras 87% após o tratamento térmico de têmpera por indução.

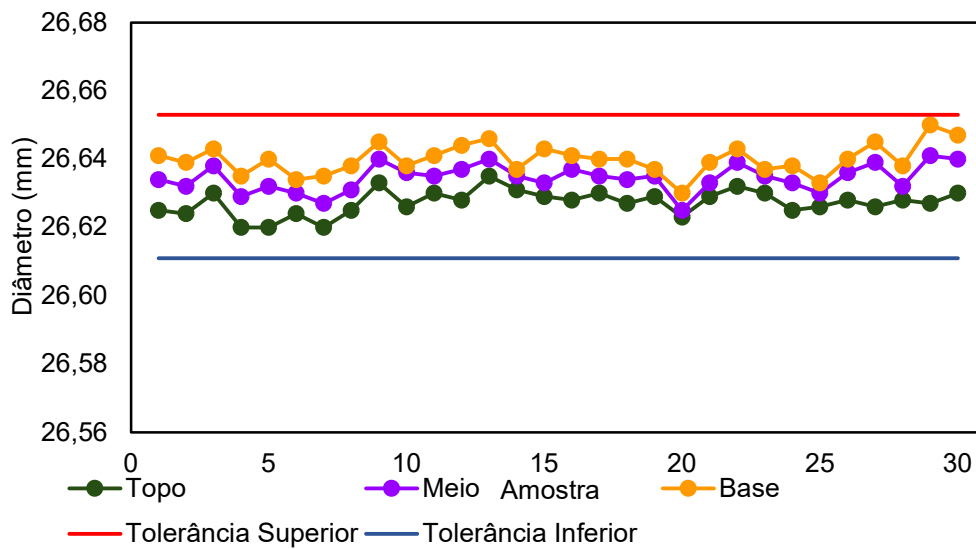




Figura 44 - Diâmetro das amostras 78% antes do tratamento térmico de têmpera por indução.

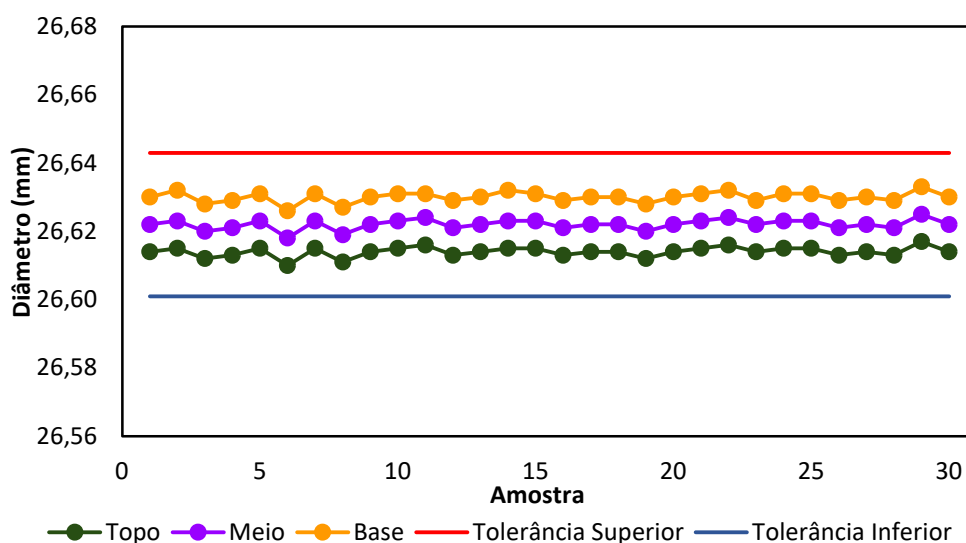
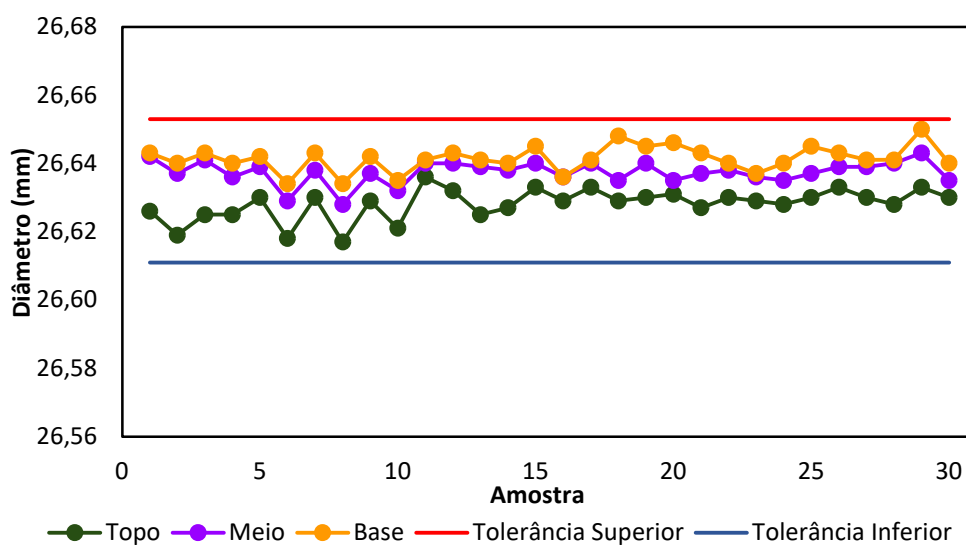


Figura 45 - Diâmetro das amostras 78% após o tratamento térmico de têmpera por indução.



Na potência de aquecimento de 95% foi atingido um diâmetro de 26,654 mm em duas amostras, o que ultrapassa o limite de tolerância superior do projeto de 26,653 mm. A Tabela 12 exibe os valores da média do diâmetro e o desvio padrão medidos no topo, no meio e na base das amostras nas três condições de potência de aquecimento.

Tabela 12 - Média aritmética e desvio padrão da dimensão da peça no topo, no meio e na base para os % de potência citados.

Amostras (% potência)	Diâmetro Médio no Topo (mm)	Desvio Padrão no Topo (mm)	Diâmetro Médio no Meio (mm)	Desvio Padrão no Meio (mm)	Diâmetro Médio na Base (mm)	Desvio Padrão na Base (mm)
95%	26,620	0,00351	26,646	0,00349	26,627	0,00323
87%	26,628	0,00369	26,635	0,00398	26,640	0,00439
78%	26,629	0,00457	26,638	0,00340	26,641	0,00373

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos são similares, em parte aos obtidos por Yi *et al.* (2013), onde o aumento da potência de aquecimento elevou as distorções dos discos de aço SAE 4340 estudados neste trabalho.

A principal diferença entre estes resultados está no fato da profundidade da camada temperada aumentar junto com a potência de aquecimento para o aço SAE 4340, situação com comportamento semelhante ao resultado obtido no capítulo 4.1.1, onde foram testadas diferentes potências para um mesmo tempo de aquecimento.

## 4.2 EXPERIMENTOS ALTERANDO A TAXA DE RESFRIAMENTO

Para realização deste experimento foi alterada a concentração de PAG para 5%, 10% e 15%, conforme já mencionado anteriormente. A Figura 46 mostra um exemplo do momento em que a ponta de eixo está em final de ciclo, ou seja, no estágio de resfriamento recebendo o jato de fluido refrigerante por meio de duchas.

Figura 46 - Peça durante o resfriamento.

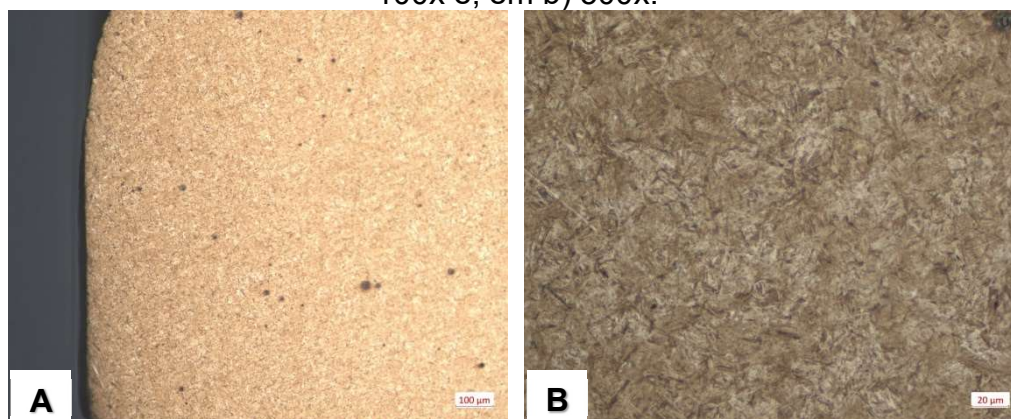


Fonte: Autor.

#### 4.2.1 Análise Metalográfica

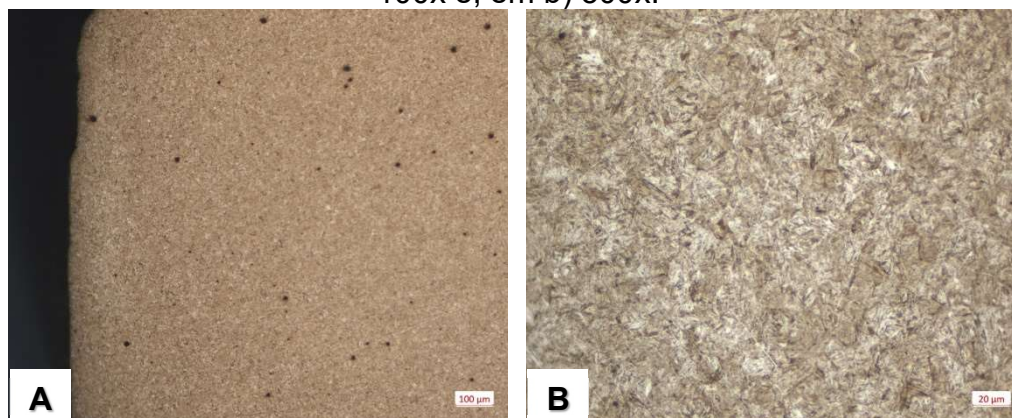
As análises metalográficas da seção transversal das amostras dos experimentos com alteração da taxa de resfriamento estão representadas da Figura 47 até a Figura 49. É possível identificar a formação de uma microestrutura martensítica com morfologia em ripas que é típica para esse teor de carbono dos SAE 1050, cujos detalhes microestruturais, tais como as agulhas de martensita, podem ser identificados sob ampliação de 500x.

Figura 47 - Metalografias das amostras de identificação cinza (5% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x.



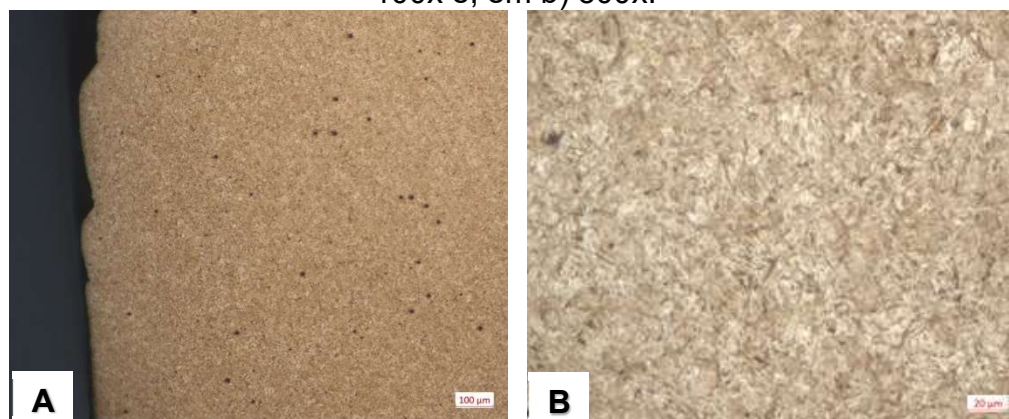
Fonte: Autor.

Figura 48 - Metalografia das amostras de identificação azul (10% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x.



Fonte: Autor.

Figura 49 - Metalografia das amostras de identificação azul (15% de PAG). Em a) 100x e, em b) 500x.



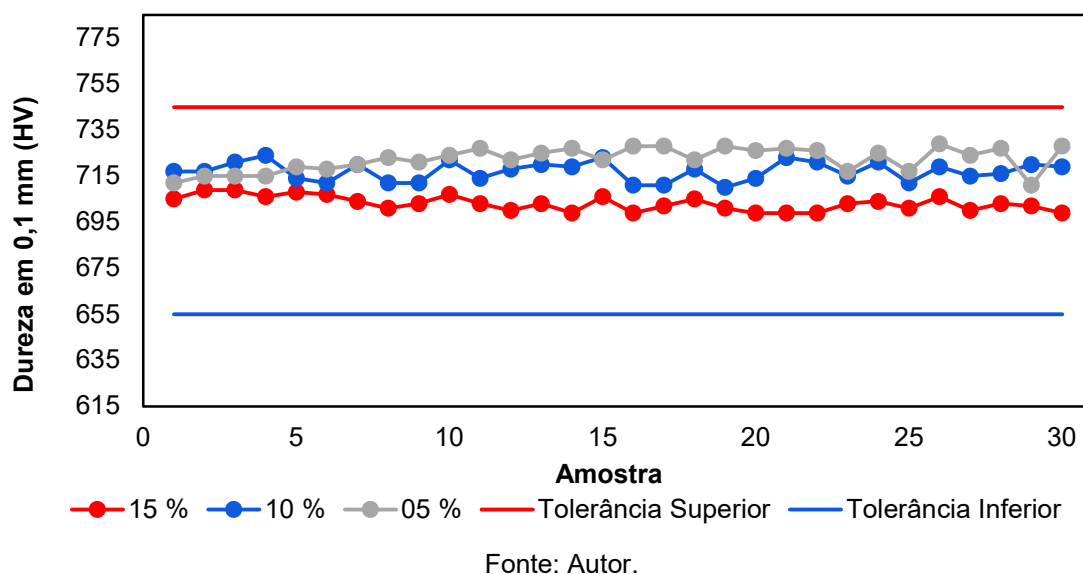
Fonte: Autor.

Foi possível constatar que não houve diferença significativa entre o tamanho de grão das microestruturas formadas no tratamento variando a concentração de PAG no resfriamento, o que está de acordo com a literatura, já que o tamanho de grão se relaciona com o crescimento do grão austenítico durante o aquecimento (CHIAVERINI, 2008).

#### 4.2.2 Análise de Microdureza

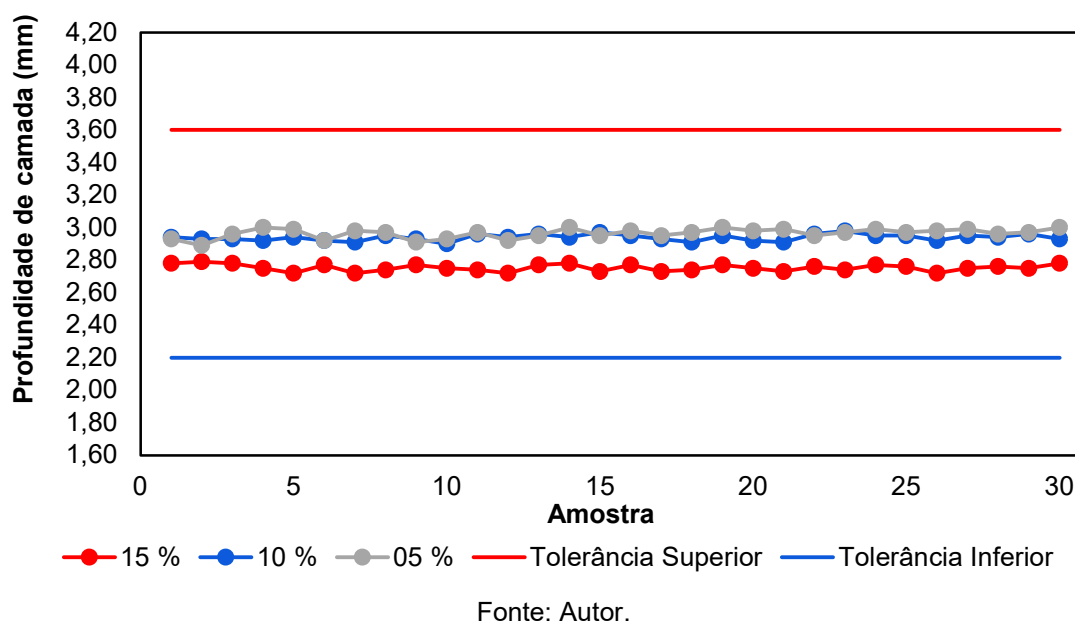
Na Figura 50 são apresentados os valores médios de microdureza Vickers em uma camada de 0,1 mm de profundidade para cada amostra submetida a cada um dos três tipos de resfriamentos (SAE1050 PAG5 / SAE1050 PAG10 / SAE1050 PAG15).

Figura 50 - Microdureza Vickers das amostras a uma profundidade de 0,1 mm.



Na Figura 51 é apresentada a profundidade da camada temperada para cada uma das amostras temperadas pelos três meios de resfriamento em questão.

Figura 51 - Profundidade da camada (mm) temperada das amostras.



A média aritmética da microdureza da camada temperada e sua profundidade, bem como o seu desvio padrão estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Média aritmética e desvio padrão da microdureza e da profundidade da camada temperada para as três concentrações de PAG nas soluções utilizadas como meios de resfriamento.

Amostras/ Concentração de PAG	Microdureza Vickers Média (HV)	Desvio padrão (HV)	Profundidade da Camada Média (mm)	Desvio padrão (mm)
SAE1050 PAG5	723,5	5,245	2,97	0,0298
SAE1050 PAG10	717,5	4,119	2,94	0,0210
SAE1050 PAG15	703	3,183	2,75	0,0195

Fonte: Autor.

Pode-se verificar que as amostras SAE1050 PAG10 apresentaram microdureza média (717,5 HV) muito próxima à microdureza das amostras SAE1050 PAG5 (723,5 HV), mesmo sendo um meio de resfriamento mais brando. Enquanto as amostras SAE1050 PAG15 apresentaram menor microdureza (703 HV) pois foram submetidas à um meio de resfriamento menos severo.

A profundidade das camadas temperadas em solução das amostras SAE1050 PAG5 e SAE1050 PAG10 são aproximadamente as mesmas (2,97 mm e 2,94 mm, respectivamente), enquanto as amostras SAE1050 PAG15 apresenta profundidade da camada temperada consideravelmente menor (2,75 mm).

Os resultados de dureza obtidos ao se alterar o meio de resfriamento na têmpera por indução foram condizentes com a literatura, já que em trabalhos como o de Gamboni *et al.* (2020) quanto mais severo o meio de resfriamento, maior a dureza obtida na peça e sua profundidade de camada.

Ao se comparar estes valores de microdureza com o experimento alterando a potência de aquecimento mantendo o tempo de permanência constante, foi possível verificar que a variação da potência de aquecimento influencia mais na dureza superficial do que a taxa de resfriamento, assim como foi concluído no trabalho de Metage e Sidhu (2017).

#### 4.2.3 Análise Dimensional

Os diâmetros medidos no topo, no meio e na base das diferentes amostras antes do tratamento térmico de têmpera por indução são apresentados nas Figuras 52, 54 e 56, e após o tratamento térmico de têmpera por indução são apresentados nas Figuras 53, 55 e 57. É possível correlacionar os diâmetros com cada meio de

resfriamento empregado e exibir as tolerâncias dimensionais das peças antes e depois do tratamento térmico de têmpera por indução.

Figura 52 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG5 antes do tratamento térmico de têmpera por indução.

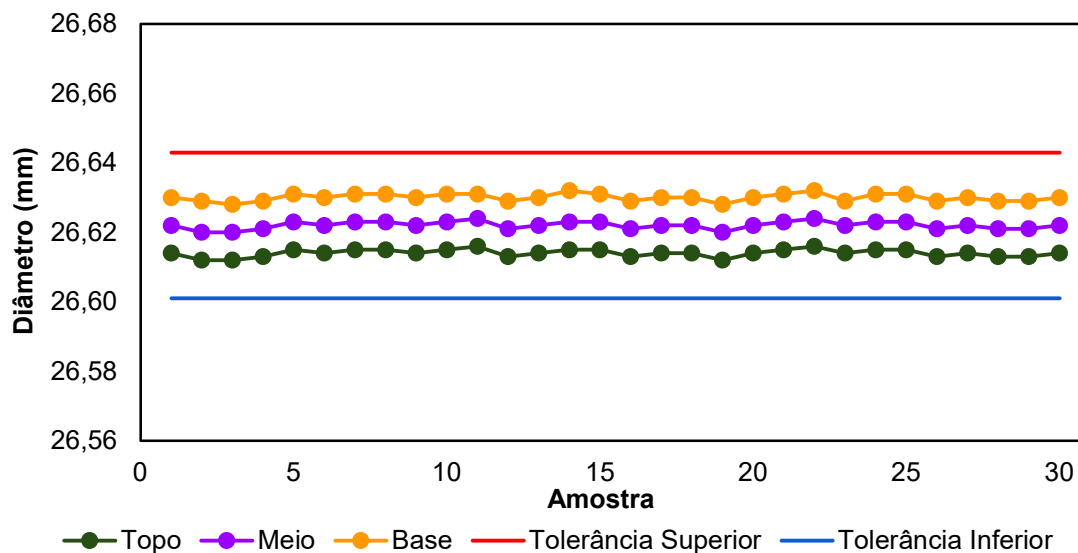


Figura 53 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG5 após o tratamento térmico de têmpera por indução.

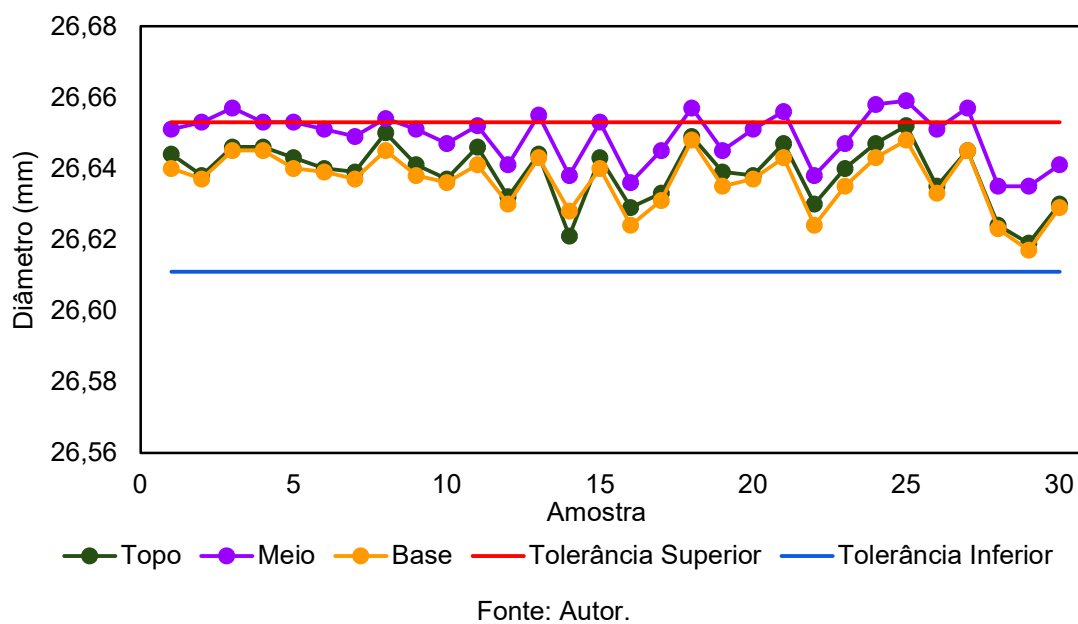
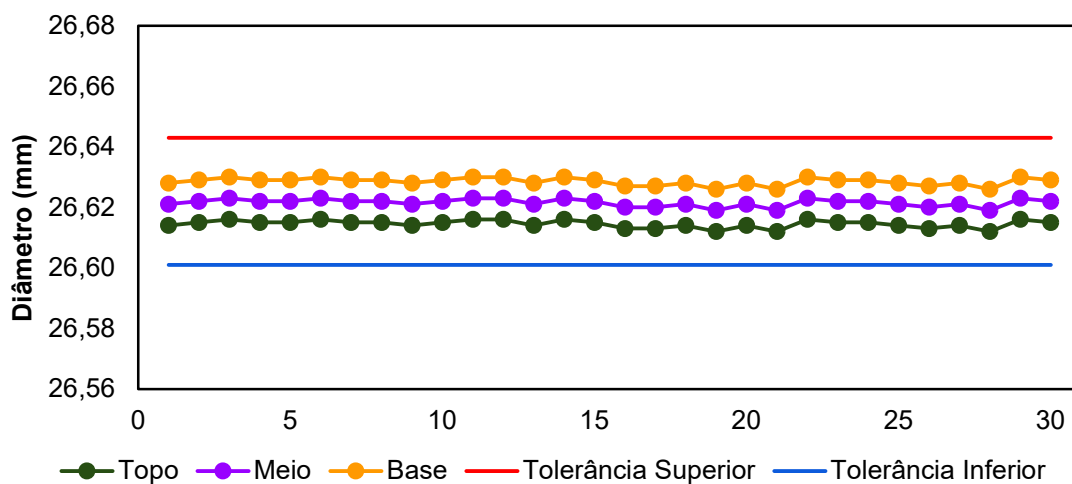
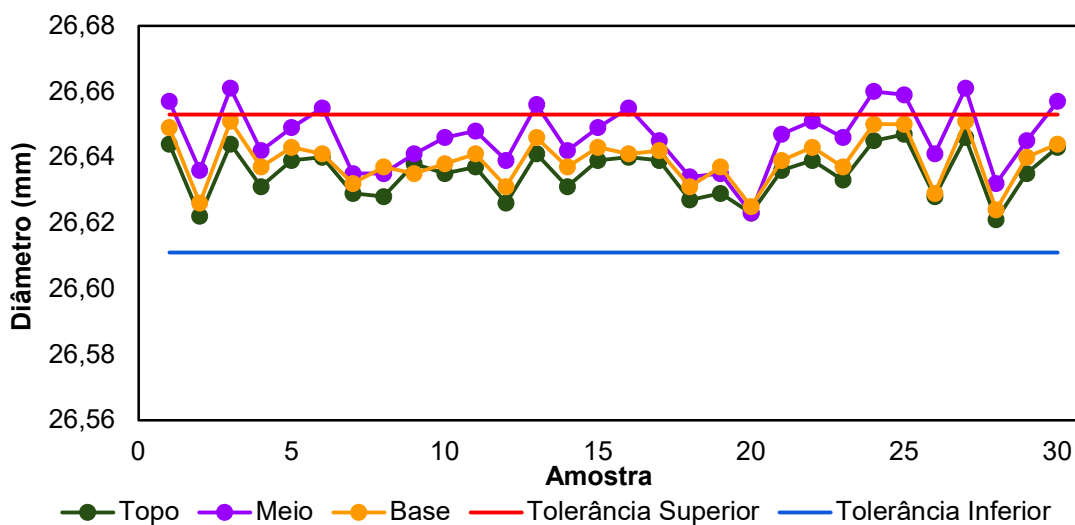


Figura 54 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG10 antes do tratamento térmico de têmpera por indução.



Fonte: Autor.

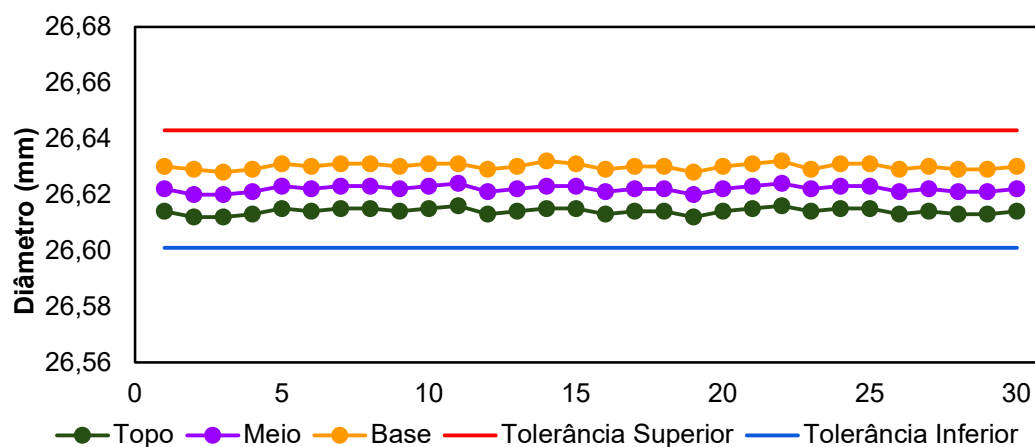
Figura 55 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG10 após o tratamento térmico de têmpera por indução.



Fonte: Autor.

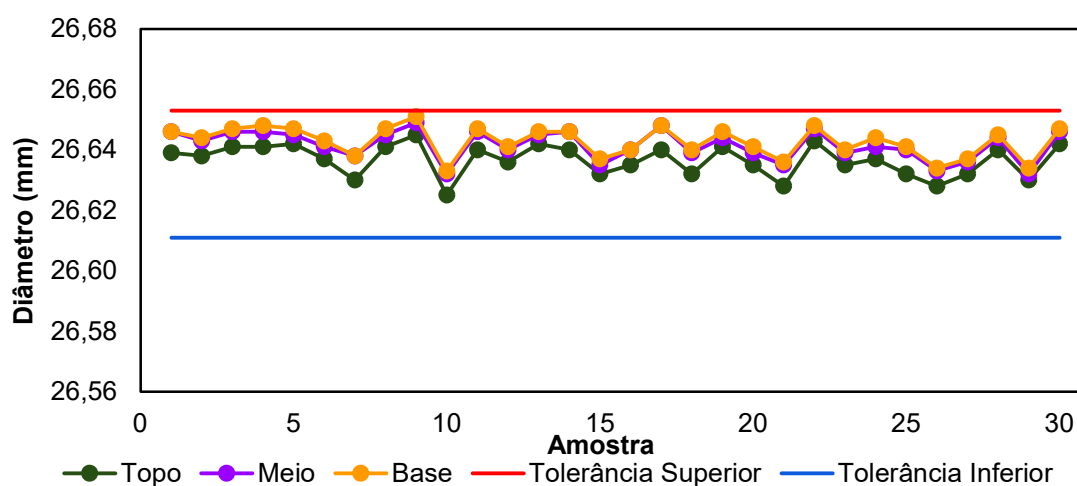


Figura 56 - Diâmetro das amostras SAE1050 PAG15 antes do tratamento térmico de têmpera por indução.



Fonte: Autor.

Figura 57 - Distorções no diâmetro das amostras SAE1050 PAG15 após o tratamento térmico de têmpera por indução.



Fonte: Autor.

Diversas amostras apresentaram distorções que ultrapassaram o limite de tolerância dimensional nas amostras resfriadas a 5% e 10% de PAG, algo que não foi visto nas amostras resfriadas a 15% de PAG. A Tabela 14 exibe os valores da média do diâmetro e o desvio padrão medidos no topo, no meio e na base das amostras resfriadas nas três condições de resfriamento.

Tabela 14 - Média aritmética e desvio padrão da dimensão da peça no topo, no meio e na base para os três meios de resfriamento citados.

Amostras	Diâmetro Médio no Topo (mm)	Desvio Padrão no Topo (mm)	Diâmetro Médio no Meio (mm)	Desvio Padrão no Meio (mm)	Diâmetro Médio na Base (mm)	Desvio Padrão na Base (mm)
SAE1050 PAG05	26,64	0,0085	26,651	0,0073	26,638	0,0080
SAE1050 PAG10	26,637	0,0075	26,646	0,0099	26,64	0,0076
SAE1050 PAG15	26,638	0,0052	26,642	0,0049	26,644	0,0049

Fonte: Autor.

Amostras (SAE1050 PAG5) submetidas ao resfriamento em solução de 5% de PAG apresentaram uma distorção severa do meio da peça, onde por vezes, a dimensão desta região ultrapassou o limite dimensional da peça em até 0,0225%. Assim como o ponto de meio, o ponto de topo possui dimensão superior à dimensão do ponto de base na grande maioria das amostras testadas chegando a uma diferença de 0,015% entre estes pontos, o que compromete a operação de montagem.

Ao empregar resfriamento com solução de 10% de PAG, também se observou que as amostras SAE1050 PAG10 sofreram distorções elevadas no ponto do meio, podendo estar acima da tolerância especificada para a peça em 0,0225%. Pode ser observado, porém, que o emprego da solução de 10% de PAG diminuiu as distorções do ponto de topo, possuindo uma dimensão final menor do que a dimensão do ponto de base em 29 das 30 amostras, onde apresenta uma diferença de 0,011% em comparação com a base em apenas uma amostra.

No emprego do resfriamento em solução de 15% de PAG, o resfriamento mais brando, foi constatado que as amostras (SAE1050 PAG15) estão dentro dos limites de tolerância dimensional, apresentando distorção dimensional menor em relação as demais amostras (SAE1050 PAG5 / SAE1050 PAG10) tanto para o ponto de topo quanto para o ponto do meio, garantindo a especificação do fabricante e, assim, a funcionalidade da peça fabricada.

Foi possível observar e constatar que quanto menor a concentração de PAG, maior é a taxa de resfriamento, enquanto o contrário também é verdadeiro, ou seja, quanto maior a concentração de PAG, menor é a taxa de resfriamento, isso pode ser evidenciado na figura 21, o qual consta as curvas de resfriamento fornecida pelo

fabricante Houghton. Com o aumento da taxa de resfriamento há um aumento nas distorções dimensionais da peça, este comportamento também foi visto no trabalho de Zhichao Li *et al.* (2014), que realizou simulações do tratamento de têmpera por indução no software DANTE em uma peça de aço AISI 1541. Conforme Zhichao Li, as distorções deram-se no sentido axial e, para o meio de resfriamento mais severo (25 kW/(m<sup>2</sup> °C)), foi na ordem de 2,1% em relação ao valor nominal do eixo, enquanto em um meio mais brando de resfriamento (5 kW/(m<sup>2</sup> °C)), as distorções ocorreram na ordem de 0,9%. Os resultados foram semelhantes aos testes realizados com a variação da concentração de PAG, pois observou-se que o meio de resfriamento mais severo (5% de PAG) teve uma distorção dimensional na ordem de 0,0225% acima da especificação, enquanto o meio de resfriamento mais brando (15% de PAG) a peça atendeu a especificação dimensional de projeto. Nestas simulações, foram alteradas as propriedades térmicas do meio de resfriamento, sendo mais severo ou mais brando e se concluiu que as distorções e as tensões residuais aumentam com maiores taxas de resfriamento.

As distorções da peça ao se alterar o meio de resfriamento são mais severas que as distorções do experimento anterior variando a potência de aquecimento, o que indica que apesar da potência de aquecimento influenciar mais nos valores absolutos de dureza, a taxa de resfriamento influencia mais nas tensões residuais e distorções da peça.

## 5 CONCLUSÃO

Com relação as microestruturas, foi possível observar que quanto maior a potência de aquecimento, maiores foram os grãos formados durante a austenitização prévia ao resfriamento no processo de têmpera por indução e menor o tamanho de grão ASTM.

No contexto das distorções do componente (Ponta de Eixo) ao variar a potência de aquecimento, pôde-se observar que quando a potência atingiu 95%, foi atingido o diâmetro de 26,654 mm na região central da peça, excedendo o limite de tolerância de 26,653 mm e resultando em um efeito indesejado em formato de "barril", prejudicando a fabricação do componente. Por outro lado, ao utilizar potências de 87% e 78% as distorções se mantiveram dentro dos limites de tolerância e não ocorreram distorções severas nas dimensões centrais da peça. Além disto, o aquecimento com potência de 78% e 4,0 s revelou-se mais eficaz, proporcionando à peça maior microdureza (720 HV) e profundidade média da camada temperada (3,00 mm), ao mesmo tempo que manteve as distorções dentro dos limites aceitáveis de tolerância estabelecidos para o projeto.

Durante a condução desta pesquisa acerca do processo de têmpera por indução, constatou-se que o resfriamento utilizando uma solução de 10% de PAG resultou em uma profundidade da camada temperada e microdureza semelhantes ao resfriamento de 5% de PAG (2,94 mm e 2,97 mm de profundidade e 717,5 HV e 723,5 HV de microdureza, respectivamente). Entretanto, é importante mencionar que diversas amostras submetidas ao resfriamento com 10% de PAG apresentaram distorções dimensionais elevadas no ponto do meio, excedendo a tolerância especificada de 26,653 mm. Em relação ao experimento de resfriamento (PAG) as microestruturas se mostraram bem semelhantes, não havendo nenhuma diferença significativa.

Diante disso, optou-se por considerar mais adequado o resfriamento em uma solução de 15% de PAG, que, embora produza uma camada temperada com menor microdureza e profundidade de camada, mostrou-se mais eficaz na redução das distorções dimensionais. Essa abordagem permitiu que as peças atendessem aos requisitos geométricos estipulados, mantendo suas dimensões dentro dos limites de tolerância dimensional estabelecidos em projeto.

As propriedades e especificações metalúrgicas também foram atendidas em sua totalidade em todos os experimentos, conforme requerimentos do projeto.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar os dados obtidos neste presente trabalho e realizar o experimento utilizando a melhor condição em relação a distorção dimensional do parâmetro potência (78%) vs a melhor condição do parâmetro resfriamento (15% de concentração de PAG).
- Incluir testes de fadiga e torção como validação dos ensaios mecânicos destes experimentos.

## REFERÊNCIAS

- BOSSLE, V. S. *et al.* Influência da intensidade de corrente elétrica do tratamento térmico de indução eletromagnética nas propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 / Influence of the electric current intensity of the electromagnetic induction heat treatment on the mechanical properties of ABNT 1045 steel. **Brazilian Journal Of Development**, [s.l.], v. 7, n. 8, p. 84801-84815, 27 ago. 2021.
- CALLISTER JÚNIOR, W.D.; RETHWISCH, D. G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E.; CANALE, A.C. Polímeros de têmpera à base de PAG. **Minerva**, [s.l.], v. 2, n. 3, p. 209-214, 2006.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 4. ed. São Paulo: ABM, 2008.
- COELHO, G.S.. **Avaliação do efeito dos parâmetros de têmpera por indução sobre a microestrutura e a dureza de aços de construção mecânica**. 2022. 91 f. TCC (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- COUPARD, D. *et al.* Residual stresses in surface induction hardening of steels: comparison between experiment and simulation. **Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 487, n. 1-2, p. 328-339, jul. 2008.
- GAMBONI, O.C. *et al.* Análise microestrutural e de dureza do aço sae 1050 após procedimento de têmpera utilizando diferentes fluidos de resfriamento. **III Simpósio de Tecnologias da Fatec de Sertãozinho (Sitefa/Stz)**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 140-150, 28 dez. 2020.
- GKN AUTOMOTIVE LIMITED. **GKN Automotive**. [2023]. Disponível em: <https://www.gknautomotive.com/>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- GRUM, J. A review of the influence of grinding conditions on resulting residual stresses after induction surface hardening and grinding. **Journal Of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 114, n. 3, p. 212-226, ago. 2001.
- LEMOES, G.V.B. **Análise de tensões residuais em eixos automotivos do aço DIN 38B3 temperados por indução. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação)**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- LI, Z. *et al.* Effect of Quenching Rate on Distortion and Residual Stresses During Induction Hardening of a Full-Float Truck Axle Shaft. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, [s.l.], v. 23, n. 12, p. 4170-4180, 12 ago. 2014.

LI, Z.; FREBORG, A.; FERGUSON, L.. Effect of preheat on improving beneficial surface residual stresses during induction hardening process. *In: 2016 Proceedings of the ASME 2016 11th International Manufacturing Science & Engineering Conference (MSEC2016)*. [s.l.]: ASME, 2016. p. 1-6.

METAGE, S. P.; SIDHU, J. S.. Optimization of Process Parameters in Induction Hardening of 41Cr4 Steel by Response Surface Methodology. **International Journal Of Mechanical Engineering Research**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 83-97, 2017.

NAKAGAWA, M. **Abc**: custeio baseado em atividades. São Paulo: Atlas, 1994.

NOVIKOV, I. **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1994.

NUNES, R. M. **Análise de tensões residuais no processo de trefilação combinada do aço AISI 1048 visando minimizar distorções pós processamento**. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

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

QUACKER HOUGHTON, PAG: Aqua Quench 145- Curvas de Resfriamento.

ROCHA, A. S. *et al.* Experimental characterization and simulation of a wire drawing process and related distortion potentials\*. **Htm Journal Of Heat Treatment And Materials**, [s.l.], v. 68, n. 3, p. 135-141, 26 jun. 2013.

ROSSINI, N.S. *et al.* Methods of measuring residual stresses in components. **Materials & Design**, [s.l.], v. 35, p. 572-588, mar. 2012.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R. L.. **Handbook of Induction Heating**. New York: CRC Press, 2003.

RUDNEV, Valery I.. A common misassumption in induction hardening. **Heat Treating Progress**, [s.l.], v. 4, p. 23-25, 2004.

SEGERBERG, S.O.; BODIN, J.. Proceedings of the Third International Seminar of the International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering. *In: INTERNATIONAL FEDERATION FOR HEAT TREATMENT AND SURFACE ENGINEERING. Quenching and Carburising*. Melnourne: Institute Of Materials, 1991. p. 177-188.

SEHERR-THOSS, H.; SCHMELZ, F.; AUCKTOR, E.. **Universal Joints and Driveshafts**: analysis, design, applications. [Berlim]: Springer, 2006.



SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R.. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1988.

SILVA, C. L.. Gestão estratégica de custos em cadeias de valor. *In*: Congresso Brasileiro de Custos, 6., 1999, São Paulo. **Anais [...]** . São Paulo: ABC, 1999. p. 1-16.

SMITH, W.; HASHEMI, J.. **Foundations of Materials Science and Engineering**. 5. ed. New York: McGraw Hill, 2012.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEER. **Chemical Compositions of SAE Alloy Steels**, SAE J404, ed. 1994.

STEYER, V. **Eixos tubulares em material SAE 4130H com camada cementada na parte externa e interna**. 2006. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TOTTEN, G. (ed.). **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Ohio: Asm Intl, 2002.

TOTTEN, G. E. (ed.). **Steel Heat Treatment Handbook**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2006.

VIEIRA, E. R. *et al.* Analysis of the applicability of polymeric solutions as cooling fluid in the quenching of low-alloy steels. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, [s.l.], v. 18, p. 1-7, 2021.

VIEIRA, E. R. *et al.* Efeitos da variação da concentração de solução polimérica aquosa a base de PVP na têmpera de aço AISI 4140. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 1-11, 2019.

YI, J. *et al.* Distortion and residual stress measurements of induction hardened AISI 4340 discs. **Materials Chemistry And Physics**, [s.l.], v. 142, n. 1, p. 248-258, out. 2013.

ZOCH, H.-W.. From Single Production Step to Entire Process Chain – the Global Approach of Distortion Engineering. **Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 6-10, jan. 2006.