



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO MARANHÃO PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DAS DISTORÇÕES DE UMA ENGRENAGEM DURANTE O  
PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO**

Recife

2022

PEDRO MARANHÃO PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DAS DISTORÇÕES DE UMA ENGRENAGEM DURANTE O  
PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Área de concentração:** Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

Coorientadora: Profa. Dra. Lidice Aparecida Pereira Gonçalves.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

P654s      Pinheiro, Pedro Maranhão.  
              Simulação das distorções de uma engrenagem durante o processo de têmpera por indução / Pedro Maranhão Pinheiro. – 2022.  
              76 f.: il., figs., tabs.

              Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.  
              Coorientadora: Profa. Dra. Lidice Aparecida Pereira Gonçalves.  
              Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Recife, 2022.  
              Inclui referências.

              1. Engenharia mecânica. 2. Tratamento térmico. 3. Indução. 4. Distorções. 5. Simulação. 6. Otimização. I. Costa, José Ângelo Peixoto da (Orientador). II. Gonçalves, Lidice Aparecida Pereira (Coorientadora). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-304

PEDRO MARANHÃO PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DAS DISTORÇÕES DE UMA ENGRENAGEM DURANTE O  
PROCESSO DE TÊMPERA POR INDUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia.

Aprovada em: 28/02/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Orientador)  
Instituto Federal de Pernambuco

---

Profª. Dra. Lidice Aparecida Pereira Gonçalves (Coorientadora)  
Instituto Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Eduardo Padón Hernández (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus professores, por terem contribuído diretamente para o meu desenvolvimento profissional, especialmente aos Professores Dr. Ângelo Peixoto e Dra. Lidice Aparecida Pereira Gonçalves, pelos conhecimentos transmitidos e pela assistência durante a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus familiares, pai, mãe e, em especial, para minha esposa, pelo apoio e paciência durante toda esta jornada.

A todos, meu muito obrigado!

## RESUMO

O presente trabalho avalia as distorções (deformações) que ocorrem em uma engrenagem durante o processo de têmpera por indução em um ambiente virtual (simulação). O estudo realizado envolve a modelagem do conjunto de fixação da engrenagem no equipamento com a ferramenta da Autodesk Inventor® para posterior avaliação do processo de têmpera, incluindo os ciclos de aquecimento e resfriamento, no software Ansys®. Uma vez determinados os parâmetros do processo de têmpera e simulado todo o ciclo, é realizada uma avaliação na engrenagem, e as diferenças entre os valores das dimensões antes e após o processamento (deformações) são computadas e comparadas com resultados obtidos experimentalmente. A partir das validações do modelo hipóteses são avaliadas com o objetivo de obter um menor valor para essas deformações e um menor consumo energético durante o processamento sem comprometer as especificações do produto. O sistema avaliado é uma indutora com 125kW e 30kHz. O indutor é feito de uma liga de cobre e os dispositivos que fixam a engrenagem no equipamento são de aço inoxidável. Foram realizados estudos de otimização topológica para definir a melhor geometria dos dispositivos de fixação que resultam na melhor distribuição de calor ao longo da engrenagem, garantindo que ele esteja em conformidade com as especificações definidas em projeto. Os resultados obtidos neste trabalho indicam que o modelo desenvolvido consegue prever as deformações do furo central da coroa com uma diferença de 6,3% em comparação aos resultados experimentais. Ainda, o modelo pode ser usado para testar hipóteses de variação de parâmetros, de forma a obter um menor valor de deformação e condições de processo que resultem em menor consumo de energia.

Palavras-chave: tratamento térmico; indução; distorções; simulação; otimização.

## ABSTRACT

The present work evaluates the distortions (deformations) that occur in a gear during the induction hardening process in a virtual environment (simulation). The study carried out involves the modeling of the gear fastening set on the equipment with the Autodesk tool, Inventor®, for further evaluation of the hardening process, including the heating and cooling cycles, in the Ansys® software. Once the parameters of the hardening process have been determined and the entire cycle is simulated, an evaluation on the gear is carried out, verifying the differences between the values of the dimensions before and after processing are computed (deformations) and compared with results obtained experimentally. From the model validations, hypotheses are evaluated to obtain a lower value for these deformations and a lower energy consumption without compromising the product specifications. The system evaluated is an inductor with 125kW and 30kHz. The inductor is made of a copper alloy and the devices that fix the product to stainless steel equipment. Also, topological optimization studies are carried out to define the best geometry of the fastening devices that result in the best heat distribution throughout the product, ensuring that it complies with the specifications defined in the project. The results obtained in this work indicate that the developed model is able to predict deformations of the central hole of the anchor with a difference of 6.3% compared to the experimental ones. Furthermore, the model used to test the hypotheses of obtaining parameters with lower formation and process values may result in lower energy consumption conditions.

Keywords: heat treatment; induction; distortions; simulation; optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coroa de transmissão montada .....	11
Figura 2 - Fluxo de fabricação de uma coroa de transmissão, da estampagem até o tratamento térmico. ....	12
Figura 3 - Engrenagens avaliadas. Forjado (esquerda) e usinado (direita) .....	16
Figura 4 – Geometria de biela reprojetaada com otimização topológica .....	17
Figura 5 – Modelo 3D da engrenagem estudada .....	17
Figura 6 – Tensão residual no dentado em ambos os cenários de têmpera .....	18
Figura 7 – Distorção ao longo do dente.....	19
Figura 8 – Peça de estudo (engrenagem).....	19
Figura 9 – Geometria do dispositivo para cementação.....	20
Figura 10 – Geometria para têmpera .....	20
Figura 11 – Comparativo entre temperaturas simuladas e experimentais. ....	21
Figura 12 – Temperatura máxima simulada X experimento. ....	22
Figura 13 – Dureza superficial simulada X experimento. ....	23
Figura 14 – Estrutura metalográfica simulada.....	23
Figura 15 – Modelo 3D da engrenagem e indutor.....	24
Figura 16 – Peça cilíndrica - Geometria do material - utilizada nos experimentos.....	25
Figura 17 – Representação de aquecimento de uma chapa com indutor circular.....	26
Figura 18 – Indicação das posições das medições.....	27
Figura 19 – Comparativo entre temperaturas obtidas em experimento X elementos finitos ...	27
Figura 20 – Engrenagem 1.....	28
Figura 21 – Engrenagem 2.....	28
Figura 22 – Proposta de otimização 1 .....	28
Figura 23 – Proposta de otimização 2 .....	29
Figura 24 – Proposta de otimização 3 .....	29
Figura 25 – Comparativo entre projetos. Modelo tradicional (esq.) X otimizado (dir.) .....	31
Figura 26 – Comparativo entre temperatura simulada e experimental.....	32
Figura 27 – Suporte original (a) x suporte otimizado (b).....	33
Figura 28 – Modelo 3D do sistema formado pelo cadinho e indutor.....	34
Figura 29 – Distribuição da temperatura na seção transversal do cadinho. ....	34
Figura 30 - Modelo do sistema de freio.....	36

Figura 31 - Pinças de freio dianteiro (a) e traseiro (b).....	36
Figura 32 – Pinças reprojctadas por otimização topológica. Dianteiro (a) e traseiro (b).....	37
Figura 33 – Diagrama Ferro-Carbono .....	38
Figura 34 – Diagrama TTT de aço carbono .....	39
Figura 35 – Esquema mostrando aquecimento por indução.....	41
Figura 36 – Coroa de transmissão de motocicleta tratada com têmpera por indução. ....	43
Figura 37 – Estrutura de uma motocicleta obtida por otimização topológica. ....	44
Figura 38 – Suporte de fixação redesenhado por otimização topológica.....	44
Figura 39 – Otimização topológica de uma estrutura sujeita carregamentos e apoios.....	45
Figura 40 – Fluxograma de trabalho.....	47
Figura 41 – Gradientes de resfriamento em um meio composto por um fluido de resfriamento vaporizável (A) em comparação a um polímero PAG (B). ....	48
Figura 42 – Medição de temperatura da coroa durante o aquecimento.....	49
Figura 43 – Equipamento de têmpera por indução.....	50
Figura 44 – Visão geral da coroa de transmissão estudada .....	52
Figura 45 – Estações do processo de têmpera por indução .....	53
Figura 46 – Detalhe do sistema de têmpera pelo indutor .....	54
Figura 47 – 2D do sistema de fixação .....	56
Figura 48 – Base de uma peça em produção retrabalhada com rasgos .....	56
Figura 49 – Geometria de várias bases testada ao longo do desenvolvimento.....	57
Figura 50 – Modelo 3D do sistema de fixação.....	58
Figura 51 – Fluxo de trabalho da simulação.....	59
Figura 52 – Tampa de fixação .....	60
Figura 53 – Base de apoio .....	60
Figura 54 – Malha com 1,5mm .....	62
Figura 55 – Temperaturas no processo.....	64
Figura 56 – Temperatura no final do processo.....	65
Figura 57 – Deformação ao final do processo.....	66
Figura 58 – Regiões que deverão ser mantidas na otimização .....	68
Figura 59 – Resultado da otimização topológica.....	68
Figura 60 – Influência do material na deformação.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Comparativo entre deformações obtidas via elementos finitos e experimento.....	16
Tabela 2 –	Resumo dos testes realizados .....	22
Tabela 3 –	Lista com as variações dos parâmetros utilizados nos testes.....	25
Tabela 4 –	Resumo das simulações .....	29
Tabela 5 –	Comparativo dos pesos das engrenagens .....	30
Tabela 6 –	Resumo comparativo entre projetos. TM (projeto atual) versus TO LBPF (otimização topológica mais manufatura aditiva) .....	31
Tabela 7 –	Comparativo entre modelos .....	33
Tabela 8 –	Comparativo entre temperatura simulada e experimental .....	35
Tabela 9 –	Dimensões principais da coroa de transmissão do estudo .....	50
Tabela 10 –	Propriedades adicionadas no Ansys .....	58
Tabela 11 –	Tabela com testes de tamanho de elemento de malha .....	60
Tabela 12 –	Constantes da equação (11) .....	62
Tabela 13 –	Comparativo entre temperaturas .....	64
Tabela 14 –	Comparativo entre deformações .....	66
Tabela 15 –	Estudo de caso .....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	13
1.2	OBJETIVOS GERAIS .....	14
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	14
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>38</b>
3.1	TÊMPERA .....	38
3.2	TÊMPERA POR INDUÇÃO .....	40
3.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA .....	43
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
4.1	EXPERIMENTO .....	50
<b>4.1.1</b>	<b>Produto .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Processo de Têmpera por Indução .....</b>	<b>51</b>
4.2	SIMULAÇÃO .....	56
<b>4.2.1</b>	<b>Material .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Malha .....</b>	<b>60</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Condições de contorno .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
5.1	TEMPERATURA .....	63
5.2	DEFORMAÇÃO .....	64
5.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA .....	66
5.4	ESTUDOS DE CASOS .....	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS .....	73
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As engrenagens, componentes mecânicos destinados a transmitir movimentos, estão presentes nas mais diversas aplicações, desde brinquedos até indústria aeronáutica. Em motocicletas possuem as mais variadas funções. A principal é transmitir movimento para as rodas como consequência do ciclo de combustão dos motores movidos a combustível fóssil e ou biocombustível. O ciclo de subida e descida do pistão do motor faz girar o virabrequim que transmite esse torque para a transmissão o que leva ao movimento do pinhão que transmite a rotação para roda traseira via corrente. Uma coroa presente na roda traseira, faz a roda girar numa velocidade diferente da transmitida pelo pinhão devido à diferença no número de dentes entre eles (relação de transmissão). A coroa, por sua vez, faz a roda girar, movimentando a motocicleta.

Figura 1 - Coroa de transmissão montada



Fonte: Site da Daido Industrial e Comercial LTDA<sup>1</sup>

O processo de fabricação de engrenagens pode ter os mais variados fluxos de processo. A seleção do fluxo mais adequado vai depender do material usado, geometria do produto, tolerâncias aplicadas e requisitos de aparência.

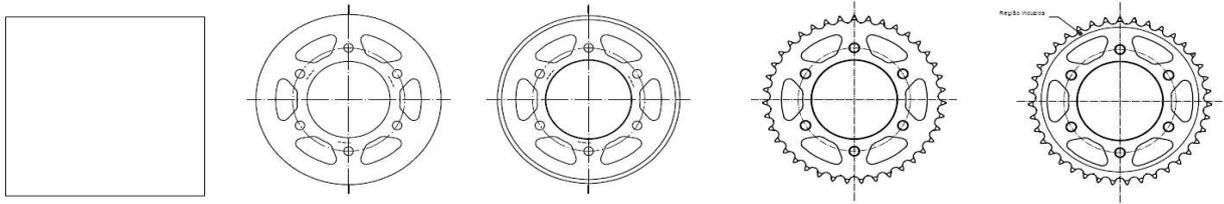
As coroas de transmissão, devido à geometria, geralmente possuem o seguinte fluxo de fabricação:

Estampagem → Usinagem → Tratamento térmico → Acabamento → Tratamento superficial → Expedição (envio para o cliente).

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://daido.com.br/motos/kit-de-transmissao/>. Acesso em: 03 jan. 2022

Figura 2 - Fluxo de fabricação de uma coroa de transmissão, da estampagem até o tratamento térmico.



Fonte: O autor (2022)

O processo de fabricação começa com o recebimento do *blank* de aço carbono SAE 1045. Esse *blank* é levado para a estampagem onde são feitos os cortes dos alívios, furos de fixação, furo central e externo, essas duas últimas características passarão por processos de acabamento, uma vez que a estampagem não consegue atender as tolerâncias finais. Em seguida, a peça estampada é encaminhada para a usinagem onde o externo e o furo central são usinados nas suas dimensões finais e tem seus dentes usinados. Na sequência, a peça segue para o tratamento térmico. Nesse tipo de produto é feito o tratamento térmico de têmpera. O processo utilizado é a têmpera por indução onde a peça é aquecida via indução eletromagnética e resfriada com uma mistura de água e aditivos.

Devido a sua complexidade, uma das principais etapas de fabricação é o tratamento térmico. Durante esse processo, a engrenagem é submetida a um ciclo de aquecimento e resfriamento que tem o objetivo de mudar a estrutura metalográfica do aço e suas propriedades mecânicas. O ciclo de tratamento térmico, aquecimento seguido de resfriamento, gera distorções devido ao gradiente de temperatura no ciclo. Tais distorções provocam uma variação dimensional no produto que, dependendo do fluxo de processo e característica avaliada, deve ter seu valor alterado, em operações de transformações antes do tratamento térmico, para compensar o valor das distorções ou tem suas dimensões finais atendidas em processos de acabamento após tratamento térmico.

Associando geometrias variadas com diversos tipos de ligas que podem ser aplicadas na fabricação da engrenagem, esse valor de distorção não é conhecido, sendo necessários testes para se obtê-los. Ainda, as peças podem ser colocadas em diversas posições para serem submetidas a esses ciclos, dificultando a escolha da melhor forma de tratamento. Os testes consomem um tempo considerável, gerando um alto custo.

O processo de tratamento térmico mais utilizado para coroa de transmissão é a têmpera por indução. Nesse tipo de processo, a peça é colocada em uma base e é aproximada

de um indutor que aquece a peça através de indução eletromagnética e logo após é resfriada (têmpera). Esse processo é dimensionado de tal forma que apenas uma determinada área da peça seja temperada, atingindo uma dureza mais elevada que o restante da peça conforme requisitos definidos pelo cliente no projeto do produto. O aquecimento de apenas parte do produto para posterior resfriamento, associado ao fato de coroas de moto possuírem um diâmetro muito maior do que sua espessura e grandes alívios estampados, acentua ainda mais esse efeito de distorção. Ainda, nesse processo, a geometria do dispositivo de fixação da peça no equipamento pode afetar a região aquecida, prejudicando o atendimento à região temperada da peça. O projeto desses componentes deve ser bem estudado para não comprometer a qualidade do produto.

A escolha desse tema faz parte do grupo de pesquisa de Energia da UFPE/IFPE coordenada pelos professores. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa que realiza estudos na área de simulação focada em transferência de calor. O objetivo desse trabalho é criar uma sistemática que possa ser implantada em indústrias que possuam o processo de têmpera por indução.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Como foi apresentado anteriormente, distorções durante o tratamento térmico impactam no atendimento das especificações finais do produto e, conhecer esses valores previamente, reduz o tempo de testes necessário para definição dos parâmetros de fabricação.

Além disso, a geometria dos dispositivos de fixação também tem impacto direto no atendimento nas especificações do produto. Um melhor entendimento da influência de sua geometria previamente à fase de teste impacta nos custos de desenvolvimento e redução no tempo de entrega ao cliente.

Atualmente não existe um modelo virtual que preveja essa influência. Como consequência, em um novo desenvolvimento, uma geometria padrão é utilizada e testes são realizados no chão de fábrica para verificar sua eficácia, resultando em máquina parada para retrabalhos nos dispositivos, sendo às vezes necessária a confecção de um novo componente.

O presente trabalho visa, através de simulação, obter o valor dessas distorções que ocorrem no tratamento. Além disso, será feita uma avaliação nos dispositivos de fixação da coroa na máquina, para verificar a possibilidade de redução da massa do dispositivo através

de otimização topológica. Por fim, um estudo de caso será feito variando parâmetros de processo para verificar sua influência nos valores de distorção e temperatura.

O conhecimento prévio dessas informações torna a indústria mais competitiva e reduz os prazos no desenvolvimento de novos produtos. Atualmente, devido a rápida transformação que o planeta passa, novos produtos devem ser lançados com mais velocidade. Desenvolvimentos que antes eram de quase 3 anos pois envolviam confecção de protótipos e testes em bancadas e em pistas que poderiam necessitar ser refeitos dependendo dos resultados, estão sendo reduzidos com o uso de modelos virtuais que fazem simulações e suprimem os testes iniciais, fornecendo dados de forma mais rápida para as equipes de desenvolvimento realizarem mudanças e confeccionarem apenas os protótipos na fase final dos testes.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

- Simular as distorções de uma coroa de transmissão durante o processo de têmpera por indução.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar um modelo virtual para simulação para avaliação prévia de distorções;
- Avaliar as distorções de engrenagens durante o tratamento térmico;
- Avaliar dispositivos de tratamento térmico e sugerir melhorias em sua geometria.

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos, onde serão mostradas as fases de estudo no desenvolvimento do modelo virtual para análise de distorções e avaliação da geometria dos dispositivos.

No capítulo I é apresentada uma introdução, juntamente com a motivação e os objetivos desejados com este estudo.

No capítulo II é dedicado à revisão bibliográfica e o estado da arte, onde são apresentados os estudos nas áreas de tratamento térmico e otimização topológica.

No capítulo III é apresentada a fundamentação teórica sobre tratamento térmico, mais especificamente têmpera, o processo de têmpera por indução e otimização topológica.

No capítulo IV é apresentada a metodologia utilizada para a modelagem do sistema de fixação juntamente com a coroa e a apresentada a validação do modelo com dados obtidos em testes físicos em uma indústria.

No capítulo V são apresentados os resultados obtidos com as simulações, juntamente com seus discursões.

No capítulo VI é dedicado a conclusões e sugestões de trabalhos futuros relacionados ao modelo de tratamento térmico e otimização de dispositivos.

## 2 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo serão apresentados textos referentes aos tópicos de tratamento térmico, aquecimento por indução e otimização topológica.

Cho *et al.* (2004) analisaram a estrutura metalográfica e as distorções dos diâmetros internos e externos de *Bevel Gears* (engrenagens cônicas) feitas de aço SAE 4118H, comparando dois processos de fabricação - peças forjadas e peças usinadas, além de comparar as distorções de peças temperadas e revenidas.

Figura 3 – Engrenagens avaliadas. Forjado (esquerda) e usinado (direita).



Fonte: Cho *et al.* (2004)

Para peças forjadas, o efeito elástico que ocorre com a peça ao ser retirada da matriz de forja foi desconsiderado. No estudo, as simulações foram realizadas no software de elementos finitos DEFORM-HT. Para as peças usinadas, os resultados de simulação foram bem próximos aos encontrados nos experimentos, com uma diferença de 0,004 mm para o diâmetro interno e 0,012mm para o diâmetro externo.

Para as peças forjadas, o efeito de recuperação elástica da peça ao ser retirada da matriz de forjamento, afetou a convergência dos resultados simulados e reais necessitando de maiores estudos sobre o tema.

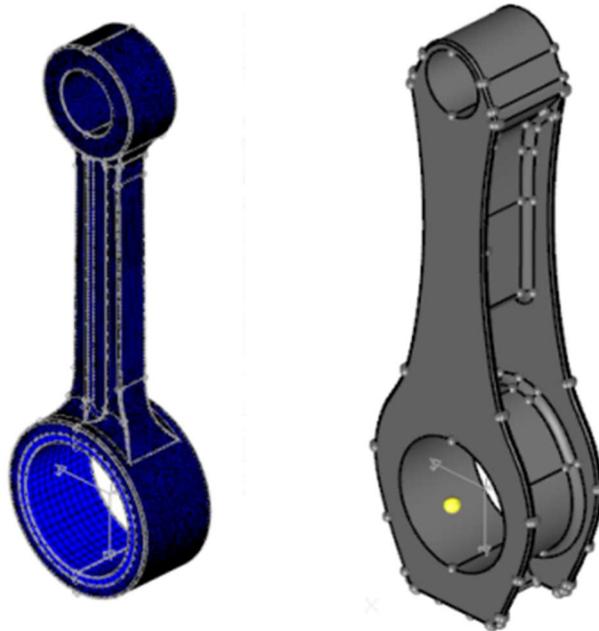
Tabela 1 - Comparativo entre deformações obtidas via elementos finitos e experimento.

<b>Diâmetro Interno</b>		<b>Diâmetro Externo</b>	
Simulação	Experimento	Simulação	Experimento
0,011	0,015	0,037	0,025

Fonte: Adaptado de Cho *et al.* (2004)

Toledo *et al.* (2009) utilizaram ferramentas de otimização topológica para definir uma geometria mais apropriada para uma biela de um motor de 04 (quatro) tempos. Aplicando os carregamentos e restrições atuantes no funcionamento do componente, uma nova geometria foi obtida, garantindo um carregamento 40% maior no componente.

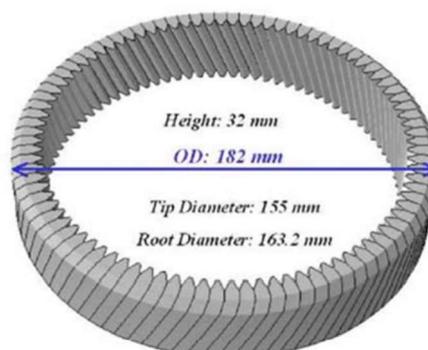
Figura 4 – Geometria de biela reprojetaada com otimização topológica



Fonte: Toledo *et al.* (2009)

Zhichao *et al.* (2011) simularam um processo de têmpera por indução de uma cremalheira feita de aço 5130 previamente cementada e resfriada com a uma taxa de resfriamento controlada a fim de determinar as tensões residuais e distorções decorrentes desse processo.

Figura 5 – Modelo 3D da engrenagem estudada



Fonte: Zhichao *et al.* (2011)

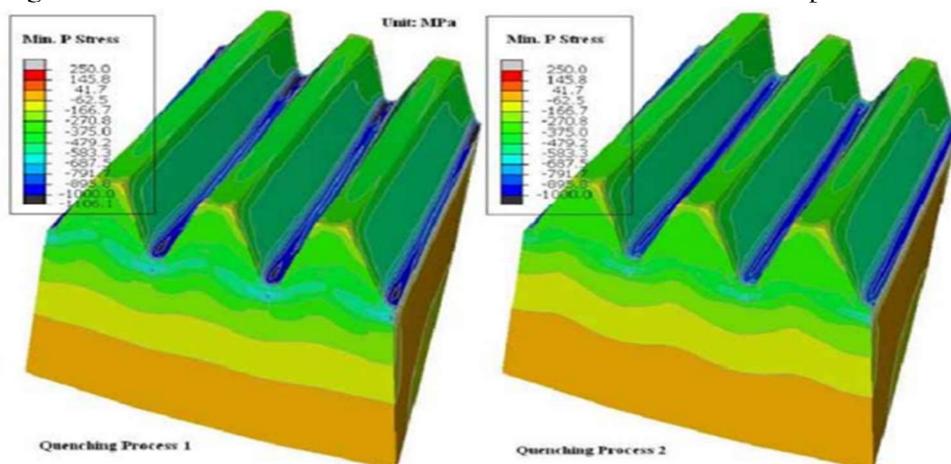
O processo de indução foi modelado usando o software DANTE seguindo a seguinte sequência:

- Aquecimento por 4,0s a média frequência
- Tempo de espera de 0,75s
- Aquecimento a alta frequência por 0,45s
- Têmpera por spray:
  - Em toda região exposta da peça
  - Apenas na região do dentado.

Após a modelagem do processo e análise do resultado, chegou-se ao seguinte resultado:

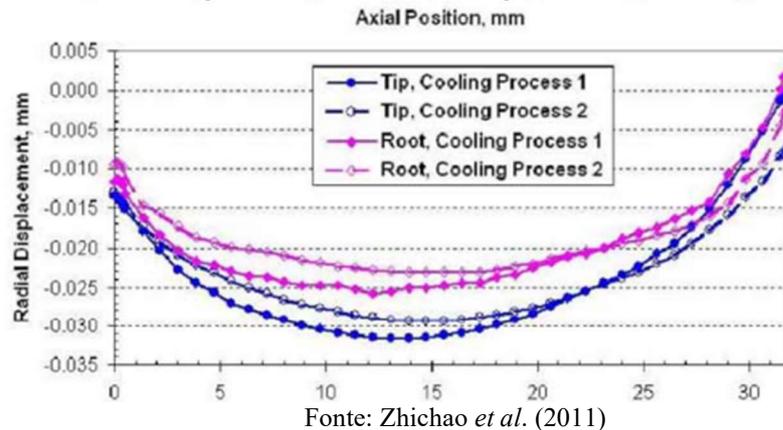
- Não foram observadas diferenças nos resultados entre os dois cenários de têmpera por spray;
- Tensão residual de compressão é observada na raiz do dente bem como uma retração na direção radial;
- O contorno do dente contração radial e apresentou um formato “ampulheta” devido à transformação da camada cementada.

Figura 6 – Tensão residual no dentado em ambos os cenários de têmpera



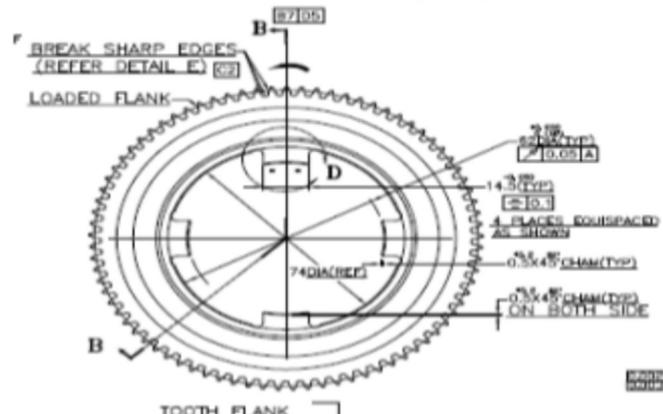
Fonte: Zhichao *et al.* (2011)

Figura 7 – Distorção ao longo do dente



Com base nesses resultados, uma compensação no perfil do dentado pode ser feita previamente para compensar essa distorção, garantindo que o produto permaneça dentro do especificado. George *et al.* (2014) analisaram o efeito das distorções na circularidade em engrenagens com grandes diâmetros e esbeltas destinadas aplicadas em helicópteros.

Figura 8 – Peça de estudo (engrenagem)



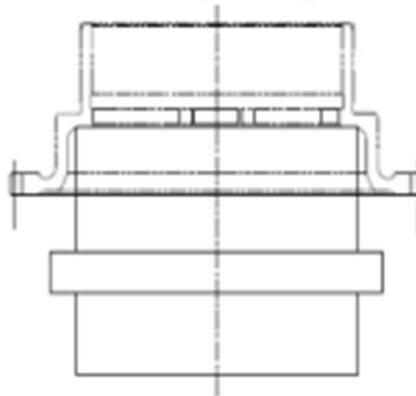
Fonte: George *et al.* (2014)

Seu estudo se baseia na influência do tipo de fixação do produto durante a têmpera, avaliando o tipo de rejeição no processo de tratamento térmico. As avaliações realizadas indicam que o tipo de suporte durante o tratamento térmico impacta na distorção devido ao empeno da peça. Dois dispositivos foram confeccionados, um para o processo de cementação e outro para o processo de têmpera.

O estudo para o projeto dos componentes envolve as seguintes etapas:

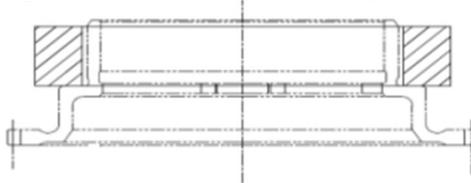
- Estudo do componente: Nessa etapa é avaliada a geometria e peso do componente, bem como são definidas as regiões de apoio com base nas dimensões críticas do produto (regiões que são mais afetadas e que necessitem de operações posteriores para compensar as distorções ou que necessitem de “correções” prévias no produto antes de serem tratadas). O componente também deve ser projetado de tal forma que previna distorções no produto como, por exemplo, prevenir que o material contraia e também que forneça o apoio apropriado para evitar empenos;
- Seleção do material do dispositivo: o material adequado deve ser selecionado evitando que se deforme durante o tratamento térmico e comprometa a forma final do produto.

Figura 9 – Geometria do dispositivo para cementação.



Fonte: George *et al.* (2014)

Figura 10 - Geometria para têmpera



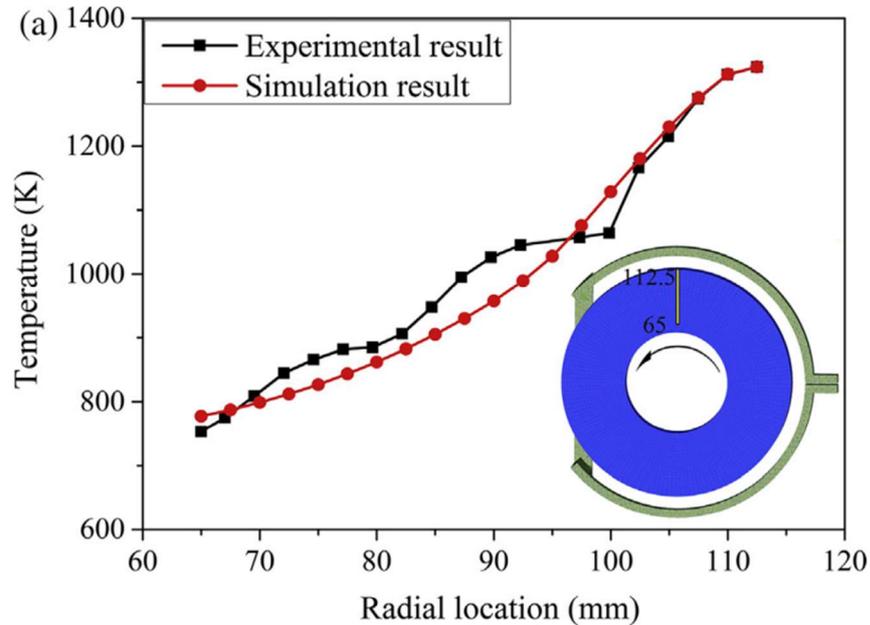
Fonte: George *et al.* (2014)

O estudo resultou no desenvolvimento de um sistema de fixação que reduz a circularidade desse componente durante a têmpera.

Fu *et al.* (2017) simularam o processo de aquecimento indutivo em engrenagens fabricadas pelo processo de “gear rolling”. O estudo visa a avaliação da influência da densidade de corrente e frequência na eficiência do aquecimento e distribuição de temperatura. Os resultados obtidos foram então comparados com resultados experimentais.

Para o estudo, dois tipos de indutores foram analisados, LMF e TMF. Para as simulações, o software DEFORM foi utilizado. O comparativo entre as simulações e os resultados experimentais podem ser vistos abaixo.

Figura 11 – Comparativo entre temperaturas simuladas e experimentais.



Fonte: Tong *et al.* (2018)

A diferença entre as temperaturas simuladas e experimentais foi de 8,1%. Para temperaturas abaixo de 1003K (ponto de Curie), o erro entre valores é de 32,9%. Considerando que o tempo de aquecimento da peça é curto, a influência do erro abaixo de 1003K na distribuição de temperatura é baixo. Com isso, os resultados da simulação foram considerados confiáveis e o modelo validado.

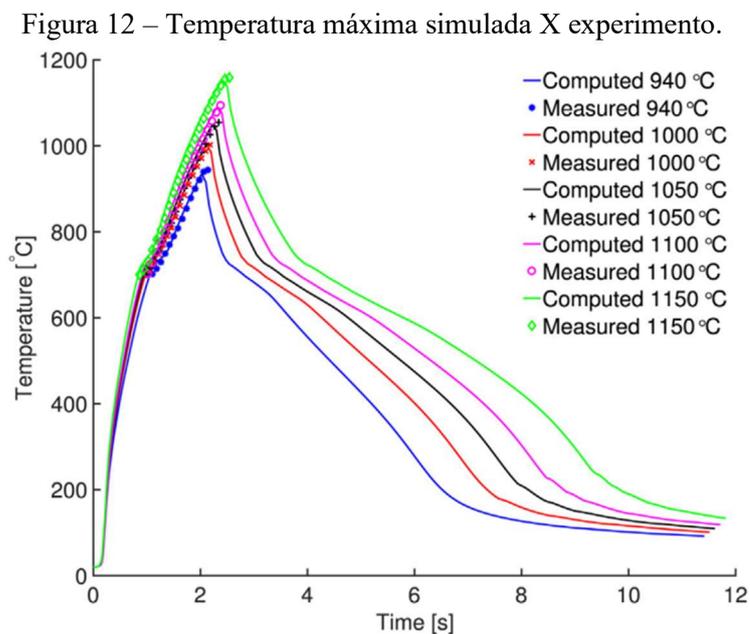
Fisk *et al.* (2018) modelaram um processo de têmpera por indução utilizando o software MSC Marc e compararam com resultado experimental. Para os experimentos, foram usadas 15 amostras, cilindros com 100 mm de comprimentos e 40 mm de diâmetro de aço AISI 4150, usando 03 (três) taxas de aquecimentos e cinco picos de temperaturas. As peças foram temperadas utilizando água com 8% de um polímero comercial (Aqua-Quench 365).

Tabela 2 – Resumo dos testes realizados

Teste número	Frequência [kHz]	Potência [kW]	Tempo de Aquecimento [s]	Máx. Temperatura °C	Taxa de aquecimento [K/s]
1	3.3–3.6	150–165	21	944	226
2	3.3–3.7	164–180	22	1006	243
3	3.3–3.7	171–186	23	1055	257
4	3.3–3.8	176–192	24	1097	276
5	3.3–3.8	190–208	25	1159	270
6	3.3–3.6	99–109	33	943	152
7	3.3–3.7	109–121	35	1010	155
8	3.3–3.7	114–126	36	1050	162
9	3.3–3.8	120–132	38	1103	163
10	3.3–3.9	127–140	40	1153	164
11	3.0–3.6	41–47	95	941	55
12	3.0–3.7	49–55	100	998	51
13	3.0–3.9	56–64	105	1050	50
14	3.1–3.9	65–73	110	1113	51
15	3.1–3.9	69–77	115	1159	52

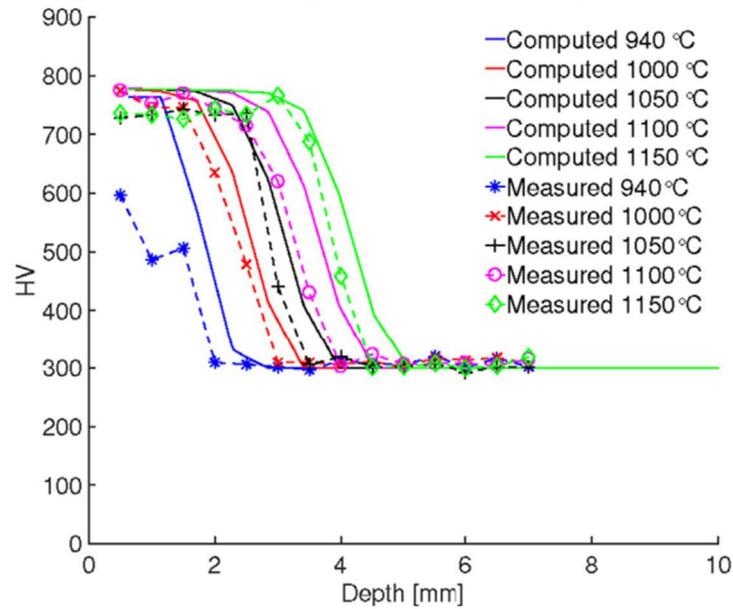
Fonte: Adaptado de Fisk *et al.* (2018)

Nos experimentos foram medidas, além da temperatura, a dureza superficial na região temperada e a estrutura metalográfica. Os resultados foram então comparados com as simulações. O comparativo entre resultados é mostrado abaixo, a uma taxa de resfriamento de 260K/s.



Fonte: Fisk *et al.* (2018)

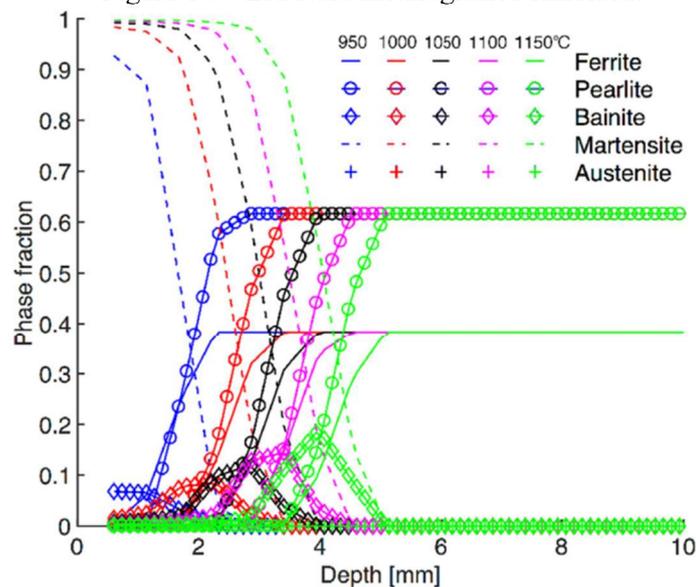
Figura 13 - Dureza superficial simulada X experimento.



Fonte: Fisk *et al.* (2018)

Para a estrutura metalográfica, a fração da estrutura resultante na região é simulada e comparada com resultados metalográficos obtidos através de microscópio. O comparativo entre resultados numéricos e experimentais é difícil uma vez que o resultado experimental está sujeito a interpretação de quem está avaliando a foto da metalografia.

Figura 14 – Estrutura metalográfica simulada.

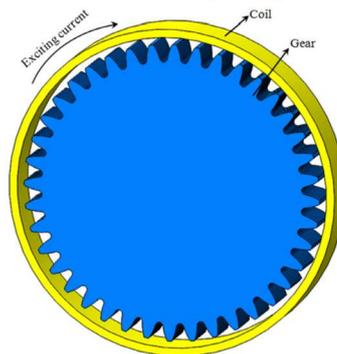


Fonte: Fisk *et al.* (2018)

Os resultados simulados apresentam uma boa aproximação com os resultados experimentais indicando que o modelo desenvolvido é válido para prever a temperatura e a dureza atingida pelo componente na têmpera por indução. Tong *et al.* (2018) modelaram um sistema de aquecimento por indução de uma engrenagem de dentes retos e sua têmpera, avaliando a fração da microestrutura resultante, a tensão residual e a indicação de possíveis trincas na região temperada. O material da engrenagem utilizado foi o 42CrMo. Para o estudo foram modelados a engrenagem e o indutor.

A estratégia utilizada para a simulação consiste em acoplar uma análise eletromagnética, que irá calcular o aquecimento através de indução eletromagnética, com um modelo de análise térmica, para a parte do resfriamento, um módulo de transformação de fase e por fim uma análise mecânica para a avaliação de tensões residuais a indicação de locais onde possa ocorrer trincas.

Figura 15 – Modelo 3D da engrenagem e indutor



Fonte: Tong *et al.* (2018)

O ciclo de aquecimento utilizado consiste em aquecimento a média frequência por 1,8s seguido aquecimento a alta frequência por 0,35s. Entre a mudança de média para alta frequência, existe um tempo de espera de 0,2s. Após o aquecimento e tempo de espera de 0,5s, a engrenagem é resfriada por 30s com uma mistura de água e polímero.

Após as simulações, as seguintes conclusões foram tomadas:

- Durante o aquecimento a média frequência, a máxima temperatura passa do topo do dente para a raiz do dente. O topo do dente austenitiza durante o aquecimento. Uma região uniforme induzida é obtida após a têmpera;

- O valor máximo de tensão é obtido no início da formação da martensita, possibilitando o surgimento de trinca;
- A raiz do dente possui em tensão compressiva ao fim do processo de têmpera. O valor da tensão de contato durante o engrenamento é menor do que o valor da tensão residual o que leva a um retardo no início do aparecimento da trinca e sua propagação.

Hajék *et al.* (2019) avaliaram os efeitos dos parâmetros de processo de têmpera por indução como temperatura da água, concentração do polímero na água durante a têmpera e a rotação na distorção de um cilindro, executando testes variando tais parâmetros.

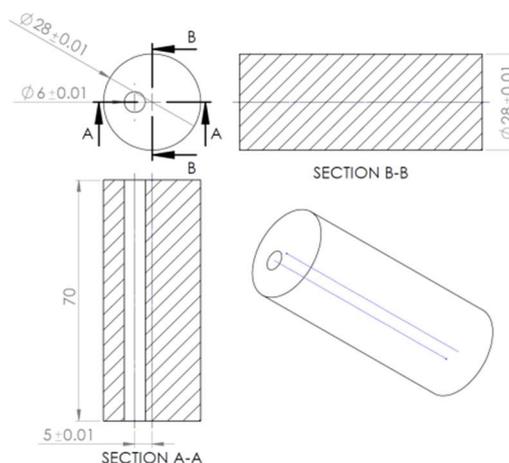
Tabela 3 - Lista com as variações dos parâmetros utilizados nos testes.

Testes	1,2,3	4,5, 6	7, 8, 9	10, 11,12	13, 14,15	16, 17,18	19, 20,21	22, 23,24
<b>Concentração do polímero</b>	[-]	4,2	8,2	12,5	-	-	-	-
<b>Temperatura da água</b>	[°C]	24	24	24	20	35	55	20
<b>Rotação</b>	[rev·s-1]	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	6

Fonte: Hajék *et al.* (2019)

Os testes foram realizados em uma barra de aço EN C35E. Essa liga é um aço de médio carbono utilizado em aplicações com carregamento moderado em peças usinadas. O material utilizado estava normalizado. A dureza superficial do material pode atingir os valores de 50-56 HRC para diâmetros abaixo de 40 mm e valores entre 47-53 HRC para diâmetros superiores a 40 mm.

Figura 16 – Peça cilíndrica - Geometria do material - utilizada nos experimentos



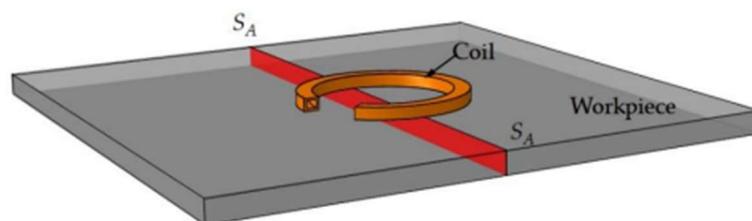
Fonte: Hajék *et al.* (2019)

Após os testes foram medidas a dureza e as distorções na geometria da barra (diâmetro). As conclusões observadas foram as seguintes:

- A profundidade da região endurecida será maior nas regiões de menor massa;
- A dureza varia longitudinalmente e depende da temperatura de indução e intensidade do resfriamento;
- Têmpera com polímero gera um formato de “ampulheta” (menor no centro do que nas extremidades) na barra;
- Têmpera com água gera um formato de “barril” (maior no centro do que nas extremidades) na barra;
- Têmpera com polímero gera uma distorção mais uniforme no diâmetro externo da barra;
- A distorção no furo da barra não é uniforme ao longo do seu eixo;
- Diâmetro do furo da barra diminui independentemente do meio utilizado para têmpera;
- O furo da barra tende a se aproximar do centro da barra com a têmpera por indução.

Dong *et al.* (2019) propuseram uma forma de calcular o fluxo de calor que atua em uma chapa de aço baixo carbono durante o processo de aquecimento por indução com um indutor circular usado no processo de conformação de chapas para a indústria naval através de uma função Gaussiana que tem o objetivo de reduzir o esforço computacional no cálculo da temperatura de aquecimento.

Figura 17 – Representação de aquecimento de uma chapa com indutor circular



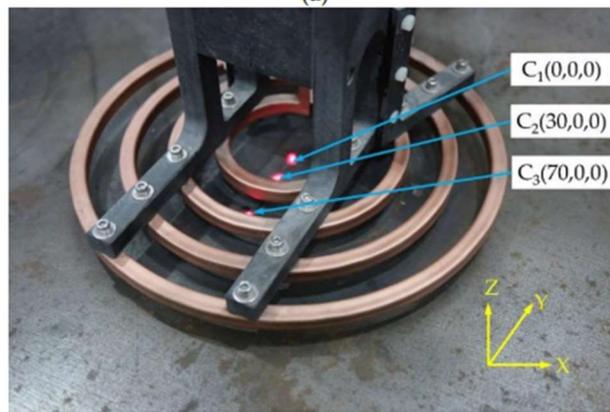
Fonte: Dong *et al.* (2019)

No artigo apresentado é descrita uma equação de fluxo de calor é descrita, através de simplificações nas equações que descrevem o fenômeno de indução eletromagnética.

$$q(r) = \frac{Q}{(2\pi\sqrt{2\pi}R_0r_H)} * e^{-\left(\frac{r-R_0}{r_H}\right)^2} \quad (1)$$

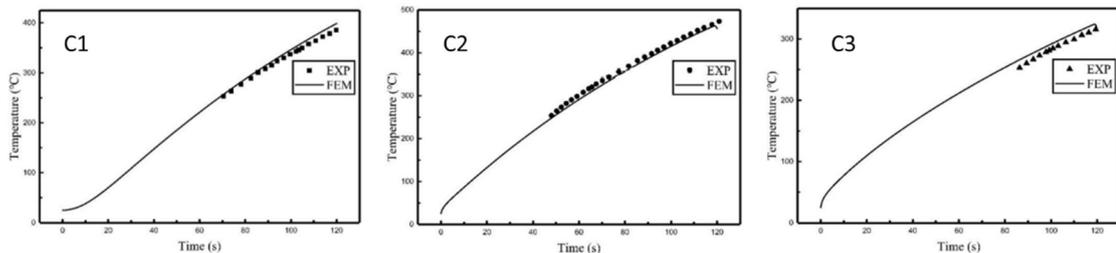
As medições das temperaturas são feitas em três posições. Os resultados dos experimentos são comparados com modelo em elementos finitos.

Figura 18 - Indicação das posições das medições



Fonte: Dong *et al.* (2019)

Figura 19 – Comparativo entre temperaturas obtidas em experimento X elementos finitos



Fonte: Dong *et al.* (2019)

Como resultado, o modelo proposto através da equação descrita acima pode ser utilizado, reduzindo o esforço computacional sem perda da precisão nos resultados.

Patel *et al.* (2019) propuseram três cenários de geometrias de engrenagens de transmissão automotiva com o objetivo de obter uma geometria mais leve. O objetivo do trabalho é reduzir o peso dos componentes, retirando regiões que possuem baixo valor de tensão, aumentando o desempenho da transmissão e vida dos rolamentos, uma vez que as cargas atuantes nesses componentes diminuem com a diminuição de peso das engrenagens.

Inicialmente, as engrenagens são modeladas no Solidworks. As dimensões dos componentes estão conforme uma transmissão comercial.

Figura 20 – Engrenagem 1

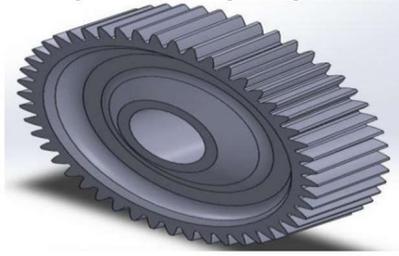
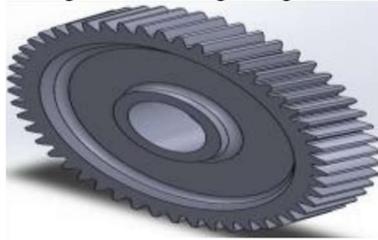
Fonte: Patel *et al.* (2019)

Figura 21 – Engrenagem 2

Fonte: Patel *et al.* (2019)

Para os modelos é usada uma malha tetraédrica é usada e as condições de carregamento são aplicadas. Para a engrenagem, uma força tangencial é aplicada resultante de um torque de 9 N.m. As tensões observadas no modelo estão abaixo do limite permitido de 555 MPa.

Com base no modelo, três propostas de design são testadas.

Figura 22 – Proposta de otimização 1

Fonte: Patel *et al.* (2019)

Figura 23 – Proposta de otimização 2



Fonte: Patel *et al.* (2019)

Figura 24 – Proposta de otimização 3



Fonte: Patel *et al.* (2019)

Um resumo dos resultados é mostrado abaixo. Como pode ser observado, nos 3 (três) cenários, a tensão ficou abaixo do limite estabelecido.

Tabela 4 – Resumo das simulações

Produto	Proposta	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
<b>Engrenagem 1</b>	1	23,901	0,0029855
	2	24,544	0,003144
	3	24,185	0,0035727
<b>Engrenagem 2</b>	1	49,174	0,0059599
	2	48,533	0,0060693
	3	52,79	0,008038

Fonte: Adaptado de Patel *et al.* (2019)

O cenário 01 foi fabricado para ser testado, o comparativo de peso entre componentes é mostrado abaixo. Testes na performance da transmissão com os novos componentes não foram descritos no trabalho.

Tabela 5 – Comparativo do peso das engrenagens.

<b>Produto</b>	<b>Peso original (Kg)</b>	<b>Novo peso (Kg)</b>	<b>Redução (%)</b>
<b>Engrenagem 1</b>	0,76	0,72	5,2
<b>Engrenagem 2</b>	0,16	0,14	12,5

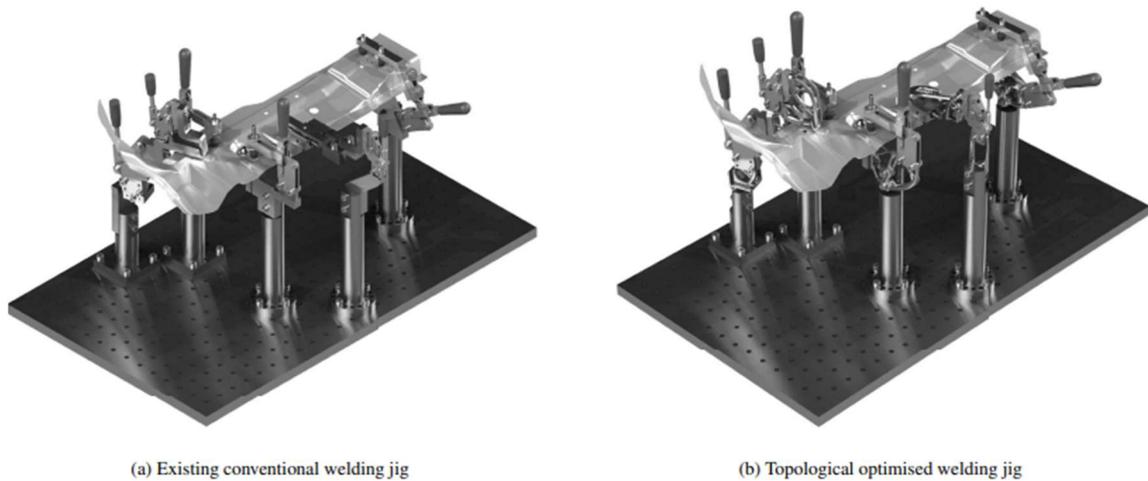
Fonte: adaptado de Patel *et al.* (2019)

Günther *et al.* (2020) aplicaram ferramentas de otimização topológica para redesenhar um sistema de fixação para processo de soldagem em uma indústria automotiva. O objetivo do estudo é reduzir a quantidade de componentes que compõe o dispositivo bem como reduzir seu peso e custo de fabricação utilizando manufatura aditiva para fabricação do novo projeto. Os dispositivos avaliados seguem os seguintes princípios de projeto:

- Princípio da localização: os dispositivos de fixação para soldagem devem restringir a movimentação das peças (graus de liberdade)
- Facilidade no manuseio: à medida que os componentes são soldados, o peso e tamanho do conjunto aumentam. Os dispositivos projetados devem ser capazes de carregar e descarregar os componentes da forma mais conveniente possível
- Ajustável: devido aos ciclos de carga e descarga de componentes, os dispositivos devem ser ajustáveis para compensar desgastes e variações de tolerância dos componentes que serão soldados.

Um modelo 3D foi elaborado no software Solidworks. O material usado na avaliação foi o aço inoxidável 316L. As condições de carregamento foram colocadas com base nos dados disponibilizados bem como a localização das restrições e conexões entre os elementos. Após a execução da ferramenta de otimização, uma nova geometria do dispositivo é gerada.

Figura 25 – Comparativo entre projetos. Modelo tradicional (esq.) X otimizado (dir.)



Fonte: Günther *et al.* (2020)

O resumo dos ganhos obtidos é mostrado numa tabela onde se observa que houve uma redução na massa, volume, número de componentes e custo de fabricação do novo conjunto otimizado.

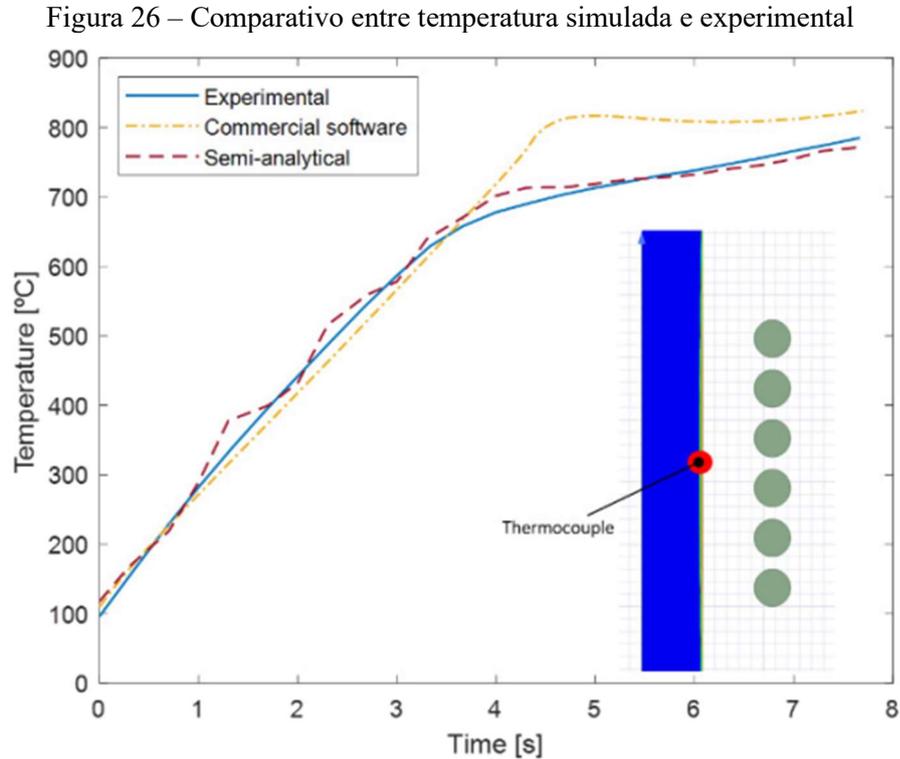
Tabela 6 – Resumo comparativo entre projetos. TM (projeto atual) versus TO LBPf (otimização topológica mais manufatura aditiva).

Característica	Atual	<b>Otimizado + Manufatura aditiva</b>
<b>Massa Total do dispositivo (kg)</b>	9,87	4,82
<b>Volume do dispositivo</b>	1265	602,8
<b>Número de componente</b>	21	12
<b>Custo de manufatura (€)</b>	1420,5	2244,89

Fonte: Adaptado de Günther *et al.* (2020)

Areitioaurtena *et al.* (2020) simulou o processo de têmpera por indução de um bilhet de 42CrMo4 com o objetivo de prever a profundidade da camada induzida e sua dureza. No estudo um modelo semianalítico é proposto com o objetivo de reduzir o esforço computacional na simulação.

Nessa metodologia, uma análise de elementos finitos é feita para calcular o campo eletromagnético. Esse resultado é exportado. Em seguida, equações analíticas são combinadas com um modelo de elementos finitos para a análise térmica com o objetivo de calcular o gradiente de temperatura.



Fonte: Areitioaurtena *et al.* (2020)

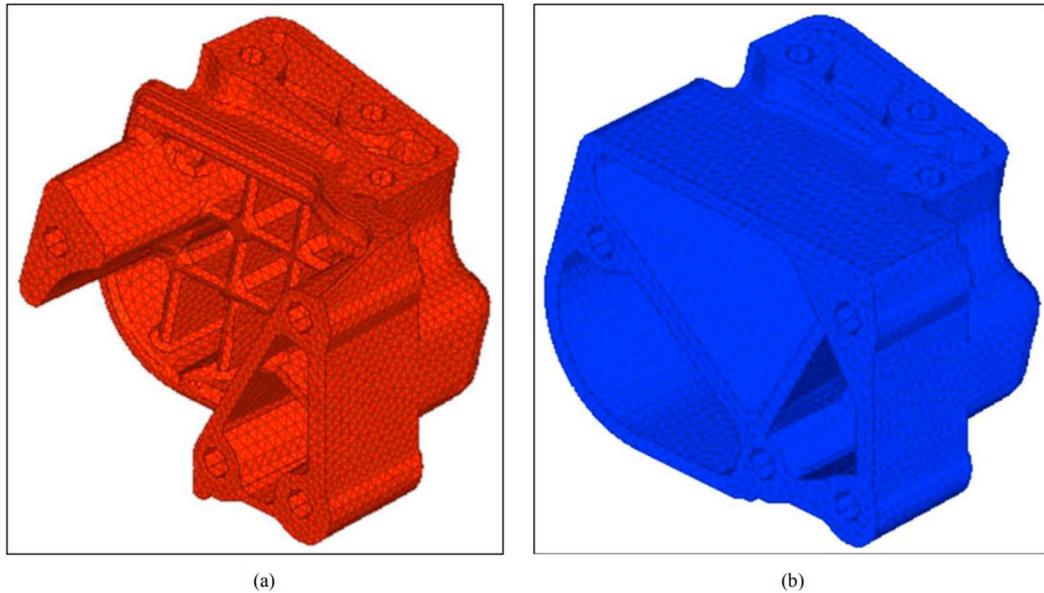
O resultado entre a temperatura simulada e experimental apresenta uma diferença de 3,2%, indicando uma boa correlação entre os valores. Para o tempo computacional, uma redução de 20% foi obtida com o modelo proposto, indicando que a metodologia tem potencial para uso em estudos mais extensos na indução eletromagnética. O modelo então foi considerado válido.

Armentani *et al.* (2020) utilizaram ferramentas de otimização topológica para redesenhar suportes de motores. O objetivo do trabalho é reduzir a transmissão das vibrações do motor para o chassi, aumentando o conforto dos passageiros. Para o estudo, foi criado um modelo 3D do suporte. Em seguida, as condições de contorno (carregamento, restrições) foram adicionadas e uma análise estrutural foi realizada. Com base nos resultados, a otimização topológica foi aplicada com base nas seguintes condições:

- Função: Maximização da primeira frequência natural de vibração
- Restrição: Manter 70% da área funcional do modelo.

O resultado da otimização pode ser visualizado abaixo.

Figura 27 – Suporte original (a) X suporte otimizado (b)



Fonte: Armentani *et al.* (2020)

Um comparativo entre as frequências natural e a massa de ambos os modelos pode ser visto abaixo.

Tabela 7 – Comparativo entre modelos

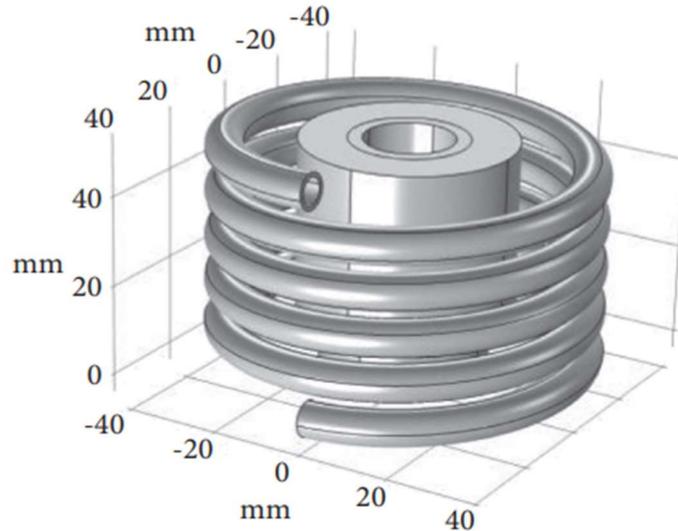
<b>Modelo</b>	<b>Peso</b>	<b>Primeira frequência natural</b>
<b>Pré Otimização</b>	1243g	1024 Hz
<b>Pós Otimização</b>	989 (-20%)	1122 Hz (+10%)

Fonte: Adaptado de Armentani *et al.* (2020)

O modelo se mostra promissor, mas é necessário validação através da construção e validação da nova geometria. Essa etapa não foi abordada no artigo. Min *et al.* (2021) modelaram através do software COMSOL o aquecimento por indução de um cadinho de grafite com diferentes valores de corrente e frequência do indutor. Com o valor da frequência,

uma relação entre a temperatura do cadinho e a corrente no indutor pode ser estabelecida o que é importante para definir a potência do equipamento.

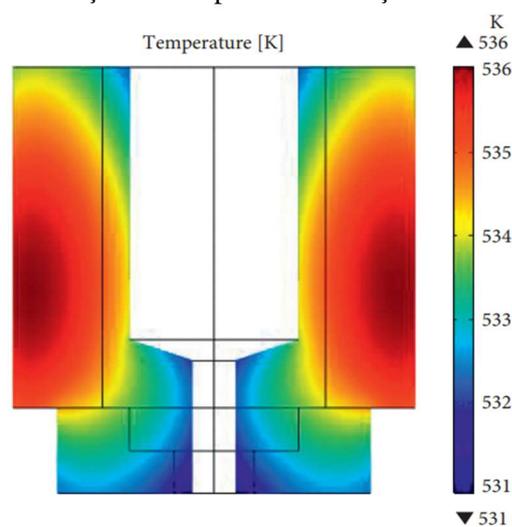
Figura 28 – Modelo 3D do sistema formado pelo cadinho e indutor.



Fonte: Min *et al.* (2021)

O fenômeno do efeito de superfície também foi estudado no cadinho para a definição da escolha da frequência para o sistema de aquecimento. A simulação mostra a temperatura no cadinho durante o aquecimento.

Figura 29 – Distribuição da temperatura na seção transversal do cadinho



Fonte: Min *et al.* (2021)

As temperaturas resultantes das da simulação foram comparadas com os resultados experimentais e apresentam uma boa relação.

Tabela 8 – Comparativo entre temperatura simulada e experimental

Corrente (A)	Temperatura do experimento (K)	Temperatura da simulação (K)	Diferença Absoluta (K)	Diferença relativa
<b>40,3</b>	343,9	338,6	-5.3	-1.5%
<b>59,8</b>	402,1	395,5	-6.6	-1.6%
<b>81,1</b>	497,4	475,1	-22.3	-4.5%
<b>99,7</b>	612,7	577,4	-35.3	-5.8%
<b>200,0</b>	1509,8	1431,4	-78.4	-5.2%

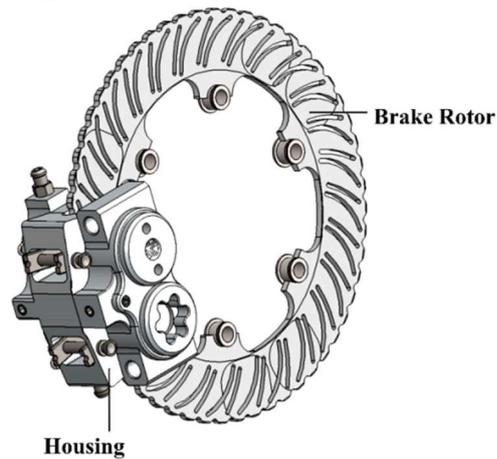
Fonte: Adaptado de Min *et al.* (2021)

Com base no experimento conclui-se que:

- O modelo reproduz o efeito de superfície onde o fluxo magnético é concentrado na superfície do cadinho e decresce em direção ao centro;
- A temperatura cresce exponencialmente com o aumento da corrente no indutor. A temperatura média do cadinho, devido ao efeito de superfície, pode ser considerada como a temperatura na região externa do cadinho;
- A diferença na temperatura entre as simulações e testes experimentais indicam que o modelo pode ser usado para prevê a temperatura no processo e ajudar na definição dos parâmetros de potência e frequência de equipamentos.

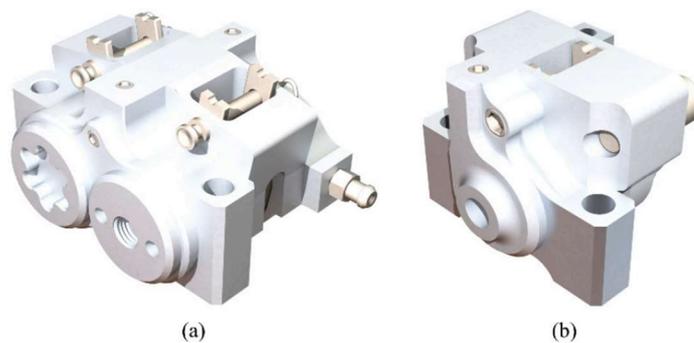
Tyflopoulos *et al.* (2021) utilizaram ferramentas de otimização topológica com o objetivo de reduzir o peso em pinças de freio destinada a aplicações automotivas. As peças foram otimizadas, parcialmente redesenhadas, validadas e impressas em titânio através de manufatura aditiva.

Figura 30 - Modelo do sistema de freio



Fonte: Tyflopoulos *et al.* (2021)

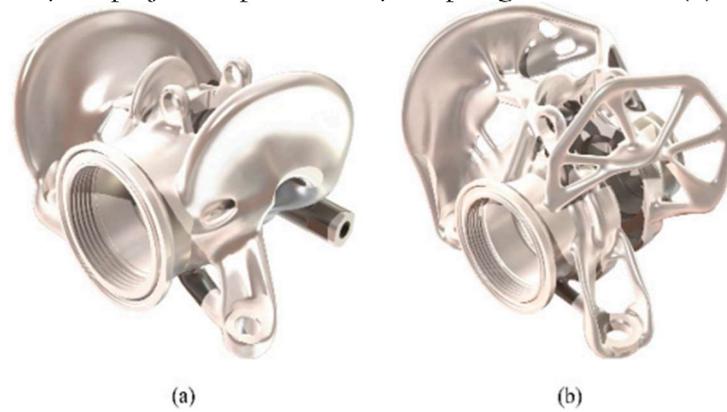
Figura 31 - Pinças de freio dianteiro (a) e traseiro (b)



Fonte: Tyflopoulos *et al.* (2021)

Utilizando o Ansys Discorvey software, os modelos foram otimizados utilizando condições de contorno obtidas a partir de testes experimentais. As geometrias obtidas foram exportadas para o Solidworks e parcialmente redesenhadas para serem fabricadas através de manufatura aditiva. As validações de tensões atuantes e deformações nos modelos foram feitas utilizando o software ABAQUS.

Figura 32 – Pinças reprojctadas por otimização topológica. Dianteiro (a) e traseiro (b)



Fonte: Tyflopoulos *et al.* (2021)

O resultado do redesign reduz o peso dos componentes em 42% a pinça dianteira e 64,7% para a pinça traseira. As deformações foram reduzidas em 50% para a pinça dianteira e 17,16% para a pinça traseira. Os componentes foram impressos mais não foram testados, mas em teoria, ultrapassam os componentes utilizados como base para o estudo

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O trabalho envolve conhecimentos de tratamento térmico, têmpera de aço, que é a mudança de sua estrutura visando o aumento de resistência ao desgaste, eletromagnetismo, que é o aquecimento por indução da peça possibilitando que aconteça a têmpera e otimização topológica, usada para reprojeter os dispositivos de fabricação da coroa. A seguir é realizada uma revisão na teoria que envolvem os tópicos mencionados acima.

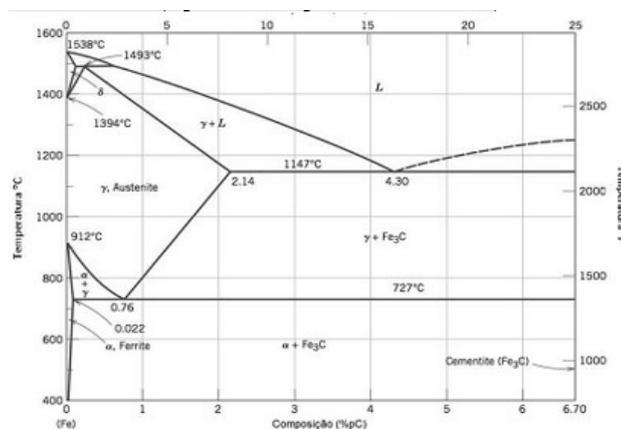
#### 3.1 TÊMPERA

A têmpera é um processo de tratamento térmico que tem como objetivo alterar as propriedades mecânicas de um liga ferrosa. O processo consiste basicamente das seguintes etapas (COLPAERT, 2008):

- a) Aquecimento até a temperatura adequada para obter uma microestrutura austenítica.
- b) Manutenção da peça neste patamar de temperatura por um tempo adequado.
- c) Resfriamento em um meio que resulte em velocidade apropriada para obter a formação da martensita.

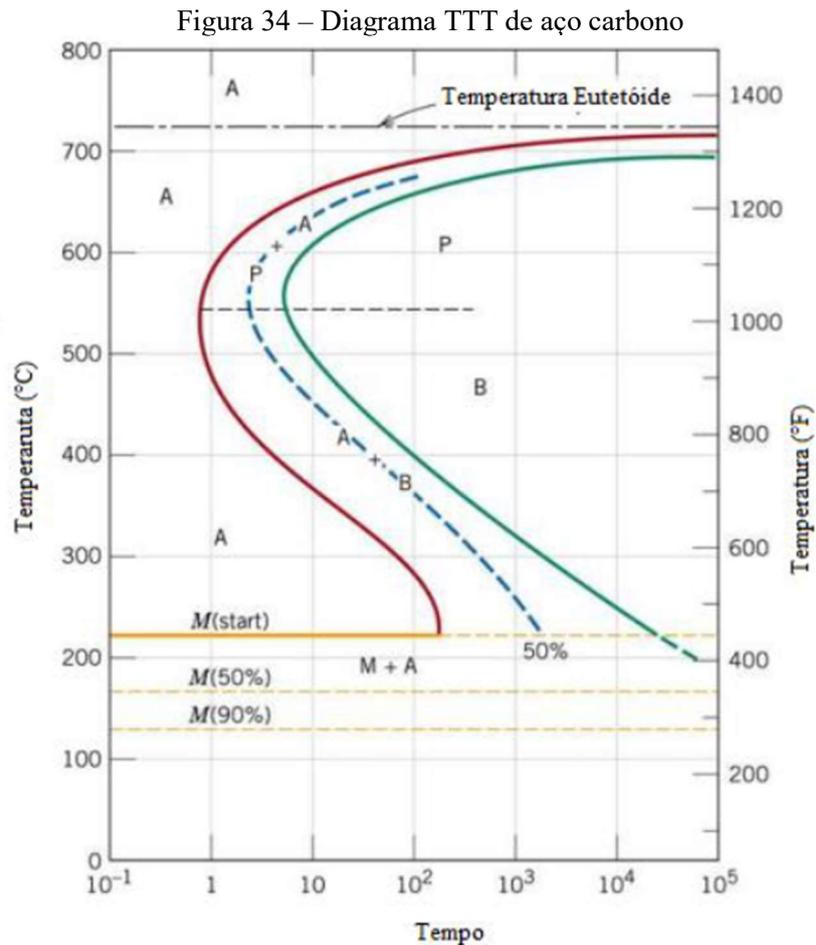
Na têmpera, o resultado esperado ao fim do processo é que a região que foi aquecida e resfriada a uma velocidade adequada, seja composta de martensita. A temperatura, à qual o material deve ser submetido para atingir a austenitização pode ser determinada pelo diagrama ferro carbono. A temperatura deve ser tal que esteja dentro da região da fase  $\gamma$  (austenita).

Figura 33 – Diagrama Ferro-Carbono



Fonte: Callister JR. (2002)

A taxa de resfriamento pode ser definida consultando o diagrama TTT do material. Para que a Martensita seja obtida, o material deve passar do campo austenítico (A) para o campo martensítico (Mt) em um determinado tempo de tal forma que, caso uma linha seja traçada entre os pontos final e inicial, ela não deve cruzar a região austenita + ferrita (A+F). A razão entre a diferença de temperatura e o tempo decorrido será a taxa de resfriamento. No caso do sistema métrico, graus celsius por segundo ( $^{\circ}\text{C/s}$ ).



Fonte: Adaptado de Callister (2006)

O meio de resfriamento utilizado, para que se atinja uma taxa alta o suficiente para que se obtenha a martensita, é geralmente um meio líquido. Os meios mais comuns são o óleo mineral ou água. A água por sua vez pode ter aditivos, como por exemplo, polímeros solúveis à base de PAG (polialquilenoglicol).

A estrutura martensítica possui uma dureza elevada, que aumenta sua resistência ao desgaste. Porém, apresenta uma ductilidade muito baixa, quase que desprezível, tornando-a muito frágil e com baixa resistência ao impacto, inviabilizando sua aplicação na maioria dos casos.

Uma forma de contornar essa baixa resistência ao impacto é realizar um tratamento térmico de revenimento após a têmpera, obtendo uma estrutura conhecida por martensita revenida. As temperaturas de revenimento ficam em torno de 250 a 650°C. O resultado é uma estrutura com dureza ainda elevada, mas com uma tenacidade substancialmente maior do que a martensita.

A austenita possui uma densidade maior do que a martensita. Durante a têmpera, ocorre um aumento de volume, gerando tensões internas. Essas tensões geram distorções (deformações) no produto que, dependendo da geometria e percentual de carbono, podem ocasionar trincas. O controle dos parâmetros da tempera, possuem uma forte influência no resultado.

### 3.2 TÊMPERA POR INDUÇÃO

No processo de têmpera por indução, o aquecimento é obtido através de um fenômeno eletromagnético. Um componente chamado indutor, irá produzir um campo eletromagnético alternado devido à aplicação de uma corrente alternada. A peça que deverá ser aquecida entrará em contato com esse campo magnético que por sua vez irá gerar uma corrente alternada na peça, chamada de corrente parasita. Essa corrente variável no tempo irá aquecer a peça devido ao efeito Joule. O processo de indução eletromagnética pode ser descrito através das equações de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5)$$

Onde  $\vec{H}$  é a intensidade do campo magnético,  $\vec{J}$  é a densidade de corrente elétrica conduzida,  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  é a densidade de corrente,  $t$  representa o tempo,  $\vec{E}$  é o campo elétrico,  $\vec{B}$  é o campo magnético,  $\vec{D}$  é a densidade do fluxo elétrico e  $\rho$  é a densidade volumétrica de carga.

As grandezas  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{J}$  podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

Onde  $\epsilon$  representa a constante dielétrica,  $\mu$  é a permeabilidade magnética e  $\sigma$  é a condutividade elétrica. A geração de calor,  $q$ , pode ser obtida através da lei de Joule:

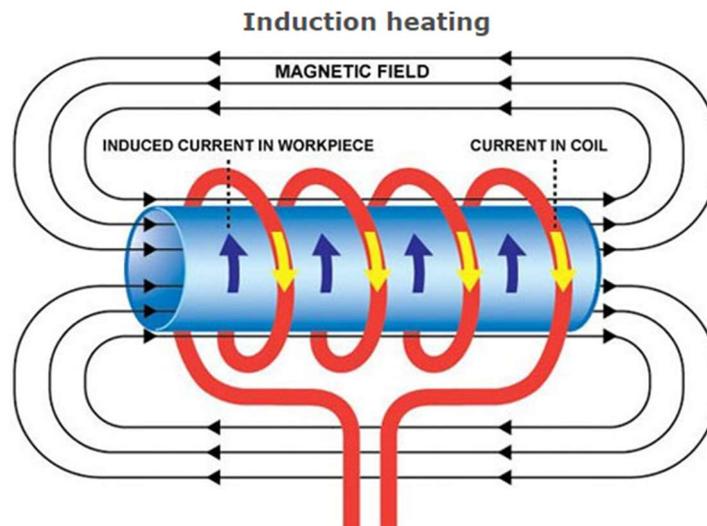
$$q = \frac{|\vec{J}|^2}{\sigma} \quad (9)$$

A distribuição de temperatura pode ser obtida resolvendo a equação:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{q} \quad (10)$$

Onde  $c$  é o calor específico,  $k$  é a difusividade térmica e  $\dot{q}$  é a taxa de geração de calor interna.

Figura 35 – Esquema mostrando aquecimento por indução.



Fonte: Site Duolin Induction Heating Machine<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Disponível em: <[https://www.duolin.com/induction\\_heating/](https://www.duolin.com/induction_heating/)>. Acesso em: 03 jan.2022.

Diferente do aquecimento em forno, que acontece devido à convecção e à radiação que aquecerão toda a peça, na têmpera por indução o aquecimento pode ser controlado em determinada região. Além disso, devido ao efeito superficial (*skin effect*), o aquecimento se dá apenas próximo à superfície da peça. Tal fenômeno acontece devido à densidade de corrente ser maior na superfície, que diminui à medida que penetra no material. A profundidade da penetração pode ser calculada pela seguinte equação, descrita por Zinn *et al.* (1988).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (11)$$

Onde  $\delta$  é a profundidade da penetração,  $f$  é a frequência da corrente alternada,  $\mu$  é a permeabilidade magnética e  $\sigma$  é a condutividade do material. Como podemos observar, a profundidade da penetração é inversamente proporcional à frequência. Ao dimensionar um equipamento de aquecimento por indução, deve-se considerar essa característica, visto que tais equipamentos operam numa determinada faixa de frequência. Esse fenômeno permite que o aquecimento seja localizado e a modificação das propriedades mecânicas ocorra apenas nas áreas de interesse.

Para coroas de transmissão, tal processo garante que apenas a região dos dentes obtenha uma dureza elevada, pois sofrerão desgaste durante seu funcionamento devido ao movimento relativo com a corrente de transmissão da motocicleta. As demais regiões da peça permanecem com a dureza da matéria-prima usada, uma vez que não estão sujeitas a desgaste durante seu funcionamento. A Figura 36 apresenta um exemplo de uma coroa tratada com têmpera por indução. A região mais escura indica o local onde foi realizada a têmpera.

Figura 36 – Coroa de transmissão de motocicleta tratada com têmpera por indução.



Fonte: O autor (2022)

### 3.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A otimização topológica é um método matemático utilizado para gerar a melhor geometria de um determinado componente sujeito a condições de contorno pré-estabelecidas.

A aplicação desse método envolve os seguintes fatores:

- Maximização de uma restrição (condição de contorno, como por exemplo, tensão);
- Minimização de uma variável como, por exemplo, peso do componente.

Esse tipo de solução é aplicado nos mais diversos ramos da engenharia. Uma das mais conhecidas é a otimização de estruturas sujeitas a carregamentos através da diminuição de seu peso e conseqüentemente, de seu custo devido a utilização de menos matéria prima. Setores como aeronáutica, automotiva, robótica, construção civil aplicam essa metodologia para obter componentes mais leves com o mesmo desempenho do componente “original”. Alguns exemplos são mostrados abaixo.

Figura 37 – Estrutura de uma motocicleta obtida por otimização topológica.



Fonte: Site da Digital Engineering<sup>3</sup>

No exemplo acima, um quadro de motocicleta foi redesenhado com o objetivo de reduzir sua massa e com isso melhora a performance do da moto, impactando diretamente no consumo de combustível. O novo design mantém a resistência do quadro original, garantindo a segurança durante o funcionamento da moto. Para garantir a performance, uma carenagem deve ser colocada pois as remoções de material no quadro aumentam o arrasto durante o funcionamento.

Figura 38 – Suporte de fixação redesenhado por otimização topológica.



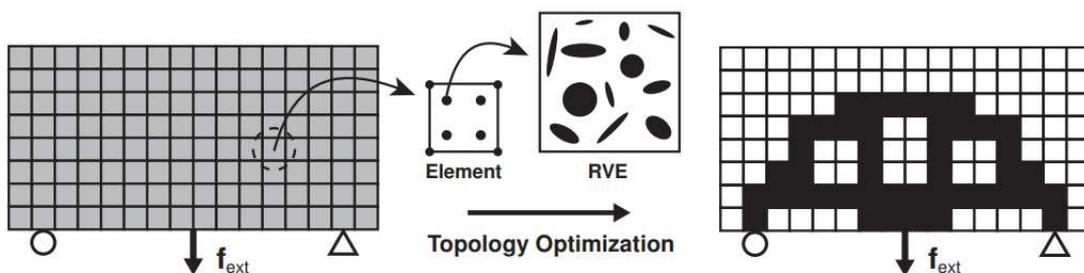
Fonte: Site da Engineering Product Design<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Disponível em: <<https://www.digitalengineering247.com/article/a-contemplation-on-topology-optimization/>>  
Acesso em: 02 jan. 2022.

No exemplo acima, um suporte foi reprojetoado com o objetivo de reduzir a massa do componente mantendo os requisitos de carregamento. O resultado é um componente mais leve e com o mesmo desempenho do componente original. Diferente da otimização paramétrica, na qual o objetivo é otimizar uma característica do produto, como, por exemplo, a quantidade de furos possíveis em um suporte para que a estrutura resista a um carregamento definido, na otimização topológica, toda a geometria (forma) pode ser alterada. Locais onde tinha material podem ser removidos e sua forma final é mais orgânica, que resulta em formas mais complexas. Essas geometrias, apesar de serem as mais adequadas à aplicação do componente, esbarram em limitações no processo de fabricação. Muitas das obtidas na otimização só são possíveis de manufaturar por fundição ou manufatura aditiva, o que limita a quantidade de materiais disponíveis.

Um exemplo comumente usado quando se apresenta essa metodologia é o de um bloco sujeito a um carregamento. Devido à localização dos apoios e carregamentos aplicados, a tensão nesse componente não é igual ao longo de toda sua extensão. Logo, regiões onde suas tensões atuantes são zero ou desprezíveis, condição essa definida previamente, podem ser removidas da geometria sem causar perda de desempenho do componente conforme podemos ver na Figura 39.

Figura 39 – Otimização topológica de uma estrutura sujeita carregamentos e apoios



Fonte: Xia (2016)

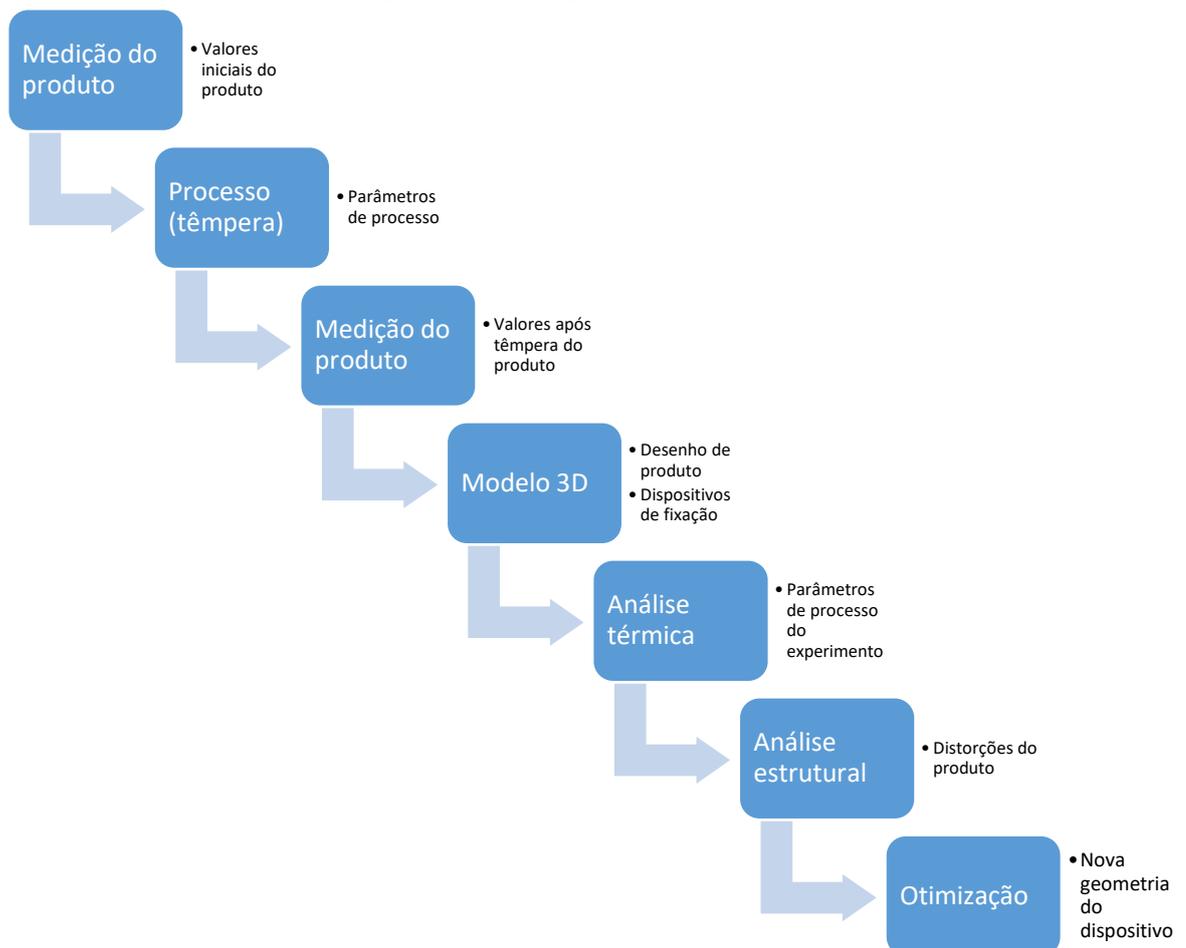
<sup>4</sup> Disponível em: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>. Acesso em: 02 jan. 2022.

No exemplo acima, um componente é sujeito a um carregamento e tem seus apoios (restrições) definidos. Através do uso de otimização topológica, deseja-se obter a melhor geometria que atenda aos critérios estabelecidos, que nesse caso é o de menor volume de material.

## 4 METODOLOGIA

Para o trabalho será estudado o processo de têmpera por indução de uma coroa de transmissão fabricada por uma multinacional fabricante de autopeças. A coroa é destinada para motocicletas. O fluxo de trabalho elaborado consiste em uma etapa de experimentos em peças correntes de produção, coleta de dados do experimento. Após é feita a simulação utilizando os mesmos parâmetros do experimento para validação do modelo. Em seguida, uma otimização topológica é realizada para verificar se o dispositivo de fixação do produto na máquina pode ser melhorado, como por exemplo, reduzindo o peso. O fluxograma descrito na Figura 40 mostram as etapas do trabalho.

Figura 40 - Fluxograma de trabalho

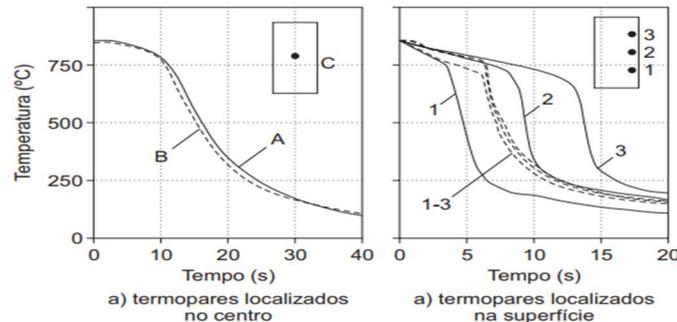


Fonte: O autor (2022)

No processo de indução, a coroa é colocada em uma base que é fixa em uma mesa rotatória. Ao iniciar o ciclo de tratamento a mesa gira, posicionando a peça abaixo do indutor. Uma tampa desce para impedir que a peça se movimente no sentido axial durante o processo, evitando acidentes e danos ao equipamento. Em seguida o indutor desloca-se verticalmente, ficando alinhado com a peça. Nesse momento, a peça começa a rotacionar e aquecer durante um tempo pré-determinado. Ao atingir o tempo de aquecimento, uma mistura de água e polímero é despejada na coroa, fazendo a têmpera do produto.

O meio de resfriamento utilizado na têmpera é uma mistura de água e polímero. A utilização do polímero serve para obtenção de taxas de resfriamento mais altas e um resfriamento mais uniforme ao longo da peça. A utilização dessa mistura gera menor gradiente térmico e de transformação, que por sua vez diminui a ocorrência de trincas e distorções na peça se comparado com o resfriamento em meio vaporizável. TENSI et al. (2003) compararam os gradientes de resfriamento de um cilindro em um meio composto com água e polímero versus um meio vaporável (óleo).

Figura 41- Gradientes de resfriamento em um meio composto por um fluido de resfriamento vaporizável (A) em comparação a um polímero PAG (B).



Fonte: Tensi *et al.* (2003)

Para garantir que as especificações do cliente sejam atendidas (região temperada e dureza), a frequência e potência precisam ser controlados. A temperatura na qual a peça será aquecida é consequência dos parâmetros frequência e potência usados no processo. Medições mostram que durante a indução a temperatura na coroa chega a 1000°C, conforme pode ser observado na medição com câmera termográfica FLIR T440, utilizando uma emissividade de 0,85. Essa temperatura é suficiente para garantir a transformação de fase e atender as especificações do produto.

Figura 42 – Medição de temperatura da coroa durante o aquecimento



Fonte: O autor (2022)

O ciclo de aquecimento e resfriamento provoca deformação no produto. Essa deformação associada com as variações dos processos anteriores (estamparia e usinagem) pode comprometer o atendimento ao dimensional do produto. Por isso, durante a etapa de desenvolvimento do novo produto, são realizados estudos de deformação.

Esses estudos consistem em medir as características que na visão da engenharia de produto, podem ser comprometidas na indução. As medições são feitas antes e após o processo de têmpera. Essa variação entre resultados é somada com as tolerâncias de fabricação dos processos anteriores e confrontada com a especificação do produto acabado. Caso o resultado dessa soma ultrapasse os limites da especificação final, restrições nos processos anteriores deverão ser feitas. Caso não seja possível, devido às limitações de processo, um processo de acabamento deverá ser realizado após a têmpera para garantir o atendimento ao desenho.

Nessa etapa, são medidas as deformações em doze (12) peças para a definição do fluxo de processo. A definição é baseada nos valores de máxima e mínima deformação.

Será feito o modelo 3D do conjunto peça e dispositivos em ferramenta CAD sendo esse modelo transferido para o software Ansys Mechanical, ferramenta de simulação amplamente utilizada para estudos de análise estrutural, transferência de calor e massa,

vibrações, eletromagnetismo, para simulação do aquecimento e resfriamento. A escolha do software é devido ao fato de em uma única ferramenta, poder combinar as análises de troca de calor juntamente com a análise estrutural e de otimização, utilizando os resultados das etapas anteriores como entrada para a análise seguinte. O objetivo é obter o mesmo valor de deformações que foram encontrados em testes experimentais. Após a validação desse modelo, análises serão feitas visando a otimização nos dispositivos de indução, gerando um design mais adequado ao produto.

O Equipamento usado para a têmpera de indução possui a especificação de 100 kW e 30 kHz. A alimentação das peças e sua retirada é feita de forma manual pelo operador de produção.

Figura 43 – Equipamento de têmpera por indução



Fonte: O autor (2022).

No equipamento, a peça é fixada numa base que impede o descolamento radial durante o processo. Um dispositivo, chamado de tampa, desce e impede que a peça se mova axialmente. Os projetos desses dispositivos seguem um padrão estabelecido pelo fabricante do equipamento. Contudo, devido à mudança da geometria de novos produtos, algumas modificações devem ser feitas na geometria dos dispositivos de fixação. Tais modificações impactam nas características do produto, pois os dispositivos podem interferir no aquecimento

da peça e impedir que a região definida para o aquecimento e conseqüentemente a têmpera seja atingida.

Durante as etapas de desenvolvimento de novos produtos podem ser feitas altera es na geometria, demandando testes em máquina e tempo para retrabalho em ferramentaria, aumentando os custos do produto.

#### 4.1 EXPERIMENTO

Para valida o do modelo virtual,   realizado um experimento em uma coroa atualmente em fabrica o. O produto tem suas dimensões medidas, diâmetro do furo, para serem comparadas com o modelo virtual que será desenvolvido nesse trabalho. O comparativo entre os resultados será feito para valida o.

##### 4.1.1 Produto

Para o início da valida o, foi escolhido um modelo de coroa de transmissão atualmente em produ o. Essa coroa   destinada ao de motocicletas de montadora presente no Brasil. As especifica es gerais do produto em questão são mostradas abaixo:

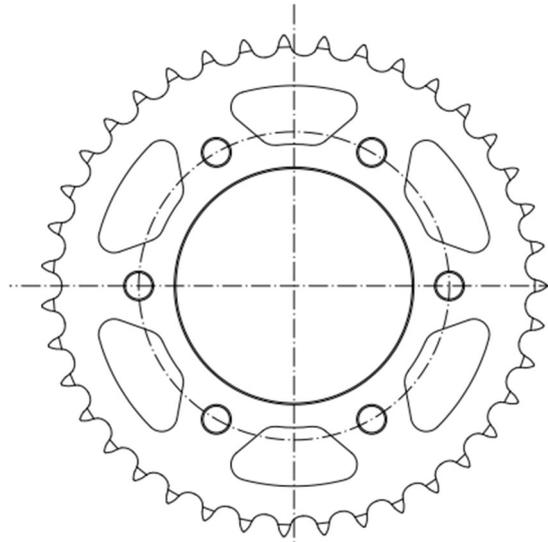
Tabela 9 - Dimensões principais da cora de transmissão do estudo

<b>Material</b>	<b>SAE 1045</b>
<b>Diâmetro externo</b>	163 mm
<b>Diâmetro Interno</b>	76 mm
<b>Espessura</b>	7,2 mm
<b>Número de Dentes</b>	39
<b>Corrente</b>	428

Fonte: O Autor (2022)

Por se tratar de um projeto de propriedade de uma montadora, as demais especifica es e tolerâncias serão omitidas. Um esquema geral da peça   mostrado abaixo:

Figura 44 – Visão geral da coroa de transmissão estudada



Fonte: O autor (2022)

#### 4.1.2 Processo de Têmpera por Indução

O processo de têmpera por indução inicia com a alimentação da peça no equipamento pelo operador. O equipamento é dotado de uma mesa giratória com 04 estações. O equipamento em questão é exclusivo para a realização da têmpera por indução de coroas de aço carbono. O equipamento possui 125 kW de potência e 30 Hz de frequência. Os indutores são fabricados pelo fornecedor do equipamento enquanto os dispositivos são de fabricação interna, sendo projetados pelo setor de engenharia e fabricado na ferramentaria da planta.

Figura 45 – Estações do processo de têmpera por indução



Fonte: O autor (2022)

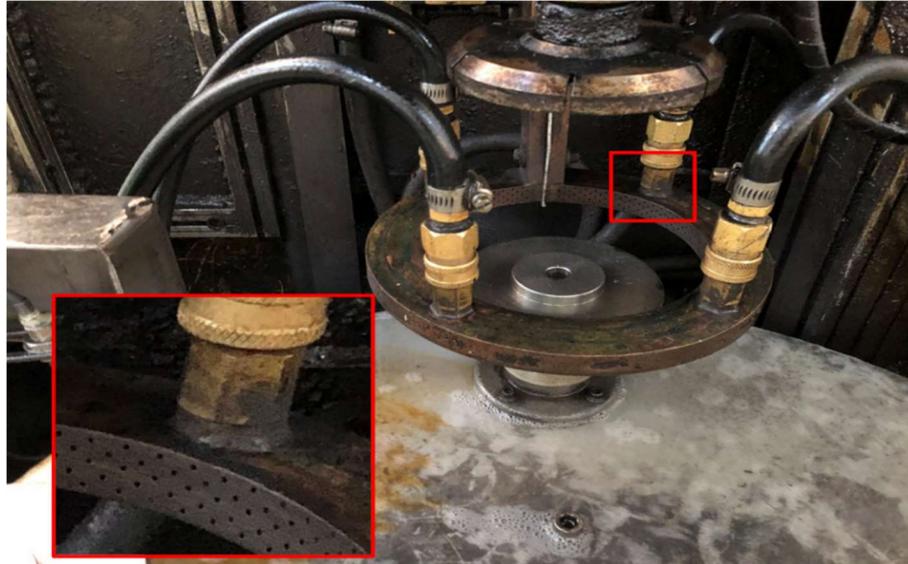
A primeira estação serve como carga e descarga do equipamento. Ao colocar a peça na primeira estação, o equipamento gira a mesa no sentido horário para uma posição de espera intermediária. Ao efetuar um novo giro, a estação posiciona a peça para o aquecimento. Nesse momento, a tampa desce e encosta na peça. Em seguida, o indutor desce e se posiciona alinhado com centro da peça, tal alinhamento é necessário para evitar que uma face da coroa aqueça de forma diferente da outra face, gerando diferença de espessura da região temperada.

Na sequência a peça começa a rotacionar, numa velocidade estabelecida em processo, para garantir um aquecimento homogêneo, e aquecer. Passado o tempo de aquecimento, a solução de água mais polímero é lançada na peça para realizar a têmpera. O polímero utilizado é o YUSHIRO QUENCHANT HSC a 8%. Essa água chega ao indutor através de conexões na face do componente e percorre seu interior sendo jogada diretamente na peça por furos distribuídos radialmente. Nessa etapa, a peça encontra-se temperada, mas ainda possui uma temperatura que impede o manuseio do operador. Com isso, na próxima estação que antecede a descarga, a peça passa por um sistema de ducha para resfriar o produto abaixo dos 30°C.

Esse resfriamento ocorre em uma estação diferente da têmpera apenas para não aumentar o tempo de ciclo da operação pois no momento que ela está resfriando, uma

próxima peça está sendo temperada. O resfriamento é necessário pois envolve manuseio do operador que retira a peça e segue para o próximo processo de fabricação.

Figura 36 – Detalhe do sistema de têmpera pelo indutor



Fonte: O autor (2022)

Para avaliação das distorções decorrentes do processo de têmpera, foram recolhidas cinco peças antes de serem induzidas. A característica avaliada foi o diâmetro do furo central da peça. As medições foram feitas usando uma máquina de medições por coordenadas MITUTOYO CRYSTA APEX S. O método de avaliação é através da medição de 20 pontos e calculado o diâmetro médio.

Os valores obtidos na medição para o diâmetro do furo foram plotados em um gráfico, que além dos valores medidos representa também os limites de especificação de processo das características. Em seguida, as cinco peças foram submetidas a têmpera e ao revenimento e em seguida as mesmas características são avaliadas utilizando os mesmos métodos de medição usados previamente. Nesse gráfico, os valores obtidos são comparados com as especificações finais do produto.

Caso os valores estejam fora dos limites de especificação, as devidas compensações são feitas nos processos de usinagem anteriores e um novo teste é feito para validar as novas especificações. Nos testes realizados, a deformação média do furo ficou em 0,063mm. Como a deformação do diâmetro do furo é a mais crítica pois essa característica tem uma tolerância

menor do que o diâmetro de raiz, o foco do trabalho se concentrará na avaliação dessa dimensão.

Os parâmetros de processo usados nos testes foram:

- Potência: 93%
- Tempo de Aquecimento: 8 s
- Vazão da ducha: 35 l/min
- Rotação: 100 rpm

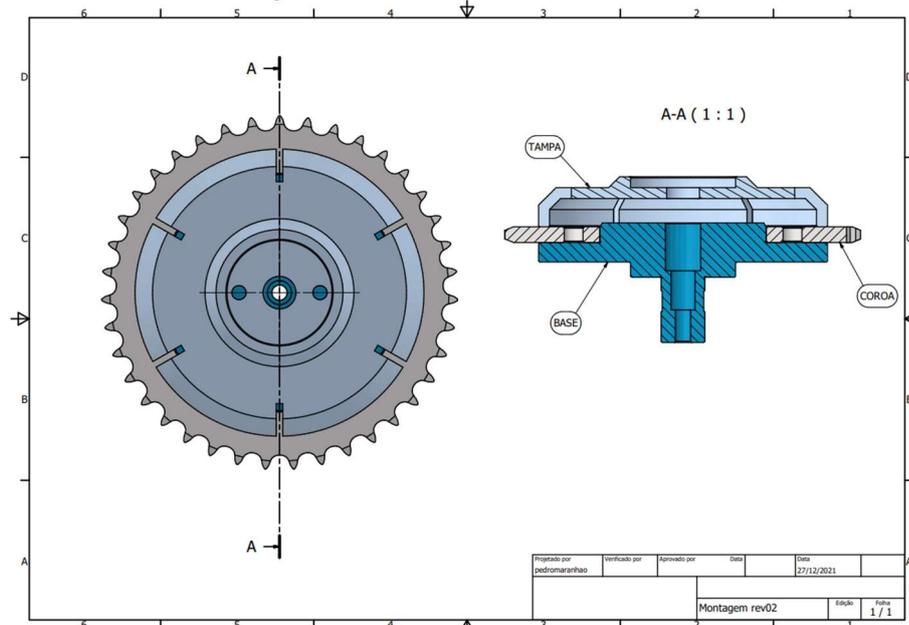
Todo o ciclo, que envolve a indexação da peça na estação, aquecimento, resfriamento e giro para a próxima estação dura 26 s. O tempo de aquecimento é de 8 segundos e 4 segundos de resfriamento. Durante o ciclo, foi utilizada uma câmera termográfica para medição das temperaturas as quais atingiram 1100°C.

Mesmo a região não sendo aquecida diretamente, devido a condução e convecção no resfriamento, deformações acontecem ao longo da peça. O furo central da peça possui uma tolerância pequena considerando as demais especificações do produto. Tal fato acontece, pois, a coroa é montada no cubo de roda da motocicleta e serve como um guia para montagem dos parafusos de fixação na moto. A tolerância do furo tem impacto direto no custo da peça pois, dependendo do seu valor, uma operação de acabamento deverá ser adicionada após a têmpera, aumentando os custos de fabricação.

A geometria do dispositivo, base (inferior) e tampa (superior), seguem um *design* já estabelecido previamente em outros desenvolvimentos. Os diâmetros externos dos dispositivos que irão atuar como apoio são projetados para serem o mais próximo do diâmetro de raiz da coroa menos a região que será temperada que nesse caso pode ser de 2,0 mm abaixo do diâmetro de raiz.

Inicialmente, um modelo em 3D é projetado. Concluído o modelo 3D, uma folha de detalhamento, 2D, é criada e encaminhada para a ferramentaria onde será fabricado o dispositivo. Uma vez confeccionado, são realizados testes no equipamento para validação de sua geometria.

Figura 47 – 2D do sistema de fixação



Fonte: O autor (2022)

Durante os testes, o produto tem sua camada induzida avaliada. Essa característica indica o quanto da peça foi aquecida e temperada. Se durante a validação dos dispositivos, a camada for menor do que o especificado e se não existe a possibilidade de alterar os parâmetros de processo, devido principalmente a ocorrência de trincas no produto, o diâmetro externo da base e tampa é diminuído. A base é passível de vários repasses pois possui uma geometria sólida. Para a tampa contudo, a possibilidade de retrabalho é menor visto que o componente possui uma região em vazio. Ainda, pequenos rasgos podem ser feitos na base, mas sua eficácia não é bem conhecida.

Figura 48 – Base de uma peça em produção retrabalhada com rasgos



Fonte: O autor (2022)

A ausência de uma ferramenta de simulação leva a várias tentativas que consomem tempo e geram custos não previstos em desenvolvimento. Várias alterações são testadas no modelo padrão para se obter uma melhor condição de processo.

Figura 49 – Geometria de várias bases testada ao longo do desenvolvimento.



Fonte: O autor (2022)

Os retrabalhos na geometria desses dispositivos não seguem uma ordenação e fica a critério da equipe que está atuando no desenvolvimento do produto.

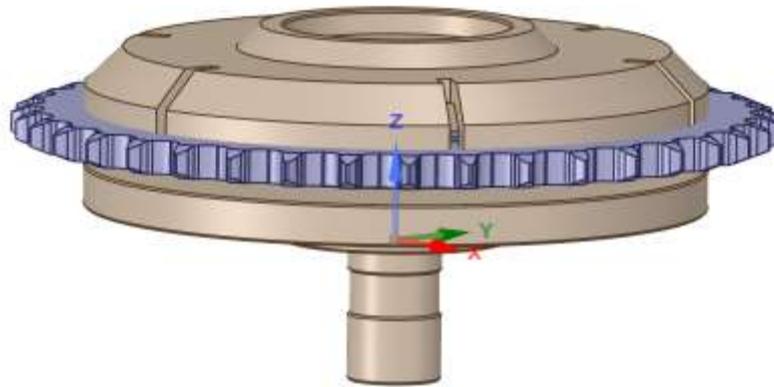
## 4.2 SIMULAÇÃO

Após os resultados experimentais e entendimento do processo de têmpera, foi realizada uma simulação numérica. Primeiramente, foi criado um modelo 3D da coroa juntamente com os dispositivos de fixação, base e tampa, usando uma ferramenta CAD (Autodesk Inventor), como pode ser observado na Figura 50.

Em seguida, o modelo 3D é importado para o software Ansys Mechanical, inicialmente, um estudo térmico transiente é realizado para avaliar o gradiente de temperatura durante o aquecimento.

Após, foi simulado o processo de aquecimento e uma análise estrutural é feita para avaliar as tensões na coroa ao fim do ciclo. Por fim, é feita uma otimização topológica nos dispositivos de fixação para definir uma geometria mais adequada. O objetivo é obter uma base com menor massa e que tenha pouca influência na distribuição de temperatura na peça durante o aquecimento, atuando apenas como um suporte para o processo.

Figura 50 – Modelo 3D do sistema de fixação



Fonte: O autor (2022)

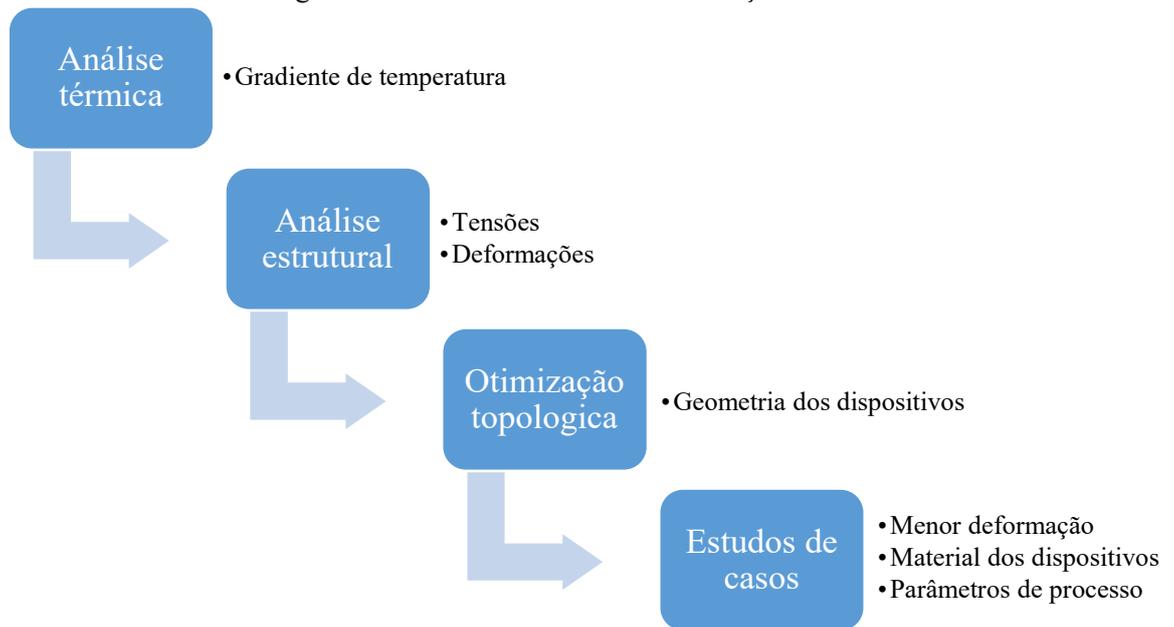
A simulação começa com a definição do fluxo de trabalho no Ansys. Inicialmente, é realizada uma análise transiente de transferência de calor para se obter os gradientes de temperatura durante o processo de têmpera.

Após a definição da temperatura, o resultado é levado para o ambiente de análise estrutural onde as tensões decorrentes das variações de temperatura são analisadas.

Por último, com base nos resultados acima citados, é executada a análise topológica no modelo 3D com o objetivo de reduzir o peso do conjunto e eliminar regiões que atrapalhem o aquecimento da região temperada, retirando calor do processo.

O fluxo de trabalho é mostrado na Figura 51 com as etapas realizadas no Ansys e os resultados obtidos em cada etapa da simulação.

Figura 51 – Fluxo de trabalho da simulação



Fonte: O autor (2022)

#### 4.2.1 Material

A primeira etapa da simulação é a definição dos materiais que serão usados. A coroa, conforme mencionado anteriormente, é feita de aço carbono 1045 conforme norma SAE. Os dispositivos de fixação, base e tampa, são feitos de aço inoxidável AISI 420.

A especificação da coroa é definida pelo cliente, que detêm o projeto do produto. Para os dispositivos, a definição foi feita pelo fabricante do equipamento, que forneceu os primeiros dispositivos. Para os materiais, as seguintes propriedades foram incluídas no *Ansys Mechanical*.

Tabela 10 - Propriedades adicionadas no Ansys

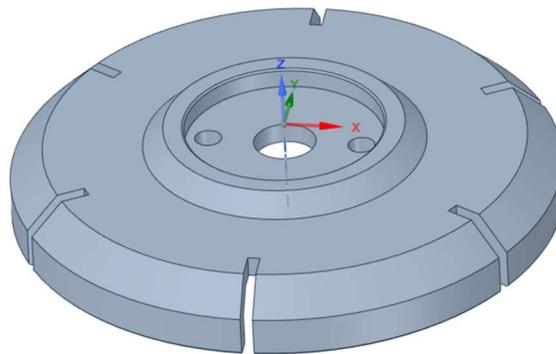
Propriedade	Aço 1045	AISI 420
Coefficiente de expansão térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	1,15E-0,5	1,03E-0,5
Poisson	0,29	0,24
Tensão de cisalhamento (GPa)	80	80,87

Fonte: O autor (2022)

Nas análises que serão executadas, as transformações de fases da estrutura do material serão desconsideradas. Na prática, parte das distorções que ocorrem no produto são decorrentes da mudança de estrutura no material que nesse caso, após a têmpera passa a ter uma estrutura martensítica na região tratada enquanto as demais regiões possuem a estrutura do *blank*.

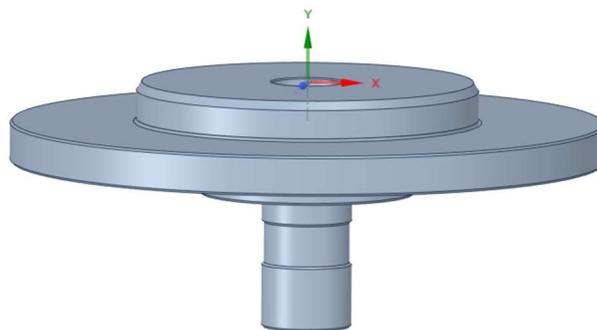
Após a definição dos materiais, a geometria é importada. Inicialmente é usado como modelo 3D, o projeto padrão definido previamente. As geometrias são mostradas abaixo.

Figura 52 – Tampa de fixação



Fonte: O autor (2022)

Figura 53 – Base de apoio



Fonte: O autor (2022)

Os diâmetros externos da tampa e base possuem os mesmos valores e inicialmente são iguais ao diâmetro de raiz do produto menos 4 mm.

#### 4.2.2 Malha

Em seguida é feita uma avaliação da malha. Foram feitas análises com vários tamanhos de elementos com o objetivo de avaliar a resposta da temperatura. O objetivo desse teste foi avaliar tanto a resposta da temperatura bem como o tempo de cálculo para definir um tamanho adequado de malha a fim de reduzir os esforços computacionais.

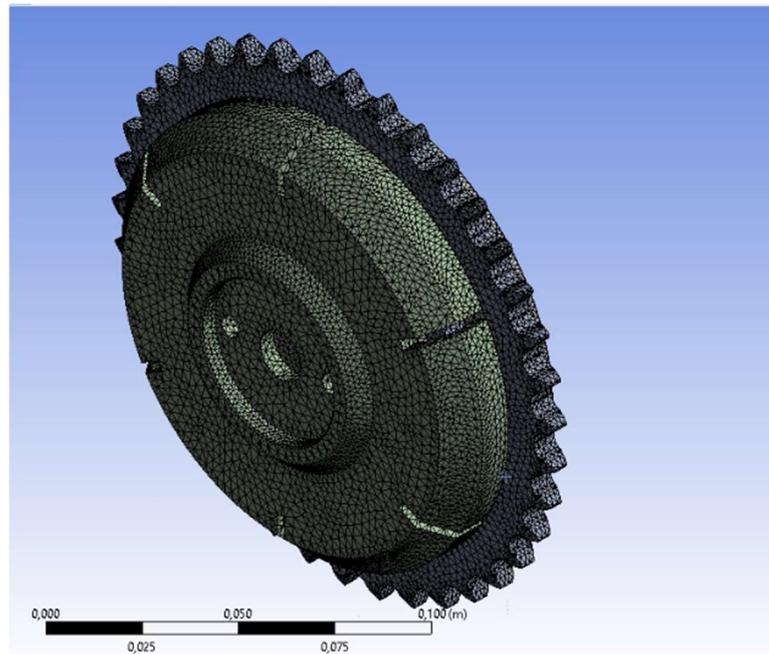
Tabela 11 – Tabela com testes de tamanho de elemento de malha

<b>Tamanho dos elementos (mm)</b>	<b>Nós</b>	<b>Elementos</b>	<b>Tempo de cálculo (s)</b>	<b>T<sub>máx</sub>°C(Coroa)</b>
<b>0,8</b>	836558	478533	1041	351,8
<b>1</b>	543853	309357	610	350,98
<b>1,5</b>	265145	147562	265	348,38
<b>2</b>	169352	92986	187	407,16
<b>3,5</b>	113961	61490	145	488,43
<b>4</b>	95822	51566	116	489,49
<b>5</b>	77208	40918	92	479,12
<b>10</b>	50109	25885	60	466,22

Fonte: O autor (2022)

Observa-se que para os valores entre 0,8 e 1,5 mm, a diferença entre os resultados foi de 3,42°C, o que para os valores de temperatura que serão trabalhados é aceitável, pois durante o processo de aquecimento e têmpera a variação de temperatura é de 1100°C. Logo, da diferença de 3,42°C na simulação representa um erro de 0,29% o que é aceitável. Com isso, o tamanho de 1,5mm de malha foi definido e será utilizado na simulação para possibilitar os estudos paramétricos com mais agilidade.

Figura 54 – malha com 1,5mm



Fonte: O autor (2022)

#### 4.2.3 Condições de Contorno

Em seguida são definidas as condições de contorno no modelo. Inicialmente temos a condição de contorno do fluxo de calor definido. O equipamento possui uma potência nominal de 125 kW. Contudo, as perdas no equipamento devem ser consideradas. Tradicionalmente, tem-se as seguintes eficiências.

- Eficiência da indução = 60%
- Perda no indutor = 2%

Com isso, a potência transferida para a peça é de 73,5 kW. Considerando que apenas 93% desse valor é usado no processo, conforme definido previamente, o valor da potência será de 65 kW.

Em seguida, a convecção é adicionada no modelo. Para a convecção, o valor do coeficiente de convecção não é conhecido e precisa ser estimado. A correlação utilizada foi a disponível no INCROPERA (2008). O caso usado é de um cilindro com escoamento cruzado.

$$Nu_D = C * Re_D^m * Pr^{1/3} \quad (12)$$

Para o número de Reynolds, foram considerados os seguintes dados:

- Vazão = 35l/min
- D = 2 mm (diâmetro das saídas de água)
- Massa específica = 1000kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidade = 0,000907 Ns/m<sup>2</sup>

Com isso, o número de Reynolds foi de 17050. Para este valor de Reynolds, obtemos os valores de C e m que deverão ser usados na equação (12). Os valores são 0,193 e 0,618 respectivamente conforme tabela abaixo.

Tabela 12 – Constantes da equação (11)

<b>Reynolds</b>	<b>C</b>	<b>m</b>
<b>0,4 até 4</b>	0,989	0,330
<b>4 até 40</b>	0,911	0,385
<b>40 até 4000</b>	0,683	0,466
<b>4000 até 40000</b>	0,193	0,618
<b>40000 até 400000</b>	0,027	0,805

Fonte: Adaptado de Incropera (2008)

O número de Nusselt calculado foi de 146,37 e utilizando a equação  $h=(Nu*k)/D$  , onde  $k=0,58$  W/mK para a coroa, obtém-se um coeficiente de convecção de 8000 W/m<sup>2</sup>K. Esse valor foi utilizado no modelo. Algumas considerações devem ser feitas no cálculo desse coeficiente:

- Cálculo não considera a ebulição da água;
- Cálculo não considera a mistura de polímero (8%).

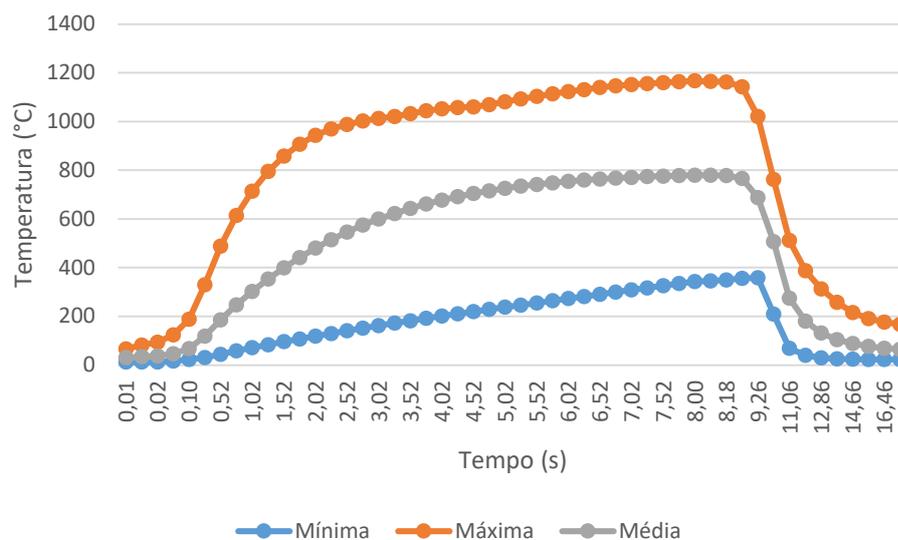
## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da simulação serão mostrados abaixo. Inicialmente, os valores das temperaturas são comparados com os obtidos experimentalmente através de medição termográfica. Posteriormente é feita uma avaliação estrutural para avaliar as distorções no diâmetro do furo e compará-las com os resultados das medições. Em seguida, uma otimização topológica é feita para avaliar se existe uma melhor geometria que se adeque ao processo. Por fim, uma vez verificado que o modelo reflete os dados experimentais, estudos de casos serão realizados para verificar a influência da variação de parâmetros de processo no produto para determinar se existe uma melhor combinação de parâmetros para peça em estudo e estabelecer uma sistemática de avaliação para novos produtos.

### 5.1 TEMPERATURA

Definidas as condições de contorno, é realizada a simulação do sistema. Como resultado, as temperaturas são calculadas conforme Figura 55. Foram plotadas as temperaturas ao longo do tempo do processo, desde o aquecimento até o final do resfriamento. A Figura 55 apresenta os resultados na região do dente da coroa.

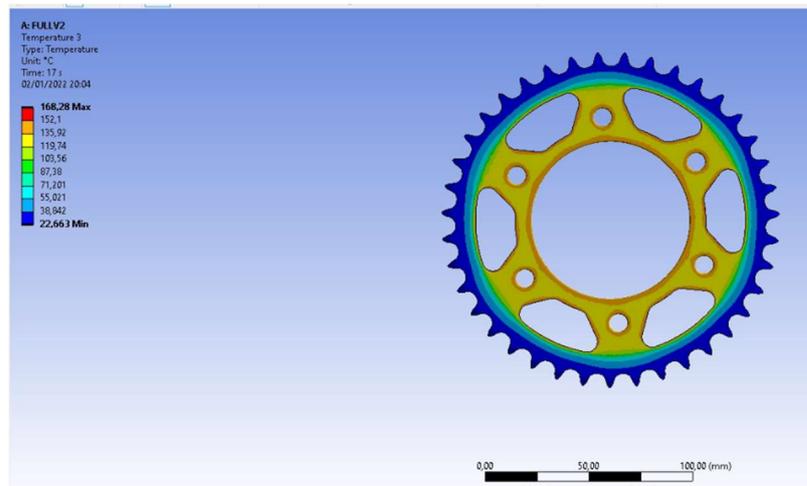
Figura 55 – Temperaturas no processo



Fonte: O autor (2022)

Verifica-se que a máxima temperatura está bem próxima dos resultados obtidos experimentalmente. A máxima temperatura na coroa após o processo foi de 168°C, como pode ser verificada na Figura 56, que é próximo dos dados históricos que existem. Nesse estudo é comprovada a necessidade de uma estação de resfriamento da peça após a indução. Essa estação irá esfriar a peça até ela seja possível manuseá-la em segurança pelo operador do equipamento.

Figura 56 – Temperatura no final do processo.



Fonte: O autor (2022)

A Tabela 13 mostra um comparativo entre as temperaturas obtidas na simulação frente ao resultado experimentais.

Tabela 13 – Comparativo entre temperaturas	
Temperatura máxima (°C)	
<b>Simulação</b>	1166,5
<b>Experimento</b>	1239
<b>Diferença</b>	72,5 (6,22%)

Fonte: O autor (2022)

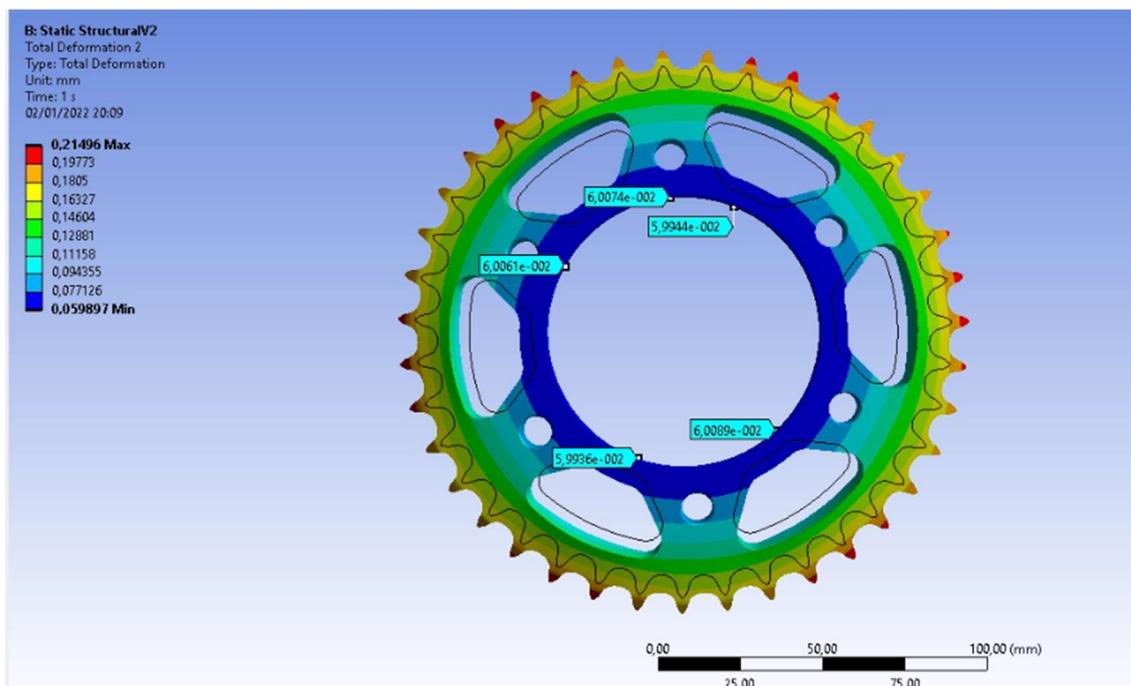
## 5.2 DEFORMAÇÃO

Após o estudo térmico, uma análise estrutural é feita para verificar os valores de distorções. O resultado dessa simulação está localizado na Figura 57. Conforme mostrado

anteriormente, 05 peças foram medidas antes e após induzir. Os valores considerados para comparação foram as deformações médias sofridas pelo produto.

O valor médio deve-se ao fato de a coroa possuir uma deformação não uniforme ao longo do furo devido à pequena espessura (7,2 mm) em comparação ao diâmetro externo (163 mm). Essa deformação provoca uma ovalização no furo coroa. As medições realizadas na máquina de medição por coordenadas levam em conta a quantidade de pontos que foram usados para formar o círculo que representa o furo e calcula um círculo médio com base nesses pontos. Ao fazer esse tipo de avaliação, os afastamentos dos pontos em relação ao círculo médio descrevem o erro de forma da característica que é conhecida por ovalização (circularidade).

Figura 57 – Deformação ao final do processo.



Fonte: O autor (2022)

Os valores de deformação no furo central ficaram em torno de 0,059 mm que é próximo ao resultado obtido experimentalmente de 0,063 mm. Um ponto de observação deve ser feito pois o valor de 0,063 mm de deformação é um valor médio encontrado, existindo peças que ficaram acima e abaixo desse valor. Essa variação decorre da variação na composição da matéria prima, do posicionamento da peça no dispositivo visto que é uma

alimentação manual e existem folgas entre o guia central e peça, variações nos próprios instrumentos de medição e do equipamento. A Tabela 14 apresenta um resumo dos valores de deformação encontrado na simulação frente ao valor encontrado experimentalmente.

Tabela 14 – Comparativo entre deformações

	<b>Deformação (mm)</b>
<b>Simulação</b>	0,059
<b>Experimento</b>	0,063
<b>Diferença</b>	0,004 (6,78%)

Fonte: O autor (2020)

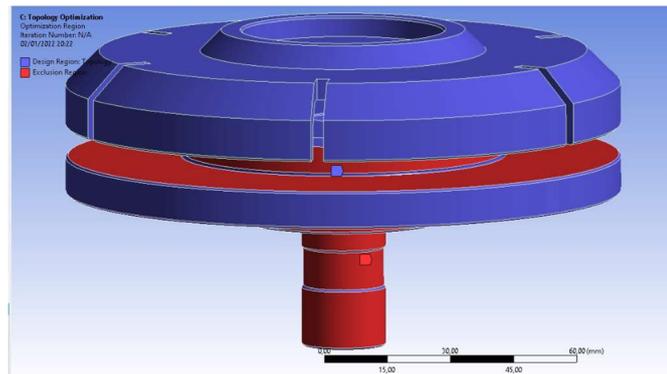
Ainda, conforme foi comentado previamente, mesmo não sendo a maior deformação que existe na coroa, o diâmetro do furo é o mais crítico devido a sua tolerância. Enquanto o valor de deformação do furo corresponde a aproximadamente 45% da tolerância final do produto, para as demais regiões, localizadas na região do dente e alívios estampados, essa deformação corresponde a aproximadamente 15% da tolerância final do produto, motivo pelo qual não será foco de discussão nessa dissertação.

Com base no resultado, pode-se considerar que o modelo reproduz o ambiente real do processo, mantendo suas limitações. O modelo proposto, pode ser usado para novos desenvolvimentos, podendo prever a deformação no furo central e ser tomada a decisão de compensar essa deformação em processos anteriores ou inserir um processo.

### 5.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Em seguida, uma otimização topologia é realizada. Inicialmente, algumas regiões são delimitadas e marcadas para que o software não as remova na otimização. Essas regiões são importantes pois estão atreladas aos sistemas de fixação e apoio da peça no equipamento. As regiões marcadas em vermelho deverão permanecer na otimização.

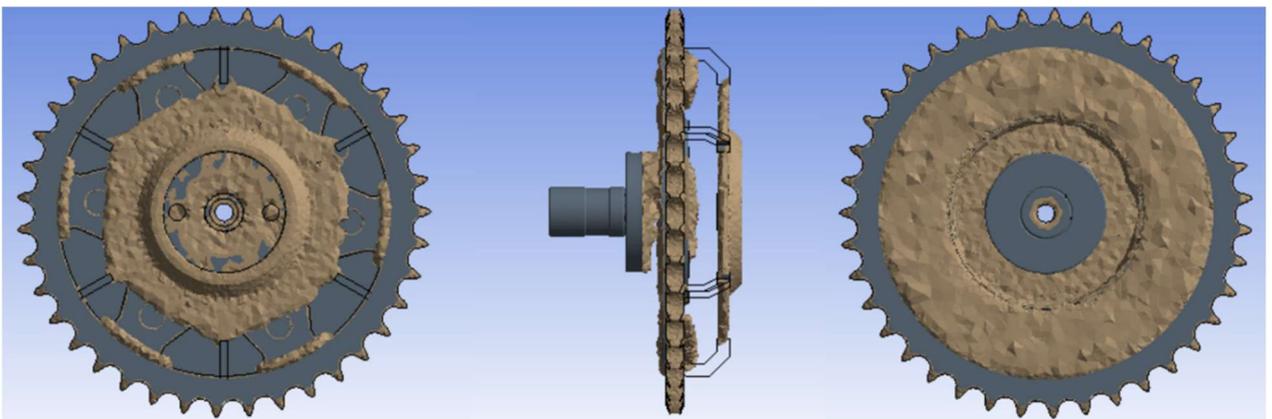
Figura 58 – Regiões que deverão ser mantidas na otimização



Fonte: O autor (2022)

Como objetivo, uma redução de 50% na massa foi associada à otimização. Quinhentas (500) iterações foram colocadas como máximo para que o software fizesse os cálculos de remoção de material. O resultado da otimização é mostrado abaixo com as regiões que deverão permanecer.

Figura 59 – Resultado da otimização topológica



Fonte: O autor (2022)

O resultado mostra as regiões que podem ser removidas da geometria sem impactar na simulação. Observando o resultado, vê-se que a parte central, apesar de poder ser removida, na prática não é possível pois faz parte do sistema de fixação da base no equipamento. Contudo, alívios podem ser feitos na base, reduzindo seu peso. Percebe-se também que a base pode ter sua espessura reduzida. A validação da nova geometria necessita de avaliação prévia para não gerar empenos nem quebras durante o processo, colocando em risco a segurança do operador da máquina.

Na parte superior, vemos que boa parte do dispositivo pode ser removida. Como ele tem função de conter a peça durante o giro impedindo que a peça seja arremessada para fora da base, causando um acidente, ela não pode ser removida, sendo necessário que permaneça em contato com a coroa. Mas, uma nova geometria pode ser testada aumentando a quantidade de rasgos na tampa, reduzindo assim o seu peso.

No geral, o resultado demonstra que a geometria dos dispositivos pode ser revisada sem impactar no resultado das deformações. Novas geometrias podem ser mais baratas pois consomem menos material e ainda podem ser utilizados processos de fabricação mais baratos e rápidos. Dispositivos mais baratos impactam diretamente nos custos de fabricação.

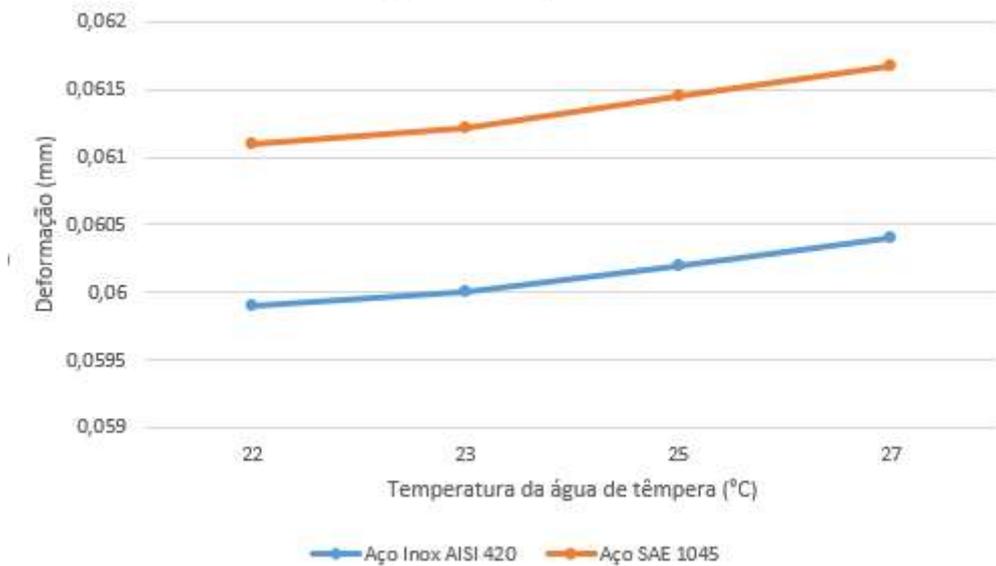
#### 5.4 ESTUDOS DE CASOS

Após a validação, estudos de casos foram realizados para verificar a influência de parâmetros inseridos no modelo. O primeiro diz respeito ao material. Inicialmente, as bases e tampas são feitas de aço inoxidável. Contudo, esse material é caro e foi investigada a possibilidade de se usar o aço 1045. No mesmo estudo, uma variação da temperatura da água de resfriamento foi considerada simulando o controle do equipamento atrelado com a variação de temperatura do ambiente. O equipamento possui um sistema de refrigeração dessa água, mantendo dentro de  $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 60 mostra o estudo parametrizado e a influência do material para várias temperaturas da água usada na têmpera. Observa-se que as deformações ficaram bastante próximas, tendo uma diferença de 0,001mm o que é admissível para o nível de deformação aceitável (1,6% de diferença).

Logo, como possibilidade, um novo dispositivo pode ser fabricado para ser testado. A redução com o custo de matéria prima para confecção da base pode ser reduzida em 40% apenas com a troca de aço inox pelo aço carbono. Contudo, cabe uma consulta ao fornecedor do equipamento para entender se essa especificação de material é com base em algum outro problema que não é coberto pela simulação e não pode ser visualizado nessa etapa.

Figura 60 – Influência do material na deformação.



Fonte: O autor (2022)

Um novo estudo de caso foi realizado dessa vez alterando o valor da potência utilizada no aquecimento, juntamente com as variações do caso anterior. A Tabela 15 resume o resultado desse teste. Para o estudo, foram consideradas uma variação de potência de  $\pm 5\%$ . Esse valor é o permitido que se possa variar durante as preparações. Variações na potência são realizadas para compensar variações na peça, como, por exemplo, no lote de matéria-prima.

Tabela 15 – Estudo de caso

<b>Teste No.</b>	<b>Potência (W)</b>	<b>Material da Base</b>	<b>Temperatura da água (°C)</b>	<b>Deformação Máxima (mm)</b>	<b>Deformação mínima (mm)</b>	<b>Temperatura máxima (°C)</b>
1	65000	Aço Inox AISI 420	22	0,214	0,059	1165
2	65000	Aço Inox AISI 420	23	0,214	0,059	1166
3	65000	Aço Inox AISI 420	25	0,214	0,060	1167
4	65000	Aço Inox AISI 420	27	0,213	0,060	1167
5	65000	Aço SAE 1045	22	0,252	0,061	1174
6	65000	Aço SAE 1045	23	0,252	0,061	1175
7	65000	Aço SAE 1045	25	0,251	0,061	1176
8	65000	Aço SAE 1045	27	0,251	0,061	1176
9	61750	Aço Inox AISI 420	22	0,204	0,056	1108
10	61750	Aço Inox AISI 420	23	0,204	0,057	1109
11	61750	Aço Inox AISI 420	25	0,203	0,057	1109
12	61750	Aço Inox AISI 420	27	0,203	0,057	1110
13	61750	Aço SAE 1045	22	0,239	0,058	1117
14	61750	Aço SAE 1045	23	0,239	0,058	1117
15	61750	Aço SAE 1045	25	0,239	0,058	1118
16	61750	Aço SAE 1045	27	0,238	0,058	1119
17	68250	Aço Inox AISI 420	22	0,225	0,062	1223
18	68250	Aço Inox AISI 420	23	0,225	0,062	1223
19	68250	Aço Inox AISI 420	25	0,225	0,063	1224
20	68250	Aço Inox AISI 420	27	0,224	0,063	1225
21	68250	Aço SAE 1045	22	0,265	0,064	1232
22	68250	Aço SAE 1045	23	0,264	0,064	1232
23	68250	Aço SAE 1045	25	0,264	0,064	1233
24	68250	Aço SAE 1045	27	0,263	0,064	1234

Fonte: O autor (2022)

No estudo acima observa-se que um aumento na temperatura da água, associado a um aumento na potência, impacta diretamente nos valores de deformação, aumentando esses valores. Esse aumento no valor da deformação (0,009 mm), para a peça em questão não tem um grande impacto, não necessitando de um processo de acabamento após tratamento

térmico, mas gera um aumento no consumo da energia elétrica, tornando o processo mais caro.

A diminuição desses valores, potência e temperatura da água, diminuem o valor da deformação e gera um menor consumo de energia elétrica. Contudo, a diminuição desses valores tem impacto direto no atendimento as especificações de dureza e profundidade de camada temperada uma vez que mudam a dinâmica da transformação de fase. Para validação desses novos parâmetros, experimento deve ser realizados.

O estudo de caso serve também para verificar qual a temperatura a coroa irá atingir no processo de aquecimento. O equipamento de indução não possui o controle da temperatura na qual a peça irá atingir durante o processo. Esse valor é consequência da potência aplicada e do tempo de aquecimento. Conhecer o valor da temperatura previamente ajuda na definição do processo pois, com base no diagrama TTT do material, pode ser definida uma temperatura de têmpera evitando aquecimento excessivo e ocorrência de trincas.

## 6 CONCLUSÃO

O modelo proposto mostra um resultado de deformação próximo ao encontrado nos experimentos. As diferenças entre os valores são devidas às simplificações que foram feitas para o estudo. Apesar de não serem exatamente iguais, o modelo criado serve como apoio no estudo inicial de processo de fabricação de um novo componente, tornando as definições de fluxo de fabricação mais precisas e o custo do produto mais próximo do real evitando prejuízos para a empresa e perda de novos negócios.

A aplicação de otimização topológica indica que um conjunto mais leve pode ser projetado, exigindo menos esforço do equipamento durante o giro da peça. Esse novo conjunto de fixação pode ser testado para diversas geometrias, associadas com várias combinações de materiais sem a necessidade de gastos com confecção, e fabricação de peças, gerando parada na linha de produção e aumento nos custos de desenvolvimento.

Também testes na variação de parâmetros poderão ser feitos, verificando as melhores condições de potência e tempo de aquecimento e resfriamento, objetivando uma melhor combinação desses valores para gerar um menor custo de fabricação, reduzindo gastos com energia elétrica e tempo de produção por peça.

Contudo, o modelo ainda não consegue prever a influência da variação do material em si no processo. Variações em composição química e estrutura do material impactam nos valores de deformação uma vez que o objetivo do tratamento é atender a critérios de dureza e região endurecida, parâmetros podem ser alterados e impactaram nos valores de deformação e temperatura. A variação de processo associada com a variação na composição química da matéria prima pode gerar trincas durante o processo de tempera. O modelo proposto e analisado não consegue prever a ocorrência dessas trincas.

Ainda, o material escolhido para os dispositivos pode sofrer oxidação devido aos sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento, algo que o modelo proposto não consegue prever.

Em geral, a criação desse modelo mostra uma evolução na forma de análise desse tipo de processo que antes estava restrito a testes físicos que se apoiam em conhecimentos prévios e fases de testes para validação. A melhoria contínua nesse modelo irá contribuir para um avanço na indústria, tornando-a mais competitiva em um cenário global cada vez mais acirrado com a possibilidade de fornecimento global de produtos e serviços.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como próximos trabalhos são sugeridos os seguintes temas para desenvolvimento:

- Avaliação de novas geometrias nos dispositivos de fixação, verificando o impacto dessas mudanças na deformação;
- Avaliar o efeito da transformação de fase da matéria prima nos valores de deformação;
- Aperfeiçoamento do modelo, avaliando os efeitos da adição de polímero na água para o resfriamento na temperatura e deformação;
- Avaliação do surgimento de trincas devido a variação de parâmetros de processo e composição química do material.

## REFERÊNCIAS

AREITIOAURTENA, M.; SEGURAJAUREGI, U.; URRESTI, I.; FISK, M.; UKAR, E. Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinders, **Procedia CIRP**, v. 87, pp. 545-550, 2020.

ARMENTANIA, E.; GIANNELLAB, V.; PARENTEC, A.; PIRELLIC, M. Design for NVH: topology optimization of an engine bracket support. **Procedia Structural Integrity**, v. 26, pp. 211-218, 2020.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma Abordagem Integrada**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.

\_\_\_\_\_. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CHEN, F.; WANG, J.; YANG, X. Topology optimization design and numerical analysis on cold plates for lithium-ion battery thermal management. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2022.

CHO, J.R.; KANG, W.J.; KIM, M.G.; LEE, J.H.; LEE, Y.S.; BAE, W.B. Distortions induced by heat treatment of automotive bevel gears. **Journal of Materials Processing Technology**, V. 153-154, p. 476-481, 2004.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4ª ed, Blucher: São Paulo, 2008.

DAIDO INDUSTRIAL E COMERCIAL LTDA. Disponível em: <https://daido.com.br/motos/kit-de-transmissao/>. Acesso em: 03 jan. 2022.

DIGITAL ENGINEERING. Disponível em: <https://www.digitalengineering247.com/article/a-contemplation-on-topology-optimization/>. Acesso em: 02 jan. 2022.

DONG, H.; ZHAO, Y.; YUAN, H.; HU, X.; YANG, Z. A Simplified Calculation Method of Heat Source Model for Induction Heating. **Materials**, v. 12, n. 18, 2019.

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. Disponível em: **Erro! A referência de hiperlink não é válida.** Acesso em: 02 jan. 2022.

FISK, M.; LINDGREN, L. E.; DATCHARY, W.; DESHMUKH, V. Modelling of induction hardening in low alloy steels. **Finite Elements in Analysis and Design** 144, v. 166, pp. 61-75, 2018.

FU, X.; WANG, B.; TANG, X.; JI, H.; ZHU, X. Study on induction heating of workpiece before gear rolling process with different coil structures. **Applied Thermal Engineering**, v. 114, pp. 1-9, 2017.

GEORGE, J. P.; KOSHY, J.; ABRAHAM, B.C. Distortion Reduction in Gear Heat Treatment Process by a Simple Fixture. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, V. 4, 2014.

HÁJEK, J.; ROT, D.; JIŘINEC, J. Distortion in Induction-Hardened Cylindrical Part. **Defect and Diffusion Forum**, 2019.

INCROPERA. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**, 6ª ed. LTC: Rio de Janeiro, 2008.

LI, Z.; FERGUSON, B.L. Controlling Gear Distortion and Residual Stresses During Induction Hardening. **Gear Technology**, 2011.

LIANG, X. **Multiscale Structural Topology Optimization**. ISTE PRESS, 2016.

MIN, J.; ZHU, G.; YUAN, Y.; LIU, J. COMSOL Simulation for Design of Induction Heating System in VULCAN Facility. **Science and Technology of Nuclear Installations**, v. 2021, 2021.

PATEL, M.; VALIULLA, H.; KHATOD, V.; CHAUDHARY, B.; GONDALIA, V. Topology Optimization of Automotive Gear using Fea. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 8, n. 4, pp. 1079-1084, 2019.

SCHUH, G.; BERGWELER, G.; LICHTENTHÄLER, K.; FIEDLER, F.; REBOLLO, S. de L. P.. Topology Optimisation and Metal Based Additive Manufacturing of Welding Jig Elements. **53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems**, 2020.

TENSI, H. M.; CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. E. The quenching process: an overview of the fundamental physics properties of liquid quenching. **CONGRESSO ANUAL DA ABM**, 58., 2003, Rio de Janeiro, RJ. p. 359-370, 2003.

TOLEDO, D. G. C.; SILVA, E. C. N.; SILVA, R. A. de L.; CRUZ, R. F. da; GALLI, L. A. F. Design of a Connecting Rod for Internal Combustion Engine by Applying Topology Optimization. **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 2009, Gramado. **20th International Congress of Mechanical Engineering** (2009).

TONGA, D.; GUA, J.; TOTTEN, G.E. Numerical investigation of asynchronous dual-frequency induction hardening of spur gear. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 142, pp. 1-9, 2018.

TYFLOPOULOS, E.; LIEN, M.; STEINERT, M. Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4, 2021.

ZINN, S.; SEMIATIN, S. L. **Elements of Induction Heating**. ASM International, 1988, 15f.