

**Otimização do processo de revenimento do aço SAE 4122: avaliação da influência do tempo e da temperatura nas propriedades metalúrgicas**

**Optimization of the tempering process of SAE 4122 steel: evaluation of the influence of time and temperature on metallurgical properties**

**Optimización del proceso de temple del acero SAE 4122: evaluación de la influencia del tiempo y la temperatura en las propiedades metalúrgicas**

DOI: 10.54901/educa.v9-540

Gabriel Freitas Queiroz<sup>1</sup>  
Dr. Manuel Patricio da Silva Bisneto<sup>2</sup>  
Msc. Edgard Gonçalves Cardoso<sup>3</sup>  
Msc. Lucas Almeida Willenshofer<sup>4</sup>  
Dr. Leandro Cardoso da Silva<sup>5</sup>

**RESUMO:** O tratamento térmico é amplamente utilizado na indústria automotiva para garantir propriedades mecânicas adequadas aos componentes submetidos a elevadas solicitações de carga e desgaste. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência do tempo e da temperatura de revenimento no aço SAE 4122, visando reduzir o tempo de processamento sem comprometer os requisitos metalúrgicos especificados para o produto. A metodologia consistiu na realização de ensaios laboratoriais em forno mufla, utilizando amostras previamente cementadas e temperadas, submetidas a diferentes combinações de temperatura e tempo de revenimento, além de uma etapa de pré-aquecimento. Foram realizados ensaios de dureza Rockwell C e análises metalográficas para validação das características microestruturais. Os resultados demonstraram que as amostras submetidas a 190°C apresentaram durezas entre 63 e 65 HRC, enquanto a condição de 200°C resultou em valores de 61 a 64 HRC. A condição com pré-aquecimento a 190°C por 30 minutos seguida de revenimento por 100 minutos apresentou dureza superficial de 63 HRC, atendendo às especificações do processo, que variam entre 57 e 63 HRC, além de manter os demais requisitos metalúrgicos exigidos. Essa condição permitiu reduzir o tempo total de processamento de 180 para 100 minutos, representando um ganho produtivo de aproximadamente 44%. Conclui-se que a otimização proposta é tecnicamente viável, proporcionando aumento da produtividade industrial sem comprometer a qualidade e o desempenho dos componentes tratados termicamente.

**Palavras-chave:** revenimento; tratamento térmico; aço SAE4122; dureza Rockwell; otimização de processo.

---

<sup>1</sup> Pós-Graduando em Projetos Mecânicos Industriais, Faculdade SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil.  
E-mail: gabriel2127@outlook.com.br.

<sup>2</sup> Doutor em Nanociências e Materiais Avançados, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil.  
E-mail: manuel.bisneto@sp.senai.br

<sup>3</sup> Doutorando em Energia, Centro Universitário SENAI-SP, Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, São Paulo, Brasil. E-mail: edgard.cardoso@sp.senai.br

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Mecânica, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil.  
E-mail: lucas.willenshofer@sp.senai.br

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Centro Universitário SENAI-SP, São Paulo, São Paulo, Brasil.  
E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico é um processo amplamente utilizado nas indústrias em geral. O conceito desse processo envolve o aquecimento e a manutenção do material a uma temperatura e tempo específicos, seguido de resfriamento, que pode ser lento, rápido, à temperatura ambiente, em ar, água ou óleo. Todos os parâmetros do processo são definidos de acordo com as necessidades e as características mecânicas desejadas. Na indústria automotiva, os aços-liga são utilizados em eixos, engrenagens, virabrequins e componentes de transmissão. Alguns exemplos de aços-liga utilizados são os da família 41XX, aços cromo-molibdênio como o 4140 e o 4122. Devido à sua boa resistência à fadiga, eles têm ampla aplicação nesse setor industrial.(Špuro e colab., 2026)

O processo de tratamento térmico do aço SAE4122 utilizado na indústria consiste em cementação, têmpera e revenido. A cementação enriquece a superfície com carbono, gerando potencial de endurecimento. Posteriormente, a têmpera forma martensita na estrutura do material, aumentando sua dureza. Finalmente, o revenido alivia as tensões resultantes da têmpera, de modo que o material atinja a dureza ideal para sua função na montagem mecânica. Este estudo concentra-se na otimização do processo de revenimento industrial em uma linha de tratamento térmico composta também por cementação e tempera. A influência da temperatura e do tempo de revenido nos pontos de dureza será abordada para fins de validação das características metalúrgicas que são requisitos de qualidade do processo pré-estabelecidos, portanto o objetivo desse estudo é a avaliação e comparação dos resultados afim de diminuir o tempo de processamento.(Hua e colab., 2022)

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os tratamentos térmicos desempenham papel fundamental na engenharia de materiais, em específico na indústria automotiva, onde atua o componente do presente estudo. Esses componentes são submetidos a elevadas cargas mecânicas e necessitam apresentar alta resistência ao desgaste e resistência à fadiga. Os processos de cementação associados à têmpera e revenido continuam sendo amplamente utilizados em engrenagens automotivas devido à capacidade de produzir elevada dureza superficial mantendo um núcleo tenaz, característica essencial para componentes sujeitos a carregamentos cíclicos severos.(Klimeš e colab., 2026)

Os aços-liga da família SAE 41XX possuem ampla aplicação industrial devido à presença de cromo e molibdênio, que aumentam a temperabilidade e favorecem a formação de

microestruturas endurecidas após o tratamento térmico. Estudos recentes demonstram que a combinação entre cementação e revenido em aços utilizados em engrenagens pesadas proporciona melhor distribuição de dureza. O revenimento em baixas temperaturas influencia diretamente a microestrutura martensítica e o desempenho à fadiga de contato em camadas cementadas de aços-liga utilizados em engrenagens industriais.(Li e colab., 2025)

A cementação consiste em um tratamento termoquímico baseado na difusão de carbono na superfície do aço em temperaturas elevadas, normalmente acima da zona crítica de austenitização. O objetivo do processo é gerar uma camada superficial enriquecida com carbono capaz de atingir elevada dureza após a têmpera. O aumento do tempo de permanência durante a cementação influencia diretamente a profundidade da camada endurecida e os valores finais de dureza, demonstrando que o controle adequado dos parâmetros térmicos é essencial para garantir uniformidade microestrutural e desempenho mecânico satisfatório.(Baali e colab., 2023)

Após a cementação, a têmpera promove a transformação da austenita em martensita por meio de resfriamento rápido, aumentando significativamente a dureza do material. Entretanto, a formação martensítica também produz elevadas tensões residuais internas, podendo ocasionar fragilidade, distorções dimensionais e risco de trincas. Estudos apontam que componentes automotivos cementados tendem apresentar alterações importantes no estado de tensões residuais após os processos de têmpera e revenido, influenciando diretamente propriedades como resistência mecânica e vida em fadiga.(Clark e colab., 2013)

Nesse contexto, o revenimento é considerado uma etapa indispensável pois, ele geralmente vem para eliminar tensões residuais oriundas do processo de tempera assim garantindo o equilíbrio entre dureza e tenacidade. O processo promove o alívio parcial das tensões internas formadas durante a têmpera e favorece a estabilização da martensita revenida. As temperaturas utilizadas nesse trabalho de 190°C e 200°C pertencem ao chamado 1º Estágio do revenido que fica entre 100° e 250°C ocorrendo precipitação do carboneto de ferro e reticulado hexagonal nesse estágio a dureza Rockwell começa a cair podendo chegar a 60.(“Aços e Ferros Fundidos (V. Chiaverini) | PDF”, [S.d.])(Souza e colab., 2022)

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Material Utilizado

O material utilizado para os testes foi o aço SAE4122, uma liga composta de cromo e molibdênio. Antes do revenimento, as peças passam por um processo de cementação e endurecimento para atingir as propriedades mecânicas especificadas para uso na indústria automotiva. O aço SAE 4122 é amplamente aceito na indústria automotiva por combinar boa usinabilidade, excelente resposta ao tratamento térmico e as propriedades mecânicas necessárias, além de alta dureza superficial. É um material que tende a apresentar boa resistência ao desgaste, o que é essencial para componentes que operam sob altas cargas e fadiga.(Scheuer e colab., 2025)

Pertencente à família 41xx, o aço SAE 4122 é um material cuja composição química é definida pela norma SAE J404, caracterizado pela presença de cromo e molibdênio, que lhe conferem alta temperabilidade e resistência mecânica. Para o aço SAE 4122, a composição típica inclui aproximadamente 0,20–0,25% de carbono, 0,80–1,10% de cromo e 0,15–0,25% de molibdênio, com o restante de ferro, tornando-o adequado para tratamentos termoquímicos como a cementação. A Tabela 1 apresenta a composição química do material utilizado nesta pesquisa.

**Tabela 1** – Composição química do Aço SAE 4122

| C           | Si          | Mn          | Cr          | Mo          | P (máx) | S (máx) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|---------|
| 0,20 – 0,30 | 0,15 – 0,35 | 0,60 – 1,50 | 1,00 – 1,60 | 0,20 – 0,40 | 0,035   | 0,040   |

**Fonte:** Classificação de aços IFSC

#### 3.2 Equipamentos de Laboratório

##### 3.2.1 Mufla

Após tempera e cementação as peças passaram por um processo de revenimento para escalabilidade dos testes e para não gerar impacto no processo produtivo foi utilizado um forno tipo mufla, conforme a Figura 1. Esse tipo de equipamento é amplamente utilizado para testes de validação de processo e para ensaios metalúrgicos. O forno mufla tem capacidade atingir temperaturas superiores a 1000°C por conta de resistências elétricas elevando a temperatura e

seu interior conter uma câmara revestida de material refratário garantindo uma melhor distribuição de calor em seu ambiente. (Miranda e Fernandes, 2019)

Figura 1 – Forno elétrico Tipo Mufla



Fonte: Elaborado pelos autores

Para análise o forno foi utilizado para duas faixas de temperatura de 190°C e 200°C temperatura essa utilizada para encharque das peças com objetivo de reduzir as tensões provenientes da tempera.

### 3.2.2 Microscopio Olympus GX51

Utilizado para metalografia, inspeção de falha, controle de qualidade, pesquisa de materiais e análise de microestruturas de materiais ferrosos e não ferrosos. A utilização da microscopia garante a análise da microestrutura do material garantindo especificações técnicas do material metálico.(Tonelli, 2021) Conforme a Figura 2 temos a imagem do ensaio para caracterização da fase na liga metálica um parâmetro essencial para que a peça seja aprovada dentro das características metalúrgicas especificadas dentro do processo de fabricação.

Figura 2 – Ensaio de metalografia sendo realizado



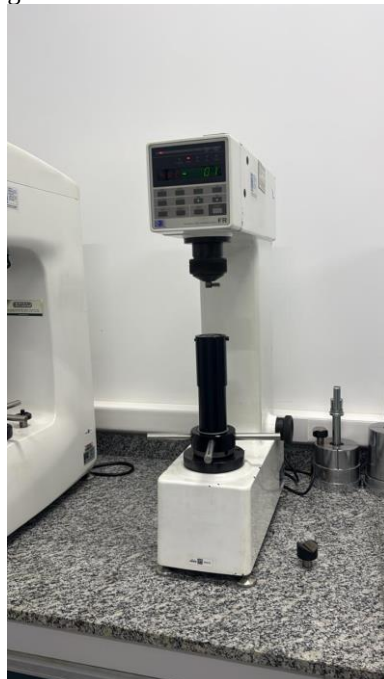
Fonte: Elaborado pelos autores

Após as imagens capturadas do núcleo e camada é feita análise da microestrutura. Para um material proveniente de revenimento a estrutura predominantemente é composta por martensita revenida.

### 3.2.3 Medidor de Dureza Mitutoyo

Com aplicação voltada a controle de processos e caracterização de materiais em laboratórios metalúrgicos, o medidor de dureza que é mostrado na Figura 3 abaixo é responsável por mensurar as propriedades mecânicas de metais e ligas metálicas. Para a caracterização do aço SAE 4122 foi empregado a escala de medida HRC (Hardeness Rockwell C), esse tipo de ensaio é geralmente utilizado para aplicação em corpos de prova de aço temperado.(Santos, 2022)

Figura 3 – Medidor de Dureza Mitutoyo



Fonte: Elaborado pelos autores

O teste realizado nas dependências do laboratório metalúrgico do SENAI foi aplicado nas 8 amostras com objetivo de relacionar a temperatura e tempo de processo com os pontos de dureza encontrado nas amostras.

A realização desse ensaio se baseia na profundidade de penetração de um penetrador sob cargas padronizadas, quanto menor a profundidade maior será o valor de dureza, pois se trata de uma escala inversamente proporcional.(Abraham, 2013)

### **3.3 Método**

#### **3.3.1 Aplicação na Mufla**

O processo de tratamento térmico foi feito em um forno contínuo, onde as peças se acomodam em uma esteira transportadora entram e se encaminham para as pistas com uma velocidade de cadência controlada respeitando o tempo de ciclo. Por um sistema são puxadas e encaminhadas até a primeira pista onde são cementadas, após período especificado pelo setor de qualidade, no final do percurso a peça é submersa em óleo realizando assim a têmpera e em sequência entra em outra pista para o forno que conduz o processo de revenimento, conforme as Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Esquema das pistas de tratamento térmico



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 7 – Fluxo de processos tratamento térmico



Fonte: Elaborado pelos autores

Para início dos testes foi separado 6 amostras como relacionado na Tabela 2, nas instalações da empresa essas amostras passaram pelo processo de cementação e têmpera, após tratamento as peças foram levadas para o laboratório dando início ao processo de testes com objetivo de redução de tempo no revenimento e avaliação dos pontos de dureza em função do tempo conhecendo a curva de aquecimento do material

Tabela 2 – Relação tempo x temperatura das amostras

| Amostra | Tempo (min) | Temperatura (°C) |
|---------|-------------|------------------|
| 1       | 120         | 190              |
| 2       | 100         | 190              |
| 3       | 80          | 190              |
| 4       | 60          | 190              |
| 5       | 120         | 200              |
| 6       | 100         | 200              |

Fonte: Elaborado pelos autores

Após a primeira bateria de teste foi repetido para duas novas amostras agora contemplando um processo de pré-aquecimento visando diminuir o tempo de encharque da peça pensando na possibilidade de implementar pelo fato de na pista de tratamento térmico ter um

espaço inaproveitado onde as peças ficam paradas perdendo potencial térmico, visto que a Fórmula 1 abaixo revela os tempos que compõem o processo de revenimento diminuindo o tempo de encharque que é o período onde a peça tem o aquecimento até chegar em uma temperatura desejada e normalizar o processo para que a mesma seja revenida.

$$TP = \text{Tempo de encharque} + \text{Tempo de revenimento} \quad (1)$$

Com essas duas baterias de testes chegamos na compreensão e hipótese do nosso presente estudo, qual a influência da permanência da peça no processo de revenimento como as características metalúrgicas vão se comportar e até onde podemos chegar para que seja possível obter uma melhoria no processo produtivo para o material SAE 4122.

Com isso na segunda bateria de teste vamos realizar um processo de pré-aquecimento de 30 minutos a 190°C para que a peça chegue em um patamar elevado de temperatura para que possa iniciar o revenimento, na Tabela 3 é possível verificar como está relacionado os testes de pré-aquecimento.

Tabela 3 – Amostras para teste de pré-aquecimento

| Amostra | Pré-Aquecimento °C | Pré-Aquecimento (min) | Revenimento Temperatura °C | Revenimento Tempo (min) |
|---------|--------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1P      | 190                | 30                    | 190                        | 80                      |
| 2P      | 190                | 30                    | 190                        | 100                     |

Fonte: Elaborado pelos autores

As duas baterias de teste conforme Tabela 2 e 3 foram conduzidas no forno mufla da figura 1 com capacidade de aquecimento de até 1200°C, os testes dentro do laboratório é possível replicar condições reais do processo da empresa e a possibilidade de aumentar a escalabilidade algo que no dia a dia da empresa não é possível.

### 3.3.2 Metalografia

A metalografia é imprescindível quando se trata de caracterização de materiais e análise de falhas em ligas metálicas sendo responsável por interpretar as características das microestruturas dos materiais, propriedades físicas e validar os processos de fabricação, principalmente em materiais que passaram por um processo de tratamento térmico.(Almeida Silva e colab., [S.d.]) Para análise da microestrutura as amostras selecionadas para

caracterização passaram por um processo de lixamento manual a fim de um melhor acabamento no processo posterior ao qual é um processo de polimento, conforme Figura 8. Após as peças já se encontrarem lixadas e polidas foi realizado um ataque nital de 2%. Com auxílio de um microscópio Olympus GX51 e uma ampliação de 500x e 1000x foi possível obter as imagens microestruturais da camada e do núclo da peça.(Medeiros e Dantas, [S.d.])

Figura 8 – Amostra utilizada para análise da microestrutura



Fonte: Elaborado pelos autores

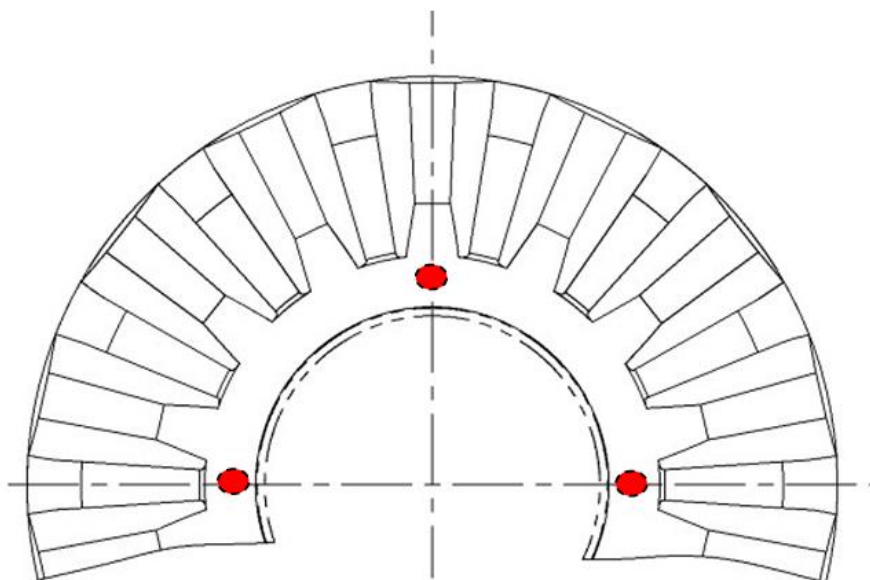
### 3.3.3 Dureza

O ensaio de dureza é essencial para esse trabalho para aprovar ou reprovar a peça, temos também outras características metalúrgicas especificadas pelo controle de qualidade para serem atendidas.(De e colab., 2023)

A medição foi feita em durometro da marca mitutoyo conforme figura 3, o método consiste em medir a profundidade de penetração por um penetrador cônico de diamante que é aplicado a uma carga de 150kgf.(Brignoli, 2025a)

As amostras foram submetidas a 3 pontos de avaliação conforme Figura 9 e com isso temos os resultados obtidos na escala Rockwell C.

Figura 9 – Croqui da posição de avaliação de dureza superficial (3 pontos utilizando a média).



Fonte: Elaborado pelos autores

## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

### 4.1 Resultados Ensaio de Dureza

A primeira bateria de testes com 190°C e 200°C nos trouxe resultados interessantes principalmente nas amostras 1 e 5 com um acréscimo de 10°C de uma amostra para a outra tivemos uma redução de 3 pontos de dureza apresentado.

Foi utilizado 6 amostras sendo 4 delas a 190°C e com um tempo de permanência de 120, 100, 80 e 60 minutos, as outras 2 amostras foram submetidas na mufla a uma temperatura de 200°C com um tempo de 120 e 100 minutos, a Tabela 4 nos apresenta a relação de amostras e dureza obtida.

Tabela 4 – Resultados da primeira bateria de teste

| Amostra | Tempo (min) | Temperatura (°C) | Dureza (HRC) |
|---------|-------------|------------------|--------------|
| 1       | 120         | 190              | 63           |
| 2       | 100         | 190              | 64           |
| 3       | 80          | 190              | 64           |
| 4       | 60          | 190              | 65           |
| 5       | 120         | 200              | 61           |
| 6       | 100         | 200              | 64           |

Fonte: Elaborado pelos autores

Como na linha de tratamento térmico tem espaço que é possível a instalação de uma zona de pré-aquecimento foi realizado mais 2 testes para avaliação da possibilidade de reduzir ainda mais o tempo de revenimento, com a diminuição do tempo de encharque das peças e trazendo ganho produtivo para o processo. Para segunda bateria de testes foi utilizado duas amostras a 190°C com um pré-aquecimento de 30 minutos e um tempo de revenimento de 100 e 80 minutos, a Tabela 5 nos mostra os valores de HRC referente a amostra 1P e 2P.

Tabela 5 – Resultados da segunda bateria de testes

| <b>Amostra</b> | <b>Pré-<br/>Aquecimento<br/>°C</b> | <b>Pré-<br/>Aquecimento<br/>(min)</b> | <b>Revenimento<br/>Temperatura<br/>°C</b> | <b>Revenimento<br/>Tempo<br/>(min)</b> | <b>Dureza<br/>(HRC)</b> |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| <b>1P</b>      | 190                                | 30                                    | 190                                       | 80                                     | 64                      |
| <b>2P</b>      | 190                                | 30                                    | 190                                       | 100                                    | 63                      |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Avaliando os resultados das duas baterias de testes tivemos 3 amostradas aprovadas são elas 1, 5 e 2P pelo fato de os parâmetros de dureza estar dentro do especificado pela empresa que varia de 57 a 63 HRC, porém não é de se descartar os valores obtidos no processo no tempo de 80 minutos o qual apresentou 64HRC visto que para se igualar aos parâmetros estabelecidos temos que diminuir somente 1 ponto de dureza. Vale ressaltar que os ensaios foram feitos em um forno tipo mufla utilizado em laboratório de testes.

## 4.2 Características Metalúrgicas

O controle de qualidade para o processo é essencial principalmente quando se trata de componentes utilizados que serão submetidos a esforços de torção, vibração, choque mecânico, cargas radiais e axiais, entre outros fatores solicitados, nesse sentido manter o controle das características metalúrgicas são necessárias para garantir o padrão de qualidade do processo garantindo vida útil e confiabilidade do equipamento.(Dias, 2023)

Abaixo nós temos a Tabela 6 e 7 onde é avaliado outros requisitos de qualidade para que os componentes atendam as solicitações mecânicas exigidas, parâmetros como camada total e efetiva, austenita retida a partir da metalografia.

Tabela 6 – Características metalúrgicas após revenimento da primeira bateria de testes

| PARAMETROS     |                  | 1      | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | ESPECIFICADO  |
|----------------|------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|
| DUREZA         | Superfície       | 63 HRC | 64 HRC   | 64 HRC   | 65 HRC   | 61 HRC   | 64 HRC   | 57 – 63 HRC   |
|                | Pitch            | 34 HRC | 34 HRC   | 34 HRC   | 34 HRC   | 34 HRC   | 34 HRC   | 34 – 45 HRC   |
|                | Sub-Superficial  | 60 HRC | 59,6 HRC | 58,2 HRC | 60,7 HRC | 57,8 HRC | 58,4 HRC | 57 – 63 HRC   |
|                | 0,10mm           |        |          |          |          |          |          |               |
| CAMADA TOTAL   | Raiz             | 28 HRC | 29 HRC   | 28 HRC   | 28 HRC   | 29 HRC   | 28 HRC   | 28 – 40 HRC   |
|                | Pitch            | 1,8mm  | 1,7mm    | 1,7mm    | 1,7mm    | 1,7mm    | 1,7mm    | -             |
|                | Raiz             | 1,3mm  | 1,3mm    | 1,3mm    | 1,3mm    | 1,3mm    | 1,3mm    | -             |
| CAMADA EFETIVA | Pitch            | 1,07mm | 1,02mm   | 1,06mm   | 1,05mm   | 1,04mm   | 1,00mm   | -             |
|                | Raiz             | 0,75mm | 0,64mm   | 0,72mm   | 0,71mm   | 0,70mm   | 0,67mm   |               |
| METALOGRAFIA   | Austenita Retida | 30%    | 30%      | 30%      | 30%      | 30%      | 30%      | 10 – 30%      |
|                | IGO              | 0,02mm | 0,02mm   | 0,02mm   | 0,02mm   | 0,02mm   | 0,02mm   | 0,0381 mm max |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Tabela 7 – Características metalúrgicas após revenimento da segunda bateria de testes

| PARAMETROS     |                  | 1P      | 2P      | ESPECIFICADO  |
|----------------|------------------|---------|---------|---------------|
| DUREZA         | Superfície       | 64 HRC  | 63 HRC  | 57 – 63 HRC   |
|                | Pitch            | 34 HRC  | 34 HRC  | 34 – 45 HRC   |
|                | Sub-Superficial  | 61 HRC  | 58 HRC  |               |
|                | 0,10mm           |         |         | 57 – 63 HRC   |
| CAMADA TOTAL   | Raiz             | 30 HRC  | 31 HRC  | 28 – 40 HRC   |
|                | Pitch            | 1,7mm   | 1,7mm   | -             |
|                | Raiz             | 1,3mm   | 1,3mm   | -             |
| CAMADA EFETIVA | Pitch            | 1,00mm  | 1,02mm  | -             |
|                | Raiz             | 0,79mm  | 0,71mm  |               |
| METALOGRAFIA   | Austenita Retida | 25%     | 25%     | 10 – 30%      |
|                | IGO              | 0,016mm | 0,016mm | 0,0381 mm max |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Analisando as Tabelas 6 e 7 é possível verificar que em todos os parâmetros as amostras 1, 5 e 2P foram aprovadas sendo assim podendo implementar o tempo de revenimento no processo de fabricação gerando um ganho de 44% no tempo de processamento visto que no estado inicial o processo apresentava um tempo de 180 minutos de revenimento agora passando para 100 minutos utilizando a amostra 2P como base.

É imprescindível destacar que a segunda bateria de testes obteve 25% de austenita retida uma queda de 16,7% para os valores obtidos na primeira bateria que foi de 30%. Durante a transformação martensítica é raro onde se tem uma formação completa, mesmo após o resfriamento parte da austenita se mantém na microestrutura do material como austenita retida, a importância dessa queda de 16,7% na amostra 2P foi importante pois essa austenita retida sob

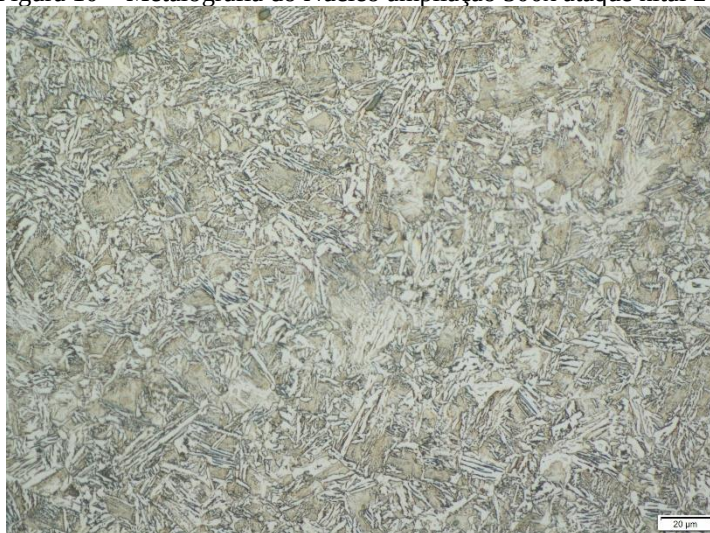
tensões pode comprometer a estabilidade dimensional, diminuir a dureza final e promover a nucleação de trincas nos componentes.(Brignoli, 2025b)

### 4.3 Metalografia

Após preparação da amostra foi realizado a metalografia para análise da estrutura da peça em seu núcleo e camada, com um ataque nital de 2% e ampliação de 500x e 1000x.

Abaixo temos as Figuras 10 e 11 que correspondem as análises metalográficas do núcleo com ampliação de 500x e 1000x.

Figura 10 – Metalografia do Núcleo ampliação 500x ataque nital 2%



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Figura 11 – Metalografia do Núcleo ampliação 1000x ataque nital 2%



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Abaixo a Figura 12 análise metalográfica da camada com ampliação de 1000x e ataque nital de 2%.

Figura 12 – Análise metalográfica da camada ampliação 1000x



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Gabriel, 2026)

Como esperado observa-se predominantemente uma microestrutura composta por martensita proveniente do processo de tempera essa martensita podemos notar no formato de ripas, as áreas brancas correspondem a austenita retida.(Miyahara e colab., 2023)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo avaliar a influência do tempo e da temperatura de revenimento no aço SAE 4122, buscando identificar oportunidades de redução do tempo de processamento sem comprometer os requisitos metalúrgicos exigidos para aplicação em componentes automotivos. A partir dos ensaios realizados, foi possível verificar que a otimização dos parâmetros de revenimento proporcionou ganhos consideráveis no tempo de processamento chegando a 44% pelo fato de antes do estudo o processo de revenimento ser realizado em 180 minutos agora tem uma capacidade de realizar em 100 minutos, isso nos traz um aumento significativo da capacidade produtiva. Em ambiente industrial, essa redução possibilita maior disponibilidade do forno para novos ciclos, aumentando a capacidade produtiva e reduzindo o consumo energético por carga processada.

Os resultados demonstraram que a combinação entre pré-aquecimento e redução do tempo de permanência no revenimento permitiu atender às especificações de dureza e demais requisitos de qualidade estabelecidos para o processo. Além disso, as análises metalográficas

confirmaram a manutenção das características microestruturais esperadas para o material após o tratamento térmico, evidenciando que a proposta de otimização não comprometeu a integridade metalúrgica das amostras avaliadas.

Como principal contribuição, o estudo demonstrou a viabilidade técnica de reduzir o tempo total do processo de revenimento, possibilitando maior eficiência operacional e melhor aproveitamento da capacidade produtiva da linha de tratamento térmico. Os resultados obtidos reforçam a importância da análise experimental dos parâmetros de processo como ferramenta para a melhoria contínua dos sistemas de manufatura.

Como limitação, destaca-se que os ensaios foram conduzidos em escala laboratorial, utilizando forno tipo mufla para simular as condições industriais. Dessa forma, recomenda-se a realização de testes em escala produtiva para validação definitiva da proposta, bem como estudos futuros que avaliem o impacto da otimização do revenimento em propriedades como resistência à fadiga, desgaste e desempenho em serviço dos componentes tratados.

## REFERÊNCIAS

ABRAHAM, George K. **The Effect of an Encapsulated Specimen's Mounting Material on Its Rockwell Hardness Test Results**. *Metallography, Microstructure, and Analysis* 2013 2:6, v. 2, n. 6, p. 378–382, 24 Out 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13632-013-0104-6>>. Acesso em: 14 maio 2026.

**AÇOS E FERROS FUNDIDOS** (V. Chiaverini) | PDF. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/17649502/ACOS-E-FERROS-FUNDIDOS-V-Chiaverini>>. Acesso em: 29 maio 2026.

ALMEIDA SILVA, Miguel e BEZERRA DOS SANTOS, Lucas e CATARINA LIMA DA SILVA, Ruthilene. **A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE METALOGRÁFICA NO ENSINO TÉCNICO E PROFISSIONAL DA MECÂNICA**. [S.d.]. Acesso em: 15 maio 2026.

BAALI, Selma e BENARIOUA, Younes e MAZOUZ, Aboubaker Essaddiq. **An Experimental Study of the Influence of Carburizing Treatment Holding Time on the Structure and Hardness of 16NC6 Steel**. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 13, n. 2, p. 10478–10482, 2 Abr 2023. Disponível em: <<https://www.etasr.com/index.php/ETASR/article/view/5684>>. Acesso em: 29 maio 2026.

BRIGNOLI, Vinicius Luis. **Avaliação da Influência da Temperatura de Austenitização na Têmpera por Indução Sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço SAE 4140 Aplicado na Fabricação de Fixadores Automotivos**. 9 Jul 2025a. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266707>>. Acesso em: 30 maio 2026.

BRIGNOLI, Vinicius Luis. **Avaliação da Influência da Temperatura de Austenitização na Têmpera por Indução Sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas do Aço SAE**

**4140 Aplicado na Fabricação de Fixadores Automotivos.** 9 Jul 2025b. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/266707>>. Acesso em: 30 maio 2026.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS-UNIS/MG ENGENHARIA  
MECÂNICA LUÍS FERNANDO ARAÚJO SANTOS **ESTUDO COMPARATIVO DE APLICABILIDADE ENTRE OS AÇOS AISI O1 (VND) E AISI D6 (VC 131) ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DA DUREZA VARGINHA 2022.** [S.d.]. Acesso em: 14 maio 2026.

CLARK, Andrew D. e colab. **Comparison of Austempering and Quench-and-Tempering Processes for Carburized Automotive Steels.** SAE International Journal of Materials and Manufacturing, v. 6, n. 2, p. 146–153, 15 Abr 2013. Disponível em: <<https://saemobilus.sae.org/articles/comparison-austempering-quench-tempering-processes-carburized-automotive-steels-2013-01-0173>>. Acesso em: 29 maio 2026.

DE, Renata e colab. **Estudo da distorção por têmpera de placas estampadas dos aços SAE 1050 e SAE 4140.** 13 Dez 2023. Disponível em: <<https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/30878>>. Acesso em: 30 maio 2026.

DIAS, Lorena Aparecida Oliveira. **Aplicação de ferramentas da qualidade no laboratório de Mecânica e Ciência dos Materiais de uma instituição de ensino superior.** 21 Jun 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39377>>. Acesso em: 30 maio 2026.

HUA, Tao e colab. **Residual stress evolution enhanced martensite phase transition and texture development in cryogenic-tempered WC-Co ultra-coarse grained cemented carbide.** Materials Science and Engineering: A, v. 834, p. 142592, 17 Fev 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509322000016>>. Acesso em: 23 abr 2026.

KLIMEŠ, Martin e colab. **Process robustness in reduced-time vacuum carburizing of automotive gear steels.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2026, p. 1–13, 30 Abr 2026. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-026-18226-y>>. Acesso em: 27 maio 2026.

LI, Qingliang e colab. **Low-Temperature Tempering to Tailor Microstructure, Mechanical and Contact Fatigue Performance in the Carburized Layer of an Alloy Steel for Heavy-Duty Gears.** Metals 2025, Vol. 15, Page 934, v. 15, n. 9, p. 934, 22 Ago 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/15/9/934/htm>>. Acesso em: 29 maio 2026.

MEDEIROS, Vinícius e DANTAS, De Oliveira. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS.** [S.d.]. Acesso em: 15 maio 2026.

MIRANDA, Guilherme Pires Carneiro De e FERNANDES, Daniel de Almeida. **CONTROLE DE TEMPERATURA DE UM FORNO MUFLA.** 27 Out 2019. Acesso em: 14 maio 2026.

MIYAHARA, Bryan e SILVA, Moraes e PAULO, São. **Comparação da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço sae 4140 submetido a tempera e revenimento convencional e por indução por meio de uma simulação por dilatométrica.** . [S.l.]: Universidade Presbiteriana Mackenzie. Disponível em:

<<https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/33366>>. Acesso em: 30 maio 2026. , 3 Ago 2023

SCHEUER, Cristiano José e CARDOSO, Rodrigo Perito e BRUNATTO, Silvio Francisco. **History, evolution, and current state of carburizing treatment on martensitic stainless steels.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2025 141:1, v. 141, n. 1, p. 141–170, 17 Out 2025. Disponível em:

<<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-16701-6>>. Acesso em: 23 abr 2026.

SOUZA, Victor Barbosa De e colab. **INFLUÊNCIA DO REVENIMENTO NA DUREZA E NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO SAE 4340.** 75º Congresso Anual da ABM, v. 75, n. 75, p. 3311–3324, 29 Nov 2022. Disponível em: <<http://abmproceedings.com.br/pt-br/article/influncia-do-revenimento-na-dureza-e-na-microestrutura-de-um-ao-sae-4340-1>>. Acesso em: 29 maio 2026.

ŠPURO, Peter e colab. **Comparison of Residual Stresses in Tools Used in the Automotive Industry: Conventional vs. Innovative Heat Treatment for Cost-Effectiveness and Efficiency.** Transportation Research Procedia, v. 93, p. 471–476, 1 Jan 2026. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146525008452>>. Acesso em: 23 abr 2026.

TONELLI, Lavinia. **Revealing the Hierarchical Microstructure of Innovative Additively Manufactured Metal Parts with Conventional Light Microscopy.** Metallography, Microstructure, and Analysis 2021 10:2, v. 10, n. 2, p. 278–282, 29 Mar 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13632-021-00721-1>>. Acesso em: 14 maio 2026.