

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LÍVIA REGINA NASCIMENTO RIBEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS TRATAMENTOS
TÉRMICOS DE RECOZIMENTO E TÊMPERA DO AÇO SAE 1045**

BELO HORIZONTE

2019

LÍVIA REGINA NASCIMENTO RIBEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS TRATAMENTOS
TÉRMICOS DE RECOZIMENTO E TÊMPERA DO AÇO SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2019

LÍVIA REGINA NASCIMENTO RIBEIRO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE EXPERIMENTAL DOS TRATAMENTOS
TÉRMICOS DE RECOZIMENTO E TÊMPERA DO AÇO SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Profa.: Dra. Aline Silva Magalhães

Profa.: Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof.: Dr. Leonardo Neves

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me deu forças para persistir na busca pelo conhecimento.

A minha família que me deu o suporte necessário durante toda a minha vida.

Ao Professor Dr. Wellington Lopes, por seu apoio, competência e atenção, meus sinceros agradecimentos.

A equipe da Sixpro pela orientação e ajuda na elaboração de toda a simulação computacional.

Agradeço também as professoras: Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pela indicação da empresa para aquisição do Aço, Aline Silva Magalhães por se dispor a ensinar e auxiliar na elaboração do trabalho, a todos os amigos que me cederam materiais, equipamentos e, em especial a Izabella Cristina Saldanha Gomes, pelo incentivo e ajuda no desenvolvimento desse estudo.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por fornecer a estrutura necessária e, também, a oportunidade de aprender e crescer pessoal e profissionalmente.

RESUMO

O tratamento térmico dos aços é um processo muito utilizado pelo homem que permite o domínio dos materiais e suas propriedades para fabricação e desenvolvimento de novos produtos. A simulação computacional, por sua vez, é uma ferramenta capaz de prever resultados práticos, a partir de informações reais de processo, que poupa gastos excessivos com material, energia, horas de trabalho, retrabalhos e, no entanto, é pouco utilizada por profissionais da área de tratamento térmico. Esse estudo tem por objetivo comparar os resultados práticos, de microestrutura e dureza do aço SAE 1045 após tratamentos térmicos de recozimento, têmpera em óleo e água, com os resultados obtidos via simulação computacional e analisar a eficiência dos softwares JMatPro e QForm na previsão dos resultados. Para isso, três amostras (de cada condição) foram submetidas a temperatura de 850°C e tempos de encharque de 1h, 16 min e 10 min para realização dos tratamentos térmicos de recozimento, têmpera em óleo e água, respectivamente. Os parâmetros do processo prático: temperatura inicial, tamanho de grão, tempo e meio de resfriamento foram inseridos nos softwares JMatPro e QForm para possibilitar a realização dos cálculos numéricos, a plotagem e análise dos resultados da simulação computacional. Como resultados, identificou-se para simulação computacional do recozimento a formação de aproximadamente 37% de ferrita pró-eutetóide, 63% de perlita e dureza equivalente a 158HV, enquanto na prática identificou-se a formação de 42% de ferrita pró-eutetóide, 58% de perlita e dureza equivalente a 157HV. A comparação dos resultados relativos aos constituintes formados no processo de têmpera em óleo não pode ser realizada, pois as fotomicrografias obtidas em prática não revelaram de forma expressiva os constituintes. Entretanto, foi possível comparar os resultados de dureza, obtendo-se o valor de 366 HV com a simulação computacional e 270 HV como resultado prático. Na simulação computacional do processo de têmpera em água identificou-se a formação de aproximadamente 97% de martensita e porcentagens inferiores a 1 dos constituintes austenita, ferrita, perlita e bainita. Já na prática foi possível identificar de forma qualitativa a predominância do constituinte martensita em toda a extensão da amostra. Desse modo, a simulação computacional se mostrou uma ferramenta eficaz para determinar tendências de resultados que garante economia de tempo, material, energia e retrabalhos.

Palavras-chave: tratamento térmico, simulação computacional, aço SAE 1045, microestrutura, dureza.

ABSTRACT

Heat treatment of steels is a process used to control the properties and the development of materials and new products. Computer simulation, is a tool capable to predicting practical results from real processes informations, which saves excessive costs on material, energy, working hours and rework, but is little used by heat treatment industries. This study aims to compare the practical, microstructure and hardness results of SAE 1045 steel after annealing, oil and water quench heat treatment, with data obtained by computer simulation and to analyze the efficiency of JMatPro and QForm softwares in predicting the results. For this purpose, three samples (from each condition) were submitted to heating at 850 ° C and soaking times of 1h, 16 min and 10 min to perform the annealing, oil and water tempering treatments, respectively. The practical process parameters: initial temperature, grain size, time and process cooling were setup up into the JMatPro and QForm softwares to enable numerical calculations, plotting and analysis of computational simulation results. The results by computer annealing simulation indicated that the formation of approximately 37% of pro-eutectoid ferrite, 63% of perlite and hardness equivalent to 158HV, while in practice results detected the formation of 42% of pro-eutectoid ferrite, 58% perlite and hardness equivalent to 157HV. The comparison of the results related to the constituents formed in the oil quenching process cannot be performed because the photomicrographs obtained in practice did not expressively reveal all constituents. However, it was possible to compare the hardness results, obtaining the value of 366 HV with the computer simulation and 270 HV as a practical result. The computer simulation by quenching process in water was identified the formation of approximately 97% of martensite and austenite, ferrite, perlite and bainite. In practice it was possible to identify qualitatively the predominance of the martensite constituent throughout the sample. In this way, computer simulations have proven to be an effective tool for determining outcome trends that ensures time, material, energy and rework savings.

Keywords: heat treatment, computer simulation, SAE 1045 steel, microstructure, hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Posicionamento dos átomos de Fe na estrutura cristalina dos aços.....	15
Figura 2 - Diagrama de Fases	16
Figura 3 – Transformação em função do tempo.....	17
Figura 4 – Diagrama TTT.....	17
Figura 5 – Diagrama TRC	18
Figura 6 - Transformação microestrutural dos aços hipoeutetóide	20
Figura 7 – Transformações microestruturais da têmpera	21
Figura 8 - Metodologia abordada	28
Figura 9 - Preparação da amostra para análise microestrutural e medição de dureza.....	30
Figura 10 – Contornos de perlita utilizados como aproximação do tamanho de grão austenítico	31
Figura 11 - Determinação da porcentagem de perlita.....	32
Figura 12 - Interface do JMatPro.....	33
Figura 13 – Microestrutura do aço SAE 1045 em sua condição inicial	36
Figura 14 - Dureza inicial do aço SAE 1045.....	36
Figura 15 - Comportamento do Aço SAE 1045 durante recozimento	37
Figura 16 - Transformações no recozimento a 758°C.....	38
Figura 17 - Microestrutura da amostra R1 após recozimento com ampliações distintas.	39
Figura 18 - Microestrutura da amostra R2 após recozimento com ampliações distintas.	39
Figura 19 - Microestrutura da amostra R3 após recozimento com ampliações distintas.	39
Figura 20 - Porcentagem de Perlita após recozimento	40
Figura 21 - Dureza do Aço SAE 1045 pós-recozimento	41
Figura 22 – Comportamento do Aço SAE 1045 durante a têmpera.....	42
Figura 23 - Pontos de controle.....	43
Figura 24 – Transformações da têmpera em óleo ao longo da peça.....	44
Figura 25 - Microestrutura da amostra T1 após têmpera em óleo com ampliações distintas...45	
Figura 26 - Microestrutura da amostra T2 após têmpera em óleo com ampliações distintas...45	
Figura 27 - Microestrutura da amostra T3 após têmpera em óleo com ampliações distintas...45	
Figura 28 - Dureza das amostras de Aço SAE 1045 temperadas em óleo	46
Figura 29 - Microestrutura da base da amostra Tb1 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	47

Figura 30 - Microestrutura da base da amostra Tb2 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	47
Figura 31 - Microestrutura da base da amostra Tb3 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	47
Figura 32 - Microestrutura da lateral da amostra Tt1 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	48
Figura 33 - Microestrutura da lateral da amostra Tt2 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	48
Figura 34 - Microestrutura da lateral da amostra Tt3 após têmpera em água, com ampliações distintas.....	48
Figura 35 – Constituintes presentes à 30°C após têmpera em água	49
Figura 36 - Dureza das amostras após têmpera em água.....	50
Figura 37 - Dureza das amostras em sua condição inicial e após tratamentos dérmicos de recozimento, têmpera em óleo e água.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Aço SAE 1045 (1064 Kg)	29
Tabela 2 - Dados de Entrada QForm	34
Tabela 3 -Análise de composição química do aço SAE 1045 por espectroscopia de emissão óptica.	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivos Gerais	13
2.2	Objetivos Específicos.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Tratamentos Térmicos	14
3.1.1	<i>Diagramas TTT e TRC</i>	<i>16</i>
3.1.2	<i>Recozimento</i>	<i>18</i>
3.1.3	<i>Têmpera</i>	<i>20</i>
3.2	Simulação Numérica e o Método dos Elementos Finitos	22
3.2.1	<i>Softwares: Solid Works, JMatPro e QForm.....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Teoria do modelo de Jhonson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK).....</i>	<i>25</i>
3.2.3	<i>Simulação numérica e previsão de resultados.....</i>	<i>26</i>
4	MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1	Material	28
4.2	Métodos	29
4.2.1	<i>Composição Química.....</i>	<i>29</i>
4.2.2	<i>Tratamentos térmicos</i>	<i>29</i>
4.2.2.1	<i>Recozimento.....</i>	<i>29</i>
4.2.2.2	<i>Têmpera em Óleo</i>	<i>29</i>
4.2.2.3	<i>Tempera em Água.....</i>	<i>29</i>
4.2.3	<i>Análise Microestrutural</i>	<i>30</i>
4.2.4	<i>Diâmetro médio de grão</i>	<i>31</i>
4.2.5	<i>Porcentagem de fases</i>	<i>31</i>
4.2.6	<i>Microdureza Vickers.....</i>	<i>32</i>
4.2.7	<i>Simulação Numérica</i>	<i>33</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Composição Química.....	35
5.2	Condição Inicial	35
5.3	Recozimento	37
5.4	Têmpera.....	42

6	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

De forma acidental, há milhares de anos, a humanidade descobriu fenômenos relacionados ao tratamento térmico. Relatos, anteriores à vinda de Cristo, descrevem que os guerreiros resfriavam bruscamente o metal após aquecimento, a fim de aumentar a dureza e resistência de suas espadas e armaduras para serem bem-sucedidos nas batalhas. Essas percepções práticas, ao longo de várias gerações, permitiram que o homem adquirisse maior domínio do calor, dos materiais, das propriedades e dos processos de fabricação, tornando-o capaz de desenvolver produtos segundo suas necessidades (VALE, 2011).

No passado, por falta de tecnologia de instrumentação e conhecimento metalúrgico, não existia uma preocupação com o controle preciso de temperatura durante o tratamento térmico. Entretanto, a crise energética de 1970 e a superprodução siderúrgica mundial forçaram a otimização de processos para reduzir custo e aumentar a competitividade. Assim, equipamentos mais potentes, com recursos automáticos e sistemas avançados foram desenvolvidos com essa finalidade. A simulação computacional é um outro recurso poderoso capaz de promover economia no processo produtivo (GORNI, 2019).

A simulação permite a criação de modelos representativos de um processo real e a interpretação dos comportamentos desenvolvidos no material mediante às condições nas quais ele foi submetido. Existem empresas especializadas em analisar a demanda industrial e definir a abordagem adequada para problemas como a previsão de ciclos térmicos, a realização de processos termoquímicos, a variação de microestruturas, a geração de tensões residuais e distorções resultantes em componentes tratados (LOBENWEIN, 2016).

Contudo, esses recursos são pouco aplicados no setor de tratamento térmico. Segundo Lobenwein (2016) a indústria conhece muito pouco sobre as contribuições que a simulação pode oferecer. Silva (2015) comenta que fatores como o alto custo de aquisição dos softwares, a escassez de mão de obra qualificada para a condução das simulações e as tentativas ineficazes de implementação na indústria, fizeram com as tecnologias das indústrias sul-americanas se tornassem atrasadas em relação as demais.

Essa resistência apresentada pelas indústrias à simulação também está relacionada a cultura das empresas em manter processos convencionais e a falta de compreensão das ferramentas dos softwares. É importante entender que a simulação não substituirá os profissionais que realizam

testes e desenvolvem processos, pois ela não é capaz de estabelecer estratégias e solucionar problemas. A simulação atuará como mais um recurso gerador de resultados, a partir de dados de entrada, que possibilita, por meio de análises críticas de profissionais da área, a definição de condições mais assertivas para serem testadas em prática, evitando assim, gastos excessivos com material, energia, horas de trabalho e retrabalhos (SILVA, 2015).

Esse trabalho teve por objetivo investigar a microestrutura e a dureza do aço SAE 1045 pós tratamentos térmicos de recozimento e têmpera, por meio de simulação computacional e da prática em laboratório, a fim de comparar os resultados em ambos os casos e avaliar a eficiência dos softwares JMatPro e QForm em prever os resultados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Investigar a evolução microestrutural e a dureza Vickers do aço SAE 1045 de modo experimental e por simulação numérica com uso dos softwares JMatPro e QForm após a execução dos tratamentos térmicos de recozimento, têmpera em óleo e água.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a resistência mecânica com uso de ensaios de dureza Vickers e aspectos microestruturais do aço SAE 1045 antes e após a execução dos tratamentos térmicos de recozimento e têmpera em óleo e água;
- Realizar a simulação numérica da evolução da dureza Vickers e da microestrutura do aço SAE 1045 após a execução dos tratamentos térmicos de recozimento, têmpera em óleo e água;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente e por simulação numérica;
- Avaliar a eficiência dos softwares JMatPro e QForm em prever os resultados práticos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamentos Térmicos

O tratamento térmico é definido por muitos autores como o processo de aquecimento e resfriamento controlado de um metal, ou seja, sob condições de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento determinadas previamente. Esse ciclo térmico, que envolve aquecimento e resfriamento, possibilita que o metal adquira propriedades necessárias à sua aplicação, tais como: diminuição ou aumento de dureza, aumento de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, melhoria na usinabilidade, resistência ao desgaste, calor, à corrosão, modificação de propriedades elétricas e magnéticas (TRINDADE, 2017).

Ainda que o tratamento térmico seja realizado propositalmente, também existem ocasiões onde ele acontece durante o processo de fabricação, de forma não intencional. Operações de soldagem são exemplos desses casos, onde alterações significativas nas propriedades de uma peça podem ser provocadas (GERDAU, 2019).

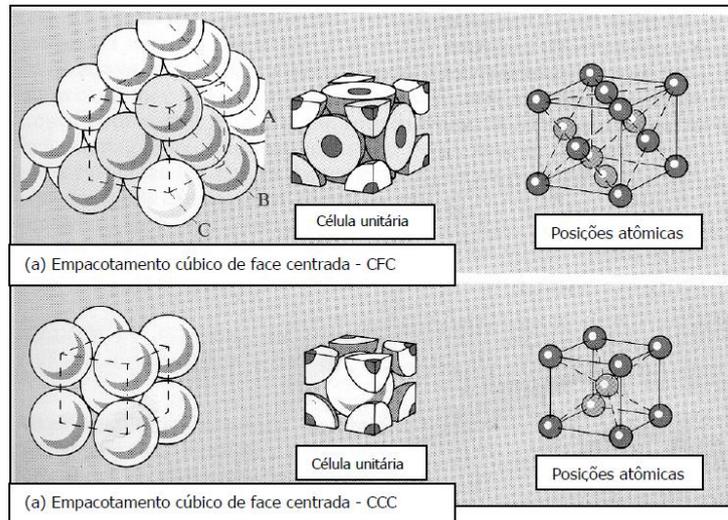
Nos aços, a realização do tratamento térmico produz grandes benefícios, pois este material responde bem aos ciclos térmicos. Um mesmo aço pode se comportar de formas completamente diferentes dependendo do tratamento térmico realizado. Quando o objetivo é aliviar tensões residuais, elevar a tenacidade ou refinar o grão do material selecionam-se tratamentos térmicos capazes de reduzir a dureza do material, normalização e recozimento são alguns exemplos. Se, por outro lado, deseja-se aumentar resistência à fadiga, a fluência ou ao desgaste, o caminho é escolher tratamentos térmicos que aumentem a dureza do material, como por exemplo, têmpera e revenimento (GERDAU, 2019).

Para atingir as propriedades almejadas, além de selecionar o tratamento térmico adequado, também é necessário entender sobre a composição química do material e sua microestrutura (GERDAU, 2019). São as modificações estruturais que ocorrem durante o resfriamento que alteram de propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2003).

O aço é uma liga metálica composta, predominantemente, de átomos de ferro e carbono com teor e posição variáveis no retículo cristalino (CHIAVERINI, 2003). A figura 1 representa as estruturas assumidas pelo ferro na rede cristalina. Dependendo de sua alotropia será possível

manter em solução determinadas quantidades de carbono, átomo que ocupa os interstícios da célula unitária (GERDAU, 2019).

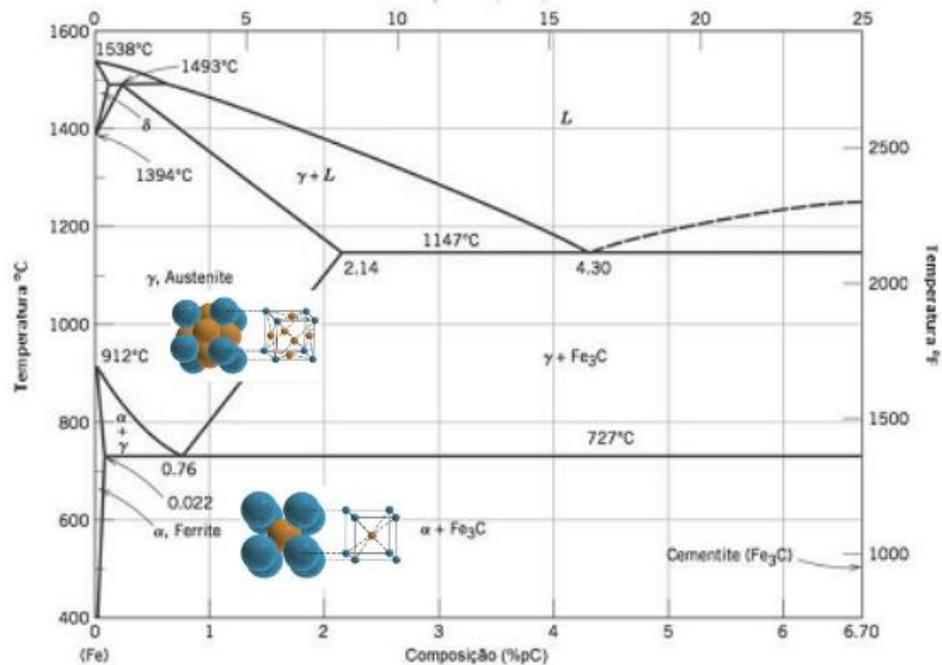
Figura 1- Posicionamento dos átomos de Fe na estrutura cristalina dos aços



Fonte: Adaptado de GERDAU, 2019.

Os aços possuem como constituintes básicos a ferrita, austenita e cementita. A ferrita ou ferro alfa apresenta estrutura cristalina cúbica de corpos centrado e mantém em solução a porcentagem máxima de carbono igual a 0,025. Ela apresenta propriedades mecânicas de dureza, aproximadamente 90 HV, e resistência muito baixas, porém possui elevada ductilidade e conformabilidade). Já a forma alotrópica gama ou austenita apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada e possui teor máximo de carbono igual a 2%. Por sua vez, a cementita ou Fe_3C possui estrutura cristalina complexa, porcentagem máxima de carbono igual a 6,67 e dureza de aproximadamente 1050 HV (COLPAERT, 2008). A figura 2 apresenta o diagrama de fases ferro carbono e representações da estrutura cristalina das fases austenita e ferrita.

Figura 2 - Diagrama de Fases



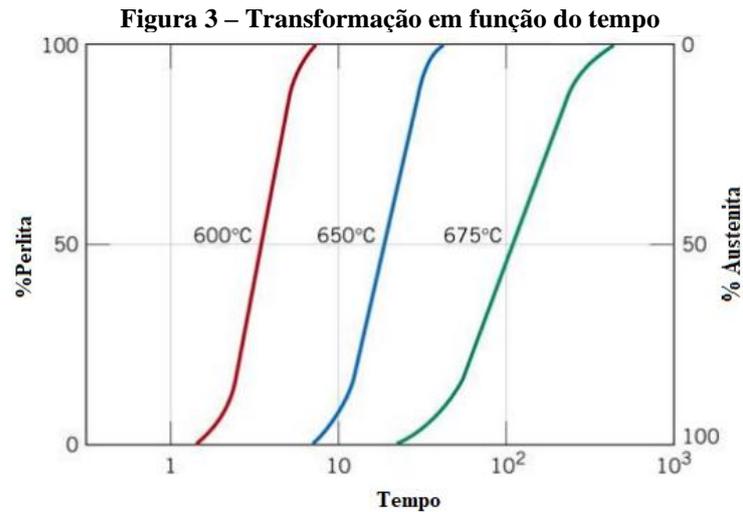
Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2002.

Praticamente todos os tratamentos térmicos feitos em aços são baseados na transformação do ferro em sua forma alotrópica grama para a estrutura alfa. Essa transformação permite o endurecimento e resistência ao desgaste nos aços (MACHADO, 2002). Nesse trabalho, serão abordados os tratamentos térmicos de recozimento e têmpera.

3.1.1 Diagramas TTT e TRC

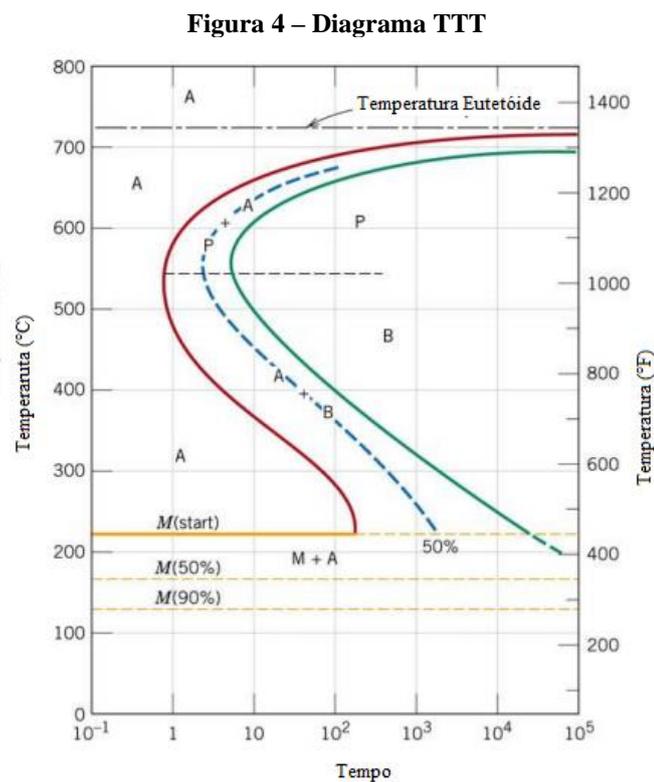
O método da “transformação isotérmica” foi desenvolvido pelos pesquisadores Davenport e Bain com o intuito de verificar o tempo necessário para início e término das transformações que ocorrem no aço, partindo da fase austenita, quando este é resfriado e mantido sob uma temperatura constante (CALLISTER, 2006).

A figura 3 mostra a curva de transformação isotérmica da austenita em perlita. A partir dela pode-se determinar o tempo necessário à transformação para uma temperatura específica.



Fonte: CALLISTER, 2006.

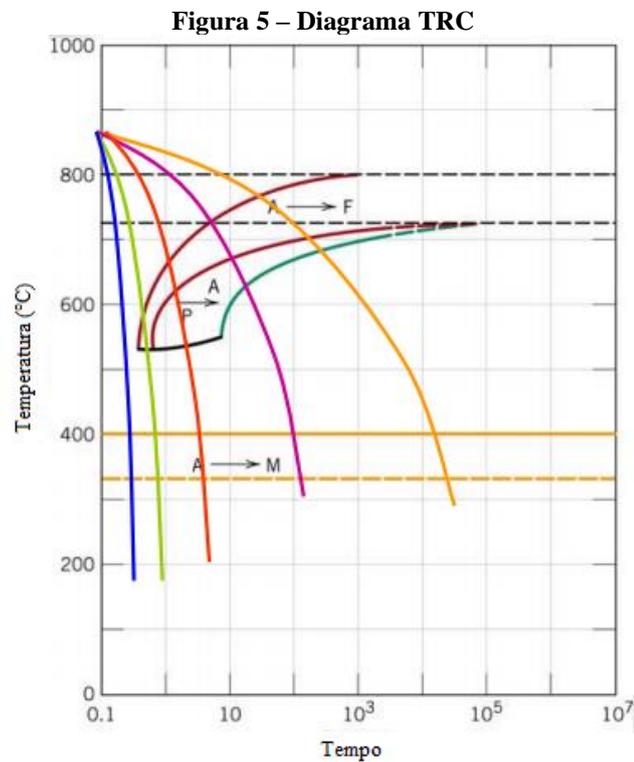
Realizando o mesmo experimento para temperaturas distintas, pode-se criar o diagrama de transformação isotérmica de um aço, apresentado na figura 4.



Fonte: CALLISTER, 2006.

Esse diagrama recebe o nome de Diagrama TTT (transformação-temperatura-tempo). Com ele é possível extrair informações a respeito das fases que poderão se formar em dada condição de resfriamento considerando temperatura e tempo (CALLISTER, 2006).

Em geral, os tratamentos térmicos não são realizados a uma temperatura constante, o resfriamento ocorre de modo contínuo. Assim, fez-se necessário a elaboração do diagrama TRC (transformação com resfriamento contínuo), apresentado na figura 5.



Fonte: CALLISTER, 2006.

Como pode ser observado, o diagrama TRC apresenta taxas de resfriamento, as quais o material pode ser submetido para alcançar o microconstituente desejado (CALLISTER, 2006).

3.1.2 *Recozimento*

Durante processos de conformação mecânica, tais como: laminação, trefilação, forjamento e outros, para fabricação de barras e tarugos, por exemplo, o aço é deformado plasticamente a frio e sofre um fenômeno denominado encruamento. Esse efeito provoca aumento da resistência mecânica, tamanho de grão e dureza no metal. Mas também, ocasiona a diminuição da ductilidade do material (SMITH, 2010).

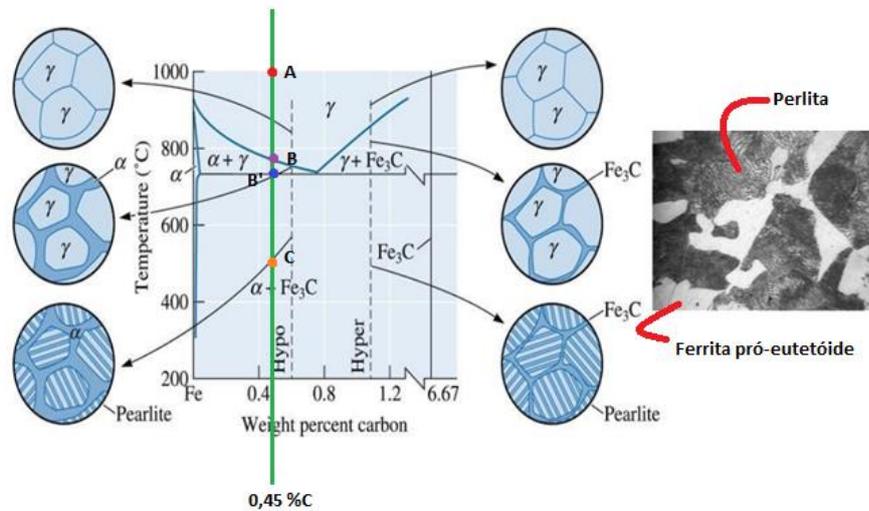
Todas essas mudanças de propriedades devem-se às alterações nas imperfeições da rede cristalina: lacunas, discordâncias e outras. Para se retornar à condição não deformada o material

precisa ser recozido, ou seja, é necessário que ele seja aquecido a uma dada temperatura e tempo (CHIAVERINI, 2003).

Sendo assim, o objetivo do recozimento, de uma forma geral, é garantir ductilidade a peça que se comportaria como material frágil caso o tratamento não fosse realizado (GERDAU, 2019). Existem três estágios do recozimento durante o aquecimento: recuperação, recristalização e crescimento de grão. No primeiro estágio, recuperação ou recozimento para alívio de tensões, ocorre o rearranjo das discordâncias para se atingir configurações mais estáveis. Esse fenômeno ocorre em baixas temperaturas e permite a redução das tensões geradas pelo encruamento no material. No estágio de recristalização, que ocorre a temperaturas mais elevadas, observa-se grande alteração da microestrutura do metal e modificação de propriedades mecânicas devido ao fenômeno de nucleação. Nessa etapa ocorre o surgimento de novos cristais que apresentam estrutura e composição química equivalente à dos grãos originais. No terceiro estágio, crescimento de grão, os grãos formados na etapa anterior aumentam de tamanho. Isso acontece por meio da absorção de grãos da vizinhança (SMITH, 2010).

O aço SAE 1045 possui 0,45% de teor de carbono e é classificado com hipoeutetóide. Para se realizar o recozimento desse aço é necessário, primeiramente, aquecer o material até uma temperatura que garanta sua total austenitização. Como pode ser visto na figura 3, partindo da temperatura igual a 1000°C (ponto A do diagrama) o aço está completamente austenitizado. Ao resfriá-lo até a temperatura de aproximadamente 800°C (ponto B do diagrama) duas fases irão coexistir: austenita e ferrita. À medida que a temperatura diminui grãos de ferrita pró eutetóide com dimensões reduzidas irão se nuclear e crescer nos contornos de grão da austenita, por essa região ser energeticamente favorável. No ponto B' a austenita atinge composição eutetóide e origina a perlita, constituinte formado pelas fases ferrita e cementita. No ponto C, o material apresentará microestrutura semelhante à representada imagem da figura 6 (FEITAS, 2014).

Figura 6 - Transformação microestrutural dos aços hipoeutetóide



Fonte: Adaptado de RUCHERT, 2019.

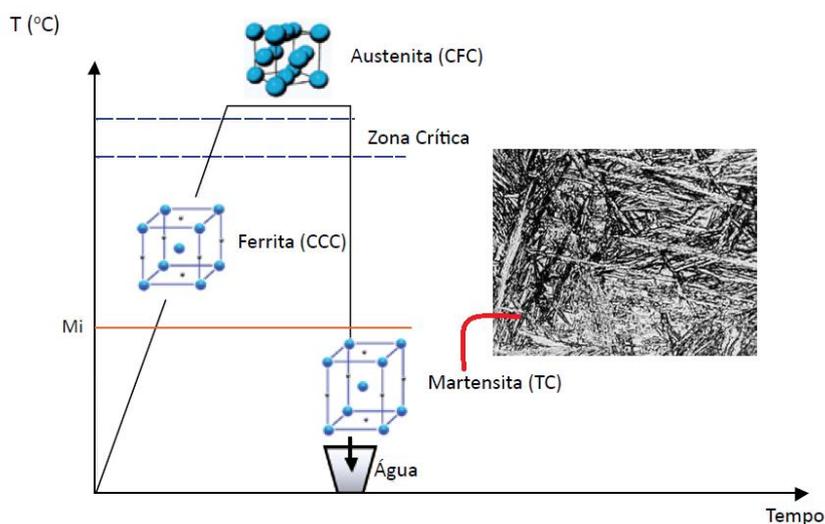
É importante ressaltar que o resfriamento deve acontecer lentamente dentro do forno, para que se obtenha perlita grossa de menor dureza e maior ductilidade (GERDAU, 2019).

Santos (2018) em seu estudo, realizou o recozimento aquecendo o aço até a temperatura de 860°C e mantendo-o nessa temperatura por duas horas. O resfriamento foi realizado dentro do forno a uma taxa de aproximadamente 50°C/h até atingir temperatura inferior a 500°C. Foi observado por meio de ensaios de compressão que o aço após recozimento apresentou maior deformação plástica do que em seu estado bruto laminado, evidenciando assim a eficiência do tratamento térmico.

3.1.3 *Têmpera*

O objetivo principal da têmpera é aumentar a dureza do material para que ele possa ser empregado em aplicações que exigem maior resistência mecânica. Desse modo, o aço deve ser aquecido até sua completa austenitização e resfriado bruscamente para causar a formação do constituinte martensita que é duro e frágil, como ilustrado na figura 7 (SILVA, 2010).

Figura 7 – Transformações microestruturais da têmpera



Fonte: Adaptado de GERDAU, 2019.

A velocidade de resfriamento é o principal fator a ser controlado nesse tratamento. Sendo assim, o meio de resfriamento deve ser muito bem selecionado levando-se em consideração o teor de carbono presente no aço, sua forma e dimensão. Os meios líquidos mais comuns são: água, óleo, água com sal e soluções poliméricas. Já os meios gasosos mais utilizados são: ar, hélio e argônio (SILVA, 2010).

Apesar do ganho de resistência mecânica a têmpera também provoca redução da ductilidade, tenacidade e surgimento de tensões internas. Nesse caso, é necessário fazer uso de outro tratamento térmico, denominado revenimento, para atenuar esses inconvenientes.

A explicação para o endurecimento do aço ao formar a martensita é a distorção do reticulado CCC (cúbico de corpo centrado) que origina o reticulado TCC (Tetragonal de corpo centrado) devido ao excesso de carbono. Ao resfriar bruscamente o metal não há tempo suficiente para a austenita se transformar em ferrita ou cementita. Sendo assim, o carbono excedente fica retido na estrutura martensítica, causando grande distorção e tensão na rede cristalina (GERDAU, 2019).

Trindade (2017) avaliou a influência do tempo de encharque de amostras de aço SAE 1045 na têmpera. Para isso, aqueceu todas as amostras até temperatura de 850°C, garantindo a austenitização, e resfriou-as em água após tempos de encharque de uma, duas, três, quatro e

cinco horas. Foi observado que o tempo de permanência no forno não influenciou na microestrutura formada, em todas as condições a estrutura martensítica foi alcançada. Todavia, a dureza aumentou em até 346% com a manutenção da temperatura das amostras no forno.

3.2 Simulação Numérica e o Método dos Elementos Finitos

A simulação computacional assume importância cada vez mais significativa como ferramenta de aquisição de conhecimento. Esse recurso, utilizado por profissionais de diversas áreas, tem a capacidade de identificar, formular e solucionar problemas ligados às atividades de projeto, operação, gerenciamento do trabalho e sistemas de produção de bens e serviços (GAVIRA, 2003).

Com o desenvolvimento e evolução dos microprocessadores a simulação virtual se tornou eficiente o bastante para ser utilizada industrialmente (SILVA, 2018). Mais do que nunca as organizações querem a garantia de que os investimentos produzirão os resultados esperados. Na área de conformação mecânica, modelos computacionais são bem aceitos e fornecem resultados muito próximos a realidade (MCHANNEY, 2009). Esses modelos são capazes de reproduzir e interpretar sistemas físicos por meio da separação de componentes básicos em elementos que representem a realidade. Dessa forma, é possível estudar o comportamento dos elementos de modo individual, sintetizar as soluções parciais e depois uni-las para o estudo de um sistema global (FONSECA, 2002).

Em alguns casos, a divisão dos elementos pode ser indefinida, sendo necessária a utilização de conceitos matemáticos de infinitésimos: equações diferenciais (FONSECA, 2002). A partir desse princípio surge o chamado: Método dos Elementos Finitos (MEF), definido como método matemático no qual um meio contínuo é discretizado (subdividido) em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por modelos matemáticos que permitam a obtenção dos resultados (LOTTI, 2006).

Para aplicação do MEF é necessário definir o objeto de pesquisa e desenhá-lo graficamente utilizando um software específico, AutoCAD e Solid Works são alguns exemplos. Então, o programa que contém o MEF irá subdividir o objeto criado em elementos finitos. Tais elementos representam coordenadas no espaço e podem assumir formatos variados, desde

polígonos simples em simulação 2D até tetraedros ou hexaedros no caso da simulação 3D (LOTTI, 2006).

Um elemento finito se conecta a outro por meio de um ponto ou nó. A função dos nós é passar as informações entre os elementos e a junção de vários elementos origina uma malha, arranjada em camadas bi ou tridimensionais (LOTTI, 2006). Os fenômenos físicos que ocorrem ao longo do tempo de processo, como deformação e transferência de calor, são calculados para cada nó, considerando a mútua influência entre esses em uma disposição matricial. Desse modo, a geometria do objeto de estudo deve ser bem representada por meio das malhas. Muitas vezes é necessário realizar o refinamento da malha em alguns pontos de maior complexidade de detalhe para garantir cálculos mais próximos à realidade. Nesses casos observam-se que o aumento no número de elementos provoca um aumento na quantidade de equações a serem conduzidas computacionalmente, assim como no tempo de simulação (SILVA, 2018).

No MEF também é necessário determinar as propriedades físicas e mecânicas de cada estrutura constituinte do modelo. O comportamento dos materiais mediante deformação pode provocar diversos fenômenos: elásticos, plásticos, elasto-plástico ou rígido (SILVA, 2018). No regime rígido considera-se que a geometria não sofre nenhum tipo de deformação e, portanto, nenhuma alteração dimensional. Modelos elásticos, por sua vez, são aqueles que sofrem deformações e, conseqüentemente, modificações dimensionais ao serem submetidos a esforços externos ou variações térmicas. Já os materiais plásticos podem se comportar de duas maneiras: caso o esforço externo resultar em uma tensão interna superior à tensão limite de escoamento a geometria do material irá se modificar e esse será deformado de modo permanente; se o esforço externo resultar em uma tensão interna inferior à tensão limite de escoamento o material se manterá rígido. Finalmente, o comportamento elasto-plástico, que considera simultaneamente deformações elásticas e plásticas ao calcular as variações dimensionais de uma geometria (SILVA, 2018).

Determinadas as propriedades, são feitas a aplicação das cargas necessárias e a análise dos resultados por profissionais da área (LOTTI, 2006).

3.2.1 Softwares: Solid Works, JMatPro e QForm

O Solid Works é um software de CAD 3D desenvolvido pela Solid Works Corporation que possibilita a elaboração de produtos e projetos de engenharia em vários setores (SOLIDWORKS, 2019).

O JMatPro® é um software de simulação que calcula uma ampla variedade de propriedades de materiais, tais como: equilíbrio de fase estável e metaestável, comportamento e propriedades de solidificação, propriedades mecânicas, termo físicas e físicas, transformações de fase e propriedades químicas (JMATPRO, 2019).

O QForm, desenvolvido pela empresa russa Quantor Form Ltd., é um software que permite a simulação 2D e 3D de processos de conformação massiva, tais como: forjamento, laminação, extrusão e tratamento térmico. O software utiliza de algoritmos de cálculos para prever dobramentos, refluxos, falta de preenchimento, assim como a distribuição de tensões e desgaste de ferramentas (QFORM, 2019).

O módulo QForm Heat Treatment, utilizado nesse trabalho, permite a previsão de propriedades, tais como dureza, resistência final, composição de fases, estado de tensão e a forma final dos detalhes da peça. O software também é capaz de estimar as tensões térmicas e a distorção no aquecimento e resfriamento dos detalhes, o que permite avaliar a probabilidade de rachaduras e determinar com mais precisão a forma final da peça forjada (QFORM, 2019).

Na literatura são encontrados, nos últimos cinco anos, muitos estudos que utilizaram o software QForm com finalidades diversas. A simulação como ferramenta para prever resultados de processos de conformação mecânica, tais como: extrusão, forjamento, estampagem, trefilação, laminação, e até mesmo a verificação da evolução microestrutural, deformação, distribuição de tensões para vários materiais: aço, alumínio e suas ligas, cobre, magnésio, titânio e suas ligas.

Abaixo foram listadas algumas das funcionalidades dos softwares de simulação na previsão de propriedades (MACKERLE, 2003).

- Determinação do campo de temperatura e sua distribuição com o tempo;

- Determinação da fração volumétrica, composição e propriedades físicas e mecânicas das fases formadas;
- Acompanhamento da evolução, controle e redução da magnitude das tensões internas e tensões residuais;
- Previsão do fluxo de calor e dos parâmetros que influenciam o comportamento do material durante resfriamento.
- Relaciona os parâmetros de processo e propriedades mecânicas do material tratado.

3.2.2 Teoria do modelo de Jhonson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK)

O modelo proposto por JMAK e utilizado nos cálculos do QForm parte do princípio de que processo de cristalização de matérias envolvem duas etapas: nucleação e crescimento de cristais. O fenômeno da transformação de fase acontece com o surgimento de embriões da nova fase. Esses embriões são arranjos aleatórios e transitórios de moléculas ou partículas, inerentes do processo de preparo ou formados devido a tratamentos térmicos específicos, com composições semelhantes às moléculas/partículas da nova fase (SANTOS, 2018).

Ao iniciar a mudança de fase, alguns desses embriões formados começam a crescer, adquirir estabilidade termodinâmica suficiente para não se dissolver e assim, atingir um tamanho crítico para evoluírem para a condição de núcleos. Nesse processo, o número de embriões diminui gradativamente com o passar do tempo devido a dois mecanismos: embriões que se transformam em núcleos e embriões que são absorvidos por núcleos em crescimento. Desta forma, a cristalização ocorre devido às aglomerações de núcleos em crescimento que é descrita por processos isotérmicos (equação 1) ou não-isotérmicos (equação 2) (SANTOS, 2018).

$$x = 1 - \exp[-(kt)^n] \quad (1)$$

$$T = T_0 + \phi t \quad (2)$$

Onde x é a fração de massa cristalizada após um tempo t , n o expoente de Avrami que depende do mecanismo de crescimento e dimensão do cristal, k a constante cinética, T_0 temperatura inicial e ϕ a taxa de aquecimento (SANTOS, 2018).

3.2.3 *Simulação numérica e previsão de resultados*

Nas duas últimas décadas, muitos dos processos de conformação mecânica e tratamento térmico foram simulados por métodos numéricos, especialmente pelos métodos de elementos finitos (MEF). Simular tais processos não é fácil, para isso é necessário conhecer várias áreas da engenharia, como mecânica dos fluidos, transferência de calor, metalurgia do resfriamento e solidificação, e também sobre implementação computacional de métodos numéricos (MACKERLE, 2003).

Smoljan (2006) apresenta em seu trabalho vários modelos matemáticos utilizados na previsão de resultados da simulação de processos de têmpera e revenimento. As equações para obtenção da curva de resfriamento envolvem parâmetros como: resistência térmica, coeficiente de transferência de calor, calor específico, coeficiente de condução de calor, densidade, capacidade térmica específica. Segundo o autor, as propriedades mecânicas do aço dependem diretamente de sua dureza. Assim, equações que relacionam a resistência ao escoamento, alongamento específico, redução da área, tenacidade, em função da dureza são apresentadas em seu trabalho.

A previsão da microestrutura é estimada, por meio de equações, baseando-se na composição química do aço, severidade do resfriamento, temperatura de austenitização, histórico do aço e no tempo $t_{8/5}$, que corresponde ao tempo necessário para o aço resfriar da temperatura de 800°C a 500°C (SMOLJAN, 2006).

Mesmo que existam métodos numéricos capazes de prever as propriedades mecânicas e microestruturais, em muitos casos, experimentos industriais devem ser realizados juntamente com a simulação para validar os modelos. Isso porque o mecanismo de transformação de fases não é totalmente compreendido. Geralmente, a influência interativa entre diferentes elementos de cada fase e temperatura de austenitização não são levados em consideração. Assim, erros no cálculo da transformação de fase podem ser grandes se um modelo se basear apenas no tamanho de grão da austenita anterior, na temperatura de austenitização e na composição elementar do aço (SMOLJAN, 2006).

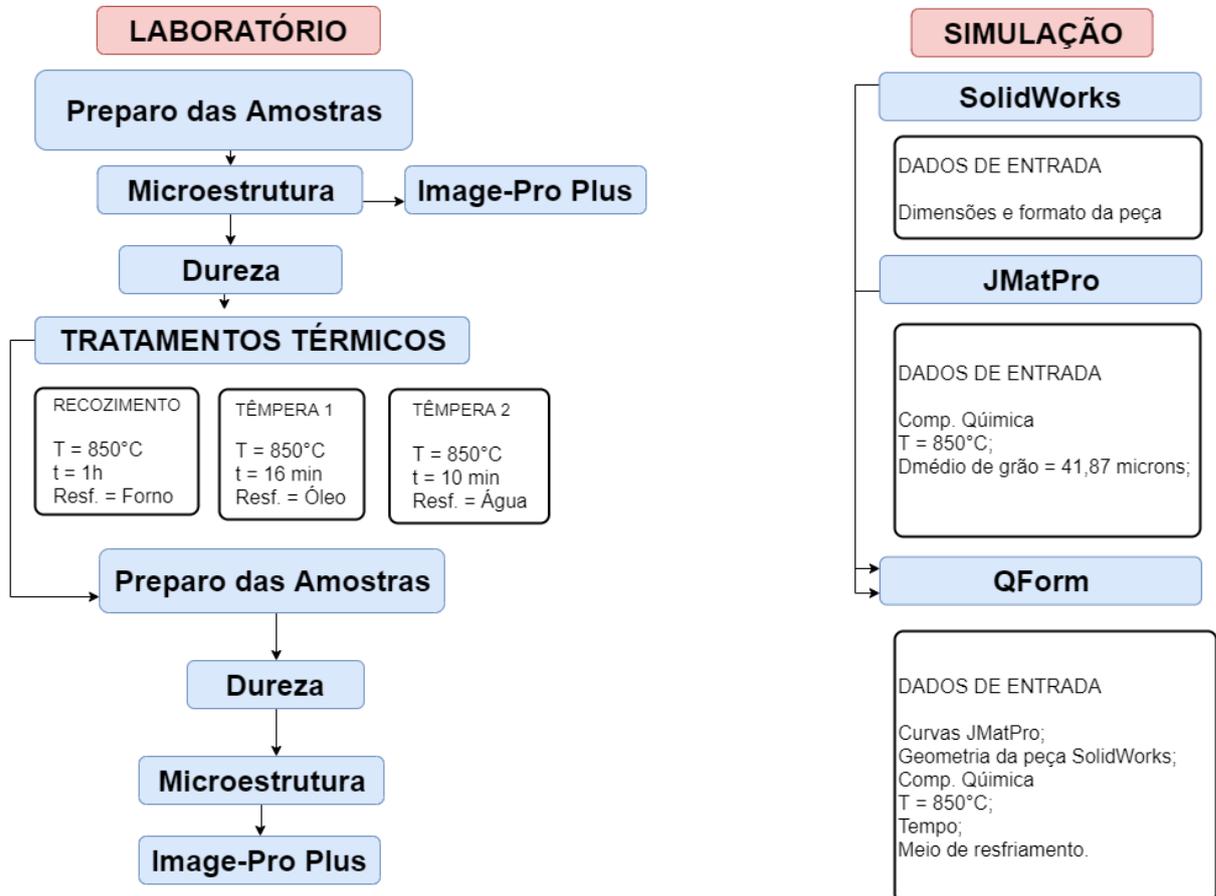
Ainda assim, a simulação é capaz de determinar muitos parâmetros físicos e químicos e proporcionar a economia de matéria-prima e energia ao otimizar os processos. Schaeffer (2005) avaliou em seu trabalho dois processos de forjamento: um a quente e outro a frio. No caso de

forjamento a quente, os resultados da simulação demonstraram que era possível forjar o componente estudado economizando cerca de 5% de material. No forjamento a frio o software foi capaz de prever defeitos no componente e possíveis falhas devido ao excesso de carga.

4 MATERIAL e MÉTODOS

A metodologia de pesquisa utilizada nesse trabalho está representada no fluxograma da figura 8 e será detalhada nas demais sessões.

Figura 8 - Metodologia abordada



Fonte: próprio autor.

4.1 Material

Os corpos de prova de aço SAE 1045 utilizados nos experimentos foram adquiridos da empresa Açomec Ferro e Aço e suas dimensões foram conferidas com paquímetro Mitutoyo Absolute resolução 0,01 mm. As amostras recozidas e temperadas em óleo apresentavam 1 polegada de diâmetro por 20 mm de altura, enquanto as amostras temperadas em água apresentavam 1 polegada de diâmetro por 12 mm de altura. A composição química do aço SAE 1045 está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química do Aço SAE 1045 (1064 Kg)

Elementos Químicos	Teor (%)
Carbono	0,45
Manganês	0,67
Silício	0,22
Enxofre	0,012
Fósforo	0,019

Fonte: Certificado de Qualidade Gerdau (2010).

4.2 Métodos

4.2.1 Composição Química

A fim de verificar se o certificado de qualidade, fornecido pela Gerdau, apresentava veracidade nos dados de composição química, foi realizada uma análise por espectroscopia de emissão ótica, equipamento da marca Spectrolab, modelo LAB LAVM 11.

4.2.2 Tratamentos térmicos

4.2.2.1 Recozimento

As três amostras submetidas ao tratamento térmico de recozimento foram colocadas no forno Magnus, à temperatura de 850°C e permaneceram nele por 1h. Passado o tempo de encharque o forno foi desligado e as amostras resfriaram em seu interior. Para a escolha da temperatura baseou-se nos artigos elaborados por Pereira (2018), Galvão (2011) e Souza (2012).

4.2.2.2 Têmpera em Óleo

As três amostras submetidas ao tratamento térmico de têmpera foram colocadas, individualmente no forno Magnus à temperatura de 850°C e permaneceram nele por 16 min. Passado o tempo de encharque as amostras foram resfriadas sob agitação leve em óleo mineral Temp 32 AD/1203, adquirido da empresa Ternec. A escolha do tempo de permanência no forno baseou-se na regra prática descrita na apostila Tratamento térmico dos aços: guia de aulas teóricas e práticas. Essa regra considera que um comprimento de 25 mm necessita de 20 min no forno para total austenitização.

4.2.2.3 Tempera em Água

As três amostras submetidas ao tratamento térmico de têmpera foram colocadas, individualmente, no forno Magnus à temperatura de 850°C e permaneceram nele por 10 min.

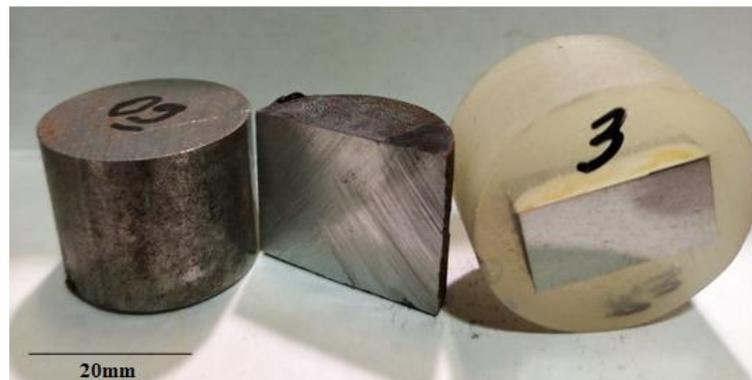
Passado o tempo de encharque as amostras foram resfriadas em água. Assim como na têmpera em óleo, a escolha do tempo de encharque baseou-se na regra prática descrita na apostila Tratamentos térmicos dos aços: guia de aulas teóricas e práticas, e a menor dimensão da amostra foi considerada nos cálculos.

4.2.3 *Análise Microestrutural*

O ensaio metalográfico permite a observação, com o auxílio do microscópio, da microestrutura de um material. Nesse ensaio pode se detectar as fases presentes, tamanho de grão, teor aproximado de carbono e a distribuição dos constituintes e inclusões (ROHDE, 2010).

Para a realização da análise microestrutural inicial e pós-tratamento térmico as amostras foram cortadas em direção longitudinal, embutidas com acrílico polimerizável em sua forma líquida e em pó, lixadas e atacadas quimicamente com uso do reativo químico Nital 3% (3mL de HNO₃ e 97mL de álcool etílico), como mostrado na figura 9.

Figura 9 - Preparação da amostra para análise microestrutural e medição de dureza



Fonte: próprio autor.

Nesse trabalho aplicou-se a técnica de lixamento manual com água em lixadeira/politriz Arotec Aropol 2V. Foram utilizadas lixas com granulometria de: 240, 320, 400 e 600 mesh, alterando-se a direção de 90 em 90° a cada lixa subsequente e polimento com pasta de diamante umidificada com álcool (granulometria de 3 e 9µm). O ataque químico foi executado com NITAL 3% v/v. Em seguida, as amostras foram observadas no microscópio Fortel.

4.2.4 Diâmetro médio de grão

Para determinação do diâmetro médio de grão utilizou-se o software Image Pro Plus 6.0. Nele foram inseridas 15 imagens com ampliação de 200X. Em seguida, determinou-se a área de 200 grãos e calculou-se o diâmetro médio do grão de acordo com a equação 3.

$$D = 2 \cdot \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5} \quad (3)$$

Essa equação faz a aproximação da área do grão como um círculo, sendo assim, D corresponde ao diâmetro médio de grão e A corresponde a área média calculada com os dados do software. Como o material obtido apresentava os constituintes ferrita e perlita, optou-se por determinar a o tamanho de grão austenítico aproximando-o da área das colônias de perlita. Para isso, foram escolhidas colônias grãos grandes e pequenas, bem reveladas, para garantir boa representatividade da amostra, como mostrado na figura 10.

Figura 10 – Contornos de perlita utilizados como aproximação do tamanho de grão austenítico



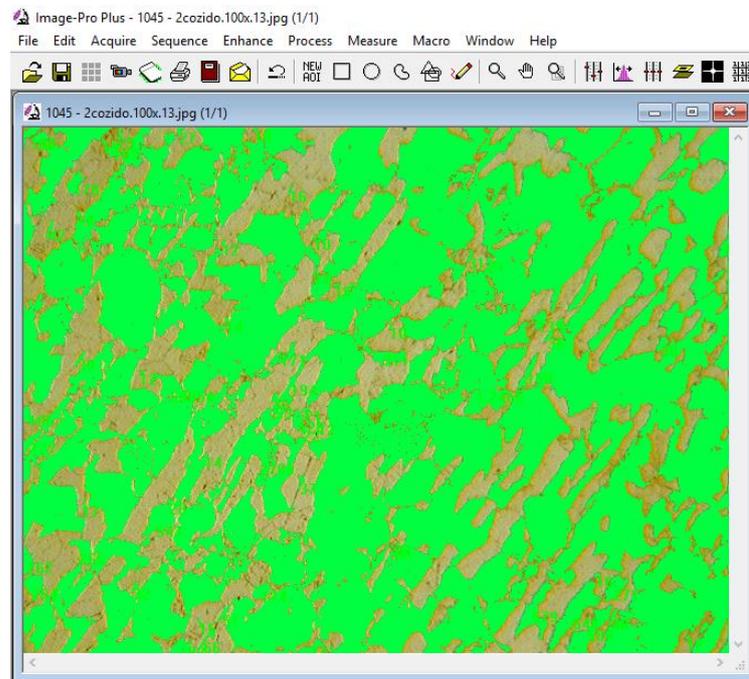
Fonte: próprio autor.

4.2.5 Porcentagem de fases

Para determinação da porcentagem de fases existentes nas amostras as imagens da microestrutura foram inseridas no software Image Pro Plus 6.0. Esse software realiza a conversão da imagem original em uma imagem com regiões coloridas, como pode ser observado pela figura 11. A coloração é feita por meio do ajuste manual de um histograma que relaciona os valores máximos e mínimos dos tons da imagem. Sendo assim, o usuário deve distinguir e definir o limiar das fases constituintes que deseja determinar para que, então, o

software contabilize a área selecionada de cada um dos constituintes: perlita e ferrita pró-eutetóide (LOMBARDO, 2010).

Figura 11 - Determinação da porcentagem de perlita



Fonte: próprio autor.

4.2.6 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers consiste aplicar uma carga pré-estabelecida, com penetrador piramidal de diamante, na superfície do corpo de prova. A dureza do material é obtida correlacionando, por meio da equação 4, a carga aplicada à área obtida na impressão.

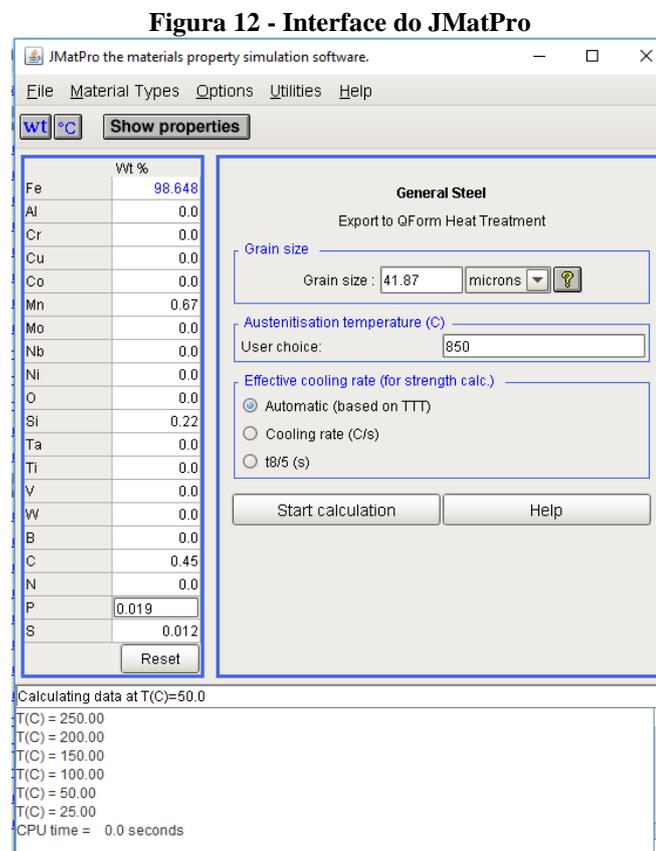
$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

Onde F é a carga aplicada em kgf e d é a média aritmética das duas diagonais em mm. A fim de verificar a condição inicial e pós-tratamento térmico das amostras de aço SAE 1045 adquiridas, mediu-se a dureza dos corpos de prova em durômetro Shimadzu HNV-2T E aplicando-se carga de 0,3 kgf e tempo de indentação igual a 15 segundos.

4.2.7 Simulação Numérica

A geometria desenvolvida no Solid Works e os arquivos provenientes do JMatPro foram utilizados como dados de entrada na simulação dos tratamentos térmicos no QForm. O computador responsável por realizar a simulação possui processador Intel® Core™ i7 4790 CPU @3.60GHz e memória de 8GB.

Para realizar a simulação, inicialmente, os dados sobre a composição química do material, temperatura do tratamento térmico e tamanho de grão foram inseridos no JMatPro, como mostrado na figura 12.



Fonte: próprio autor.

O JMatPro possui uma extensão específica para simulação de tratamento térmico no QForm. Sendo assim, a simulação realizada no JMatPro permitiu a obtenção de curvas de propriedades do aço SAE 1045, tais como: composição química, dureza, tensão limite de escoamento, além de propriedades de cada fase resultante do resfriamento no tratamento térmico: tensão de fluxo, densidade, condutividade térmica, expansão térmica, calor específico, módulo de elasticidade,

coeficiente de Poisson, dureza e resistência a tração. Para a elaboração desse trabalho, utilizou-se a curva TRC para análise do processo.

O arquivo gerado pelo JMatPro foi então importado, juntamente com a geometria da peça gerada no Solid Works em formato simétrico, para o software QForm módulos Heat Treatment com o intuito de estudar as transformações de fase ao longo do processo e prever a durezas após os tratamentos térmicos. A temperatura inicial, tempo do processo e o meio de resfriamentos foram os dados de entrada do QForm. Na tabela 2 são apresentados os parâmetros inseridos em cada um dos tratamentos térmicos.

Tabela 2 - Dados de Entrada QForm

Tratamento Térmico	Recozimento	Têmpera 1	Têmpera 2
Temperatura (°C)	850	850	850
Tempo (s)	72000	960	600
Meio	Ar	Óleo	Água
Temp. do Meio	t(0)=850°C; t(72000)=55°C	Padrão Qform: Klen Quench new agitation	Padrão Qform: Still Water
Coef. de transf. de calor (W/m²K)	30	Padrão Qform	Padrão Qform
Emissividade	0,6	0,7	0,7

Fonte: próprio autor.

Existem vários outros parâmetros, como: coeficiente de transferência de calor, emissividade térmica, taxa de resfriamento, que poderiam ser alterados no software para garantir maior fidelidade da simulação à prática. Entretanto, considerando o tempo desse estudo e os instrumentos disponíveis, esses parâmetros não foram determinados. Optou-se por utilizar os padrões sugeridos pelo software.

5 RESULTADOS e DISCUSSÃO

5.1 Composição Química

Na tabela 3 são apresentados os resultados da análise realizada por espectroscopia de emissão óptica em três amostras do aço SAE 1045, fornecido pela Açomec.

Tabela 3 -Análise de composição química do aço SAE 1045 por espectroscopia de emissão óptica.

Elemento/Amostra	1	2	3	Média
%C	0,484	0,485	0,482	0,484
%Si	0,176	0,177	0,177	0,177
%Mn	0,650	0,656	0,655	0,654
%P	0,0083	0,0090	0,0087	0,009
%S	0,0235	0,0266	0,0248	0,025
%Cr	0,0322	0,0308	0,0282	0,030
%Mo	0,0016	0,0017	0,0015	0,002
%Ni	0,0109	0,0100	0,0100	0,010
%Al	0,0022	0,0023	0,0022	0,002
%Co	0,0049	0,0049	0,005	0,005
%Cu	0,0099	0,0104	0,0101	0,010
%V	0,00041	0,00052	0,00046	0,000
%W	0,0019	0,00099	0,0014	0,001
%Fe	98,600	98,600	98,600	98,600

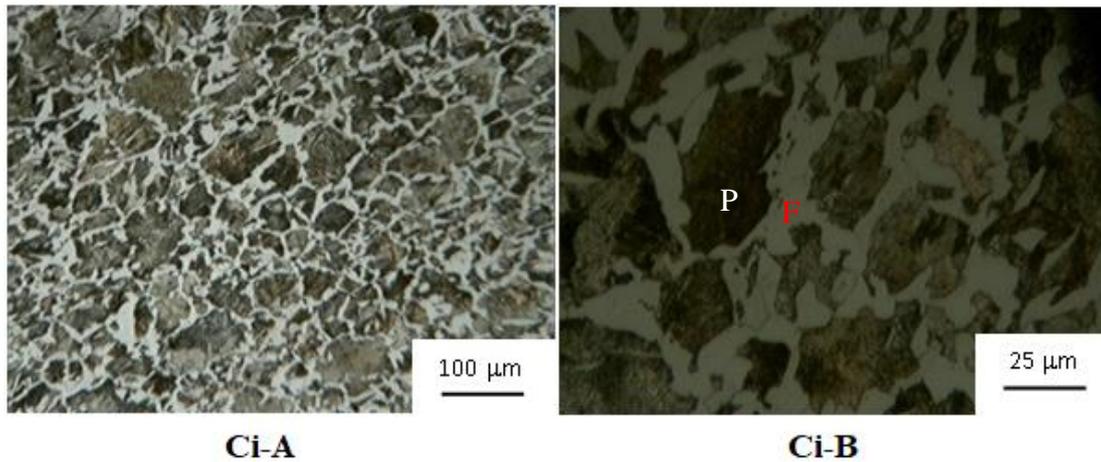
Fonte: próprio autor.

Como pôde ser observado comparando as tabelas 1 e 3, a análise química permite determinar mais precisamente a composição química do material. Elementos como Al, Cr, Ni etc, que não haviam sido detalhados no certificado fornecido pela Gerdau foram identificados. Comparando a média dos resultados da análise com os dados do fabricante do aço para os elementos comuns, percebe-se que a variação está na casa dos centésimos e ambos os documentos estão de acordo com a norma NBR NM 87.

5.2 Condição Inicial

Uma das amostras em sua condição inicial (Ci) foi observada no microscópio com o objetivo de verificar a microestrutura e o tamanho de grão do aço, esse dado também foi necessário para iniciar a simulação no software JMatPro. Na figura 13 são apresentadas as imagens obtidas com ampliações de 100X e 400X, Ci-A e Ci-B, respectivamente.

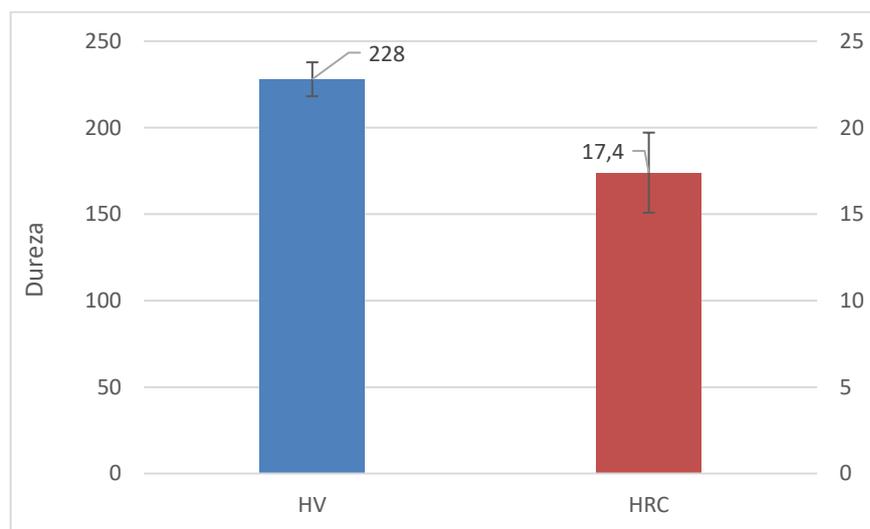
Figura 13 – Microestrutura do aço SAE 1045 em sua condição inicial



Fonte: próprio autor.

Comparando a figura 13 com as imagens obtidas nos trabalhos dos autores: Pereira (2018), Galvão (2011) e Colpaert (1974), pode-se dizer que o material em sua condição inicial tinha como constituintes a ferrita pró-eutetóide (regiões claras) e colônias de perlita (regiões escuras). A partir das imagens foram realizados os cálculos relativos ao diâmetro médio de grão das colônias de perlita como uma aproximação do tamanho de grão da austenita, o valor obtido para foi 41, 87µm. A amostra em questão também teve sua dureza determinada e apresentou como valores médios das medições 228 HV ou 17,4 HRC, como indicado na figura 14.

Figura 14 - Dureza inicial do aço SAE 1045



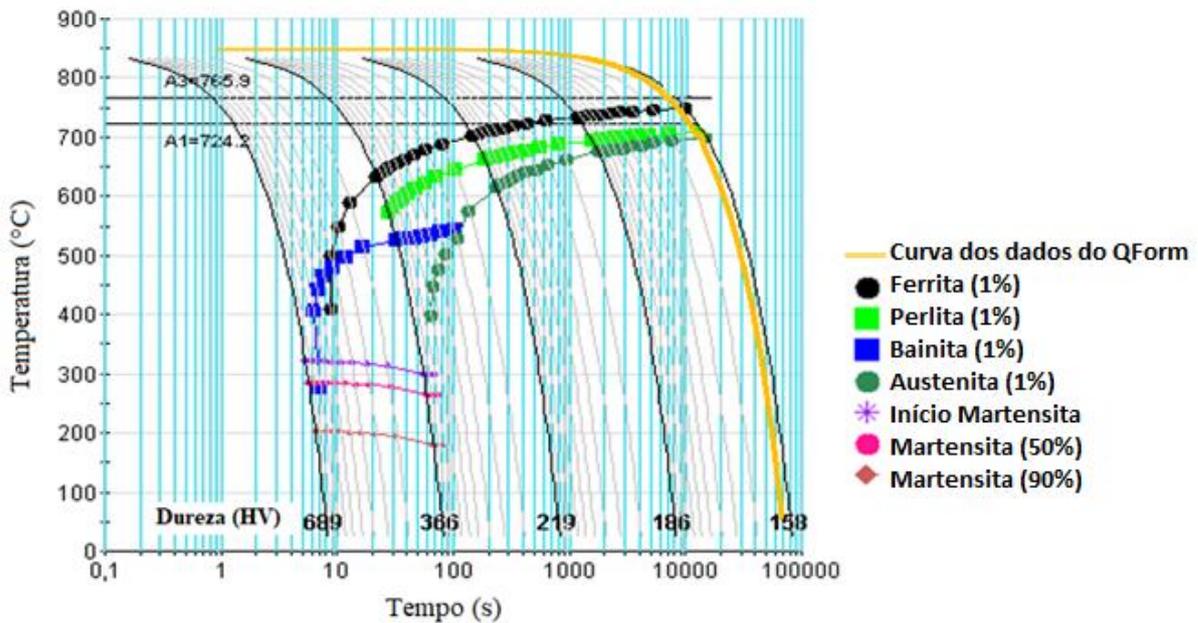
Fonte: próprio autor.

5.3 Recozimento

A simulação do tratamento térmico de recozimento foi iniciada após importar a geometria da peça em formato simétrico do software Solid Works, as curvas geradas no software JMatPro e inserir informações sobre a temperatura inicial e as condições de resfriamento para o software QForm. O software permite a obtenção de resultados a respeito da evolução microestrutural, distribuição de dureza, resistência máxima, alteração de volume, geração de calor, tempo característico e taxa de resfriamento instantâneo. Como o intuito desse trabalho é avaliar a microestrutura e dureza resultantes do tratamento térmico realizado em prática e por meio da simulação computacional somente esses resultados serão apresentados.

Feita a simulação, os dados de tempo e temperatura gerados pelo software QForm foram exportados para o excel e permitiram a elaboração do gráfico contendo a curva em amarelo. A figura 15 foi obtida pela sobreposição desse gráfico na imagem da curva TRC gerada pelo software JMatPro.

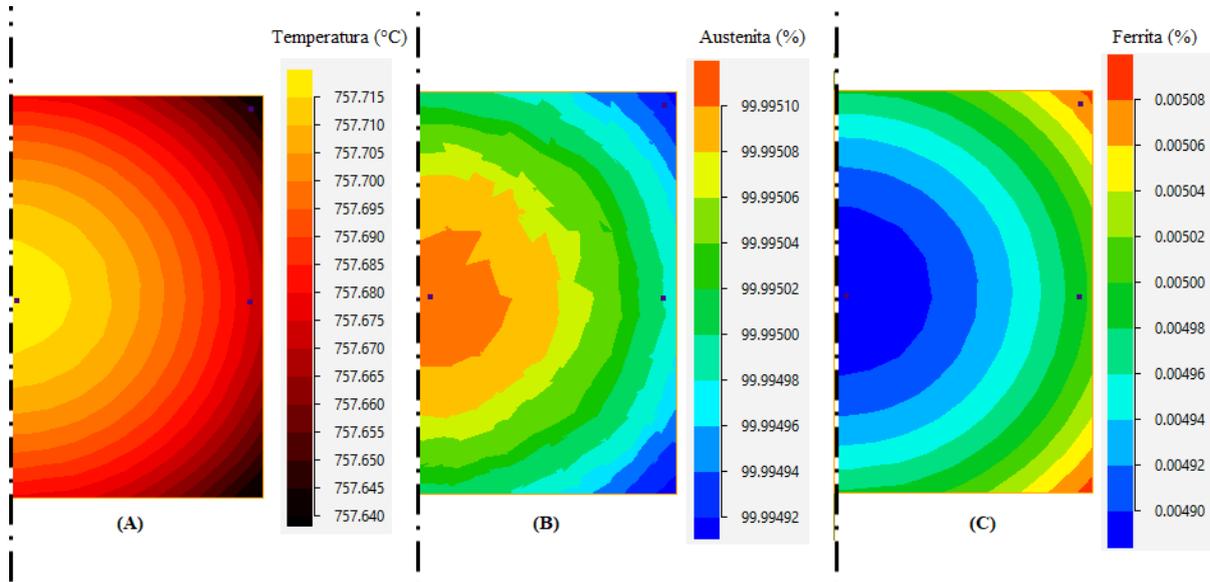
Figura 15 - Comportamento do Aço SAE 1045 durante recozimento



Fonte: próprio autor.

Como pode ser visto, a simulação do recozimento seguiu a taxa de resfriamento mais lenta entre as demais. De acordo com o resultado do JMatPro essa taxa corresponde ao valor de 0,01 °C/s e sob essas condições a austenita se transformou em perlita e ferrita. O QForm permitiu o acompanhamento do processo em termos de temperatura e porcentagem de fases existentes. A figura 16 ilustra um dos resultados do software para a temperatura de 758°C.

Figura 16 - Transformações no recozimento a 758°C



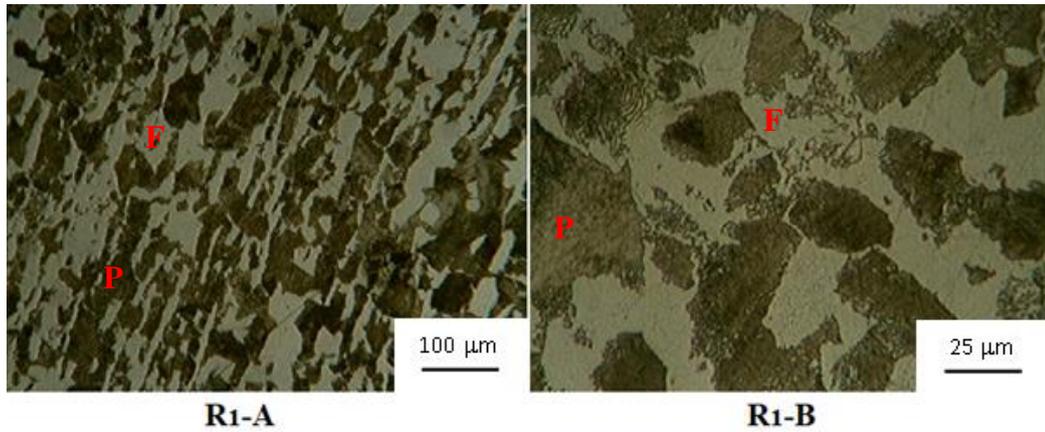
Fonte: próprio autor.

Observando a figura 16 (A) é possível notar que todo o corpo de prova está a mesma temperatura, isso porque o material foi submetido a uma baixa taxa de resfriamento. Também é possível perceber pelas figuras 16 (B) e (C) o início da transformação da fase austenita (99%) em ferrita (<1%) e que em toda a extensão do corpo de prova a proporção das fases é praticamente a mesma.

Ao final do processo, identificou-se a formação de 37,05% de ferrita, 62,95% de perlita e 0% de bainita, martensita e austenita e dureza igual a 158,2 HV. Conforme Colpaerte (2008) é esperado que um aço hipoeutetóide, como é o caso do aço SAE 1045, após total austenitização e resfriamento lento no forno, tenha toda a sua austenita transformada em ferrita e perlita. Sendo assim, os resultados da simulação se mostraram pertinentes.

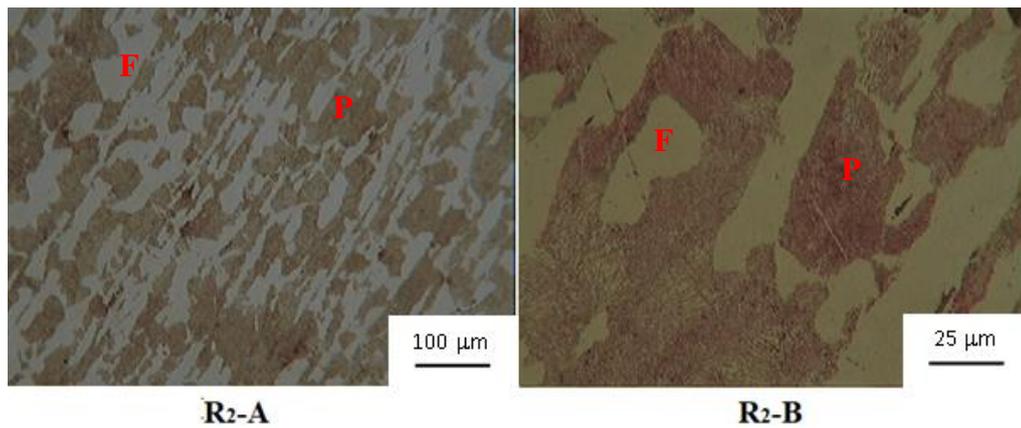
Com o intuito de comprovar os resultados obtidos via simulação realizou-se, na prática, a observação da microestrutura de três amostras submetidas ao tratamento térmico de recozimento. Nas figuras 17, 18 e 19 estão demonstrados os resultados práticos.

Figura 17 - Microestrutura da amostra R1 após recozimento com ampliações distintas.



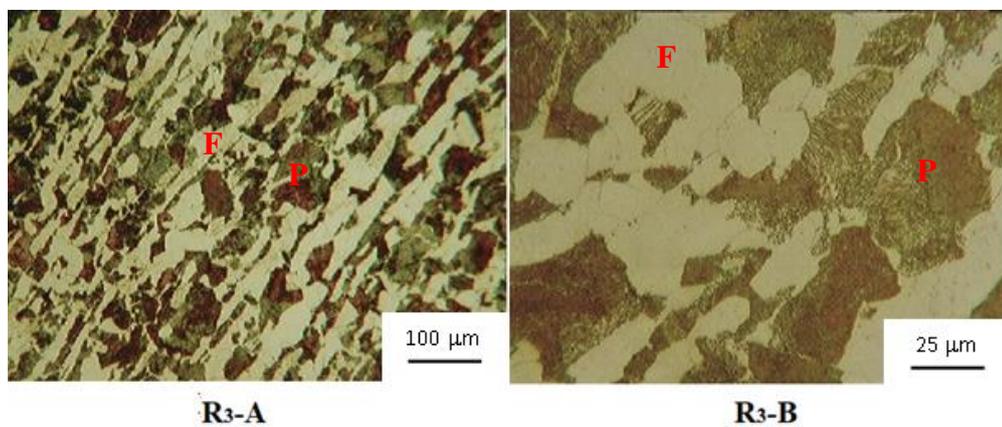
Fonte: próprio autor.

Figura 18 - Microestrutura da amostra R2 após recozimento com ampliações distintas.



Fonte: próprio autor.

Figura 19 - Microestrutura da amostra R3 após recozimento com ampliações distintas.



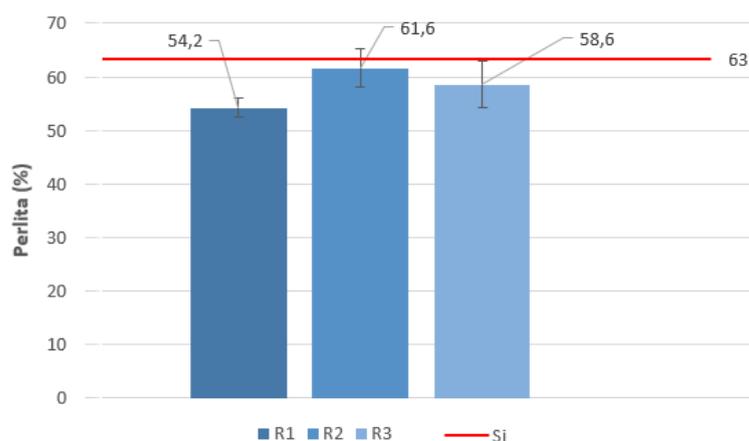
Fonte: próprio autor

Comparando as figuras 17 a 19 com as imagens obtidas nos trabalhos dos autores: Pereira (2018), Galvão (2011), Souza (2012) e Colpaert (2008) pode-se dizer que todas as amostras apresentaram as fases ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras) ao longo da sessão longitudinal.

Comparando o estado inicial com a condição após recozimento, percebe-se que os constituintes foram mantidos, porém houve um alongamento e crescimento da ferrita e das colônias de perlita. Evidenciando que o material passou pelos três estágios do processo: recuperação, recristalização e crescimento de grão (CHIAVERINI, 2003).

Para avaliar se as porcentagens das fases dos resultados da simulação condizem com os resultados práticos utilizou-se o software Image Pro Plus 6.0. Lombardo (2010) utilizou em seu trabalho um software semelhante ao Image Pro Plus 6.0, o Image J. Lombardo comenta que o processo de preparação de amostras para análise metalográfica é bastante sensível a variáveis como: temperatura de realização do ataque, proporção dos reagentes químicos utilizados, período de armazenagem dos reagentes químicos, o tempo de ataque, o modo como a amostra foi atacada. Por esse motivo, Lombardo utilizou na análise dos resultados, além do software Image J, o Método Magnético e a Difração de Raios X, a fim de conferir a confiabilidade do software. Assim, ele pôde comprovar que os resultados obtidos foram próximos e a utilização do software mostrou-se viável. A figura 20 apresenta o resultado das medições realizadas no Image Pro Plus 6.0 quanto ao percentual de perlita.

Figura 20 - Porcentagem de Perlita após recozimento



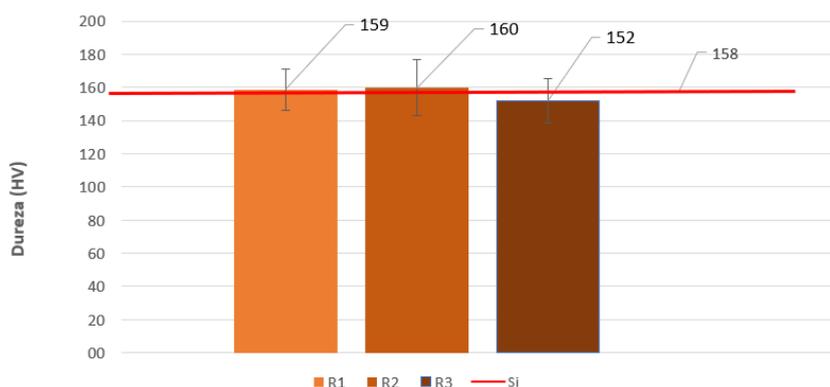
Fonte: próprio autor.

Como pode ser observado na figura 20, os corpos de prova R1, R2 e R3 continham 54,2%, 61,6% e 58,6% de perlita, respectivamente. Pela observação das fotomicrografias, esse resultado se mostrou coerente, visto que em todas as amostras a proporção entre ferrita e perlita pareceu equivalente. Comparando o resultado obtido na simulação 63% de perlita (reta Si) com o resultado médio das três amostras 58%, houve um erro de aproximadamente 8,6%.

Para avaliar se essa diferença é significativa ou não é importante considerar que as condições do processo prático não foram completamente controladas e definidas na simulação. Alguns parâmetros do processo foram ajustados pelo padrão do software e, por esse motivo, os cálculos realizados não foram tão fiéis a realidade. Além disso, existe um erro associado as medições das fases pelo Image Pro Plus 6.0, que considera o contraste de cores definido pelo usuário. Considerando esses fatores, pode-se dizer que a simulação foi capaz de prever de forma satisfatória os resultados práticos relativos à microestrutura.

Com relação a dureza das amostras, era esperado que essa fosse próxima a de seus constituintes, levando em consideração suas proporções. De acordo com os dados do fornecedor os constituintes ferrita e perlita apresentam durezas de 90 e 230 HV, respectivamente (GERDAU, 2019). Os resultados práticos da medição da dureza das amostras recozidas foram apresentados na figura 21.

Figura 21 - Dureza do Aço SAE 1045 pós-recozimento



Fonte: próprio autor.

Como pode ser observado, as três amostras apresentaram durezas médias parecidas, valores de 159, 159,9 e 152 HV, para R1, R2 e R3, respectivamente. Considerando o desvio padrão, pode-se dizer que as durezas foram iguais.

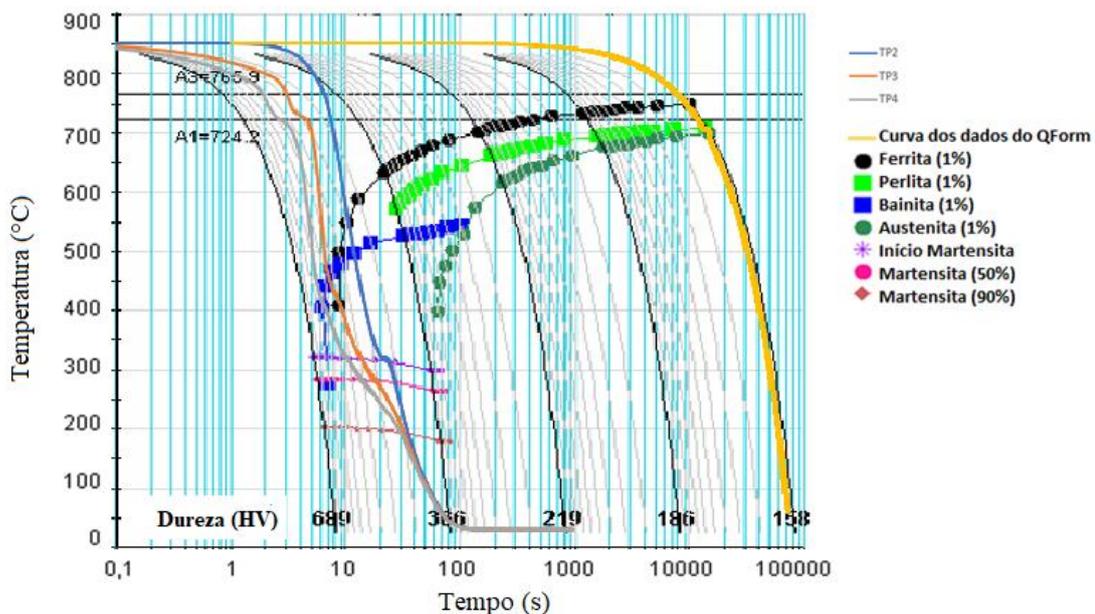
Bezerra (2006) encontrou o valor de 154,4 HV após a realização do recozimento à 850°C e 4 horas dentro do forno. Segundo Gerdau (2003) aços SAE 1045 apresentam dureza máxima equivalente a 180 HB após recozimento. Esse valor corresponde a 188 HV, conforme tabela de conversão de dureza. A simulação computacional, por sua vez, previu como dureza o valor de 158 HV (reta Si). Então, comparando os resultados práticos, da literatura e do software, conclui-se que a simulação também gerou resultados coerentes para dureza após o recozimento. Obteve-se erro menor de 1% comparando o valor médio geral prático com o valor obtido via simulação.

Comparando os tempos de simulação e prática, foram necessários 3h 35min 37s para rodar a simulação, enquanto na prática foram necessárias 21h para realização do recozimento. De modo geral, apesar da simulação não substituir completamente a prática, ela se mostrou uma boa ferramenta para obtenção de resultados práticos mais assertivos e uma solução que garante a economia de tempo, material, energia.

5.4 Têmpera

Analogamente à simulação do recozimento foram inseridos no software as condições de contorno do processo de têmpera. O QForm gerou informações de temperatura e tempo que permitiram a elaboração de um gráfico. Esse foi sobreposto a curva TRC gerada pelo software JMatPro e está apresentado na figura 22.

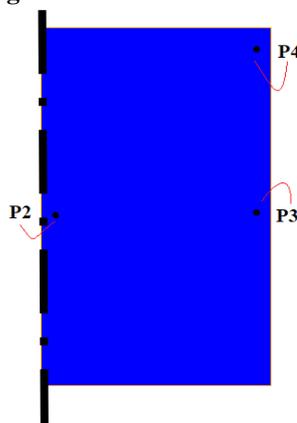
Figura 22 – Comportamento do Aço SAE 1045 durante a têmpera



Fonte: próprio autor.

A fim de estudar o resfriamento em regiões distintas da peça, três pontos foram criados: P2, P3 e P4, como mostrado na figura 23.

Figura 23 - Pontos de controle



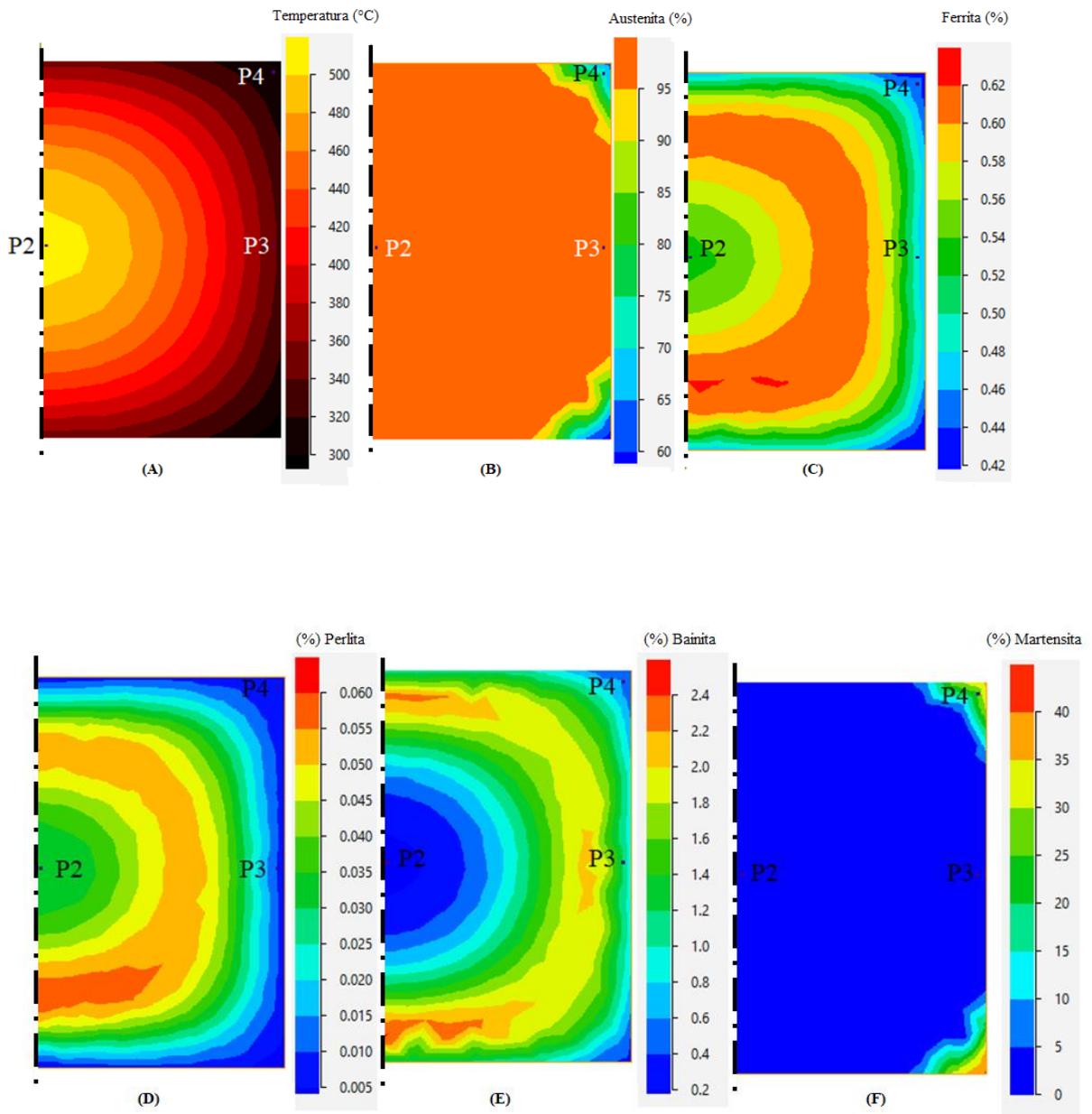
Fonte: próprio autor.

O QForm fez os cálculos exclusivamente para esses pontos e possibilitou a elaboração das curvas TP2, TP3 e TP4 mostradas na figura 23.

O ponto P4, localizado na extremidade superior externa da peça apresentou o resfriamento mais brusco entre os demais pontos e por esse motivo, a transformação da austenita em bainita e martensita aconteceu em um tempo menor. Já o ponto P2, localizado no centro da peça, apresentou o resfriamento mais lento e alcançou as curvas relativas à transformação da austenita em ferrita, bainita e martensita em tempos maiores.

Analisando a figura 24 (A) gerada pelo QForm, percebe-se que há um gradiente de temperatura ao longo da extensão da peça e por esse motivo observa-se uma variação na porcentagem dos constituintes em regiões distintas. No centro da peça, ponto P2, predomina a fase austenita, com mostrado na figura 24 (B). Os constituintes perlita, ferrita, bainita começam a se formar em quantidades muito reduzidas, em torno de 1%, como mostrado em (C), (D) e (E). Também é possível notar, por meio da figura 24 (E), que há quantidade considerável de martensita nas extremidades da peça, ponto P4.

Figura 24 – Transformações da têmpera em óleo ao longo da peça



Fonte: próprio autor.

Ao final do processo identificou-se a total transformação da austenita em 11% de ferrita; 68,2% de bainita; 3,49% de perlita e 17,31% de martensita.

Ramos (2016) estudou o processo de têmpera de aços carbono em diferentes óleos: girassol, mineral e soja. Ele identificou que a formação microestrutural predominante resultante da têmpera, foi a perlita e em alguns casos a martensita. O autor explica que os constituintes formados foram esses, pois à temperatura de austenitização não foi muito elevada (850°C) e o

aço 1045 não contém elementos de liga suficientes para promover endurecimento considerável e predominante formação martensítica. Com a intenção de verificar os resultados da simulação na prática realizou-se a micrografia das amostras temperadas (figuras 25 a 26)

Figura 25 - Microestrutura da amostra T1 após tempera em óleo com ampliações distintas.

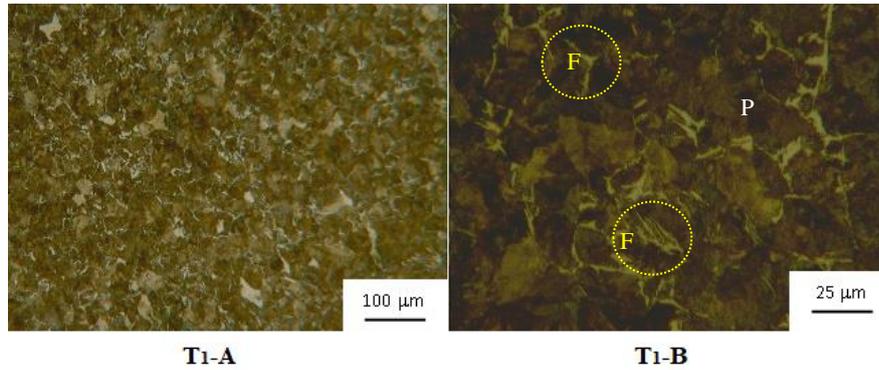


Figura 26 - Microestrutura da amostra T2 após tempera em óleo com ampliações distintas.

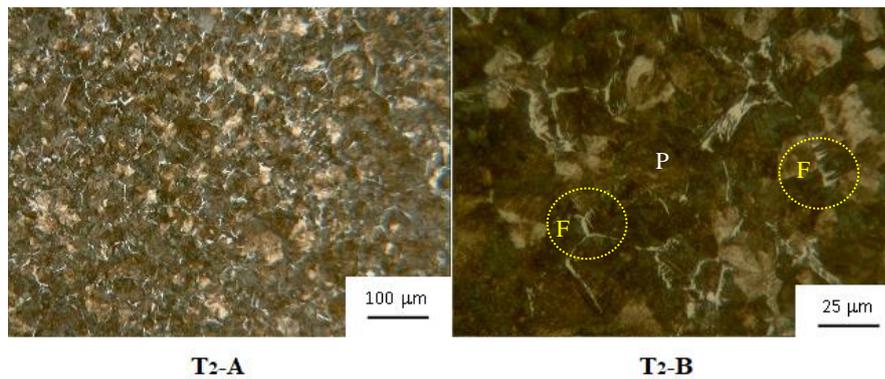
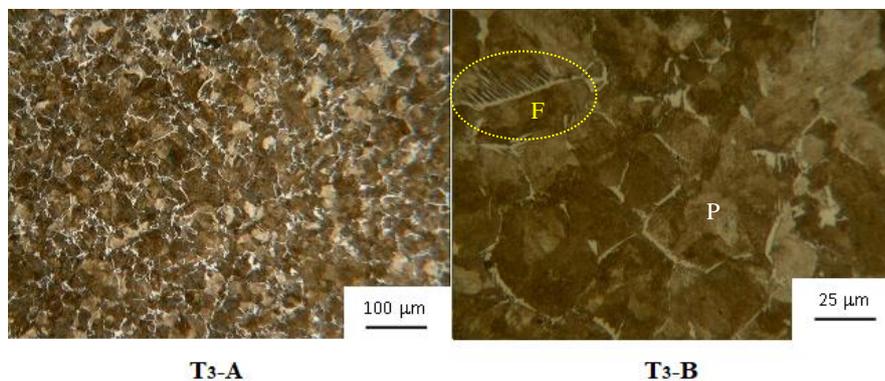


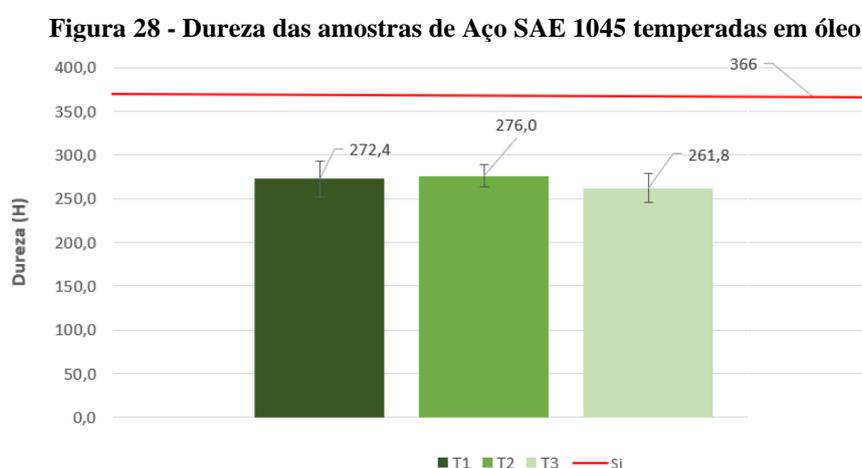
Figura 27 - Microestrutura da amostra T3 após tempera em óleo com ampliações distintas.



Fonte: próprio autor.

Comparando as fotomicrografias apresentadas como os resultados obtidos por Ramos (2016) pôde-se identificar os constituintes: ferrita pró-eutetóide, ferrita de Widmanstätten (regiões claras semelhantes a destacada com círculo), perlita (regiões em marrom). Devido à dificuldade de se determinar com exatidão a localização de cada constituinte e o pouco contraste entre as cores na imagem, a análise das proporções das fases se tornou inviável no software Image Pro Plus 6.0, e por isso não foi realizada. Por consequência, a ausência desse resultado impediu a comparação do resultado prático com a simulação.

A dureza das amostras T1, T2 e T3, temperadas em óleo também foi determinada e apresentada na figura 28.



Fonte: próprio autor.

Não houve grande divergência entre os resultados de dureza das três amostras, que apresentaram como valor médio 272,4; 276,0 e 261,8 HV para T1, T2 e T3, respectivamente. Segundo resultados obtidos por Ramos, 2016, após a têmpera em óleo mineral os valores de dureza entre 270 a 320 HV foram alcançados. Esses resultados demonstram que a prática realizada está em conformidade com os resultados desse autor (RAMOS, 2016).

Como apresentado na figura 22, a dureza prevista pelo software para as amostras temperadas em óleo foi de 366 HV. Comparando esse valor como o resultado médio geral obtido em prática (270 HV) o erro de 36% foi encontrado.

Como objetivo de atingir a estrutura martensítica, realizou-se novamente a têmpera, desta vez usando como meio de resfriamento a água. Para esse estudo, cada amostra foi cortada em duas

partes: lateral e base, para possibilitar a análise do corpo de prova como um todo. Nas figuras 29 a 34 são apresentados os resultados das fotomicrografias das amostras.

Figura 29 - Microestrutura da base da amostra Tb1 após têmpera em água, com ampliações distintas.

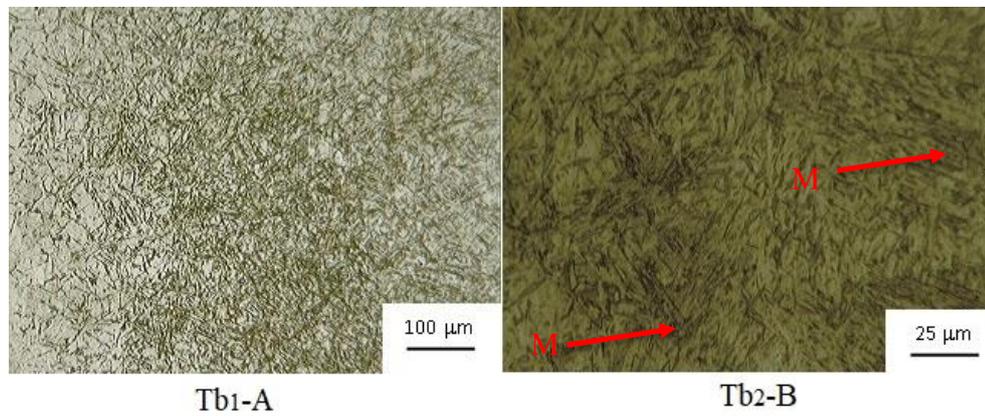


Figura 30 - Microestrutura da base da amostra Tb2 após têmpera em água, com ampliações distintas.

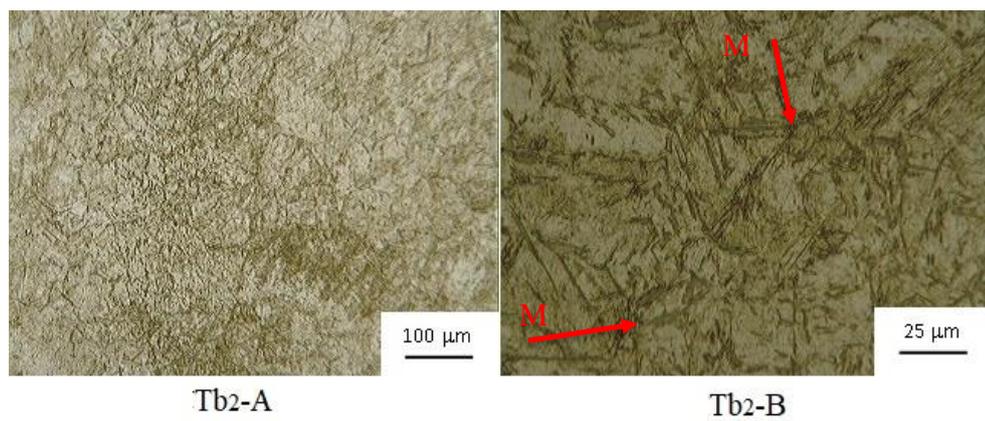
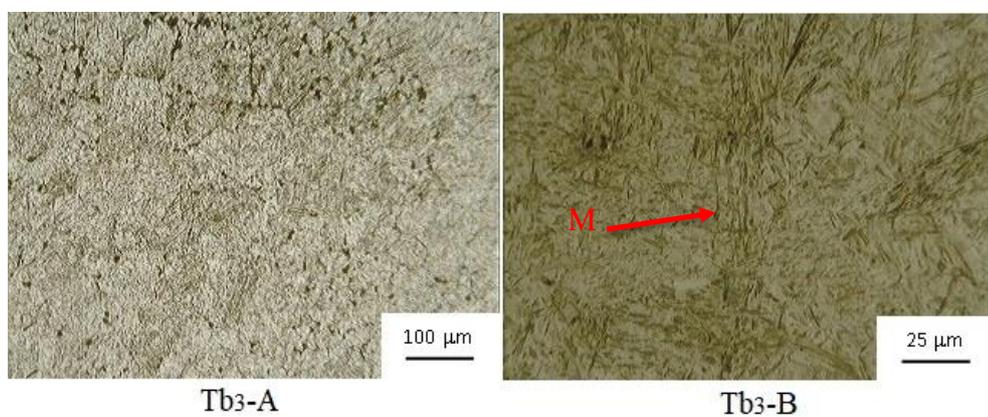


Figura 31 - Microestrutura da base da amostra Tb3 após têmpera em água, com ampliações distintas.



Fonte: próprio autor.

Figura 32 - Microestrutura da lateral da amostra Tt1 após têmpera em água, com ampliações distintas.

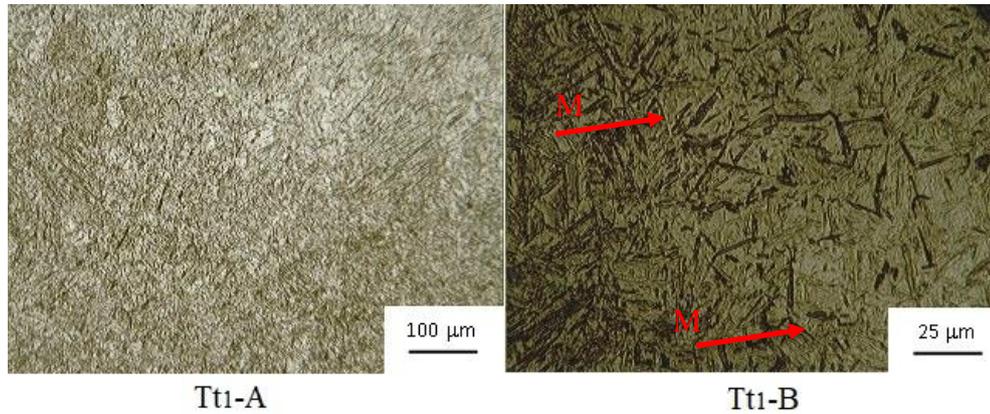


Figura 33 - Microestrutura da lateral da amostra Tt2 após têmpera em água, com ampliações distintas.

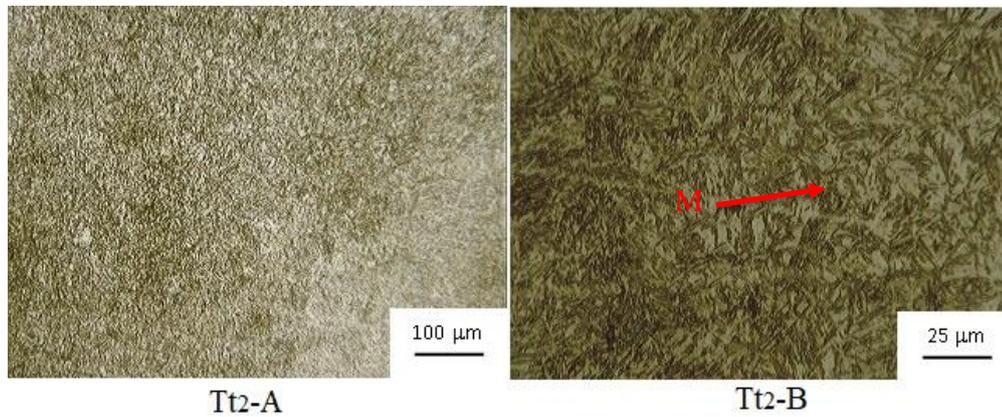
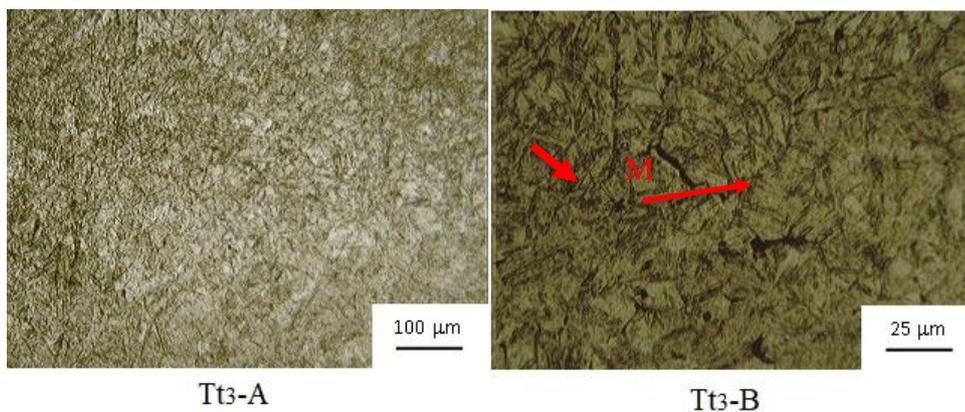


Figura 34 - Microestrutura da lateral da amostra Tt3 após têmpera em água, com ampliações distintas.



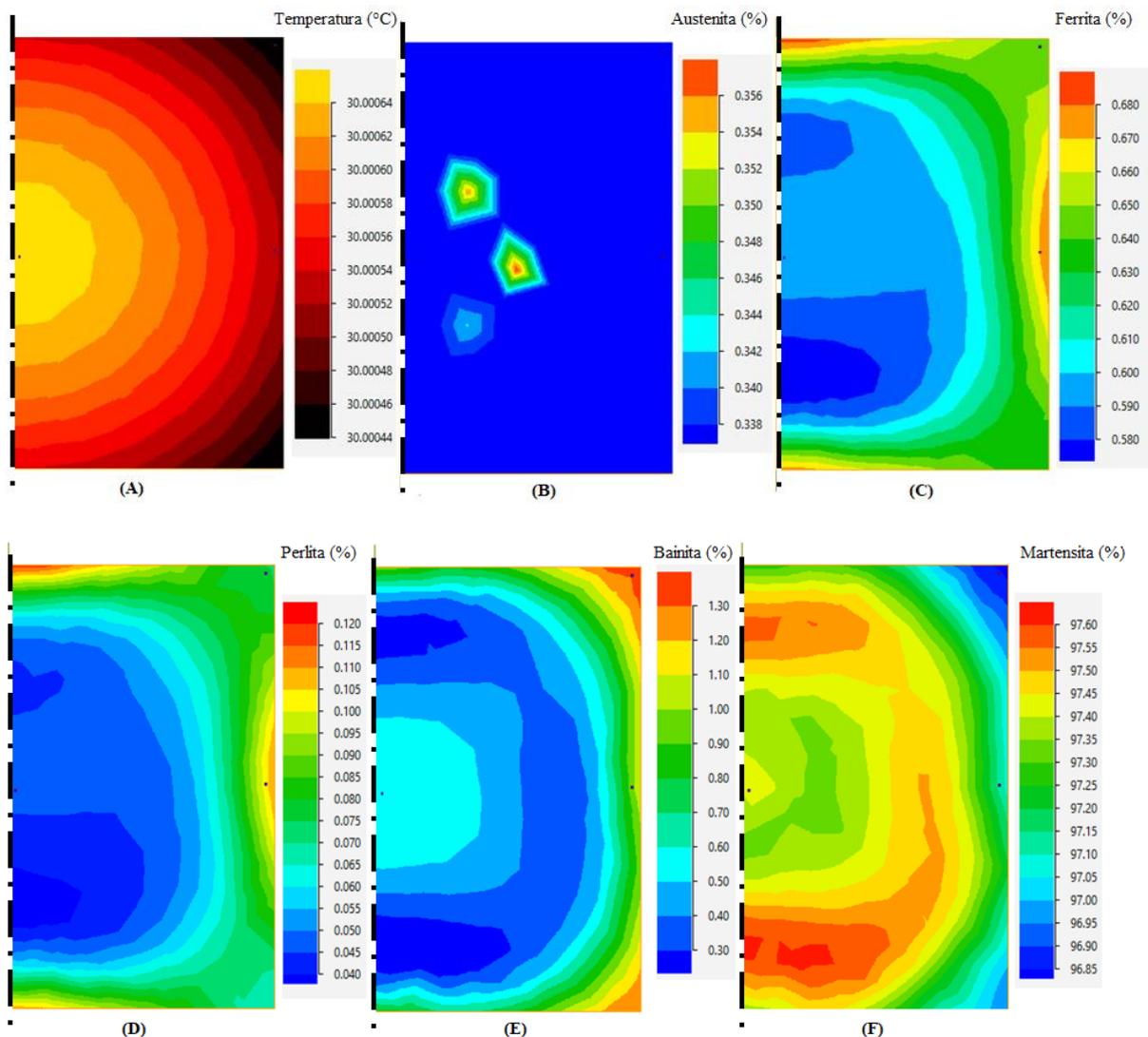
Fonte: próprio autor.

Comparando as fotomicrografias obtidas com resultados dos autores: Stein (2005), Souza (2012) e Colpaert (2008) pode-se dizer que a têmpera realizada em água possibilitou a formação

de martensita (regiões indicadas pelas setas) em toda extensão do corpo de prova (base e lateral). A análise quantitativa da porcentagem de martensita formada em cada amostra não pode ser determinada por meio do software Image Pro Plus 6.0, pois o contraste das cores inviabiliza a obtenção de resultados precisos e coerentes.

A simulação computacional também foi feita, alterando-se o meio de resfriamento para água e tempo de processo. A figura 35 mostra a quantidade de cada constituinte formado após resfriamento até a temperatura de 30°C.

Figura 35 – Constituintes presentes à 30°C após têmpera em água



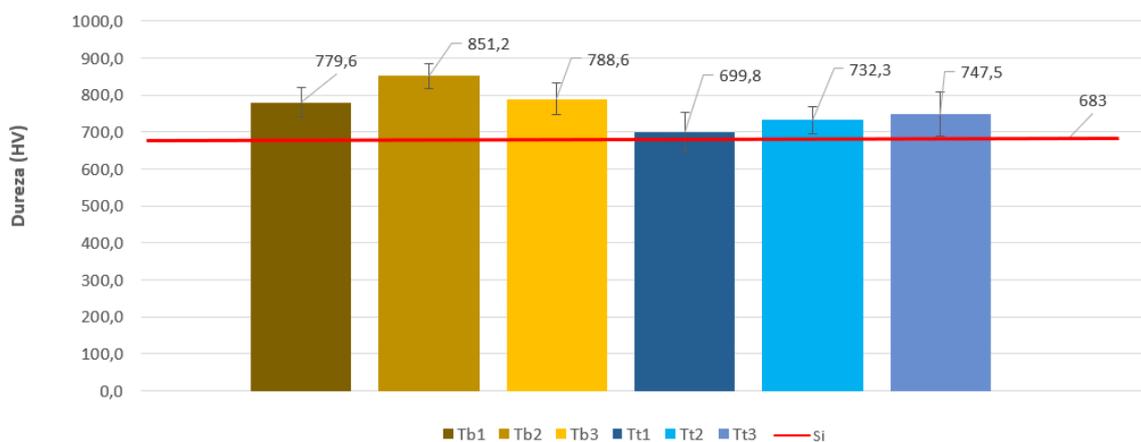
Fonte: próprio autor.

O software QForm indicou que praticamente toda a austenita da amostra se transformou em aproximadamente 97% de martensita, 1% de bainita e menos de 1% das fases austenita e ferrita

e do constituinte perlita no corpo de prova. A análise visual por meio das fotomicrografias não garante a total ausência das fases bainita e perlita. Para comprovar se realmente foram formadas essas fases e constituintes, ainda que em quantidade insignificante, seria necessário o uso de técnicas mais precisas para identificação, a difração de raios X é um exemplo. É importante, também, levar em consideração que a têmpera é um processo complexo que envolve muitas variáveis práticas que não foram determinadas. Para iniciar a simulação foram utilizados muitos parâmetros disponibilizados pelo próprio software e, provavelmente, tais informações não representavam a prática de modo fidedigno. Considerando todos esses fatores, pode-se dizer que os resultados obtidos com a simulação são coerentes.

Em relação a dureza, para a simulação encontrou-se o valor de 683HV. Na prática encontrou-se os valores apresentados na figura 36.

Figura 36 - Dureza das amostras após têmpera em água



Fonte: próprio autor

Analisando a figura 36 percebe-se que, de uma forma geral, as amostras apresentaram valores elevados de dureza. Essa propriedade evidencia a predominante formação do constituinte martensita ao longo a extensão do corpo de prova. A indentação, realizada de forma aleatória no corpo de prova, certamente atingiu regiões que possuíam algum constituinte de menor dureza, ferrita por exemplo, e por isso houve variação no valor de dureza de uma amostra para outra.

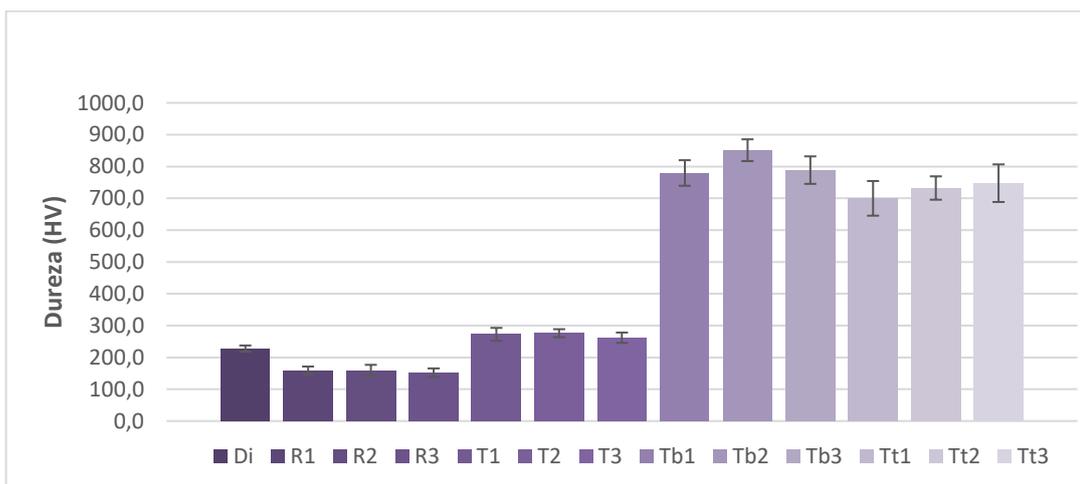
Fernandes, 2018, realizou um estudo comparativo da influência de diferentes meios de resfriamento: água e óleo na dureza do aço SAE 1045. Fernandes encontrou valores médios de 41,20 HRC e 47,90 HRC, para as amostras temperadas em óleo e água, respectivamente.

Segundo a tabela de conversão de durezas esses valores correspondem a 402 e 484, HV respectivamente. A diferença entre os resultados práticos desse trabalho e os resultados obtidos por Fernandes (2018) pode ser justificado pela taxa de resfriamento. Possivelmente, Fernandes resfriou sua amostra de forma mais lenta e isso pode ter influenciado no valor de dureza inferior a 700 HV.

Comparando o resultado médio de dureza as amostras temperadas em água, 766 HV, com o resultado da simulação, 683 HV, houve um erro de aproximadamente 11%. Considerando as condições do ensaio pode-se dizer que o software previu de forma eficiente o resultado de microestrutura e dureza do tratamento térmico de têmpera em água. Comparando os tempos de simulação e prática, foram necessários 5min para rodar a simulação, enquanto na prática foram necessárias aproximadamente 10 min, desconsiderando o tempo de aquecimento do forno, para realização da têmpera em água. Sendo assim, a simulação da têmpera também proporcionou economia de tempo, matéria-prima e trabalho.

Após as análises individuais de cada tratamento térmico foi elaborado o gráfico apresentado na figura 37 para melhor compreensão de todos os resultados de dureza obtidos.

Figura 37 - Dureza das amostras em sua condição inicial e após tratamentos térmicos de recozimento, têmpera em óleo e água.



Fonte: próprio autor

Como pode ser observado, a dureza inicial do aço era aproximadamente 228 HV e foi reduzida para aproximadamente 158 HV após o recozimento, demonstrando a eficiência do processo. Já o aço temperado em óleo teve sua dureza alterada para o valor aproximado de 270HV, isso

significa que o tratamento térmico elevou a dureza do aço, contudo não foi possível alcançar a dureza máxima esperada (valores superiores a 700 HV).

A hipótese para essa divergência entre a dureza alcançada e a esperada é o meio de resfriamento. Assim, realizou-se a têmpera em água para confirmar tal hipótese e obteve-se para essa condição valores de dureza superiores a 700 HV. Desse modo, foi possível perceber que a alteração do meio de resfriamento de óleo para água possibilitou grande ganho em termos de aumento de dureza, pois a taxa de resfriamento é maior para a água.

A simulação se mostrou uma ferramenta muito útil que pode ser utilizada na previsão de resultados práticos, mas vale ressaltar, que embora seja aparentemente simples inserir dados no software e iniciar uma simulação, gerar resultados compatíveis com a realidade e atingir os objetivos desejados não é trivial. Ter o domínio das etapas do processo que se deseja simular e parâmetros bem definidos são os primeiros passos para obtenção de resultados satisfatórios. A falta de informações precisas a respeito da matéria prima, das operações práticas e das variáveis de processo dificultam a elaboração da simulação, assim como inviabilizam a confiabilidade dos resultados.

Além disso, é importante, em muitos casos, calibrar o software para só então elaborar novos processos e analisá-los de maneira confiável. E ainda que seja necessário realizar várias simulações, o tempo e custo são menores do que refazer resultados práticos, que envolvem desperdício de material, energia, diminuição de produtividade e, conseqüentemente, lucro (SILVA, 2015).

6 CONCLUSÕES

A comparação dos resultados obtidos experimentalmente e via simulação computacional mostrou que os softwares JMatPro e QForm foram eficientes na previsão dos resultados de dureza e microestrutura relacionados ao tratamento térmico de recozimento, mas não tão assertivo nos resultados de microestrutura do tratamento térmico de têmpera em água. Isso porque a têmpera é um processo complexo que envolve muitas variáveis práticas que não foram determinadas.

Para validar ou não os resultados da microestrutura obtidos via simulação computacional, seria necessária a realização do procedimento experimental novamente de forma mais controlada para determinação das variáveis do processo que foram utilizadas como padrão. Além disso, seria necessária a realização da análise por Difração de Raios X para garantir a quantificação exata das fases presentes após a têmpera.

Também foi possível entender que a simulação computacional possibilita a previsão de tendências que devem ser analisadas por um profissional da área. Nessas condições é possível economizar tempo, material, energia, trabalho e retrabalho durante o processo, fatores que justificam a utilização dessa ferramenta.

REFERÊNCIAS

AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA. Disponível em:
<http://www.favorit.com.br/sites/default/files/tabelas/acos_para_construcao_mecanica.html>.

Acesso em 25 de ago. de 2019.

BEZERRA, D. C.; MACHADO, I. F. Estudo da usinabilidade de aço AISI 1045 após diferentes tratamentos térmicos. **Anais**. São Paulo: EPUSP, 2006.

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

CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas metálicas**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. 240p.

COELHO; E.; PIRES; I. Z. R.; SILVA; I.P.P.; OSTHUES; R. M.; FREITAS; W. F. **Tratamentos térmicos dos aços: guias de aulas teóricas e práticas**. Belo Horizonte: CEFET/MG; 2011. 46 p. (Apostila).

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008. p. 121-314.

FERNANDES, K. C.; JÚNIOR, E. V. C. S.; SOUZA, V. B. Estudo sobre a influência dos diferentes meios resfriadores com a dureza resultante para o aço SAE 1045. **Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico**. v. 4, n. 2, p. 112-276, jul/dez. 2018.

FONSECA, J. **Ferramentas de simulação em mecânica: elementos finitos**. Apostila do curso de Graduação e Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, Santa Catarina, 2002.

FREITAS, P. S. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática**. 1. ed. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.

GALVÃO, A. O.; VALCACER, S. M.; ANDRADE, S. S. L. FELIPE, R. C. T. S.; MACHADO, T. G. Análise do tratamento térmico de recozimento aplicado ao aço SAE 1045. Artito (Graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GERDAU. **Tratamento térmico**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4889840/mod_resource/content/3/Aula%20-%20Tratamentos%20T%C3%A9rmicos.pdf>. Acesso em 07 nov. 2019.

GERDAU. **Manual de aços**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_aços_gerdau.pdf>. Acesso em 07 nov. 2019.

GGD METALS. Guia Prático: aços e metais. Disponível em: <<https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2019/04/GuiaGGDMetals-Constru%C3%A7%C3%A3o-Mec%C3%A2nica.pdf>>. Acesso em 10. nov. 2019.

GORNI, A. A. O tratamento térmico na siderurgia. **Industrial Heating**, Campinas, [s.v.], n. 44. jun. 2019. Disponível em: <<https://www.industrialheating.com/articles/95124-o-tratamento-t%C3%A9rmico-na-siderurgia>>. Acesso em 27 out. 2019.

JMATPRO. **JMatPro practical software for materials properties**, 2019. Disponível em: <<https://www.sentessoftware.co.uk/jmatpro>>. Acesso em: 07 de set. 2019.

LOMBARDO, S.; COSTA, F. H.; HASHIMOTO, T. M.; PEREIRA, M. S.; ABDALLA, A. J. Método para o cálculo da fração volumétrica de austenita retida através do software de análise digital de imagens. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 19, 2010, Campos do Jordão. **Anais**. Campos do Jordão: CBECiMat, 2010. p. 4969-4975.

LOBENWEIN, R. Derrubando barreiras na simulação do TT. **Industrial Heating**, Campinas, out/dez. 2016. Disponível em: <http://www.sixpro.pro/wp-content/uploads/2017/01/Coluna-Simula%C3%A7%C3%A3o-Computacional_V01.pdf>. Acesso em 23 nov. 2019.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; JÚNIOR, J. L. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Dental Press Ortodon Facial**, Maringá, v. 11, n. 2. p. 35–43, mar/abr. 2006.

MACEDO, M. C.; GOMES, I. R. B.; SOUZA, L. G. M. Caracterização de Amostras Por Microscopia Óptica e por Microdureza de Materiais Metálicos Ferroso e Não Ferroso. **Scientia Tec: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS**, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 48–61, jul/dez. 2015.

MACHADO, I. F. **Tratamentos térmicos e de superfície**. Apostila (Graduação) – Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MACKERLE, J. Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes: A bibliography (1976-2001). **Computational Materials Science**, v. 27, n. 3, p. 313–332, 2003.

MCHANEY, R. **Understanding Computer Simulation**. 2009. [E-Book].

PEREIRA, G.; OLIVEIRA, C.; GARCIA, N.; ONASSIS, P.; AMARANTE, M. S. Análise metalográfica de aço 1045 normalizado e recozido. **Pesquisa e Ação**, v. 4, n. 1, p. 261-265, mai. 2018.

RAMOS, P. A.; RESENDE, L. P.; FARIA, D. A.; BRITO, P. P. Estudo do processo de têmpera de aço-carbono em óleos vegetais puros com diferentes temperaturas de banho. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2016, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: ABCM, 2016.

ROHDE, R. A. **Metalografia Preparação de Amostras: uma abordagem prática**. Apostila do Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais, Santo Ângelo, 2010.

SIDEL, S. M.; IDALGO, E.; SANTOS, F.; YUKIMITU, K.; MORAES, J. C. S. Expoente de Avrami pela equação de Jmak para método não-isotérmico de análise térmica. **Journal of Experimental Techniques and Instrumentation**, v. 1, n. 2, p. 1–14, 2018.

SILVA, A. D.; VIANA, R. A. M. Implementação da simulação. **Industrial Heating**, Campinas, out/dez. 2015. Disponível em: < http://www.sixpro.pro/wp-content/uploads/2017/01/Coluna_2015OutDez.pdf>. Acesso em 23 nov. 2019.

SILVA, A. D.; VIANA, R. A. **Tópicos para simulação em estampagem**. 2. ed. Belo Horizonte: Sixpro, 2018. 143p.

SILVA, A. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 637p.

SMITH, W. F.; HASHEIMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2010. 663p.

SMOLJAN, B. Prediction of mechanical properties and microstructure distribution of quenched and tempered steel shaft. **Journal of Materials Processing Technology**, Croácia, v. 175, n. 1–3, p. 393–397, 2006.

SMOLJAN, B.; ILJKIĆ, D.; HANZA, S. S. Computer simulation of working stress of heat treated steel specimen. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Coácia, v. 34, n. 2, p. 152–156, jun. 2009.

SOUZA, A. G. **Estudo do efeito do processamento termomecânico nas propriedades mecânicas do aço SAE 1045**. 2012. 188 f. Monografia (Graduação) – Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SCHAEFFER, L. BRITO, A. M. G. GEIER. M. Numerical simulation using finite elements to develop and optimize forging process. **Steel Research International**. Rio Grande do Sul, v. 76, n. 2-3, p. 199-204, 2005.

SOFTWARE. **QForm3D**, 2019. Disponível em: <<https://www.qform3d.com/software>>. Acesso em: 10 de ago. 2019.

SOLIDWORKS 2019. **Solid Works, 2019**. Disponível em: <<https://www.solidworks.com/pt-br>>. Acesso em 13 de set. 2019.

STEIN, C.R.; HERMENEGILDO, T. F.; ARAÚJO, F. G. S. Efeito da rápida austenitização sobre as propriedades mecânicas de um aço SAE 1045. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 58, n. 1, p. 51-56, jan/mar. 2005.

TRINDADE, D. R.; SANTOS, P. H. Q.; RODRIGUES, R. F. N.; DIAS, M. J.; FARIA, E. C. M.; CASTRO, A. N. Estudo e Avaliação do Tempo de Permanência a Temperatura no Tratamento Térmico de Têmpera do Aço Sae 1045. **Processos Químicos**, v. 11, n. 21, p. 67–76, jan/jun de 2017.

TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZA. Disponível em: <<http://metalurgicavera.com.br/produtos/TABELA-DE-CONVERSAO-DE-DUREZAS.php>>. Acesso em 28 de set. de 2019.

VALE, A. R. M. **Tratamento Térmico**. Apostila do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará. Belém, 2011.